

分类号

U D C

密级

编号

10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

论文题目 黄河流域甘肃段生态系统服务价值评估与
影响因素分析

研究生姓名: 廖星凯

指导教师姓名、职称: 许静 教授

学科、专业名称: 理论经济学 人口、资源与环境经济学

研究方向: 生态经济与可持续发展

提交日期: 2024年6月5日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 廖星凯 签字日期： 2024年6月5日

导师签名： 许静 签字日期： 2024年6月5日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定，同意（选择“同意”/“不同意”）以下事项：

1.学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；

2.学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”用于出版和编入CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 廖星凯 签字日期： 2024年6月5日

导师签名： 许静 签字日期： 2024年6月5日

Evaluation of ecosystem service value and analysis of influencing factors in Gansu section of the Yellow River Basin

Candidate : Liao Xingkai

Supervisor: Xu Jing

摘要

生态系统服务对人类的生存和可持续发展至关重要。在社会经济快速发展背景下,具有生态服务功能的土地类型不断流失,从而深刻影响生态系统服务价值。黄河流域甘肃段为我国重要的生态功能区,承担着多项关键的生态服务功能,但该区存在生态环境敏感脆弱,生态保护资金投入来源单一、补偿机制有待完善,生态系统服务价值测算和补偿范围、标准、方式不够明确等问题。因此,通过研究黄河流域甘肃段生态系统服务价值动态变化及空间格局,并进一步探讨影响生态系统服务价值空间分异的影响因素,有助于完善全流域生态补偿机制以及提高生态保护资金配置效率。

本文首先系统梳理了相关文献,在探究黄河流域甘肃段土地利用面积以及类型变化情况的基础上,根据修正过的当量因子表完成了黄河流域甘肃段生态系统服务价值测算、空间格局与敏感性分析,进而利用地理探测器探明生态系统服务价值的影响因素。研究表明:(1)耕地和草地是黄河流域甘肃段主要的土地利用类型。面积占比从高到低依次是耕地、林地、未利用地、建设用地、水体。建设用地的动态度远远高于其他用地类型,说明研究区建设用地扩张迅速。(2)耕地、林地和草地是提供生态系统服务价值最多的用地类型,2020年分别提供了129.9亿元、203.2亿元和196.8亿元的生态系统服务价值,三者提供的价值占总价值的95%左右,建设用地提供的生态系统服务价值最少。研究区生态系统服务价值在整个20年研究跨度之中总体呈上升态势,但是后10年增长率明显下降。黄河流域甘肃段各县区的生态系统服务价值以玛曲县最高为45.3亿元,最低是在兰州市安宁区为0.2亿元。从各县区总生态系统服务价值空间分异来看,生态系统服务价值在近20年逐渐形成正相关的空间分布格局。(3)社会经济因子是主要的影响因素,社会经济因子和社会经济因子之间的相互作用影响了生态系统服务价值空间分异格局的形成。

关键词: 黄河流域甘肃段 生态系统服务价值评估 当量因子法 地理探测器

Abstract

Ecosystem services are essential for human survival and sustainable development. In the context of rapid socio-economic development, the loss of land with ecological service functions such as woodland, grassland and water bodies has a profound impact on the value of ecosystem services. The Gansu section of the Yellow River Basin is an important ecological function area in China, which undertakes a number of key ecological service functions. However, the Plan for Ecological Protection and High-Quality Development of the Yellow River Basin of Gansu Province mentions that the ecological environment in this area is sensitive and fragile, the source of ecological protection funds is single, the compensation mechanism needs to be improved, and the scope, standards and methods of ecological value measurement and compensation are not clear enough. Therefore, by studying the dynamic changes and spatial patterns of ecosystem service value in the Gansu section of the Yellow River Basin, and further exploring the influencing factors affecting the spatial differentiation of ecosystem service value, it is helpful to improve the ecological compensation mechanism and improve the efficiency of ecological protection fund allocation in the whole basin.

In this paper, we first systematically reviewed the relevant literature, and on the basis of exploring the land use area and type changes in the Gansu section of the Yellow River Basin, the estimation of ecosystem

service value, spatial pattern and sensitivity analysis were completed according to the modified equivalent factor table, and then the influencing factors of ecosystem service value were found by using geographic detectors. The results show that: (1) Cultivated land and grassland are the main land use types in Gansu in the Yellow River Basin. The proportions from high to low are cultivated land, forest land, unused land, construction land, and water bodies. The dynamics of construction land are much higher than those of other land types, indicating that the construction land in the study area is expanding rapidly. (2) Cultivated land, forest land and grassland are the types of land that provide the most value of ecosystem services, accounting for about 95% of the total value, and the value of ecosystem services provided by construction land is the least. In 2020, it provided 12.99 billion yuan, 20.32 billion yuan and 19.68 billion yuan of ecological value, respectively. The value of ecosystem services in the study area increased in the whole 20-year study period, but the growth rate decreased significantly in the last 10 years. The ecosystem service value of each county in the Gansu section of the Yellow River Basin was the highest in Maqu County, and the lowest in Anning District of Lanzhou City. From the perspective of the spatial differentiation of the total ecosystem service value in each county, the spatial distribution pattern of ecosystem service value has gradually formed a positive correlation in the past 20 years. (3) Socio-economic factors are the main influencing factors, and the

interaction between socio-economic factors and socio-economic factors strengthens the formation of spatial differentiation pattern of ecosystem service value.

Keywords: Gansu section of the Yellow River Basin; Ecosystem service value assessment; Equivalent factor method; Geographical detector

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景与研究意义	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 研究方法、思路和内容	3
1.2.1 研究方法.....	3
1.2.2 研究思路.....	4
1.2.3 研究内容.....	5
1.3 论文的创新之处	5
1.4 本章小结	6
2 文献综述	7
2.1 生态系统服务内涵与分类	7
2.2 生态系统服务价值内涵	8
2.3 生态系统服务价值评估	10
2.4 生态系统服务价值影响因素	11
2.5 文献评述	12
2.6 本章小结	13
3 相关概念界定及理论基础	14
3.1 概念界定	14
3.1.1 生态系统服务.....	14
3.1.2 生态系统服务价值.....	15
3.2 理论基础	16
3.2.1 生态经济学理论.....	16
3.2.2 资源与环境经济学理论.....	17
3.2.3 可持续发展理论.....	18
3.3 本章小结	18
4 黄河流域甘肃段土地利用及变化分析	20

4.1 研究区概况	20
4.1.1 地理位置.....	20
4.1.2 自然地理状况.....	21
4.1.3 社会经济状况.....	21
4.2 数据来源	23
4.3 黄河流域甘肃段土地利用及变化分析	24
4.3.1 黄河流域甘肃段土地利用情况.....	24
4.3.2 黄河流域甘肃段土地利用动态变化.....	26
4.3.3 黄河流域甘肃段土地利用转移矩阵.....	27
4.4 本章小结	29
5 黄河流域甘肃段生态系统服务价值测算及时空演变分析	30
5.1 生态系统服务测算方法	30
5.1.1 生态系统服务价值测算方法选择.....	30
5.1.2 生态系统服务价值当量确定.....	30
5.1.3 单位面积生态系统服务价值测算.....	31
5.1.4 生态系统服务价值测算模型.....	32
5.2 黄河流域甘肃段生态服务价值时空演变分析	32
5.2.1 黄河流域甘肃段生态系统服务总价值时空演变分析.....	32
5.2.2 黄河流域甘肃段单项生态系统服务价值时空演变分析.....	35
5.3 各县区生态系统服务价值时空演变分析	37
5.3.1 各县区生态系统服务总价值时空演变分析.....	37
5.3.2 各县区生态系统服务总价值空间格局分析.....	40
5.3.3 各县区生态系统单项服务价值时空演变分析.....	42
5.3.4 各县区生态系统单项服务价值的空间格局分析.....	44
5.4 黄河流域甘肃段生态系统服务价值敏感性分析	47
5.4.1 生态系统服务敏感性分析方法.....	47
5.4.2 生态系统服务敏感性测度.....	48
5.5 本章小结	48
6 黄河流域甘肃段生态系统服务价值影响因素分析.....	50
6.1 影响因素选取.....	50

6.2 生态系统服务价值影响因素结果分析	50
6.2.1 基于地理探测器的生态探测.....	51
6.2.2 基于地理探测器的分异及因子探测.....	52
6.2.3 基于地理探测器的交互因子探测.....	52
6.3 本章小结	54
7 研究结论与政策建议	55
7.1 研究结论	55
7.2 政策建议	57
8 研究不足与展望.....	60
8.1 研究不足	60
8.2 未来展望	60
参考文献	61
附录.....	68
致谢	83

1 绪论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

生态系统指的是自然界的一个由生物和它们所处的非生物环境（如空气、水和土壤）相互作用构成的相互依赖、相互影响的系统^[1]。生态系统可以是自然界中的森林、草原、湖泊和海洋等，也可以是人为的环境，如城市、农田等。生态系统为人类提供了各种关键的生态系统服务，是人类社会赖以生存和发展的重要资源。主要分为调节服务、供给服务、文化服务以及支持服务四大类^[2]，向人类提供了包括了食物、原材料等有形的物质产品，这些服务人类可以通过货币直接进行计量，但是很多无形的服务如提供美学景观、气候调节等则由于不能直接用货币计量而往往被人忽略^[3]。因此，在人类社会的不断发展过程中，由于对生态系统和生态系统服务的片面认识导致了对资源的过度开发利用，造成了物质财富迅速积累，但自然资本总量快速下降、生态系统不断退化的局面。退化的生态系统最终反过来影响到人类社会的福祉，阻碍了社会发展，现已成为如何使人类社会实现可持续发展的又一个新命题。大量研究表明，生态系统服务价值的可靠评估有助于人们理解经济活动对自然环境造成的影响，引导社会建立损害赔偿和建立环境生态补偿机制，寻找经济发展与生态保护之间的平衡点，避免因短期经济利益而造成的长期生态损失。

自然变化和人类活动都会影响生态系统服务的形成，其中土地利用变化被认为是最广泛、最深刻的影响因素之一^[4]。土地利用与生态系统服务之间存在着密切且复杂的关系，土地本身也是生态系统的一部分。基于自身目的，人类改变土地覆盖类型的行为会产生一系列自然、社会和经济后果，也会影响到生态系统服务。土地利用与生态系统服务之间的影响是相互的，改变土地利用类型能够改变生态系统服务量和服务类型，而人类为了追求自身需要的生态系统服务又会影响到土地利用决策。可持续的土地利用策略需要充分考虑到对生态系统服务的影响，确保生态系统的健康和功能，以及人类社会的长期福祉。理解土地利用和生态系

统服务之间的关系对于促进可持续土地管理至关重要。合理的土地利用规划和管理可以保护和增强生态系统服务，有助于维护生态平衡和促进人类福祉。因此，土地利用决定着生态系统服务价值，探究两者之间的关系有助于揭示生态系统服务价值的变化趋势。

“黄河宁，天下平”。黄河上游承担着关键的水源涵养、土壤保持、固碳增汇、沙化控制等生态系统服务功能。受自然、人为等诸多因素的影响，黄河上游生态系统敏感脆弱，生态服务功能退化、系统稳定性削减，生态风险加剧等问题严重制约了流域生态系统稳定及生态环境与经济社会协同发展^[5]。因此，本文以黄河流域甘肃段为研究区，从土地利用现状及变化情况入手，运用调整后的当量因子法评估生态系统服务价值，探究其时空演变格局与和影响因素。生态系统服务价值的科学量化与评估，有助于优化流域生态资源配置、提高资源利用效率，能够为开展环境管理决策提供理论参考和决策依据。

1.1.2 研究意义

(1) 理论意义

本文通过研究黄河流域甘肃段土地覆被的变化，确定了用地类型之间的动态变化和转移情况，并结合土地利用情况，对研究区近 20 年的生态系统服务价值及其变化进行评估，探索生态服务价值的时空演变及空间格局，通过生态系统服务价值敏感性指数衡量评估结果的可靠性。最后利用地理探测器分析生态服务价值的影响因素，丰富了相关理论。

(2) 实践意义

黄河流域甘肃段作为西北地区重要的生态安全屏障，承担着关键的水源涵养、土壤保持、生物多样性维持功能。因此测算黄河流域甘肃段生态系统服务价值，评估其时空演变规律以及阐明影响因素，以期为优化土地配置、促进生态保护及经济发展提供理论依据和决策参考。

1.2 研究方法、思路和内容

1.2.1 研究方法

(1) 当量因子法

Costanza 等人于 1997 年首次明确了全球生态系统服务价值的评估原则、方法和基本步骤^[6]。通过赋予特定生态系统服务一个确定的生态系统服务价值系数来核算生态系统服务价值。然而,考虑到中国生态系统和土地类型的空间异质性,直接采用 Costanza 等人的全球生态系统服务价值估算结果可能会产生误差。因此,谢高地等中国学者在将外国学者的研究成果进行了本土化改造,并建立了中国生态系统服务单位面积的等价价值。本研究参考谢高地等^[7]研究得到的我国陆地上单位面积生态系统服务价值当量表,结合黄河流域甘肃段耕地粮食生产的实际情况,在将系数进行修正后,构建起黄河流域甘肃段的生态系统服务价值测算模型,并计算出六类用地类型的生态系统服务价值。

(2) 地理探测器

地理探测器是一种非线性的统计手段,旨在识别空间的异质性以及揭示其背后的动因^[8-10]。与地理加权回归这种线性模型不同,地理探测器采用的是非线性模型。它的一个显著优点是能够在不必担心多重共线性的情况下,量化两个独立变量与两个因变量之间的交互效应。地理探测器被广泛应用于研究地理实体空间分布的形成机理,这包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测等方面。地理探测器是一套用于检测空间差异性和揭示其背后动因的统计方法。其基本原理是,若一个自变量对因变量有显著影响,则这两个变量的空间分布应当显示出一定的相似性。这种空间差异性可以通过分类算法来表示,如环境遥感的分类;或是基于经验的方法,如胡焕庸线。地理探测器特别适用于处理分类数据,但通过对顺序数据、比率数据或间隔数据进行适当的离散化处理,也能对它们进行分析。因此,无论是定量数据还是定性数据,地理探测器均能进行探测。此外,地理探测器还能探究两个因素如何交互影响因变量,可以评估是否存在交互作用以及其性质,如其强度、方向、是线性还是非线性等。这种合并不仅限于线性关系,任何形式的关联都可以通过地理探测器来识别。

1.2.2 研究思路

在广泛搜集与分析国内外生态系统服务价值与影响因素研究文献资料的基础上，结合生态服务价值估算的理论、方法，以黄河流域甘肃段为研究实例，通过黄河流域甘肃段土地利用遥感数据，研究 2000-2020 年土地利用现状及变化情况；利用土地利用动态度，揭示 20 年来土地利用变化速度；借助土地利用转移矩阵显示土地用途转变的数量和趋势，分析研究区土地利用特点以及土地利用变化情况。同时依据该区域的自然资源状况、社会经济条件，采用当量因子法对黄河流域甘肃段的生态服务价值进行估算，突出生态服务价值空间差异，分析生态服务价值的时空分异特征，最后针对生态服务价值时空分异进行影响因素探究，得出相关结论并提出建议。本文的技术路线图如图 1.1 所示：

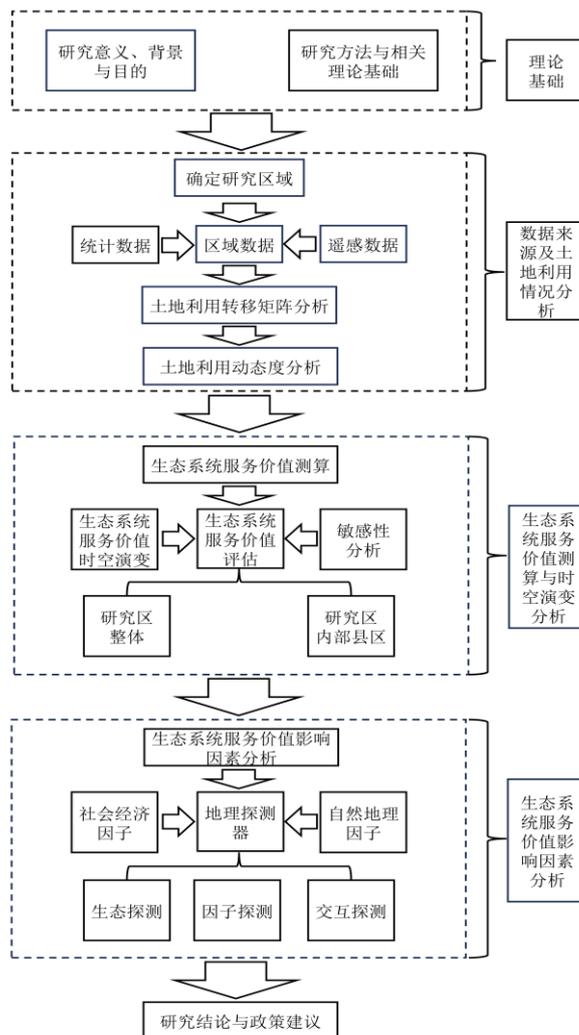


图 1-1 技术路线图

1.2.3 研究内容

本文共有六部分，文章结构及研究内容如下：

第一部分包括第一章绪论与第二章文献综述。第一章主要分析了本文选题的背景与意义，确定研究的内容与方法。第二章文献综述部分对国内外生态系统服务价值评估研究和研究方法进行梳理与评价，获得研究启示。

第二部分为论文的第三章。界定了生态系统服务与生态系统服务价值的相关概念，然后介绍了相关理论，包括可持续发展理论、生态经济学理论、资源环境经济学理论等。

第三部分为黄河流域甘肃段土地利用变化及分析。包括从研究区 2000、2010 和 2020 年三期土地利用情况着手，利用土地利用动态度、转移矩阵来探究土地利用变化趋势。

第四部分主要内容为黄河流域甘肃段生态系统服务价值评估，基于上一部分三期土地利用情况数据和各县区用地情况数据结合根据研究区实际情况修正过的当量因子计算出研究区总体生态系统服务价值、不同服务功能的生态系统服务价值、不同用地类型提供的生态系统服务价值、各县区的生态系统服务价值等，并对其在研究期间的变化进行空间格局分析，最后对黄河流域甘肃段生态系统服务价值进行敏感性分析，探讨用地类型对生态系统服务价值的影响，提高结果的可信度。

第五部分参考相关文献从社会经济和自然地理两方面选择影响因子，借助地理探测器的生态探测、因子探测和交互探测功能分析了研究区生态系统服务价值空间分异格局的主要影响因素。

第六部分为文章的结论建议部分。主要内容是总结前文内容，根据结论进行讨论，给出合理的政策建议。在本文研究的基础上，提出本文的研究方向在未来能向着怎样的方向继续深化在哪些部分可以继续完善。

1.3 论文的创新之处

(1) 根据研究区实际情况对不同用地类型生态系统服务价值的当量因子进行修正，得到符合研究区实际情况的当量因子表。结合研究区不同用地类型面积

核算黄河流域甘肃段 2000-2020 年近 20 年生态系统服务总价值和单项生态系统服务价值，从而为区域开发，自然资源利用提供意义。

(2) 以往大多数文献主要为对省域、市域或者对黄河流域整体进行分析，很少有文献对一个生态功能区域以县域为单位进行分析，研究尺度不够精细，也不能将黄河流域甘肃段整体或部分区域生态服务价值的空间相关性以及空间分布特征准确的呈现出来，缺少以县区为单位的生态系统服务价值核算研究。本文以黄河流域甘肃段生态功能区的 57 个县区为研究对象，通过对研究区内部各县区进行详细分析，对不同时期、不同地类、不同服务的情况都进行分析，能更加清楚了解研究区内部的服务价值变化情况。

1.4 本章小结

人类对生态系统服务功能与生态系统服务价值不全面且充分的认识，让人类在资源开发利用时走上了不可持续的道路。而土地利用作为影响生态系统服务功能价值的重要因素，对土地利用和生态系统服务价值进行深入研究是有必要的。本文以黄河上游重要的生态系统服务供给区黄河流域甘肃段为例，对研究区生态系统服务价值进行评估，对使用到的研究方法进行解释，以技术路线图的形式对在总体框架进行呈现，并归纳了可能的创新点。

2 文献综述

2.1 生态系统服务内涵与分类

定义生态系统服务的内涵与概念是进行生态系统服务价值评估的基础，Ehrlich P 和 Ehrlich A 提出了“生态系统服务”（Ecosystem Service）这一术语，早期学者的研究主要集中于生态系统服务概念的提出与完善。学者们从自然资本的概念出发逐渐探索出了生态系统服务的概念，1970 年在《人类对全球环境的影响报告》中，首次使用了价值相关的词眼来形容生态系统服务带给人类的效用；1977 年，Daily 等将是指由生态系统与生态过程相互作用、相互影响所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[11]，并列举了 13 种生态服务类型^[12]。Costanza 等研究认为生态系统服务是指人类通过直接或间接方式从生态系统的结构、过程和功能中获得的生命支持产品和服务，并将其分为气体调节、气候调节、水文调节、控制侵蚀和保持沉积物、废物处理、食物生产等 17 种类型^[13]。DeGroot 将生态系统服务分成调节服务、生产服务、信息服务和生境服务四大类，并细分为废弃物处理、水分调节、土壤保持等 23 小类^[14]。Fisher 等将生态系统服务定义为（主动或被动）利用生态系统来创造人类福祉的方面^[15]。联合国千年生态评估小组（MA）认为生态系统服务是人类从生态系统中获得的效益，并将其分为供给、调节、支持与文化四大类服务，这一定义与分类结果得到国际上的普遍认可^[16]。

国内有关生态服务的内涵与分类，基本上都是参考国外学者的研究成果。谢高地等认为生态系统服务是人类直接或间接地从各类自然生态系统中获取的产品与服务，按照是否可再生，将生态系统服务分为可再生的和不可再生的两类^[17]，后参照 Costanza 等研究，将其划分成生产食物与原材料、调节气体与气候、景观休闲、涵养水源、形成与保护土壤、处理废物、维持生物多样性等 9 项服务^[18]。虞依娜等将生态系统服务定义为由生态系统与各构成要素共同产生的、能够支撑人类生存和发展的实物产品及有效服务^[19]。欧阳志云等认为生态系统服务是指生态系统和生态过程所形成和维持的自然环境条件和功能，是人类赖以生存的基础，不仅为人类提供食品、药品和其他生产生活原料，还维持了人类生存的生命支持系统，如生物地化循环和水文循环，维持生物物种和遗传多样性，环境净化，

以及大气化学平衡的维持^[20]。张彪等基于人类需求的分析视角,依据生态环境作用特征的差异,把生态系统服务划分成实物型的产品、维持安全的功能和承载文化娱乐功能等 3 类 12 项服务^[21]。

2.2 生态系统服务价值内涵

对生态系统服务价值的研究始于 20 世纪中期。1948 年, Vogt 提出“自然资本”的概念,这一概念的提出为生态系统服务价值理论框架的建立奠定了基础^[22]。1969 年, Helliwel 指出生态资源价值,提出了“生态资源价值理论”^[23],进一步为生态系统服务价值理论的建立提供支撑。紧接着, 1970 年,《人类对全球环境的影响报告》中“生态系统服务功能”首次正式出现在人们视野中^[24]。到了 1977 年, Weatman 提出自然服务并尝试评估自然服务价值,首次尝试对自然资源服务价值进行尝试性的评估,为后来的评估及方法使用提供了基础^[25]。1981 年, Mooney 的文章中提到生态系统服务^[26],并在 1983 年的文章中对其概念系统地进行阐述,拓宽生态系统服务范围,探讨生态系统为人类提供的各项服务是否能用人类的先进技术进行代替。当时的研究很少有对生态系统、生态系统服务与生态资源经济价值三者结合起来的,基本都是单独进行研究,对三者分别进行界定。到 20 世纪 80 年代后期,将生态学与经济学结合研究的学科“生态经济学”出现在大众的视野中,并且在其中逐渐融入地理学、心理学等多学科的组合。1995 年,众多资源环境方面专家云集在新罕布什尔,举办了环境学者交流会议,这次会议上环境学家提出对生态系统服务的范围界定以及各种评估方法,最为影响深刻的是 Costanza 与 Daily 等一众环境学家,这次会议极大地促进了生态系统服务价值理论的研究与发展。会议过后, Daily 将在会议上的思想总结成《自然服务:社会对自然生态系统的依赖》一书并在 1997 年出版,这本书对生态系统服务做了明确的定义,将其定义为支持与满足人类生产生活的生态系统及其组成的自然环境条件^[27]。同年, Costanza 等人对全球生态系统与生态系统服务做了细分,分为了四个一级类型和十七种二级类型,其中四个一级类型包括:调节、供给、支持和文化服务,然后进一步细分为气体调节等十七种二级服务类型。并分别运用不同的评估方法对十七种服务类型进行估算,得到了全球生态系统的的服务价值^[28],这篇文章的测算方法与过程使其原理更加明确。之后很多生态系统服务及价值评估研

究都是在借鉴此文献基础上根据对生态系统服务进行分类和生态系统服务价值系数对服务价值进行测算，然后各自进行进一步的研究。Daily 与 Costanza 的研究将服务价值的研究从过去分散凌乱的、不受重视的情况变成相关研究前沿，引起了学术界的高度关注。

我国对生态系统服务价值理论的研究起步较国外更晚一点。20 世纪 80 年代，我国生态环境方面学者逐渐将国外的研究成果引入国内进行研究，生态系统服务一词才逐渐出现在国内学者的文献中。1984 年，马世俊发表于《生态学报》的《社会—经济—自然复合生态系统》一文^[29]，提出社会、经济和自然虽然表面看起来是完全不同性质的三个系统，但是其三个系统的生存发展都是受到另外两个系统的影响，它们是三个互相有联系、有影响的系统，首次把经济、社会与自然联系起来，作为一个复合生态系统，将生态学和经济学联系起来，促进了我国生态经济学理论的发展，代表我国相关理论研究的开端。同年，张嘉宾对西双版纳森林的研究让我们提高了对森林作用的认识，在文中给出了测量森林生态系统覆被率及动态变化的方法，对后期测量森林服务价值提供了基础^[30]。1988 年，国务院开展在国民经济核算体系中将自然资源核算价值纳入进去，核算了多个生态系统的资源价值，这个时期主要是对森林生态系统的资源进行核算。1997 年，Costanza 等环境学家提出评估方法后，吸引了大量国内外学者的研究。2001 年，我国生态学家谢高地等参考 Costanza 等的方法，对我国草地^[31]、河流^[32]的生态系统服务及价值进行了测算，但谢高地等学者提出 Costanza 等（1997）文章中对生态系统服务价值的测算存在问题，与我国生态环境的实际情况不符，比如 Costanza 等人对湿地的价值系数估值过高，对耕地的价值系数估值又太低，如果直接使用这个系数来做评估，会使测度结果误差较大。因此，谢高地等学者设计制作关于各种生态系统服务价值系数问卷，在 2002 年对我国 200 位生态环境方面的专家进行了问卷调查，并同时附上 Costanza 等人的结果做对比，最终 2003 年得出相比国外引进的价值系数更加符合我国生态环境实际情况的当量因子表，并以此表测算我国青藏高原的生态系统服务价值^[33]。然后谢高地等学者在 2007 年又对我国 500 位生态环境方面专家进行问卷调查，最终在 2008 年得到了新的生态系统服务当量因子表，通过对比分析，发现新的估价体系估算出来的生态系统服务价值相比 2003 年得到的结果更加符合生态环境实际情况。因此，我国现

在的生态系统服务价值测算模型主要以谢高地等 2008 年的研究成果为参考。大量生态环境学家参考谢高地等测度出的当量因子表,从县域^[34]、市域^[35]、省域^[36]等尺度对我国的生态系统展开服务价值测度,取得了丰富的成果。

2.3 生态系统服务价值评估

国外对于生态系统服务价值的研究较为成熟,对其内涵、理论、评估方法和不同案例区域的评估等都有大量的研究,在不同时期针对不同类型不同尺度的生态系统,评估其生态系统服务价值可能会用到不同的评估方法。Evelyn Asante-Yeboah 等(2023)通过问卷调查与专家意见构建判断矩阵,并将其与 3S 技术结合构建评估体系,评估了加纳西南部生态系统服务价值的变化趋势^[37]。Chan 等(2006)^[38]。Cleveland 等(2013)结合遥感图像、生物地球化学建模和实证观察结果,基于植物净初级生产力方法,以识别以前无法识别的土地上新养分和循环养分(N 和 P)生产力的模式,估算草地生态系统的服务价值^[39]。Coker Graham 等(2019)为了确定在新西兰人工林土壤生态系统服务的利益相关者之间是否存在差异,确定了与森林有关的利益相关者群体,并对他们进行调查,评估他们对 10 种森林土壤生态系统服务的相对重视程度^[40]。

早期,国内研究主要采用功能价值法,但随着研究的深入,结合多学科、多角度的新方法层出不穷^[41]。刘向华(2018)则通过非线性评估模糊集评估生态系统服务价值,这种方法结合多学科,考虑了多种影响因素,最终评估精度较高^[42]。欧阳志云等(1999)从生态系统服务价值中的非使用价值着手,运用影子价格法、机会成本法、修复费用法等测度了我国陆地生态系统服务价值^[43]。李艺欣等(2023)在则是在价值当量法的基础上使用了自然地理因素进行修正,结合引力模型与溢出效应得到最终的结果^[44]。王孟超等(2024)则使用 PLUS 模型结合土地利用政策与土地利用的动态变化评估了不同情境下的生态服务价值^[45]。黄麟等^[46](2024)通过梳理草地生态系统服务价值内涵与核算方式,提出了由 4 个一级指标、10 个二级指标和 16 个三级指标构成的复合型价值体系。

综上所述,评估生态系统服务价值的方法从以前的功能价值法和当量因子法两种逐渐发展为运用多模型,构建多层次、动态评价指标体系为主流的多元化评估方式。鉴于原有方法通常以大量数据为基础通过间接方式推算出生态系统服务

的价值,一方面适用面狭窄且使用困难,另一方面凭借市场价格、获取成本来反推出生态系统服务价值精度就相对不足。而不论是从能值分析入手借助生态学概念构建生态模型还是使用经济学价值分析都无法全面的评估生态系统服务价值,因而,学者将眼光聚焦到多学科融合、多技术并进的新模式当中。由于生态系统与生物过程之间的复杂关系,仅凭单一学科已无法满足研究需要,通过结合模糊数学、3S 技术等创新研究方法将成为未来的研究重点^[47]。

2.4 生态系统服务价值影响因素

Hong K 等(2018)结合欧拉放大与典型相关分析识别生态系统服务价值与人类活动的相互影响^[48]。Greenspoon P.J(1998)等则运用回归分析指出人们为生态系统服务价值的支付意愿受到多方面影响^[49]。Karakoç, Ö(2019)等研究认为亚马孙河流域森林的改变是人类活动(如森林火灾、生产活动)与自然环境(如气候变化)变化共同作用的结果^[50]。Cagliero C(2012)等指出在人口、经济、技术等人类活动的干扰下 18 类中的 14 类生态服务类型都出现了衰退^[51]。Puplampu and Boafo(2021)则认为从 1991 到 2018,伊拉克城市草地绿化率从 41% 下降到 15%,这伴随着生态系统服务供给的下降^[52]。Sue Ellen Taelman 等结合生命周期评估构建了可持续性评估框架^[53]。Locatelli 等认为土地利用强度是山区生态系统服务变化的重要影响因素^[54],Gashaw 等利用元胞自动机-马尔科夫模型模拟预测了土地利用变化对生态系统服务价值的影响^[55]; Notter 等运用改进的 SWAT 模型量化了坦桑尼亚和肯尼亚 Pangani 盆地的供水服务,发现盆地的总体供水量相当低,但空间变异性较大^[56]; Yuncheng Jiang 等人在耦合多生态模型的基础上使用 OPGD 和 MGWR 框架评估不同子流域之中人类活动与生态系统服务价值的关系的变化^[57]。

国内研究主要从自然条件、人口增长、经济社会发展、政策规划以及交通区位等维度,运用相关分析、多元回归、主成分分析、地理加权回归、STIRPAT 模型、地理探测器等方法,展开省域、地市、区县以及流域等不同尺度的生态系统服务价值变化的影响因素分析。程珂怡(2023)等采用地理探测器和相关回归分析,发现土地垦殖率与城乡居民可支配收入是生态系统服务价值最主要的影响因素^[58]。危小建等通过对不同尺度下的生态系统服务价值探寻其影响因素发现随

着尺度增加模型的拟合度不断下降^[59]。刘军等（2023）运用增强回归树模型指出旅游业对生态系统服务功能的影响范围^[60]。胡雪运用地理探测器探究生态经济耦合协调情况对生态系统服务价值的影响，支出归一化植被指数和城镇化率是其主要的影响因素^[61]。冯一凡等在利用时空地理加权回归模型的基础上研究发现，济宁都市圈的扩张方向和扩张速率显著影响生态系统服务价值变化^[62]。杨磊等应用地理探测器研究昆明市生态系统服务价值的驱动因素，结果表明人类活动因素及其与其他人为因素的共同作用导致了生态系统服务功能的不断退化^[63]。丁振民等探讨了陕西省耕地转移对生态系统服务价值损益的影响^[64]。还有学者对长株潭城市群和京津冀城市群的生态系统服务价值的影响因素进行了量化研究^[65-66]。

2.5 文献评述

在生态系统服务研究过程中，国际学术界已经建立了较为成熟的理论框架和评估体系，早期由 Ehrlich P 和 Ehrlich A 等人引入的“生态系统服务”概念，随后通过多项研究不断深化和扩展。中国学者在引入国外研究成果的基础上，针对国内具体情况进行了适应性研究，如谢高地等人的工作不仅对生态系统服务进行了本土化分类，还针对中国特有的生态系统进行了价值评估，逐渐形成了与国际研究相衔接的理论和方法体系。

国际与国内研究都取得了显著进展，生态系统服务价值的评估方法也在不断发展，其中现代数字技术如 3S 技术、模糊数学等被逐步引入，增强了评估的准确性和应用范围。此外，对生态系统服务价值影响因素的研究揭示了人类活动、自然环境变化等多方面因素与生态系统服务价值之间的复杂关系，这些研究不仅为理解生态系统服务价值变化提供了新视角，也为制定相关政策和管理措施提供了科学依据。随着学者前赴后继的研究，研究领域已经从早期的概念界定和基础分类，发展到如今的深入评估和影响因素分析，体现了从宏观到微观、从理论到应用的全面深化。未来研究需进一步探索多学科交叉的新方法，以及在地区尺度上对生态系统服务价值变化的更细致分析，这将为全球生态系统管理与可持续发展贡献更加丰富的理论支撑和实践指导。

2.6 本章小结

本章梳理了国内外关于生态系统服务、生态系统服务价值生态系统服务价值核算方法的发展以及生态系统服务价值影响因素的研究现状,通过文献评述获得研究启示。首先解释了生态系统服务的内涵,引出学者们是如何根据生态服务的内涵和分类来确定生态系统服务价值,主要介绍了功能价值法和当量因子法,经过对比分析各种核算方式的优缺点确定本研究所使用的生态系统服务价值核算方法。最后就常用的生态系统服务价值影响因素进行总结,最终选择所需的影响因子。

3 相关概念界定及理论基础

3.1 概念界定

3.1.1 生态系统服务

自 20 世纪 70 年代末期生态系统服务这一概念首次被提出以来,生态系统服务概念经历了从最初的简单理解到后来的全面深化的过程。最初,生态系统服务被理解为自然环境直接为人类提供的物质利益,如食物、水、木材等。然而,随着对生态系统作用深入研究的推进,学者们开始认识到生态系统服务不仅包括直接的物质供给,还涵盖调节服务(如气候调节、洪水控制和疾病控制)、文化服务(如教育、娱乐和精神满足)以及支持服务(如养分循环和土壤形成),这些服务共同构成了人类福祉的基础。随着研究引入国内,国内研究者认为生态系统服务是指通过生态系统得到的直接或间接的物质产品和服务等,这些产品和服务是生产生活的必需品或是保障我们的生活质量水平^[67]。21 世纪初,随着联合国的千年生态系统评估(MA)项目的实施,生态系统服务的概念得到了进一步的明确和拓展。MA 项目提出了供给服务、调节服务、文化服务和支持服务四大类的分类体系,为国际间的学术交流和合作提供了一个清晰的框架,并强调了生态系统服务与人类福祉之间不可分割的联系,推动了生态系统服务概念在全球范围内的普及和应用。

生态系统服务的具体分类反映着自然生态系统对人类社会的多维度贡献。国际上得到广泛认可分类方式主要分为四大类:供给服务、调节服务、文化服务和支持服务。供给服务指的是生态系统直接提供给人类的产品,如食物、水和原材料等。调节服务涵盖了生态系统对自然过程的调控作用,比如气候调节、洪水控制和病虫害抑制等。文化服务则指生态系统提供的精神、文化和娱乐价值,包括美学享受、文化遗产、休闲和旅游等。支持服务是指那些对其他三类服务提供必要基础的服务,如土壤形成、养分循环和初级生产等。这一分类不仅有助于全面理解生态系统对人类福祉的贡献,也为生态系统管理和保护提供了科学依据。随着对生态系统服务研究的深入,中国学者在此基础上进一步细化,更好地适应国

内的生态环境和社会经济条件, 如将二级服务分类为食物生产、原材料生产、气体调节等, 为中国的生态文明建设和可持续发展提供指导。

3.1.2 生态系统服务价值

Pearce 等(1990)将环境价值定义为环境为人类所提供的效用^[68]。因环境价值的存在而使得人类得到的收益被称为环境收益。将环境价值分为利用价值(use value), 选择价值(option value), 和存在价值(existence value)。利用价值就是人们从利用环境中得到的价值, 分成市场价值和非市场价值, 其中渔业丰收、旅游业收入增加及由饮水引起的疾病造成的医疗费用和病假的减少, 属于市场价值; 而人们生活的舒适感增加和非商业性的休闲活动的出现, 及人们因河流中生物多样性的恢复而产生的快乐感等, 则属于非市场价值。人们在对环境或自然资源所产生的未来收益的信息是有限的, 而开发造成的后果又是不可逆转的情况下, 暂不开发, 保持选择权, 便今后在得到更多的信息的情况下更好地决策, 选择价值就是这种从推迟决策、保持选择权中得到的收益。而出于道德的考虑认为即使对人类本身没有任何好处, 自然界的存在本身就具有价值, 这种环境价值即为存在价值。Turner 等(2008)从使用价值(use value)和非使用价值(non-use value)两个角度对生态系统服务价值进行衡量^[69], 二者共同组成总价值 (Total economic value), 使用价值又分为直接使用价值(direct use value)和非使用价值(indirect use value); 直接使用价值产生于与生态系统服务的直接互动, 可能是消费性的, 也可能是非消费性的。在国内的研究中, 生态系统服务价值也大多被划分为使用价值和非使用价值。钱翌等(2015)对总价值的分类及定义与 Turner 等(2008)十分相近^[70], 将使用价值分为三类, 分别是直接、间接使用价值和选择使用价值, 并指出任何一种环境资源都具有选择价值, 供需特点、风险偏好情况等都会对其产生影响。

综上所述, 生态系统服务的定义向更具操作性的方向发展并已经逐渐趋向一致, 而为了衡量人类从生态系统中获得的效益, 生态系统服务价值理论研究也越来越深入, 目前在评估应用中学者大多认同将总经济价值分为使用价值和非使用价值的分类方法。

3.2 理论基础

3.2.1 生态经济学理论

20 世纪 60 年代，以 Kenneth Boulding 和 Herman Daly 等为代表的经济学与生态学方面学者提出若继续传统无节制的增长方式，生态与经济都将无法持续，这一观点是生态经济学理论的开端。生态经济学的形成和发展是对传统经济活动对自然环境造成破坏的反思和回应。从 18 世纪末期开始，一系列著名的经济学家和思想家的贡献为生态经济学的诞生奠定了基础。亚当斯密在 1776 年的《国富论》中提出了市场机制下的“看不见的手”，认为个体追求自身利益最终能够促进社会整体福利的增加。尽管斯密的理论主要关注经济增长和市场效率，但他对经济活动与社会福祉之间联系的讨论，为后来生态经济学中关于经济活动对环境和社会福祉影响的思考提供了早期的理论基础。托马斯马尔萨斯在 1798 年的《人口论》中，通过讨论人口增长与资源限制之间的关系，指出了自然资源有限性和人类活动可持续性之间的潜在矛盾，这一观点成为后来生态经济学关注资源限制和人口控制的重要理论来源。随着时间推移，尤其是在 20 世纪，随着工业化进程加快和环境问题的日益凸显，生态经济学作为一门独立的学科逐渐成型。1970 年代，随着环保运动的兴起和全球环境危机意识的增强，人们开始更加关注经济活动与生态系统之间的相互影响。赫尔曼·E·达利是生态经济学领域的重要人物之一，他在 20 世纪 70 年代提出了“稳态经济”（Steady-State Economy）的概念，强调经济规模应该与地球生态系统的承载能力相适应，倡导经济发展的质量而非数量。罗伯特·科斯坦萨等人在 1997 年发布的《生态经济学导论》是该领域的重要著作之一，系统地总结了生态经济学的基本理论框架，强调了经济系统与生态系统之间的相互依存性以及经济决策对生态系统的长期影响。

生态经济学的核心内容和理念聚焦于实现经济活动与环境保护的和谐共生。它强调考虑长期生态效益和社会福祉，而不仅仅是短期经济增长。生态经济学认为，经济活动不应超过地球生态系统的承载能力，必须维持自然资源和生态服务的可持续性。生态经济学提出了多种方法来实现这一目标，包括：自然资本的价值评估、评估生态系统服务的经济价值，如清洁的空气、水和生物多样性等，以此引导更加负责任的经济决策。稳态经济模型：赫尔曼·E·达利提出的稳态经济

模型强调经济规模的稳定, 倡导资源的有效循环利用和废物的最小化。跨学科研究: 生态经济学采用跨学科的方法, 结合经济学、生态学、系统科学等领域的知识, 以全面理解经济活动与生态系统之间的复杂相互作用。政策设计和评估: 制定和评估旨在促进可持续发展的政策, 如环境税收、绿色补贴和可持续资源管理方案等。生态经济学的发展和实践显示了人类社会在面对环境挑战时的创新和适应能力。通过强调经济活动的环境影响和生态限制, 生态经济学为全球可持续发展提供了重要的理论和方法支持, 指引着人类走向与自然和谐共存的未来。

3.2.2 资源与环境经济学理论

资源与环境经济学是一门探究经济发展与自然资源及环境保护之间相互关系和影响的学科。随着社会经济与生态保护之间的矛盾激化, 促使了可持续发展概念的提出。资源与环境经济学通过分析经济活动与资源环境之间的耦合关系, 旨在寻求一种既促进经济增长又保护环境资源的可持续发展路径。

该领域的理论基础可以追溯到 20 世纪初, 意大利社会学家兼经济学家帕累托提出著名的帕累托最优理论, 分析了资源配置的效率问题。随后, 庇古在《福利经济学》中通过描述自然资源的耗尽和跨时期配置的具体方法, 引入了外部性理论, 并提出通过征收环境税等措施来解决环境问题。在 20 世纪 60 年代, 科斯在《社会成本问题》中强调了资源产权的重要性, 指出明确的产权界定是解决环境问题的关键。而哈丁的《公地的悲剧》则揭示了公共资源由于非排他性和竞用性而导致的过度利用问题。资源与环境经济学关注的核心问题包括如何在经济活动中内化外部成本、如何合理配置和利用自然资源、以及如何通过政策和管理措施防止环境恶化。该领域提倡采取一系列环境经济政策, 如设置环境标准、实行排污权交易、征收环境税、明确资源产权等, 以激励个人和企业在其经济决策中考虑环境成本, 促进资源的有效利用和环境的保护。在实践中, 资源与环境经济学的应用十分广泛, 包括环境影响评估、资源税收政策、能源管理、水资源配置、生态补偿机制等。这些应用不仅有助于解决特定的资源和环境问题, 也为政府制定相关政策提供了科学依据。

总之,资源与环境经济学为我们提供了一种理解和分析经济活动与自然环境相互作用的框架,强调通过科学的管理和政策制定,实现经济增长与环境保护的双赢目标,为全球面临的资源与环境挑战提出了可行的解决方案。

3.2.3 可持续发展理论

随着全球化的加速以及科技的迅猛发展,我们面临着前所未有的环境挑战和社会问题,这使得可持续发展理念成为国际社会共同关注的焦点。早在18世纪和19世纪,先驱学者就已经对资源的合理利用、环境保护以及未来社会的福祉展开了思考,奠定了可持续发展理论的基础。这些早期的思想强调了人与自然的和谐共存,特别是强调了对后代负责的伦理原则,这些都为后来的可持续发展理论提供了思想来源。1987年,格罗哈勒姆布伦特兰在全球环境大会上提出的可持续发展定义,满足当代人需要的同时照顾到后代,成为了可持续发展最广为人接受的解释。这一定义深刻地表明了可持续发展的核心是代内公平与代际公平的结合,既关注当代社会的公正,也承认对后代的责任。可持续发展理念倡导的是一种跨代的公正、生态的持续性以及全人类的共同参与。在公平性原则下,强调每个人不仅享有平等使用资源的权利,也承担着保护环境的责任。同时,这一原则也要求我们在满足当前需求的同时,不能牺牲未来代际的福祉。持续性原则提醒我们必须在破坏生态平衡的前提下合理利用资源,对可再生资源要在其自然恢复能力范围内进行开发利用,对不可再生资源则需谨慎使用,并积极探索可替代方案。共同性原则将环境保护的责任扩展到了全人类,强调全球合作和各国、个人间的共同行动是实现可持续发展的关键。在这些原则的指导下,旨在实现一个在生态、经济和社会三个维度上均可持续的全球发展模式。这种发展模式不仅要求我们对生态系统服务和价值给予充分重视,还要求我们不断探索和实践促进生态平衡、社会公正和经济繁荣的新路径。通过全球共识和行动,可以朝着更加公平、绿色和包容的未来迈进。

3.3 本章小结

本章对论文的相关概念、理论基础做了系统性说明。首先对生态系统服务和生态系统服务价值进行界定,方便后文相关概念的提及。然后对生态系统服务价

值评估的相关理论进行归纳总结，主要介绍了生态经济学、资源与环境经济学、可持续发展的相关理论，为之后深入围绕本文研究主题做铺垫。

4.1.2 自然地理状况

黄河流域甘肃段地理位置重要，处于黄土高原与河西走廊的交界处，西靠青藏高原，南通四川盆地，东临黄土高原，四通八达，覆盖了甘肃省政治、经济、文化中心，有着重要的地位。

黄河流域甘肃段由甘南向庆阳呈现出西高东低的地理特征，以高原、山地河谷、平川等地形为主。横跨陇东黄土高原区、陇中黄土高原丘陵沟壑区、甘南高原区三大地貌单元，平均海拔为 2200m 左右，以温带大陆性气候为主，气候类型多样，区域差异较大，年均降水量 400 mm，年均气温 7 °C。其中甘南高原区是黄河上游重要的水源涵养区和补给区，但黄河流域甘肃段整体缺水，常年干旱少雨，水资源分布严重失衡，人均水资源稀少；陇东黄土高原区、陇中黄土高原丘陵沟壑区是黄河主要的泥沙来源区，水土流失面积约为 4 万 km²，流域总面积达 14.6 万 km²，占全省总面积的 32.2%，占黄河流域总面积的 19%，甘肃段干流全长为 913 公里，占黄河全长的 16.7%，年径流量为 290 亿立方米^[71]。

4.1.3 社会经济状况

2020 年，区域内总人口 1953.9 万人，地区生产总值 7032.3 亿元。黄河流域甘肃段是甘肃省政治、经济、文化中心，同时也是国家“两屏三带”生态安全战略格局的重要组成部分。但人均 GDP 连年低于全国平均水平，城乡发展差距过大，脆弱的生态基础与贫困问题盘根错节，使得黄河流域甘肃段发展水平底下，发展质量不高。

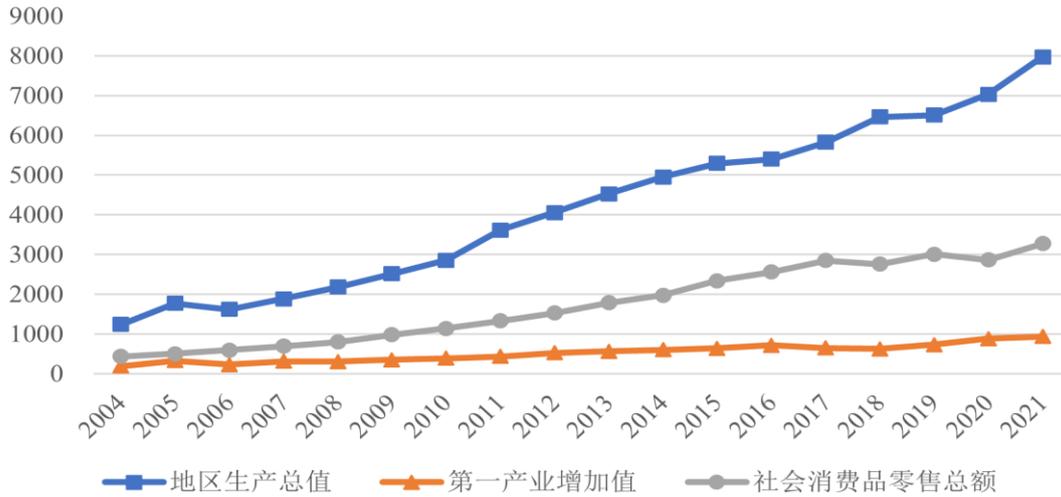


图 4.2 社会经济情况

从图 4.2 中可以看到黄河流域甘肃段从 2014 到 2021 年间经济得到了快速发展，2004 年地区生产总值仅为 1238.06 亿元，到 2021 年增长到 7968.79 亿元，增加为 2004 年的 6.44 倍。2004 年社会消费品零售总额仅为 429.77 亿元，从 2004 到 2017 年社会消费品零售总额得到了快速发展，2017 年社会消费品零售总额增长到 2843.53 亿元；2018 年到 2021 年社会消费品零售总额波动增长，增长速度放缓。但也可以看出黄河流域甘肃段整体经济发展水平依然较低，明显低于我国平均水平，第一产业增加值从 2014 到 2021 年始终小于 1000 亿元，低于全国平均水平，说明该地区产业发展速度较慢，农业基础薄弱。

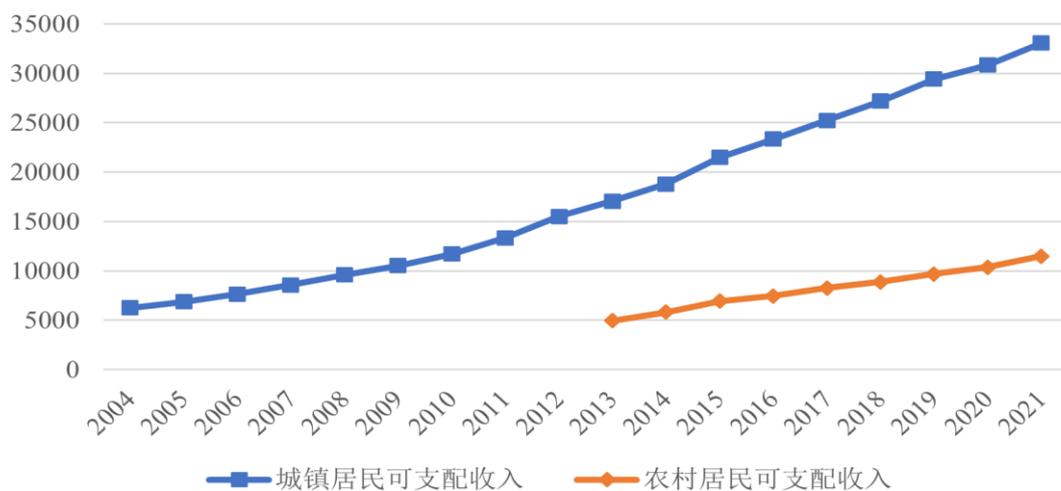


图 4.3 人民生活情况

从图 4.3 可以看出黄河流域甘肃段 2000-2021 年居民生活水平有了较快的发展。农村居民人均可支配收入从 4949.8 元增长到 11490.9 元,城镇居民可支配收入从 6239.5 元增长到 33068 元。黄河流域甘肃段居民生活水平也低于全国水平,2021 年全国城镇居民人均可支配收入高出黄河流域甘肃段 114344 元,2021 年全国农村居民可支配收入超出 7440.1 元。

从附表 1 以及图 4.2 与 4.3 可知,黄河流域甘肃段社会经济发展尚处于较低水平,且内部差异很大,其中兰州市所辖的城关区、七里河区、西固区、安宁区、红古区、永登县、皋兰县和榆中县是黄河流域甘肃段绝对的经济中心。2021 年生产总值达到 2650.8 亿元,占黄河流域甘肃段总体生产总值的 43.9%;城关区、七里河区、西固区、红古区的农村居民人均可支配收入均超过 2 万元,远远超过其他县区;城关区、七里河区、安宁区和西固区的城镇人均可支配收入是所有县区中最多的。广河县、东乡县和会宁县发展水平比较落后,2021 年地区总产值仅为 18 亿元,仅占研究区的总产值的 0.3%;2021 年东乡县农村居民人均可支配收入仅为 6390.6 元,会宁县城镇居民人均可支配收入为 20818.9 元,都明显低于研究区平均水平,分别比研究区平均农村和居民可支配收入低 4524.5 元和 8991.9 元。

4.2 数据来源

本论文使用的数据均来自国内外公开数据库,包括 2000、2010 及 2020 年土地利用/覆盖数据、数字高程模型(digital elevation model, DEM)、气象数据、社会经济数据等。其中,研究区矢量图来源于甘肃省自然资源厅标准地图服务网站下载的审图号为(甘 S(2022)3 号)标准地图通过 Adobe illustrator 制作,底图边界无修改;三期土地覆盖数据来源于 Globalland 30 全球地表覆盖数据(<http://www.globallandcover.com/>),精度为 30 m×30 m,通过经纬度寻找所需要的 N47_30、N47_35、N48_30、N47_35、N49_35,上述 5 个数据网格 2000、2010、2020 的三期遥感影像,然后将下载的 TIF 文件在 ArcGIS 10.8 中进行拼接,最后按照研究区矢量图使用按掩膜提取功能获得所需的三期土地数据;数字高程模型和归一化植被指数(NDVI)来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/#page1/3>);坡度因子使用 ArcGIS10.8 中的 3D 分析模块提取;年均气温、年均降水及 GDP 空间分布网格数据来自国家地球系统科学数

据中心 (<http://www.geodata.cn/>)；人口密度数据来源于 Worldpop 网站 (<http://www.worldpop.org/>)；其他社会经济数据来源于甘肃发展年鉴、兰州统计年鉴等；粮食产量数据来源于甘肃省统计年鉴和研究区各地市统计年鉴。

4.3 黄河流域甘肃段土地利用及变化分析

4.3.1 黄河流域甘肃段土地利用情况

将下载的黄河流域甘肃段 2000、2010 和 2020 年土地利用遥感数据，按照《土地利用分类》在 ArcGIS 10.8 中将土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地，计算出各个时点的每种土地利用类型的面积和面积占比，如表 4.1 和图 4.4 所示：

表 4.1 黄河流域甘肃段土地利用类型面积及占比

年份	项目	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
2000	面积/km ²	59344.7	18211.4	67605.2	1146.0	927.7	2980.9
	比例/%	0.40	0.12	0.45	0.01	0.01	0.02
2010	面积/km ²	59506.1	24485.1	60998.4	1478.2	967.2	2781.1
	比例/%	0.40	0.16	0.41	0.01	0.01	0.02
2020	面积/km ²	57693.0	25350.7	59150.2	1882.0	3207.8	2932.5
	比例/%	0.38	0.17	0.39	0.01	0.02	0.02

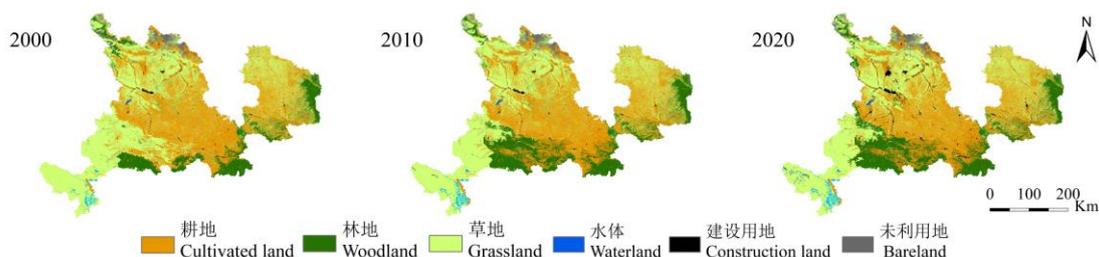


图 4.4 2000-2020 年黄河流域甘肃段土地利用情况

由表 4.1 和图 4.4 可以看出，耕地和草地是研究区最主要的用地类型，在整个研究期间内耕地和草地面积总占比超过了 75%，而林地和水体面积占比较低，这说明黄河流域甘肃段作为重要的生态建设区，可利用土地类型单一导致农牧业比重过大，急需进行保护与修复。在所有的用地类型中，草地面积占地最高，并呈现出逐年递减的趋势，从 2000 年的 67605.2 km² 下降到 2020 年的 59150.2 km²，一共减少了 8455.1 km²，其面积占比由 45% 下降到 41%。其次是耕地，约占总面

积的 40% 左右。与持续减少的草地面积不同,耕地面积及其占比在 2000 年到 2010 年间基本保持稳定,在 2010 年到 2020 年十年间有所减少,减少了 1813.0km²。除了草地、耕地之外的用地类型中林地和建设用地面积增加,分别从 18211.4km² 和 927.7km² 增长到 25350.7km² 和 3207.8km²,增加的林地主要分布于太子山天然林保护区、莲花山风景林保护区以及甘南州的卓尼县;建设用地面积增长迅速,2020 年面积是 2000 年的 3.5 倍,增加的建设用地主要分布于兰州市;水体面积缓慢增加从 2000 年的 1146.0km² 增加到 2020 年的 1882.0km²。

从 2000-2020 年三期整体土地利用整体情况来看,黄河流域甘肃段林地、水体和建设用地面积不断增加,其中林地和建设用地面积增加较多,林地面积增加 7139.3km²,建设用地面积增加 2280.1km²;耕地和草地面积降幅明显,未利用地基本保持不变。由于各县区的未利用地较少,面积变化不明显,因此本文仅分析了除未利用地以外的用地类型,详细情况见附表 2、3、4。

从附表 2、3、4 可知黄河流域甘肃段内部各县区土地利用类型面积各有不同,但大部分与研究区整体大部分比较相似。从整个研究区来看,草地和耕地是最主要的用地类型,三期占比均为 40% 左右,从其内部各县区用地类型来看林地集中于卓尼县、麦积区、岷县、合水县以及天祝县,占比较大,三期总占比均超过 45%,这说明林地集中于研究区南部与东部边缘,为黄河流域甘肃段提供了丰富的林地资源;而临夏市以及兰州市所辖的部分县区如安宁区、西固区林地面积几乎为 0,在这几个县区中西固区、安宁区最主要用地类型是草地,而且存在着草地迅速减少建设用地增加的现象;临夏市在近 20 年出现耕地减少且建设用地增加的现象,其他用地类型基本保持不变。

从其三期变化来看,各县区的变化趋势和研究区整体既有相同之处也有差异。从草地面积变化来看,在 2000-2010 年面积增长最多的是武威市天祝县,增长了 855.0km²,其余县区增长不明显,而甘南州卓尼县和临潭县、定西市的漳县和岷县草地面积出现大幅度减少,共减少 4217.8km²,2010-2020 年间天祝县、碌曲县、卓尼县和临夏县草地面积持续减少,而除安定区草地面积增加较大外,其余县区面积增长不明显,从整个研究区间来看,除天祝县、安定区和榆中县面积增加较为明显外,其余县区草地面积减少或基本不变。从林地变化来看,各县区面积情况各不相同,林地面积在 2000-2010 年间变化较为剧烈,面积的减少集中于

武威市天祝县，林地面积的增加集中于甘南州卓尼县和临潭县、定西市的漳县和岷县，面积变化均超过 600km²。在 2010-2020 年林地面积变化放缓，面积的增减均低于 300km²；相对于林地在各县区复杂且剧烈的变化相比，耕地面积变化在研究区各县区内比较平缓，除甘南州玛曲县和兰州市榆中县、永登县面积增、减变化均超过 100km² 外，其余县区基本保持不变；建设用地面积除在 2000-2010 年白银市会宁县、靖远县、景泰县还有兰州市永登县少数县区略有下降外，均出现不同程度增长，且在 2010-2020 年间兰州市的皋兰县、永登县和榆中县，白银市的靖远县增长幅度较大；水体面积在甘南州玛曲县出现了大幅度的增加，增加面积达 728.8km²，其余县区涨幅和降幅均不显著。

4.3.2 黄河流域甘肃段土地利用动态变化

单一土地利用类型动态度^[72]：

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (4-1)$$

式(4-1)中， K 为某一时段内某种土地利用类型动态度； U_a 和 U_b 分别为该时段开始与结束时某种土地利用类型的面积； T 为研究时段。

研究区土地利用类型动态度如下表：

表 4-2 土地利用变化面积及动态度

土地利用类型		耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
变化面积 (km ²)	00-10 年	161.4	6273.7	-6606.8	332.2	39.4	-199.8
	10-20 年	-1813.0	865.6	-1848.3	403.8	2240.6	151.4
	00-20 年	-1651.7	7139.3	-8455.1	736.0	2280.1	-48.4
动态度 (%)	00-10 年	0.03	3.4	-1.0	2.9	0.4	-0.7
	10-20 年	-0.3	0.4	-0.3	2.7	23.2	0.5
	00-20 年	-0.1	2.0	-0.6	3.2	12.3	-0.1

从表 4-2 可以看出：耕地总体动态度为-0.1%，但从 00-10 年、10-20 年两个时段的动态度可以看出耕地在 2000-2010 年缓慢增加在 10-20 年快速减少，减少速度是 00-10 年的 10 倍。耕地减少的原因在于退耕还林、退耕还草政策实施以及城镇化建设导致耕地被草地、林地和建设用地挤占。林地的总动态度为 2.0%，但从 2000-2010 年动态度以及 2010-2020 年动态度可以看出林地在 2000-2010 年增长速度较快，2010-2020 年增长速度变慢，动态度减少为 0.4%。可见在退耕还林以及生态保护区建设的政策干预下，林地资源得到了较好的保护。草地动态度

在相关研究期间均保持负数，呈现出不断减少的态势，草地面积的不断减少可能有三方面的原因，第一，在环境保护政策的影响下，部分草地生态系统跃迁为森林生态系统；第二，部分农牧民受传统观念影响，草地超载严重；第三，城镇的不断扩张侵蚀着草地。以上原因都导致了研究区近 20 年来草地面积的不断下降。水体动态度始终保持较高水平，而增加的水体面积又集中于甘南州，由此可知，针对甘南黄河上游水源涵养区加强管控、恢复湿地水源涵养能力的举措取得了一定的成效。建设用地总动态度在所有地类中是最大的，为 12.3%，特别是 2010-2020 年达到了 23.2%。未利用地由于自身面积较少，对整体几乎没有影响。

4.3.3 黄河流域甘肃段土地利用转移矩阵

计算公式如下^[73]：

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{1n} \\ A_{21} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

式(4-2)中， A_{ij} 为土地利用类型面积； n 为土地利用类型数量； i 和 j 为转移前后的土地利用类型。

2000-2010 年、2010-2020 年和 2000-2020 年土地利用转移矩阵如表 4.3 所示：

表 4.3 黄河流域甘肃段土地利用类型转移矩阵

年份	用地类型	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
2000 至 2010	耕地	55691.9	863.0	2465.1	79.2	194.6	46.3
	林地	354.9	16006.1	1837.9	4.4	1.9	2.6
	草地	2926.1	7446.6	56224.8	508.5	31.5	460.2
	水体	137.4	7.4	92.4	902.2	3.8	1.3
	建设用地	168.8	3.3	15.8	1.2	736.2	2.4
	未利用地	44.4	15.5	640.0	0.0	0.1	2280.0
2010 至 2020	耕地	53849.8	1073.3	2344.0	109.9	1992.9	32.3
	林地	946.3	21712.3	1667.5	13.6	36.1	6.3
	草地	2755.2	2565.4	54556.0	324.0	291.4	499.0
	水体	52.1	5.9	44.0	1357.3	8.6	9.2
	建设用地	91.3	8.3	7.3	2.4	857.3	0.5
	未利用地	73.4	6.9	262.5	48.3	18.9	2370.4
2000 至 2020	耕地	52830.1	1320.6	2956.7	128.5	2051.8	53.4
	林地	496.3	15339.2	2335.9	8.9	15.9	11.1
	草地	4019.1	8652.2	53204.8	837.3	329.0	558.4
	水体	127.1	8.0	84.0	900.0	13.9	11.6
	建设用地	123.4	7.3	13.1	2.8	778.9	2.1

2000-2020年,研究区土地利用类型发生了明显变化。2000-2010年,耕地转出面积为 3648.2km^2 ,转入面积为 3631.5km^2 ,耕地面积基本保持不变,主要转化为草地和林地;林地的转出面积为 2201.7km^2 ,转入面积为 8335.7km^2 ,变化显著,增加的林地面积主要来源于草地,原因在于政府大力推行生态功能区建设导致了草地向林地转化;草地是最主要的转出类型,转出面积达 11372.9km^2 ,主要转向林地,转入面积为 5051.3km^2 ,主要来源于耕地和林地;水体转出面积为 242.2km^2 ,转入面积为 593.3km^2 ,增加的面积主要来自草地;建设用地和未利用地基本保持不变。在2010-2020年,耕地转出面积为 5552.4km^2 ,转入面积为 3918.4km^2 ,主要转出为草地和建设用地,同时也有林地和草地转入;林地转出面积 2669.8km^2 ,转入面积为 3659.8km^2 ,相比2000-2010年变化有所缓和,增加的面积主要来源于耕地和草地;草地是最主要的转出类型,转出面积 6435.0km^2 ,主要向耕地和林地转化;增加的水体面积主要来源耕地和草地,两者合计转入面积达 433.9km^2 ,占全部转入面积的87.1%;建设用地增加明显,转出面积为 109.9km^2 、转入面积为 2347.9km^2 ,转入面积是转出面积的21.4倍,由耕地转入的面积达到 1992.9km^2 ,这说明城市进入了高速增长期,且占用耕地严重。未利用地转出比转入面积多 151.4km^2 ,主要转入来源是草地,这说明草地依旧存在沙化、荒漠化问题。

2000-2020年,在整个研究期间,土地利用类型的转出以草地转为林地为主,天子山、莲花山等保护区对生态环境的优化是草地转化为林地的主要因素,其次是草地转为耕地,这与研究区不断增加的人口压力相关。转入面积最多的是林地,在2000-2010年期间的转入量大于2010-2020年,其次2010-2020年建设用地面积涨幅大于2000-2010年,这说明2010年以后黄河流域甘肃段社会经济进入快速发展期,因此放缓了生态建设的步伐。值得注意的是,建设用地增加主要来源于耕地,这表明黄河流域甘肃段城市化的主要扩张手段为对耕地的占用,这种方式将会导致为对原有生态系统的破坏以及对生物多样性造成不利影响。这样通过牺牲耕地的生态系统服务价值来满足社会经济发展的需求,可能会对生态环境造成的难以修复的不良影响。在未来的城镇化道路上,需特别关注耕地保护和城市建设二者的平衡,以防止生态环境进一步恶化,实现可持续发展。

4.4 本章小结

研究发现：（1）从三期土地利用情况及其变化来看，耕地和草地是研究区最主要的用地类型，在整个研究期间内耕地和草地面积总占比超过了 75%，其中草地的占比最大，占总面积的 40%左右。然后占比依次是耕地、林地、未利用地、建设用地、水体。其中，建设用地、林地、水体面积在 2000-2020 年逐年增多，建设用地面积增加最多，草地面积逐年减少，耕地和未利用地呈现波动下降趋势。黄河流域甘肃段各县区用地类型的面积变化除个别县区在不同程度上与黄河流域甘肃段整体土地利用变化有差异外，其余县区用地情况均与整体相似。（2）建设用地变化最明显，总体动态度为 12.3%，且 2000-2010 年增长速度较慢，在 2010-2020 年增长速度较快，2010-2020 年动态度增加到 23.2%。水体、林地总体动态度分别为 3.2%、2%，二者均在 2000-2010 年增速快，2010-2020 年增速慢。草地总体动态度为-0.6%，草地始终保持减少态势。耕地和未利用地总体动态度均为-0.1%，且均为波动下降，但草地面积为先增后减，未利用地面积先减后增。草地总体动态度为-0.6%，2000-2010 年变化较剧烈。（3）土地利用类型转化以草地为主，草地面积大多转化为林地，在 2000-2010 年大于 2010-2020 年转化量；其次变化量比较多的用地类型是耕地转化为草地和建设用地，在 2010-2020 年变化量远远大于 2000-2010 年；期间还有部分耕地转变为草地，草地转变为未利用地，这表明耕地存在过度开垦从而导致土地荒漠化的现象。

5 黄河流域甘肃段生态系统服务价值测算及时空演变分析

5.1 生态系统服务测算方法

5.1.1 生态系统服务价值测算方法选择

通过综合分析前人关于黄河流域甘肃段生态系统服务价值评估方法,本研究选择当量因子法作为黄河流域甘肃段生态系统服务价值评估的核心方法。功能价值法虽然在单一或较小区域的生态系统服务价值评估中显示出其系统性和科学性,通过直接市场法、替代市场法和支付意愿法等多种手段,能够较为精确地反映特定服务的经济价值。然而,该方法在应对黄河流域甘肃段这种大范围复合生态系统时,面临操作复杂、变量选择多样且缺乏统一评估标准的问题,导致评估过程繁琐且易于忽视某些生态服务,从而影响评估的全面性和准确性。

当量因子法根据大量学者的研究成果,采用预设的当量因子将生态系统服务功能直接转换为经济价值,其评估过程清晰、变量全面,并遵循统一的评估标准。这种方法不仅简化了评估操作,还增强了评估的可行性和准确性。尤其是在评估如黄河流域甘肃段这样的大区域复合生态系统时,能够有效涵盖和评估区域内各类生态系统服务,确保评估结果的全面性和一致性。因此,文献分析明确表明,当量因子法因其在评估过程的标准化、系统化以及高度的实践适用性,在处理跨越多种地形地貌的大区域复合生态系统评估中,比功能价值法更为适宜。

因此,本文当使用当量因子法作为黄河流域甘肃段生态系统服务价值评估的方法,这一方法不仅能确保评估过程的准确性和可靠性,还能够体现出对大区域复合生态系统服务价值评估的全面性和一致性,显著优于功能价值法。

5.1.2 生态系统服务价值当量确定

本文参考参照“千年生态系统评估”(Millennium Ecosystem Assessment, MA)的分类方法,将生态系统服务划分为四类:调节服务、支持服务、文化服务和供给服务。生态服务当量表参照“中国生态系统单位面积生态系统服务价值当量表”(谢高地等, 2003)并参考孙兴辉等(2019)进行修正^[74],确定研究区生态系统服务价值当量因子表,研究区生态系统服务价值当量因子指的

是不同类型生态系统单位面积上各类服务功能的年均价值当量，如下表所示：

表 5.1 黄河流域甘肃段单位面积生态服务当量因子

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
供给功能	食物生产	1.0	0.3	0.4	0.5	0.0	0.2
	原材料生产	0.4	3.0	0.4	0.4	0.0	0.2
	气体调节	0.7	4.3	1.5	0.5	0.0	0.8
调节功能	气候调节	1.0	4.1	1.6	2.1	0.0	0.9
	水文调节	0.8	4.1	1.5	18.8	0.0	0.8
	废物处理	1.4	1.7	1.3	14.9	0.0	0.8
支持功能	保持土壤	1.5	4.0	2.2	0.4	0.0	1.2
	维持生物多样性	1.0	4.5	1.9	3.4	0.4	1.1
文化功能	提供美学景观	0.2	2.1	0.9	4.4	0.4	0.6
	合计	7.9	28.1	11.7	45.4	0.7	6.6

5.1.3 单位面积生态系统服务价值测算

单位面积生态系统服务价值当量通过参照谢高地测算出的我国陆地生态系统服务价值当量因子经济价值为并参考曾杰等（2014）^[75]、吴翠霞等（2022）^[76]进行修正，具体方法如下：

$$V = E_a \times \left(\frac{y'}{y} \right) \quad (5-1)$$

式中， V （元/ hm^2 ）为黄河流域甘肃段单个生态服务当量因子的价值； E_a 为我国单个生态服务当量因子的价值，即 449.1 元· hm^{-2} （谢高地等，2008）； y' 和 y 分别为 2000—2020 年间各年份的黄河流域甘肃段与全国耕地的平均粮食单产。

考虑到数据的可获得性，本研究获得了 2000-2020 年黄河流域甘肃段九个市和全国的耕地单位面积粮食单产，并求出其平均值，得到研究区平均粮食单产为 3184.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，全国粮食单产为 5017.1 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。最后根据公式最后得到 2000-2020 年研究区每个当量因子的经济价值为 285.1 元· hm^{-2} 。通过研究区生态系统服务价值当量因子表和每个当量因子的经济价值即可得到各项服务功能的生态系统服务价值系数，计算公式如下：

$$VC_{ij} = \sum e_{ij} V \quad (5-2)$$

式中， VC_{ij} 表示第 i 类用地类型中第 j 种生态服务价值系数（元/公顷）， e_{ij} 表示第 i 类用地类型中第 j 种生态服务当量， V 表示黄河流域甘肃段单个生态服务当量因子的价值，结果如下表：

表 5.2 黄河流域甘肃段单项生态服务价值系数（元/公顷）

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地
供给功能	食物生产	285.1	94.1	122.6	151.1	0.0	65.6
	原材料生产	111.2	849.5	102.6	99.8	0.0	57.0
调节功能	气体调节	205.3	1231.5	427.6	145.4	0.0	222.4
	气候调节	276.5	1160.3	444.7	587.3	0.0	242.3
	水文调节	219.5	1166.0	433.3	5351.0	0.0	228.1
支持功能	废物处理	396.3	490.3	376.3	4233.4	0.0	225.2
	保持土壤	419.1	1146.0	638.6	116.9	0.0	344.9
文化功能	维持生物多样性	290.8	1285.7	533.1	977.8	105.5	325.0
	提供美学景观	48.5	593.0	248.0	1265.8	105.5	159.6

5.1.4 生态系统服务价值测算模型

根据表 5.2 和研究区不同用地类型面积，按照公式 5-3、5-4 估算黄河流域甘肃段生态服务价值。

$$ESV = \sum VC_i M_i \quad (5-3)$$

$$ESV_i = \sum VC_{ij} M_i \quad (5-4)$$

式 5-3、5-4 中， ESV 表示生态服务价值， M_i 表示第 i 种用地类型面积， VC_i 表示第 i 类用地类型生态服务价值系数， ESV_i 表示第 i 类用地类型服务价值， VC_{ij} 表示第 i 类用地类型中第 j 种生态服务价值系数。

5.2 黄河流域甘肃段生态服务价值时空演变分析

5.2.1 黄河流域甘肃段生态系统服务总价值时空演变分析

使用前文表 4.2 黄河流域甘肃段不同用地类型面积以及表 5.1 生态服务价值系数，根据公式 5.3 可以计算出 2000-2020 年研究区生态服务价值及变化量，如下表：

表 5.3 2000-2020 年研究区不同用地类型生态服务价值及其变化（亿元）

土地类型	生态服务价值（亿元）		
	2000 年	2010 年	2020 年
耕地	133.7	134	129.9
林地	146	196.3	203.2
草地	224.9	202.9	196.8
水体	14.8	19.1	24.3
建设用地	0.2	0.2	0.7

续表 5.3

土地类型	生态服务价值 (亿元)		
	2000 年	2010 年	2020 年
未利用地	5.6	5.2	5.5
合计	525.2	557.7	560.4

表 5.4 2000-2020 年研究区不同用地类型生态服务价值变化量及变化率

土地类型	2000 年-2010 年变化		2010 年-2020 年变化		2000-2020 年变化	
	价值 (亿元)	变化率 (%)	价值 (亿元)	变化率 (%)	价值 (亿元)	变化率 (%)
耕地	0.4	0.3	-4.1	-3.1	-3.7	-2.8
林地	50.3	34.5	6.9	3.5	57.2	39.2
草地	-22	-9.8	-6.1	-3.0	-28.1	-12.5
水体	4.3	29.1	5.2	27.2	9.5	64.2
建设用地	0	0.0	0.5	250.0	0.5	250.0
未利用地	-0.4	-7.1	0.3	5.8	-0.1	-1.8
合计	32.6		2.7		35.3	

结合表 5-3 与表 5-4，可以得出如下结论：

(1) 耕地生态服务价值变化分析

在 2000 年-2020 年间耕地生态系统服务价值有所下降，变化率为-2.8%共减少了 3.7 亿元，是减少第二多的用地类型。在 2000 年-2010 年期间，耕地生态服务价值变化幅度较小变化率仅为 0.3%，2010 年-2020 年间耕地生态服务价值减少 4.1 亿元；

(2) 林地生态服务价值变化分析

林地生态服务价值在研究期间保持增加，且增速放缓。在 2000 年-2020 年间增加了 57.2 亿元，是增加最多的土地利用类型。但由于林地价值基数较大，所以变化率只排到第三，为 39.2%。在 2000 年-2010 年间林地生态系统服务价值增加了 50.3 亿元、变化率为 34.5%均为所有地类中最高，2010 年-2020 年间增加 6.9 亿元；

(3) 草地生态服务价值变化分析

草地的生态系统服务价值在 2000 年-2020 年间呈现出波动下降趋势，变化幅度不大，变化率为-12.5%，共减少了 28.1 亿元。在 2000 年-2010 年草地生态

服务价值下降较多,共减少 22 亿元,变化率为-9.8%,在 2010 年-2020 年期间减少 6.1 亿元,变化率为 3%,变化幅度较 2000 年-2010 年间放缓;

(4) 水体生态服务价值变化分析

水体的生态服务价值在整个研究期间变化率保持较高,但变化量较小。由表 5.2 可知水体的生态服务经济价值系数为 1265.8 元/公顷,远远高于其他用地类型,而且研究区水体面积基数较小,面积变化率较大。因此水体服务价值始终保持较高速度的增加主要原因在于水体面积变化率较大。在 2000 年-2020 年间变化率达到了 64.2%,是所有用地类型中第二高,但变化量仅为 9.5 亿元,在 2000-2010 和 2010 年-2020 年间变化率分别为 29.1%和 27.2%,均保持较高水平;

(5) 建设用地生态服务价值变化分析

建设用地生态服务价值变化与水体生态服务价值变化相似,都是变化率高而变化量低。在 2000 年-2010 年建设用地生态服务价值基本不变变化量和变化率均为 0,在 2010 年-2020 年迅速增加,变化率达到了 250%是所有用地类型中最高;

(6) 不同用地类型总生态服务价值变化分析

由表 5.3、5.4 可以看出。黄河流域甘肃段耕地、林地和草地提供的生态服务价值超过了总价值的 90%,在 2000-2010 年间增加了 28.6 亿元,在 2010-2020 年间呈下降趋势,下降了 3.3 亿元。在 2000-2010 年间,总体生态服务价值增加了 32.5 亿元,变化率最高的是林地 34.5%,由于耕地、林地和草地总面积增加,所以总生态服务价值也有所增加。在 2010-2020 年间生态服务价值总量增加了 2.7 亿元,其中变化率最高的是建设用地,增加量最大的是林地。林地面积的增加弥补了耕地和草地面积减少造成的价值损失。不同用地类型所提供的生态服务价值主要取决于各用地类型面积,而水体和林地所能提供的单位面积生态系统服务价值较高,建设用地提供的生态系统服务价值远远低于其他类型,因此在发展过程中要严格限制建设用地的无序扩张,保护林地和水体生态系统的完整性是构建黄河流域甘肃段生态引领区的关键。

5.2.2 黄河流域甘肃段单项生态系统服务价值时空演变分析

使用前文表 4.1 黄河流域甘肃段不同用地类型面积和表 5.2 单项生态服务价值系数,根据公式 5-4 可以计算出研究区单项生态服务价值及其变化量,如表 5.5、5.6 所示:

表 5.5 2000-2020 黄河流域甘肃段单项服务功能价值 (亿元)

一级类型	二级类型	2000 年		2010 年		2020 年	
		单项	合计	单项	合计	单项	合计
供给功能	食物生产	27.3	56.6	27.2	61.1	26.6	60.9
	原材料生产	29.3		34.0		34.4	
调节功能	气体调节	64.3	267.1	69.3	284.8	69.3	287.5
	气候调节	69.0		73.5		73.5	
	水文调节	70.4		76.6		78.6	
	废物处理	63.4		65.4		66.2	
支持功能	保持土壤	90.1	169.0	93.1	176.8	92.2	176.3
	维持生物多样性	78.9		83.7		84.0	
文化功能	提供美学景观	32.5	32.5	34.9	34.9	35.7	35.7

表 5.6 2000-2020 黄河流域甘肃段单项服务功能价值变化量 (亿元)

一级类型	二级类型	2000-2010 年		2010-2020 年		2000-2020 年	
		单项	合计	单项	合计	单项	合计
供给功能	食物生产	-0.1	4.6	-0.6	3.4	-0.7	4.4
	原材料生产	4.7		0.4		5.1	
调节功能	气体调节	4.9	17.6	0.0	2.8	4.9	20.4
	气候调节	4.5		0.0		4.5	
	水文调节	6.2		2.0		8.2	
	废物处理	2.0		0.8		2.8	
支持功能	保持土壤	3.0	7.9	-0.8	2.2	2.2	7.3
	维持生物多样性	4.9		0.3		5.1	
文化功能	提供美学景观	2.5	2.5	0.7	0.7	3.2	3.2

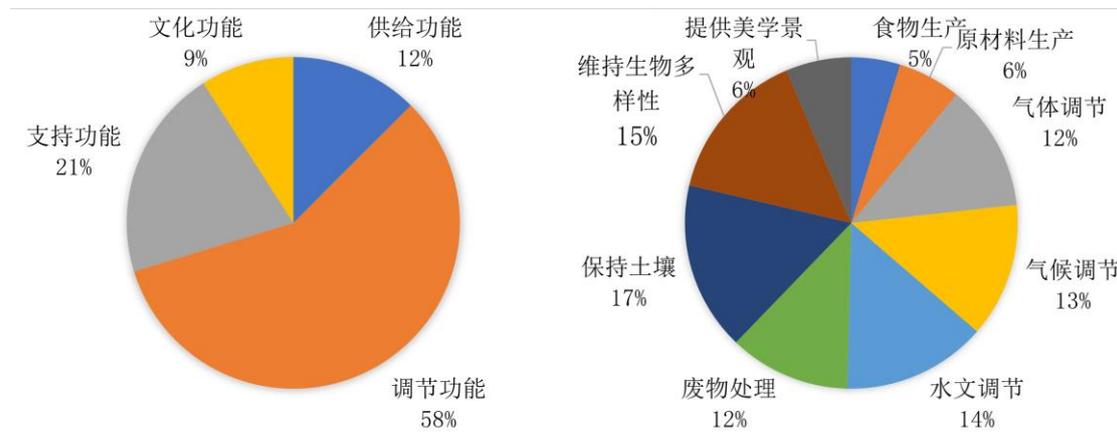


图 5.1 2020 年单项服务功能价值占比

黄河流域甘肃段单项服务功能价值及变化量测度结果如表 5.5、5.6 和图 5.1 所示。从四项一级类型服务来看，调节服务提供的生态系统服务价值最高，2020 年达到了 287.5 亿元，占总生态系统服务价值的 58%。提供支持服务的生态系统服务价值较高，提供了 176.3 亿元的服务价值，占总生态系统服务价值的 21%。供给功能和文化功能提供的生态系统服务价值较少，一共提供了 21% 的生态系统服务价值。从四种服务功能的变化情况可以看出，四种服务价值在研究期间变化量均为正，且服务价值增加量也是调节功能最大，其次是支持功能和供给功能，文化功能增加最少。

从以上 9 种二级类型服务可以看出，在 2020 年保持土壤功能最高，提供了 92.2 亿元的生态服务价值，维持生物多样性、水文调节、气候调节、气体调节和废物处理较多，生态服务价值分别为 84.0 亿元、78.6 亿元、73.5 亿元、69.3 亿元和 66.2 亿元，这五项生态服务价值占总价值的比重为 66%。食物生产提供的生态系统服务价值较少，仅占 5%，美学景观和原材料生产提供的价值均占 6%。从时序变化来看，2000-2020 年间仅食物生产的生态系统服务价值下降之外，其他八种服务的生态系统服务价值均在上升。其中，水文调节的生态系统服务价值增加了 8.2 亿元，随后依次是原材料生产、维持生物多样性、气体调节、气候调节、提供美学景观、废物处理，分别提供 5.1 亿元、5.1 亿元、4.9 亿元、4.5 亿元、3.2 亿元、2.8 亿元，土壤保持功能提供的生态系统服务价值最少，仅 2.2 亿元。

食物生产服务功能减少主要是因为耕地、草地和水体生态系统服务价值系数较大，都是提供食物生产服务的主要用地类型，且耕地面积和草地面积减少量远远超过水体面积的增加量，从而导致了这一现象。原材料生产、气体调节、气候调节、水文调节和废物处理都是在 2000-2010 年的增长量高于 2010-2020 年增长量，这主要是因为以上服务功能主要是由林地和水体提供，而林地面积在 2000-2010 年增长速度明显高于 2010-2020 年。保持土壤服务在 2000-2010 年增长在 2010-2020 年减少，这主要是由于提供该服务的耕地和草地面积在 2010-2020 年减少幅度较大虽然水体面积的增加对土壤保持功能造成了一定的正向影响，但这影响不足以抵消耕地和草地的负面影响。维持生物多样性和提供美学景观功能始

始终保持增长，在前十年增长比后十年快，这也是受到了研究区林地和水体变化情况的影响。

5.3 各县区生态系统服务价值时空演变分析

5.3.1 各县区生态系统服务总价值时空演变分析

根据黄河流域甘肃段各县区用地面积和表 5.1 黄河流域甘肃段生态服务价值系数可计算得到各县区生态系统服务价值，如表 5.7 和图 5.2 所示：

表 5.7 2000-2020 年各县区生态服务价值及变化量（亿元）

名称	2000年	2010年	2020年	2000-2010年	2010-2020年	2000-2020年
安定区	10.1	10.1	9.3	0	-0.8	-0.8
安宁区	0.2	0.2	0.2	0	0	0
白银区	4.3	4.3	4.0	0	-0.3	-0.3
城关区	0.6	0.5	0.4	-0.1	-0.1	-0.2
崇信县	3.9	3.9	3.8	0	-0.1	-0.1
东乡县	4.6	4.6	4.7	0	0.1	0.1
甘谷县	4.6	4.9	4.9	0.3	0	0.3
皋兰县	7.8	7.7	7.2	-0.1	-0.5	-0.6
广河县	1.4	1.4	1.3	0	-0.1	-0.1
合水县	17.5	17.8	17.5	0.3	-0.3	0
合作市	6.9	9.4	9.9	2.5	0.5	3
和政县	3.1	3.9	4.3	0.8	0.4	1.2
红古区	1.7	1.6	1.6	-0.1	0	-0.1
华池县	14.4	14.6	14.3	0.2	-0.3	-0.1
华亭市	5.5	5.5	5.4	0	-0.1	-0.1
环县	27.2	27.5	27.1	0.3	-0.4	-0.1
会宁县	15.2	15.2	14.5	0	-0.7	-0.7
积石山县	2.5	2.5	3.1	0	0.6	0.6
泾川县	5.8	5.7	5.5	-0.1	-0.2	-0.3
景泰县	15.0	14.7	14.7	-0.3	0	-0.3
靖远县	16.0	15.8	15.4	-0.2	-0.4	-0.6
静宁县	5.6	5.6	5.5	0	-0.1	-0.1
康乐县	2.5	3.3	3.4	0.8	0.1	0.9
崆峒区	6.6	6.5	6.4	-0.1	-0.1	-0.2
临潭县	5.0	8.8	8.8	3.8	0	3.8
临洮县	7.9	7.8	7.6	-0.1	-0.2	-0.3
临夏市	0.2	0.2	0.1	0	-0.1	-0.1
临夏县	3.3	3.5	4.7	0.2	1.2	1.4

续表5.7

名称	2000年	2010年	2020年	2000-2010年	2010-2020年	2000-2020年
灵台县	9.5	9.9	9.7	0.4	-0.2	0.2
陇西县	5.9	6.4	6.3	0.5	-0.1	0.4
碌曲县	15.7	15.2	16.8	-0.5	1.6	1.1
玛曲县	38.5	41.5	45.3	3	3.8	6.8
麦积区	21.5	22.0	21.8	0.5	-0.2	0.3
岷县	16.7	20.4	20.2	3.7	-0.2	3.5
宁县	11.9	12.1	11.8	0.2	-0.3	-0.1
平川区	6.0	6.0	5.8	0	-0.2	-0.2
七里河区	1.0	1.0	1.1	0	0.1	0.1
秦安县	3.8	3.9	3.8	0.1	-0.1	0
秦州区	10.4	11.2	11.1	0.8	-0.1	0.7
清水县	8.3	9.2	9.1	0.9	-0.1	0.8
庆城县	7.8	7.9	7.7	0.1	-0.2	-0.1
天祝县	29.3	26.3	27.3	-3	1	-2
通渭县	7.3	7.4	7.2	0.1	-0.2	-0.1
渭源县	5.4	7.0	7.1	1.6	0.1	1.7
武山县	7.5	9.8	9.7	2.3	-0.1	2.2
西峰区	3.0	3.1	2.9	0.1	-0.2	-0.1
西固区	1.0	1.0	1.0	0	0	0
夏河县	21.3	22.1	22.9	0.8	0.8	1.6
永登县	16.8	16.5	16.7	-0.3	0.2	-0.1
永靖县	6.2	6.2	6.3	0	0.1	0.1
榆中县	9.7	9.7	9.2	0	-0.5	-0.5
张家川县	5.0	5.2	5.1	0.2	-0.1	0.1
漳县	7.0	12.0	12.0	5	0	5
镇原县	9.2	9.3	9.1	0.1	-0.2	-0.1
正宁县	6.7	6.9	6.8	0.2	-0.1	0.1
庄浪县	4.4	4.4	4.3	0	-0.1	-0.1
卓尼县	28.6	35.6	37.0	7	1.4	8.4



图 5.2 2000-2020 年各县区生态系统服务总价值

由表 5.7 可得, 玛曲县的生态系统服务价值最高, 2020 年生态系统服务价值为 45.3 亿元, 占 2020 年研究区生态总价值的 8.1%; 安宁区的生态系统服务价值最低, 2020 年仅为 0.2 亿元, 占 2020 年研究区生态总价值的 0.03%。

从不同研究时期来看, 2000-2010 年研究区总生态系统服务价值增加了 31.6 亿元, 但是有 8 个县区生态系统服务价值减少, 其余县区均为增加。增加的县区中, 增加最多的是卓尼县, 增加了 7.0 亿元, 占研究区总增加值的 22.2%。此外, 增加较多的是漳县、临潭县、岷县、玛曲县以及甘南州合作市分别增加了 5.0 亿元、3.8 亿元、3.7 亿元、3.0 亿元以及 2.5 亿元, 这五个县区总共增加了 18.0 亿元, 占增加总额的 57.0%。在增加的其余县区中武山县增加最多, 增加了 2.3 亿元。在减少的县区中, 天祝县减少最多, 减少了 3 亿元, 其余 10 个县区减少较少, 合计减少 1.9 亿元。

2010-2020 年间, 黄河流域甘肃段总生态系统服务价值增速放缓, 仅增加了 3.7 亿元, 其中 12 个县区增加, 7 个县区保持不变, 其余 35 个县区生态系统服务价值有所减少。增加最多的是玛曲县, 增加了 3.8 亿元。然后增加较多的依次为碌曲县 (1.6 亿元)、卓尼县 (1.4 亿元)、临夏县 (1.2 亿元)、天祝县 (1.0 亿元) 与夏河县 (0.8 亿元)。减少最多的是安定区, 减少了 0.8 亿元。然后减少较多的依次是会宁县 (0.7 亿元)、皋兰县 (0.5 亿元)、榆中县 (0.5 亿元)、靖远县 (0.4 亿元) 和环县 (0.4 亿元)。

在整个研究期间, 研究区生态系统服务价值增加了 35.3 亿元, 说明研究区整体的生态服务都在朝着一个更加可持续的方向发展。研究区内部各县区变化各不相同, 25 个县区增加, 28 个县区减少。由此可以看出研究区内部情况差别较大, 原因在于研究区内部生态禀赋存在着明显差别, 林地、水体等生态资源丰富的用地类型集中于研究区的东部、南部还有西北部的边缘县区, 从而导致甘南、天水以及庆阳提供的生态服务价值较高。具体来看, 增加最多的是卓尼县, 共增加 8.4 亿元, 在 2000-2010 年增加 7 亿元, 在 2010-2020 年仅增加了 1.4 亿元, 主要原因在于然后依次是玛曲县 (6.8 亿元)、漳县 (5 亿元)、临潭县 (3.8 亿元)、岷县 (3.5 亿元) 以及合作市 (3 亿元), 而且卓尼县和玛曲县的生态系统服务价值始终保持增长, 这说明甘南州作为黄河上游重要的水源涵养区通过不断推进生态环境治理, 取得了一定的成绩; 而减少的县区中仅天祝县较少较明显, 减少了

2 亿元，而其余减少的县区，减少的生态系统服务价值均少于 1 亿元，其他生态系统服务价值减少较多县区依次是安定区（0.8 亿元）、会宁县（0.7 亿元）、皋兰县（0.6 亿元）、靖远县（0.6 亿元）和榆中县（0.5 亿元）。

5.3.2 各县区生态系统服务总价值空间格局分析

为了更好的描述黄河流域甘肃段生态系统服务价值的空间格局，通过 GeoDa 的空间自相关功能计算出 2000 年、2010 年、2020 年三期生态系统服务价值空间分布的全局 Moran's I 指数，为了排除各县区面积对生态系统服务价值造成空间影响，这里的空间分析使用地均生态系统服务价值。Moran's I 指数可以反映空间相邻或相近单元属性值的相似程度，计算公式如下^[77]：

$$I = \frac{n \sum_i \sum_j \omega_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{(\sum_{i \neq j} \omega_{ij}) \sum_i (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5-5)$$

式(4)中， Y_i 和 Y_j 为相邻配对空间单元的取值； ω_{ij} 为空间权重矩阵； \bar{Y} 为属性值的平均值。I 的取值范围为[-1, 1]，当 $I > 0$ 时，表示研究单元的观测值呈空间聚集，即空间正相关；当 $I < 0$ 时，表示观测值呈空间离散，即空间负相关；当 $I = 0$ 时，表示空间不相关。

LISA 指数可以反映某区域与相邻区域间属性值的相关性，计算公式如下^[78]：

$$I_i = \frac{Y_i - \bar{Y}}{S^2} \sum_{j \neq i}^{n'} \omega_{ij} (Y_j - \bar{Y}) \quad (5-6)$$

$$S^2 = \frac{1}{n'} \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (5-7)$$

式(5)—(6)中， n' 为样本量，即研究单元的数量； S^2 为样本方差。 I_i 的取值范围为[-1, 1]，当 $I_i > 0$ 时，表示高—高(HH 型)或低—低(LL 型)聚集；当 $I_i < 0$ 时，表示高值包低值(LH 型)或低值包高值(HL 型)聚集；当 $I_i = 0$ 时，表示无关联。

结果发现，各 Moran 散点图（见附图 1）基本都分布在一、三象限，二、四象限都很少，各期的生态系统服务价值空间分布的全局 Moran's I 指数均大于 0，且都在 1% 的显著性水平下显著，均呈现出空间正相关，可以知道黄河流域甘肃段生态系统服务价值呈现空间正相关分布，高值区域与低值区域均趋于集聚。三期莫兰指数在 2000-2010 年从 0.328 上升到 0.434，在 2010-2020 年由 0.434 增加到 0.436。可以看出 2000 年到 2020 年研究区生态系统服务价值空间自相关始终在增强，但是 2010 年到 2020 年增速加快较快。这可能是由于国家大力实施退耕

还林还草、封山育林、草畜平衡等一系列生态保护与恢复工程保证了甘南州、陇南市林地连片扩张,而且城市规划也让建设用地和耕地在人口密集区和经济中心区如兰州市集中扩张,而在其他地市增长缓慢。最后导致生态系统服务价值较高的林地和水体和生态系统服务价值较低的建设用地和耕地分别在空间上集聚,结果就是空间相关性明显增强^[79]。

表 5.8 黄河流域甘肃段各县区生态系统服务价值全局空间自相关分析

	2000 年	2010 年	2020 年
<i>Moran' s I</i>	0.328	0.434	0.436

使用 GeoDa 软件对黄河流域甘肃段 2000 年、2010 年、2020 年三期的生态系统服务价值进行局部空间自相关测算。由图 5.3 可知在 2000-2020 年间局部自相关情况发生了显著变化。在 2000 年低低聚集最主要的聚类类型,主要分布在临夏、兰州和白银市的部分县区,这些县区人类活动频繁,用地类型以耕地和建设用地为主,提供的生态系统服务价值较低,高高聚集只存在于庆阳市宁县。2010 年聚集布局发生了较大的变化,低低聚集区域在原有基础上向白银市方向扩张,增加了白银市的白银区、靖远县和平川区;高高聚集区出现在甘南、定西和天水部分县区。原因在于低低聚集区主要分布在人口聚集区,由于高污染、高开采的人为活动干扰,导致地表植被破坏,严重影响了生态系统的结构完整性,制约了生态系统服务功能的有效发挥。加之城镇化进程中,建设用地的不断扩张以及交通运输业的快速发展造成连片的草地、耕地被占用导致生态系统压力增加,抵抗力与恢复力下降,使低低聚集区扩张;而高高聚集区的出现则说明国家大力实施退耕还林还草、封山育林、草畜平衡等一系列生态保护与恢复工程使得研究区南部边缘草地向林地转化,提供的生态系统服务价值迅速增加。2010-2020 年间局部自相关格局基本保持不变。

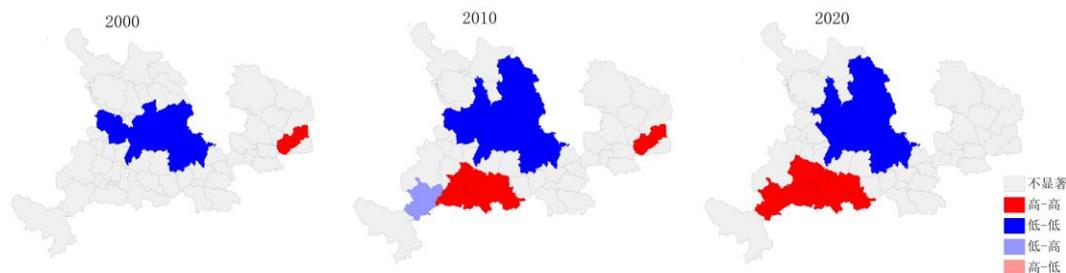


图 5.3 2000-2020 年生态系统服务价值局部自相关情况

5.3.3 各县区生态系统单项服务价值时空演变分析

使用黄河流域甘肃段各县区 2000 年、2010 年和 2020 年土地利用类型面积数据（附表 2、附表 3、附表 4）和表 5.2 黄河流域甘肃段单项生态服务价值系数数据，根据公式 5.4 可以计算出研究区各县区单项功能生态系统服务价值及变化情况，见（附表 5、附表 6、附表 7），本文重点分析 2020 年研究区各县区单项生态系统服务价值，以及从 2000 年到 2020 年期间研究区各县区单项生态系统服务价值的变化，如图 5.4 所示。

提供最多食物生产服务最多的土地利用类型是耕地，综合各县区的土地类型面积，计算得出食物生产服务价值较高的有环县、会宁县、玛曲县、靖远县和永登县，基本都超过 1 亿元，最高的是环县 1.7 亿元；较低的有崇信县、广河县、红古区和七里河区，均为 0.1 亿元，最低的是安宁区、城关区、西固区还有临夏市，由于这些县区几乎没有耕地所以提供的食物生产几乎为 0。各县区提供食物生产服务价值的内部差异小，大部分都在 0-1 亿元之间。

气体调节服务价值较高的县区为卓尼县、玛曲县、天祝县和环县，分别为 5.5、3.7、3.6 和 3.2 亿元，价值基本都在 100 亿元以上，其中最大的为卓尼县为 5.5 亿元；价值较低的有安宁区、城关区和临夏市，几乎不提供气体调节服务，其余县区的气体调节服务价值均小于 3 亿元，属于中等水平。

提供气候调节服务功能最高的县区，与气体调节服务功能结果基本一致，价值最高的也是卓尼县，为 5.3 亿元；最低的为安宁区和临夏市，依旧不提供气候调节功能，最高与最低之间相差依然较大，差 5.3 亿元。同样的趋势对于原材料生产、保持土壤、维持生物多样性以及提供美学景观服务也适用，保持土壤服务价值较高的有玛曲县、卓尼县、环县和天祝县，均在 5 亿元以上，其中最高的玛曲县为 5.5 亿元。最低的依然为安宁区和临夏市不提供该生态服务，此项服务价值极差依然较大。研究区域内气体调节、气候调节、水文调节这三项服务空间分布相近，是因为在这三项功能中，林地和水体的贡献最大，因此，服务价值与县区的水体和林地面积大小关系紧密。废物处理功能和水文调节有着相同的趋势，水域其贡献最大，其次林地贡献也较大。提供废物处理最高的是玛曲县，然后是环县、天祝县和卓尼县，分别为 3.5 亿元、2.8 亿元和 2.5 亿元。除了这几个县区外，其余的县区提供的服务较少，且内部整体差异较小。

从图 5.4 可以看出,从 2000 年到 2020 年期间,各县区单项生态系统服务价值的变化量也存在一定的规律。食物生产的生态系统服务价值总计减少了 0.7 亿元,减少最多的是卓尼县,减少了 0.1 亿元,其他县区减少量均小于 0.1 亿元,这是因为提供食物生产服务的用地类型主要是耕地,尽管耕地面积在 20 年间减少了 1651.7km²,但由于每个县区耕地面积变化都较小,基本都小于 100km²,而且耕地面积本身基数大,变化率很小,所以导致食物生产功能在各县区基本保持不变。

原材料生产的生态系统服务价值在 2000-2020 年增加了 5.1 亿元,卓尼县增加最多,增加了 1.3 亿元,天祝县减少最多,减少了 0.3 亿元。这是由于林地是最主要的该服务供给者,这其实体现了林地面积的变化趋势。所以导致原材料生产生态系统服务价值减少的是天祝县和安定区等林地减少较多的县区,其余地市(县)均为增加或基本保持不变。气体、气候调节的生态系统服务价值的变化较一致与原材料生产一致,都和林地的变化紧密相连,这是由于提供这两项服务最多的都为林地,且其他土地类型提供较少。

水文调节生态系统服务价值增加较多的有玛曲县和卓尼县,其余县区变动不明显,提供水文调节服务的主要是水体和林地,在 2000-2020 年间研究区域内的林地和水域面积基本都为增加,但天祝县水文调节服务减少的原因是由于林地面积剧烈减少,累计减少了 411.6km²,从而导致水文调节服务的减少。维持生物多样性和美学景观服务生态系统服务价值与水文调节相似,提供维持生物多样性服务主要是林地和水域、提供美学景观服务的主要为水域,其次是林地,呈现出相似的变化规律。

提供废物处理服务的主要是水体,远远超过耕地、林地和草地,建设用地面积的增加不利于废物处理服务,综合各种土地利用类型的变化,废物处理服务价值减少的有天祝县、皋兰县、崆峒区和泾川县,其余县区均为增加或不变。

提供保持土壤服务的主要是林地,其次草地和耕地也提供较多,保持土壤服务价值减少较明显的有天祝县和玛曲县,其中天祝县是由于林地面积的减少,玛曲县是由于草地面积的大量减少。卓尼县、漳县、临潭县、岷县和合作市其他县区增加较明显,其余县区变化不明显。

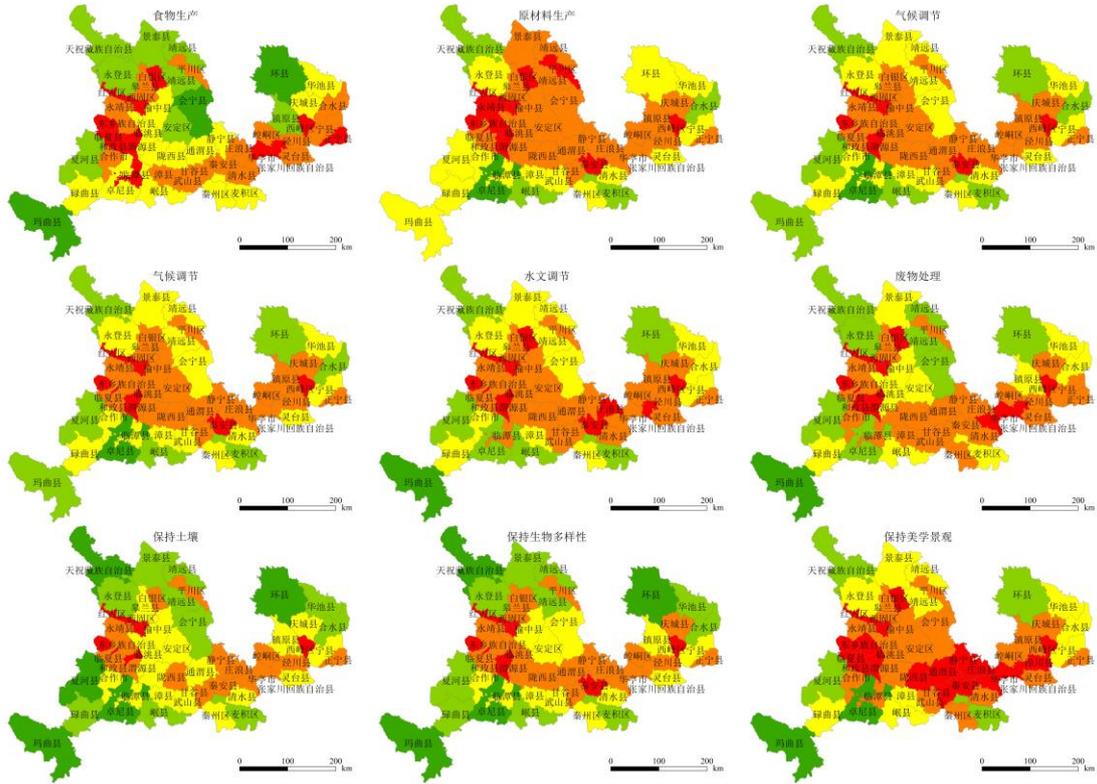


图 5.4 2020 年单项生态系统服务价值空间分布图

5.3.4 各县区生态系统单项服务价值的空间格局分析

使用 GeoDa 软件测算黄河流域甘肃段单项生态系统服务价值在 2000 年、2010 年、2020 年三期的全局空间自相关 *Moran's I* 指数，从表 5.9 中 *Moran's I* 指数以及 Moran 散点图（见附图 2、附图 3、附图 4）可知黄河流域甘肃段单项功能的生态服务价值除了废物处理服务以外都具有明显的空间正相关关系，且均是在 1% 的显著性水平下显著。从三期的 *Moran's I* 指数变化来看，食物生产、气体调节、水文调节和保持土壤四项服务在 2000 年到 2020 年一直都在增加，原材料生产、气候调节、维持生物多样性和提供美学景观四项服务在 2010 年到 2020 年间 *Moran's I* 指数有轻微的降低，但总体呈现出增加的趋势，说明黄河流域甘肃段各县区单项生态服务价值的空间相关性在增强。

表 5.9 黄河流域甘肃段各县区单项生态服务价值全局空间自相关分析

年份	食物生产	原材料生产	气体调节	气候调节	水文调节	废物处理	保持土壤	维持生物多样性	提供美学景观
2000 年	0.164	0.437	0.297	0.298	0.206	-0.073	0.193	0.270	0.286
2010 年	0.138	0.508	0.408	0.400	0.298	-0.035	0.308	0.379	0.363
2020 年	0.247	0.454	0.431	0.389	0.332	0.052	0.311	0.370	0.340

为进一步分析研究区内部各县区生态系统服务价值的空间自相关情况,使用 GeoDa 软件对单项生态系统服务价值进行了 2000 年、2010 年和 2020 年局部自相关测算,结果如图 5.5、图 5.6、图 5.7 所示。可知,大部分的生态功能都以高高集聚与低低集聚为主,高低集聚与低高集聚较少,且除了食物生产服务和废物处理服务外,其他服务类型随着时间的推移逐渐形成高高聚集区集中于研究区西南林地地区如碌曲县、卓尼县、漳县和岷县,低低聚集区集中于研究区东北部兰州-白银核心经济带和中部黄土丘陵沟壑区集中的发展趋势。

食物生产以高高集聚为主且一直保持稳定,高高聚集区始终以安定区、会宁县、陇西县、通渭县、静宁县、秦安县和庄浪县为主,这些县区位于甘肃省土地规划中的沿黄农业产业带的甘肃省农产品主产区上,主要以耕地为主要用地类型。皋兰县始终为低低聚集区,这是由于兰州市大面积的建设用地挤占了耕地,导致皋兰县及周边县区食物生产价值保持较低水平;

废物处理服务的聚集格局在整个研究期间不显著且变化较大,变化趋势不明显。这是由于水体对废物处理的重要性远远超过其他用地类型,而水体面积本身仅占研究区面积的 0.01%,且 75%左右的面积集中于玛曲县,面积第二高的永靖县仅占总面积的 0.04%,其余县区水体面积少且分布均匀。

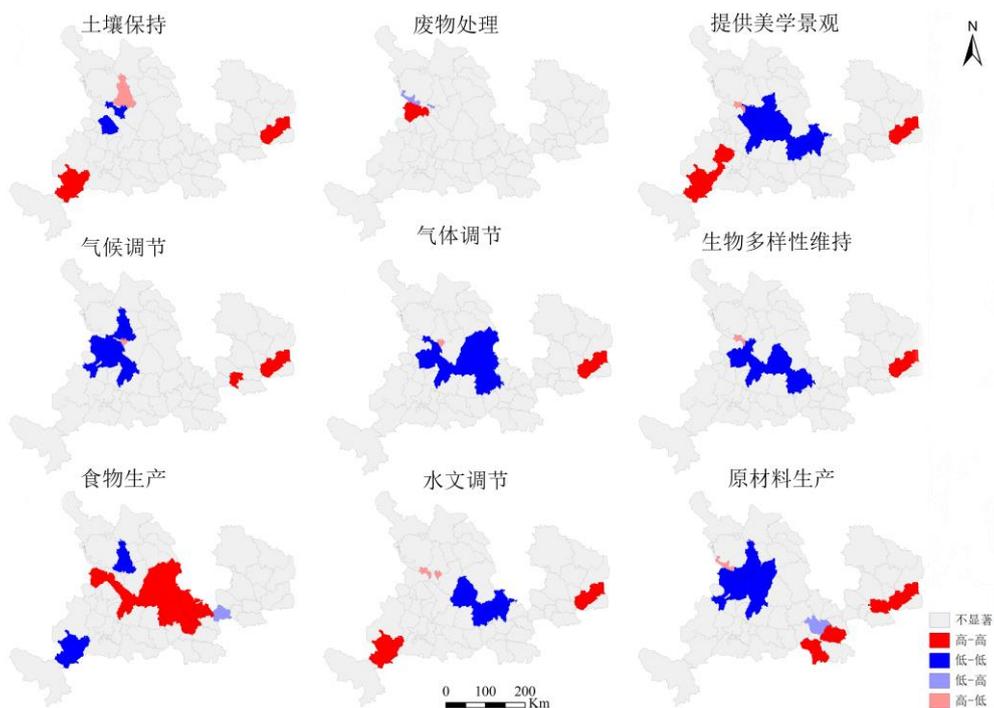


图 5.5 2000 年单项生态系统服务价值局部自相关

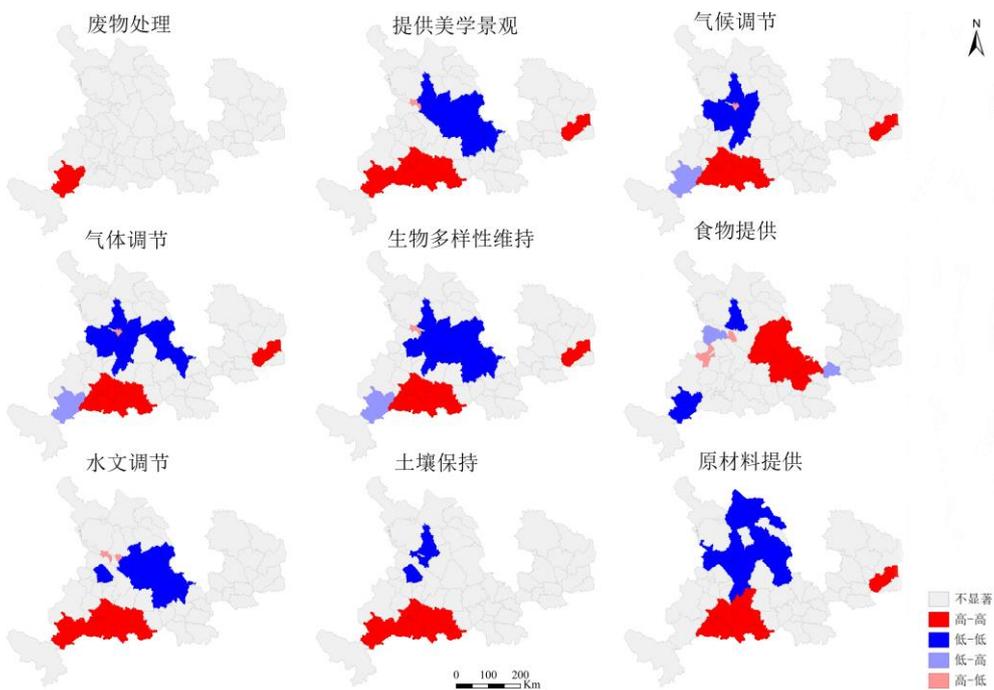


图 5.6 2010 年单项生态系统服务价值局部自相关

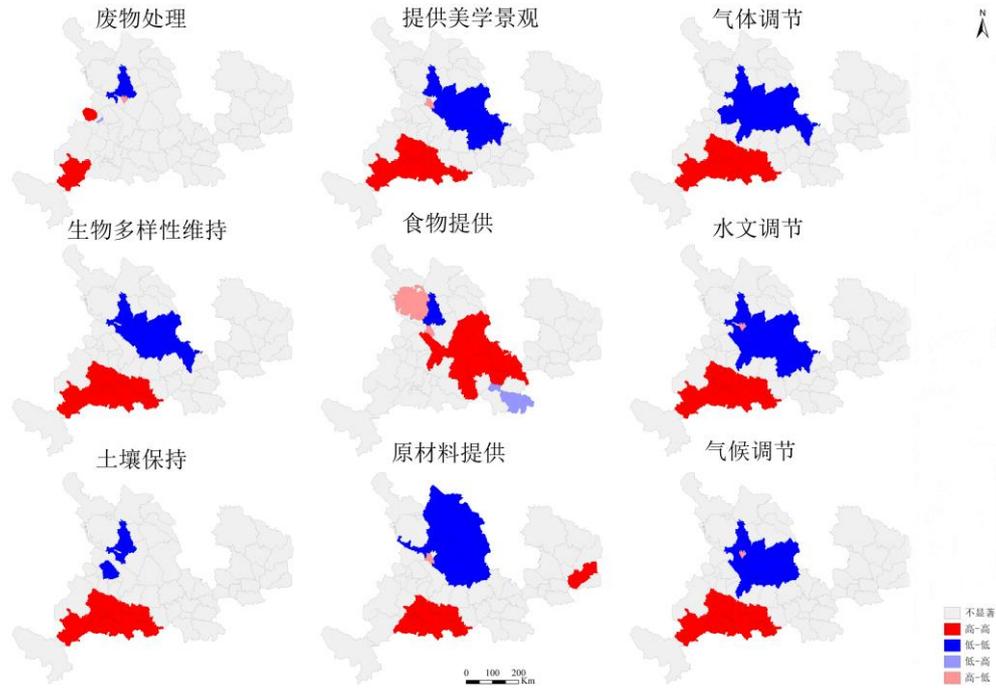


图 5.7 2020 年单项生态系统服务价值局部自相关

5.4 黄河流域甘肃段生态系统服务价值敏感性分析

5.4.1 生态系统服务敏感性分析方法

本文的生态系统服务价值通过当量因子法确认各用地类型的生态系统服务价值系数和不同用地类型的面积计算得到，生态系统服务的敏感性类似于弹性，用于测算生态系统服务价值对生态系统服务价值系数变化的敏感程度，一般以 1 为标准，大于 1 则为高，小于 1 则为低。敏感程度高则说明系数的轻微变化将导致生态系统服务价值的大幅变化，则生态系统服务价值的测算过程不可靠^[80]。通过上下调整 50%^[81]生态系数来衡量生态系统服务价值变化，计算公式如下^[82]：

$$CS = \left| \frac{(ESV_g - ESV_h) / ESV_h}{(VC_{gi} - VC_{hi}) / VC_{hi}} \right| \quad (5-10)$$

CS 为敏感性指数， ESV_h 、 ESV_g 分别表示生态系数调整前后的生态系统服务价值； VC_{hi} 、 VC_{gi} 为调整前后某一地类的生态系统服务价值系数；h 表示变动前，g 表示变动后。

5.4.2 生态系统服务敏感性测度

根据上述公式, 通过将研究区生态系统服务价值系数上下调整 50% 来计算敏感性指数, 衡量生态系统服务价值对生态系数的敏感程度^[83]。

如表 5.10 所示, 整个研究期间除草地以外, 所有用地类型的生态系统服务价值敏感性指数均远远小于 1, 表明研究区生态系统服务价值的探测结果对生态系数缺乏弹性, 本文测度的生态系统服务价值是可信的^[84]。2020 年敏感性指数从高到低依次为林地、草地、耕地、水体、建设用地 (由于未利用地所占研究区面积太小不做讨论), 代表受系数改变影响最大的是林地, 影响最小的是建设用地。从整个研究期间来看, 林地和水体的敏感性指数在不断增加, 耕地和草地的敏感性指数在逐年递减。这说明林地和水体系数的变化对研究区生态系统服务价值的影响逐渐变大。草地与耕地敏感性指数下降, 说明草地和耕地价值系数的变化对研究区生态系统服务价值的影响逐渐变小。

表 5.10 黄河流域甘肃段生态系统服务价值敏感性指数

土地利用类型		生态系统服务价值			敏感性指数		
		2000 年	2010 年	2020 年	2000 年	2010 年	2020 年
耕地	VC+50%	592.0	624.8	625.4	0.0636	0.0600	0.0579
	VC-50%	458.3	524.2	528.0			
林地	VC+50%	598.1	655.9	662.0	0.0694	0.0879	0.0906
	VC-50%	452.2	508.7	509.6			
草地	VC+50%	637.6	659.2	658.8	0.1071	0.0909	0.0877
	VC-50%	412.7	507.0	511.2			
水体	VC+50%	532.6	567.3	572.6	0.0070	0.0085	0.0108
	VC-50%	517.7	553.0	554.4			
建设用地	VC+50%	525.2	557.9	560.8	0.0000	0.0000	0.0002
	VC-50%	525.0	557.7	560.3			
未利用地	VC+50%	527.9	560.4	563.2	0.0026	0.0022	0.0024
	VC-50%	522.4	556.5	559.1			

5.5 本章小结

研究发现: 从研究区生态系统服务价值及变化情况来看, 耕地、林地和草地是提供生态系统服务价值最多的用地类型, 三者提供的价值占总价值的 95% 左右, 建设用地提供的生态系统服务价值最少。黄河流域甘肃段的生态系统服务价

值一直在增加，且增加幅度放缓。从单项价值及变化情况来看，保持土壤服务最高，维持生物多样性、水文调节、气候调节和气体调节服务价值较多，服务价值分别为 92.2 亿元、84.0 亿元、78.6 亿元、73.5 亿元、69.3 亿元，这五项服务价值占总价值的 71%。食物生产服务价值较少，仅占总价值的 6.7%。其余的三项功能的生态系统服务价值较平均。从时序变化来看，除了食物生产生态系统服务价值是在减少、保持土壤服务生态系统服务价值波动增加以外，另外的七项功能的生态系统服务价值都在增加。从研究区各县区来看，玛曲县的生态系统服务价值最高，2020 年玛曲县的生态系统服务价值为 45.3 亿元，占 2020 年研究区总价值的 8.1%。安宁区最低，2020 年仅为 0.2 亿元，占 2020 年研究区总价值的 0.03%。从各县区总价值时序变化来看，2000-2010 年间研究区总价值增加了 31.6 亿元，但有 8 个县区生态系统服务价值减少，其中天祝县减少最多，减少了 3 亿元。2010-2020 年间，研究区生态系统服务价值的增速放缓，玛曲县生态系统服务价值增加最多，增加了 3.8 亿元，而 35 个县区生态系统服务价值减少。在整个研究期间，县区之间差别较大，甘南州的卓尼县、玛曲县、漳县、临潭县和岷县等本身提供的生态系统服务价值高而且保持增长；而受人类活动影响大的安定区、皋兰县、榆中县等生态系统服务价值不断减少。从各县区总价值的空间格局来看，黄河流域甘肃段的生态系统服务价值呈现空间正相关分布，高值区与低值区均趋于集聚。各县区单项功能生态系统服务价值变化趋势与各县区生态总价值变化趋势大体一致，逐渐形成了明显的空间正相关关系。从敏感度来看，研究期间生态系统服务价值敏感性指数均比 1 小，代表研究区生态系统服务价值的测度结果对用地类型价值系数缺乏弹性，本文测度的生态系统服务价值是可信的。

6 黄河流域甘肃段生态系统服务价值影响因素分析

6.1 影响因素选取

本文借鉴有关研究成果^[83-85], 结合黄河流域甘肃段数据的可获得性和相关性从自然环境、社会经济两个方面选取影响因素进行生态系统服务价值的影响因素研究。自然环境方面, 选取年均降水(X1)、年均温度(X2)、NDVI(X3)、高程(X11); 社会经济方面选择人均社会消费品零售总额(X4)、农业机械总动力(X5)、第三产业增加值(X6)、城镇居民人均可支配收入(X7)、地方财政一般预算收入(X8)、地方财政一般预算支出(X9)、农林牧渔业总产值(X10)、GDP(X12)、第一产业GDP(X13)。

6.2 生态系统服务价值影响因素结果分析

本文基于地理探测器 (GeoDetector) 来测算生态系统服务价值的影响因素, 地理探测器是识别空间分异并揭示影响因子的一种统计学方法。其原理是: 如果自变量对某个因变量有很强的影响, 则该自变量与因变量在空间分布上具有一定的相似性。地理探测器包括 4 种探测方法, 本文使用生态探测、分异及因子探测和交互探测对生态系统服务价值的影响因素进行分析。

生态探测使用 F 统计量来衡量不同因子两两之间对因变量 Y 空间分布的影响是否有显著差异:

$$F = \frac{N_{X_1}(N_{X_2}-1)SSW_{X_1}}{N_{X_2}(N_{X_1}-1)SSW_{X_2}} \quad (6-1)$$

$$SSW_{X_1} = \sum_{h=1}^{L_1} N_h \sigma_h^2 \quad (6-1)$$

$$SSW_{X_2} = \sum_{h=1}^{L_2} N_h \sigma_h^2 \quad (6-3)$$

式中: N_{X_1} 及 N_{X_2} 分别表示两个因子 X_1 和 X_2 的样本量; SSW_{X_1} 和 SSW_{X_2} 分别表示由 X_1 和 X_2 形成的分层的层内方差之和; L_1 和 L_2 分别表示变量 X_1 和 X_2 分层数目。其中零假设 $H_0: SSW_{X_1} = SSW_{X_2}$ 。如果在 α 的显著性水平上拒绝 H_0 , 这表明两因子 X_1 和 X_2 对属性 Y 的空间分布的影响存在着显著的差异。

分异及因子探测探测某因子 X 在多大程度上解释了因变量 Y 的空间分异计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6-4)$$

式中， q 为生态风险影响因素的探测值，取值范围为[0, 1]； h 为自变量序号； L 为评价单元总数； N_h 和 N 分别为每个分区和全区的单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别为每个分区与全区生态风险的方差。

交互探测用于研究不同因子之间的交互作用，评价 $X1$ 和 $X2$ 共同作用于 Y 时，对 Y 的解释力是增强还是减弱，或者这些因子对 Y 的影响是相互独立的。首先计算 $X1$ 和 $X2$ 的 q 值： $q(X1)$ 和 $q(X2)$ ，并且计算它们交互（叠加变量 $X1$ 和 $X2$ 两个图层相切所形成的新的多边形分布时的 q 值： $q(X1 \cap X2)$ ，并对 $q(X1)$ 、 $q(X2)$ 与 $q(X1 \cap X2)$ 进行比较。两个因子之间的关系可分为以下几类，如表 6.1 所示：

表 6.1 交互作用类型

依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \min[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱
$\min[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \max[q(X1), q(X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max[q(X1), q(X2)]$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

6.2.1 基于地理探测器的生态探测

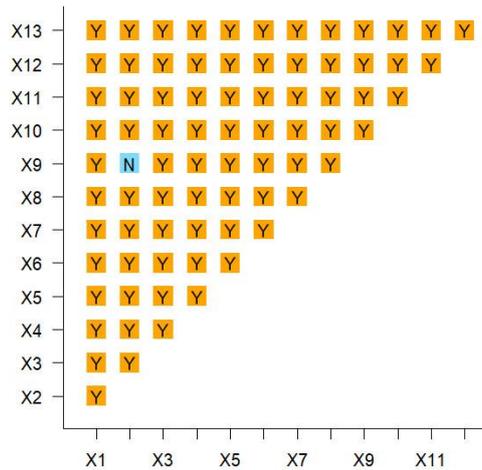


图 6.1 生态探测结果

生态探测用于分析任意两个因子的影响对黄河流域甘肃段生态系统服务价值的空间分异是否有显著的差异，即因子间是否存在多重共线性。生态检测结果

如图 6.1 所示。其中“Y”表示存在显著性差异，“N”表示不存在显著性差异。除了 X2 与 X9 外，其他各因子间差异有显著的统计学意义，表明研究所选取的因子较为合理。

6.2.2 基于地理探测器的分异及因子探测

黄河流域甘肃段生态系统服务价值的分异及因子探测结果如表 6.2 所示，可知不同因子对生态系统服务价值时空分异的影响有较为明显的差别。由下表可知，GDP、农业机械总动力、人均社会消费品、地方财政一般预算收入、第一产业 GDP、地方财政一般预算支出、年均温度、城镇居民人均可支配收入、第三产业增加值、农林牧渔业总产值和高程等 11 个因子的贡献率较高，都超过了 30%；而年均降水的贡献率为 29%，NDVI 的贡献率最低，仅为 13.1%。各因子决定力 q 值从大到小依次为 GDP (0.6471)、农业机械总动力 (0.5906)、人均社会消费品零售总额 (0.5061)、地方财政一般预算收入 (0.4704)、城镇居民人均可支配收入 (0.4495)、第一产业 GDP (0.4393)、年均温度 (0.4072)、地方财政一般预算支出 (0.4052)、第三产业增加值 (0.3908)、农林牧渔业总产值 (0.3623)、高程 (0.3490)、年均降水 (0.2908)、NDVI (0.1385)，且都通过了显著性为 1% 的检验。由此可见，社会经济因素的贡献率远远高于自然环境因素，是研究区生态系统服务价值的主要影响因素，其中，GDP 和人均社会消费品零售总额代表人类对生态系统服务的需求，农用机械总动力表征着人类农业活动产出效率，反映了人类对土地的集约利用水平，影响单位面积耕地的粮食产量，从而改变生态系统服务价值。

表 6.2 黄河流域甘肃段生态系统服务价值空间分异及因子探测结果

指标	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
q 统计量	0.2908	0.4072	0.1385	0.5061	0.5906	0.3908	0.4495	0.4704	0.4052	0.3623	0.3490	0.6471	0.4393
P 值	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

6.2.3 基于地理探测器的交互因子探测

在单因子探测的基础上，运用地理探测器的交互探测功能识别不同影响因子之间的相互作用，即两个因子共同作用于生态系统服务价值时，是否会减弱或增

强对生态系统服务价值的解释力,或者这两个因子对生态系统服务价值的影响是相互独立的。交互探测结果如表 6.3 所示,研究区各因子两两之间存在着明显的交互作用,且交互作用下的解释力明显高于单一因子,这说明因子之间的交互作用增强了对生态系统服务价值空间分异的解释力,也就是说研究区生态系统服务价值的空间分异格局同时受到多个因子的共同影响。其中,双因子增强的影响模式出现了 60 次,非线性增强的影响模式出现了 18 次。具体来看,人均社会消费品零售总额(X4)与农业机械总动力(X5)、第三产业增加值(X6)、城镇居民人均可支配收入(X7)、地方财政一般预算收入(X8)、农林牧渔总产值(X10)、GDP(X12)的交互解释力均在 0.9 以上,因此可以进一步看出社会经济因子之间的相互作用是生态系统服务价值空间分异的主导因素,这是因为人均社会消费品零售总额的大小间接反映人类社会发展对生态系统服务的需求大小。值得注意的是,非线性增强意味着两因子间的共同影响超过两者单独作用于生态系统服务价值的影响。其中属于自然环境因子之间的相互影响仅有 X1 和 X4、X3 和 X4 两项;社会经济因子和自然环境因子之间相互作用的有 7 项,其余 9 项都是社会经济因子之间的相互作用,这说明社会经济因子之间、社会经济因子与自然环境因子的相互作用是导致生态系统服务价值空间分异的主要因素。

表 6.3 黄河流域甘肃段生态系统服务价值空间分异交互因子探测结果

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
X1	0.2908												
X2	0.5409	0.4072											
X3	0.3484	0.4538	0.1385										
X4	0.8101*	0.8338	0.7167*	0.5061									
X5	0.7220	0.7597	0.6571	0.9272	0.5906								
X6	0.6123	0.6678	0.4548	0.9424*	0.8446	0.3908							
X7	0.6725	0.6720	0.5527	0.9097	0.8571	0.7749	0.4495						
X8	0.7031	0.6709	0.5356	0.9328	0.8192	0.8111	0.9435*	0.4704					
X9	0.7516*	0.7969	0.5689*	0.8657	0.9119	0.9024*	0.9199*	0.8840*	0.4052				
X10	0.7256*	0.6321	0.5034*	0.9245*	0.7880	0.8235*	0.8904*	0.7026	0.6616	0.3623			
X11	0.4622	0.5388	0.4052	0.7324	0.6586	0.6189	0.6555	0.6648	0.6966	0.6474	0.3490		
X12	0.7505	0.6807	0.6841	0.9428	0.8646	0.8212	0.7945	0.8237	0.9239	0.8199	0.7046	0.6471	
X13	0.7425*	0.6895	0.5556	0.8750	0.7855	0.8770*	0.9353*	0.7779	0.9159*	0.6867	0.6496	0.8587	0.4393

注: 不加*为双因子线性增强, 加*为非线性增强。

6.3 本章小结

通过选取相关变量对黄河流域甘肃段生态系统服务价值空间分异进行影响因素探究, 结果发现: 本文选择的各影响因子之间存在着显著的统计学意义, 符合研究目的; 在单因子探测中, 除归一化植被指数 (NDVI) 外, 其他因子对研究区生态系统服务价值的空间分异贡献较高。社会经济因子的重要程度高于自然环境因素, q 值前五的因子分别为 GDP (0.6471)、农业机械总动力 (0.5906)、人均社会消费品零售总额 (0.5061)、地方财政一般预算收入 (0.4704)、城镇居民人均可支配收入 (0.4495), 社会经济因子是生态系统服务价值的主要影响因子; 通过不同因子之间的交互探测可以得出与单因子类似的结论, 结果发现, 因子之间只存在相互增强的影响类型, 双因子增强是最主要的因子间作用模式, 社会经济因子之间、社会经济因子和自然环境因子之间的相互促进是造成生态系统服务价值空间格局分异的主要因素。

7 研究结论与政策建议

7.1 研究结论

本文在梳理相关文献的基础上,系统的测度了黄河流域甘肃段各县区土地利用情况和生态系统服务价值,并探究了生态系统服务价值的影响因素,相关结论如下:

(1) 从三期土地利用结构及变化情况来看,耕地和草地是黄河流域甘肃段最主要的用地类型,在整个研究期间内耕地和草地面积总占比超过了75%,其中草地的占比最大,占总面积的40%左右。然后占比依次是耕地、林地、未利用地、建设用地、水体。其中,建设用地、林地、水体面积在2000-2020年逐年增多,建设用地面积增加最多,草地面积逐年减少,耕地和未利用地呈现波动下降趋势。黄河流域甘肃段各县区用地类型的面积变化除个别县区在不同程度上与黄河流域甘肃段整体土地利用变化有差异外,其余县区用地情况均与整体相似。建设用地变化最明显,总体动态度为12.3%,且2000-2010年增长速度较慢,在2010-2020年增长速度较快,2010-2020年动态度增加到23.2%。水体、林地总体动态度分别为3.2%、2%,二者均在2000-2010年增速快,2010-2020年增速慢。草地总体动态度为-0.6%,草地始终保持减少态势。耕地和未利用地总体动态度均为-0.1%,且均为波动下降,但草地面积为先增后减,未利用地面积先减后增。草地总体动态度为-0.6%,2000-2010年变化较剧烈。土地利用类型转化以草地为主,草地面积大多转化为林地,在2000-2010年大于2010-2020年转化量;其次变化量比较多的用地类型是耕地转化为草地和建设用地,在2010-2020年变化量远远大于2000-2010年;期间还有部分耕地转变为草地,草地转变为未利用地,这表明耕地存在过度开垦从而导致土地荒漠化的现象。

(2) 从研究区生态系统服务价值及变化情况来看,耕地、林地和草地是提供生态系统服务价值最多的用地类型,三者提供的价值占总价值的95%左右,建设用地提供的生态系统服务价值最少。黄河流域甘肃段的生态系统服务价值一直在增加,但增加幅度放缓。从单项价值及变化情况来看,保持土壤服务最高,维持生物多样性、水文调节、气候调节和气体调节服务价值较多,服务价值分别为92.2亿元、84.0亿元、78.6亿元、73.5亿元、69.3亿元,这五项服务价值占总价

值的 71%。食物生产服务价值较少, 仅占总价值的 6.7%。其余的三项功能的生态系统服务价值较平均。从时序变化来看, 除了食物生产生态系统服务价值是在减少、保持土壤服务生态系统服务价值波动增加以外, 另外的七项功能的生态系统服务价值都在增加。从研究区各县区来看, 玛曲县的生态系统服务价值最高, 2020 年玛曲县的生态系统服务价值为 45.3 亿元, 占 2020 年研究区总价值的 8.1%。安宁区最低, 2020 年仅为 0.2 亿元, 占 2020 年研究区总价值的 0.03%。从各县区总价值时序变化来看, 2000-2010 年间研究区总价值增加了 31.6 亿元, 但有 8 各县区生态系统服务价值减少, 其中天祝县减少最多, 减少了 3 亿元。2010-2020 年间, 研究区生态系统服务价值的增速放缓, 玛曲县生态系统服务价值增加最多, 增加了 3.8 亿元, 而 35 个县区生态系统服务价值减少。在整个研究期间, 县区之间差别较大, 甘南州的卓尼县、玛曲县、漳县、临潭县和岷县等本身提供的生态系统服务价值高而且保持增长; 而受人类活动影响大的安定区、皋兰县、榆中县等生态系统服务价值不断减少。从各县区总价值的空间格局来看, 黄河流域甘肃段的生态系统服务价值呈现空间正相关分布, 高值区与低值区均趋于集聚。各县区单项功能生态系统服务价值变化趋势与各县区生态总价值变化趋势大体一致, 逐渐形成了明显的空间正相关关系。从生态系统服务价值敏感度来说, 研究期间生态系统服务价值敏感性指数均比 1 小, 代表研究区生态系统服务价值的测度结果对用地类型价值系数缺乏弹性, 本文测度的生态系统服务价值是可信的。

(3)通过对黄河流域甘肃段生态系统服务价值空间分异进行影响因素探究, 结果发现: 本文选择的各影响因子之间存在着显著的统计学意义, 符合研究目的; 在单因子探测中, 除归一化植被指数 (NDVI) 外, 其他因子对研究区生态系统服务价值的空间分异贡献较高。社会经济因子的重要程度高于自然环境因素, q 值前五的因子分别为 GDP (0.6471)、农业机械总动力 (0.5906)、人均社会消费品零售总额 (0.5061)、地方财政一般预算收入 (0.4704)、城镇居民人均可支配收入 (0.4495), 社会经济因子是生态系统服务价值的主要影响因子; 通过不同因子之间的交互探测可以得出与单因子类似的结论, 结果发现, 因子之间只存在相互增强的影响类型, 双因子增强是最主要的因子间作用模式, 社会经济因子之间、社会经济因子和自然环境因子之间的相互促进是造成生态系统服务价值空间格局分异的主要因素。

7.2 政策建议

(1) 巩固良好生态用地，提供生态经济增长动力

由前文的分析可知，黄河流域甘肃段生态系统服务价值在研究期间持续提高，但增速放缓，说明相关生态保护政策已经起到一定作用但提高作用逐渐减弱。林地作为研究区主要的用地类型之一，集中分布于研究区南部与东部边缘，2020年由林地提供的生态系统服务价值超过其他所有的用地类型，随着社会经济发展，森林资源可以给人类带来旅游、康养等绿色服务价值。基于研究区部分县区优质的林地禀赋，当地应该充分利用挖掘这一生态资源优势，积极发展与林地相关的旅游业和服务业。在出台政策保障相关行业健康发展的基础同时，也要保证资源的合理利用，在当地落实生态系统服务价值评估体系，将生态系统服务价值并入业绩考核规范，制定严格的行为规范和奖惩机制，实现林地资源的可持续利用，将林地作为新的生态经济增长点。

(2) 加强耕地保护力度，提高耕地生态系统服务价值

在研究期内食物供给服务也是唯一呈现下降趋势的生态服务类型，考虑到提供该服务的用地类型主要是耕地，耕而地面积总体呈现减少趋势，耕地减少的主要原因是建设用地扩张挤占了耕地，因此需要，在微观层面，严格实施的耕地保护制度，稳数量提质量。其次，加强土地规划管控，优化耕地布局，并从严控制建设占用耕地，特别是优质耕地，同时推行田长制和协同联动机制，通过明确责任，加强日常监管，实现从分散管理向集中协调的转变。此外，数字化赋能成为耕地保护的关键，利用卫星遥感、无人机等数字技术加强耕地监管和保护，建立技术防御体系，如“铁塔探头、卫星遥感、无人机”的综合应用，提升早期预警和监测能力。实行跨部门合作与闭环处置，自然资源、农业农村、公安等部门需加强合作，形成耕地保护的全流程管理体系，并构建闭环处置机制，针对耕地非农化、非粮化问题，实现问题的早发现、早制止和严查处，确保违法行为得到有效处置。最后，在实践创新方面，通过土地整治、高标准农田建设等措施，提升耕地质量和粮食生产能力，探索“土地整治+”模式，结合当地实际，通过创新方式激活耕地生产力，推动耕地保护工作创新。这些做法共同构建了一个多元化、

系统化的耕地保护机制，从而确保耕地资源的有效保护，支持国家的粮食安全和可持续发展战略。

(3) 统筹用地格局，优化研究区生态系统服务价值格局

虽然研究区整体的生态系统服务价值较高且一直保持增长，但是在不同的县区内部的空间分布情况却不相同，部分县区提供的生态系统服务价值在研究期内不断下降，这些县区错误的土地利用规划导致了这一结果。可以通过加强对人口结构变化和城镇化进程的科学规划，优化人口分布，引导人口和经济活动向生态承载能力较强、经济发展潜力更大的地区集中，以实现更加均衡的区域发展。其次，促进经济结构的优化和产业的升级转型，特别是通过鼓励循环经济和绿色经济的发展，不仅可以减少对自然资源的依赖，还可以有效缓解生态环境压力。此外，实施严格的生态保护措施，尤其是加强生态红线政策的执行，对于维护生态系统稳定性和服务功能至关重要。在国土空间规划与管理方面，应推动更加科学和精细化的措施，确保农业生产、生态保护及城市开发空间的合理划分与有效管理，防止和减少违规开发行为。此外，激励和引导社会资本参与到生态环境建设中来，通过政策支持和市场机制的有效结合，促进生态环境的持续改善和高质量发展。

(4) 因地制宜推进生态建设工作，推动经济自然协调发展

从生态系统服务价值空间分异的驱动因素来看，社会经济因子是导致生态系统服务价值空间格局形成的主要因素。而且结合空间自相关分析可知，各项服务在空间上存在着明显的空间格局，各项生态系统服务价值的高值区集中于研究区西南林地地区如碌曲县、卓尼县、漳县和岷县，低低聚集区集中于研究区东北部兰州-白银核心经济带和中部黄土高原丘陵沟壑区，因此结合研究区各地的资源禀赋、合理利用生态资源，因地制宜展开生态建设工作至关重要；除此之外，GDP等社会经济因素是空间格局形成的最重要影响因素，一方面可以体现兰白经济核心圈优先经济发展战略牺牲了生态利益，而且密集的人口与经济活动也给未来的生态建设造成了重重阻力，导致生态系统服务供给不足，将制约社会经济的进一步发展、阻碍人们生活质量的不断提高；另一方面也可以看出研究区南部与东部林区、山区经济发展滞后，与经济核心区形成明显的差别。在未来发展过程中，要将“两山理论”作为行动指引，努力实现经济高质量发展转型。兰白核心经济

圈要树立生态保护优先的绿色发展理念，努力实现经济自然耦合协调发展；而在经济发展滞后地区，可以在坚持生态优先的前提下，适度发展生态产业，将优秀的生态禀赋转化为新的经济增长动力。

8 研究不足与展望

8.1 研究不足

由于本文从 2000 年、2010 年和 2020 年土地利用数据着手进行研究黄河流域甘肃段生态系统服务价值及影响因素研究,遥感数据易于获取但是在时间和空间上跨度较大,本文使用 Globalland 30 遥感数据,尽管土地数据精度较高,但是数据质量比起统计数据有所不足。

8.2 未来展望

生态系统服务概念的复杂性决定了生态系统服务价值评估时往往存在不同学者之间差异较大且学者往往仅关注自身专业视角,这就导致不同学者的研究成果很难进行横向比较。在生态系统服务价值越来越受重视并成为进行生态补偿、生态资产核算重要依据的现在,如何实现成果之间的可比较是未来的研究方向。

参考文献

- [1]MEA.Millennium Ecosystem Assessment:Ecosystems and Human Well-Being-Synthesis[J].Ecosystems,2005(3):255-274.
- [2]De Groot, R.S.Functions of nature. Wolters-Noordhoff[J].Netherlands, 1992,12:134-147.
- [3]李文华,张彪,谢高地.中国生态系统服务研究的回顾与展望[J].自然资源学报,2009,24(1):2-9.
- [4]岳书平,张树文,闫业超.东北样带土地利用变化对生态服务价值的影响[J].地理学报, 2007(08):879-886.
- [5]许静,廖星凯,甘崎旭等.基于 MSPA 与电路理论的黄河流域甘肃段生态安全格局构建[J].生态环境学报, 2023.32(4):805-813.
- [6]Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al.The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].Nature,1997,387(6630):253-260.
- [7]谢高地,甄霖,鲁春霞等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,(05):911-919.
- [8]王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(01):116-134.
- [9]Wang J F,Li X H,Christakos G,et al.Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1):107-127.
- [10]Wang J F,Hu Y.Environmental health risk detection with GeoDetector. Environmental Modelling & Software,2012,33:114-115.
- [11]Daily G C.Nature's services[M].Island Press: Washington, DC,1997.
- [12]张寒.长株潭地区生态服务价值变化及驱动力分析[D].湖南师范大学,2014.
- [13]Costanza R, d'Arge R,De Groot R,et al.The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].Ecosystem Economics,1998,25(1):3-15.
- [14]De Groot R S,Wilson M A,Boumans R M J.A typology for the classification and valuation of ecosystem functions,goods and services[J].Ecological Economics,2002,41(3):393-408.

- [15]Fisher B,Turner K R,Morlig P.Defining and classifying ecosystem services for decision making[J].Ecological economics,2009,68(3):643-653.
- [16]Assessment M E.Millennium ecosystem assessment[M].Millennium Ecosystem Assessment,2001.
- [17]谢高地,鲁春霞,成升魁.全球生态系统服务价值评估研究进展[J].资源科学,2001,23(6):5-9.
- [18]谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [19]虞依娜,彭少麟.生态系统服务价值评估的研究进展[J].生态环境学报,2010,19(9):2246-2252.
- [20]欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].应用生态学报,1999,10(5):635-640.
- [21]张彪,谢高地,肖玉,等.基于人类需求的生态系统服务分类[J].中国人口·资源与环境,2010,20(6):64-6.
- [22]Vogt W.Road to Survival.New York:William Sloane Associates[J].Google Scholar,1948.
- [23]Helliwell D R.Valuation of wildlife resources[J].Regional studies,1969,3(1):41-47.
- [24]Weatman.How Much Are Nature's Services Worth[J].Science,1977,197(4307):960-964.
- [25]Mooney H A,Williams K S,Lincoln D E,et al.Temporal and spatial variability in the Interaction between the checkerspot butterfly,Euphydryas chalcedona and its principal food source,the Californian shrub,Diplacus aurantiacus[J].Oecologia,1981,50(2):195-198.
- [26]Ehrlich P R,Mooney H A.Extinction,substitution and ecosystem services[J].Bioscience,1983,33(4):248-254.
- [27]Daily G C.Nature's Services:Societal Dependence on Natural Ecosystems[M].Washington,DC:Island Press,1997:1-10.
- [28]Costanza R,d'Arge R,De Groot R,et al.The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].nature,1997,387(6630):253-260.

- [29]马世骏,王如松.社会-经济-自然复合生态系统[J].生态学报,1984(01):1-9.
- [30]张嘉宾.西双版纳的森林复被率及其动态变化[J].云南林业调查规划,1984(04):9-13.
- [31]谢高地,张钰铨,鲁春霞,郑度,成升魁.中国自然草地生态系统服务价值[J].自然资源学报,2001(01):47-53.
- [32]鲁春霞,谢高地,成升魁.河流生态系统的休闲娱乐功能及其价值评估[J].资源科学,2001(05):77-81.
- [33]谢高地,鲁春霞,冷允法,郑度,李双成.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003(02):189-196.
- [34]刘杰,刘学录,刘星雨等.武山县生态系统服务价值时空变化分析[J/OL].甘肃农业大学学报,1-18[2023-12-27].
- [35]苏建聪,唐斌,刘杨等.基于 FLUS 模型的巴中市多情景土地利用变化模拟及其生态系统服务价值评估[J].环境生态学,2023,5(11):17-25.
- [36]许静,刘慧.甘肃省生态系统服务权衡协同关系评估与预测[J].中国环境科学,2024,44(04):1863-1874.
- [37]Evelyn Asante-Yeboah,HongMi Koo, Mirjam A. F. RosTonen,et al. Participatory and Spatially Explicit Assessment to Envision the Future of Land-Use/Land-Cover Change Scenarios on Selected Ecosystem Services in Southwestern Ghana. Environmental Management.2023, 31.
- [38]Chan K M A,Shaw M R,Cameron D R,et al.Conservation planning for ecosystem services[J].PLoS biology, 2006,4(11).
- [39]Cleveland C C,Houlton B Z,Smith W K,Marklein A R,Reed S C.Patterns of new versus recycled primary production in the terrestrial biosphere.[J].Proc Natl Acad Sci USA,2013,110(31):12733-12737.
- [40]Coker G,Richard M,Bayne K,et al.Stakeholder valuation of soil ecosystem services from New Zealand's planted forests[J].PloS one,2019,14(8).
- [41]Sannigrahi S,Chakraborti S,Banerjee A,et al.Ecosystem service valuation of a natural reserve region for sustainable management of natural resources[J].Environmental and Sustainability Indicators,2020,5.

- [42] 刘向华. 我国农业生态系统服务价值的核算方法[J]. 统计与决策, 2018, 34(03): 24-30.
- [43] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999(05): 19-25.
- [44] 李艺欣, 张颖. 生态系统服务价值评估及其溢出效应研究—以承德市森林生态系统为例[J]. 环境保护, 2023, 51(22): 47-54.
- [45] 王孟超, 潘洪义, 高成等. 基于政策导向的岷江流域土地利用模拟及生态系统服务价值评估[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(02): 322-335.
- [46] 黄麟, 李佳慧, 张海燕等. 草原生态系统服务价值的内涵、核算及评估[J/OL]. 草业学报, 2024-03-18, 1-17.
- [47] 潘鹤思, 李英, 陈振环. 森林生态系统服务价值评估方法研究综述及展望[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(06): 72-78.
- [48] Hong, K.; Liu, G.; Chen, W.; Hong, S. Classification of the emotional stress and physical stress using signal magnification and canonical correlation analysis. *Pattern Recognit.* 2018, 77, 140-149.
- [49] Greenspoon, P.J.; Saklofske, D.H. Confirmatory factor analysis of the multidimensional students' life satisfaction scale. *Personal Individ. Differ.* 1998, 25, 965-971.
- [50] Karakoç, Ö.; Es, H.A.; Fırat, S.Ü. Evaluation of the development level of provinces by grey cluster analysis. *Procedia Comput. Sci.* 2019, 158, 135-144.
- [51] Cagliero, C.; Bicchi, C.; Cordero, C.; Rubiolo, P.; Sgorbini, B.; Liberto, E. Fast headspace-enantioselective GC-mass spectrometric multivariate statistical method for routine authentication of flavoured fruit foods. *Food Chem.* 2012, 132, 1071-1079.
- [52] Puplampu DA, Bofo YA Exploring the impacts of urban expansion on green spaces availability and delivery of ecosystem services in the Accra metropolis. *Environ Chall*, 2021, 5: 100283.
- [53] Sue Ellen Taelman, Laura V, De Luca Peña, et al. Integrating ecosystem services and life cycle assessment: a framework accounting for local and global

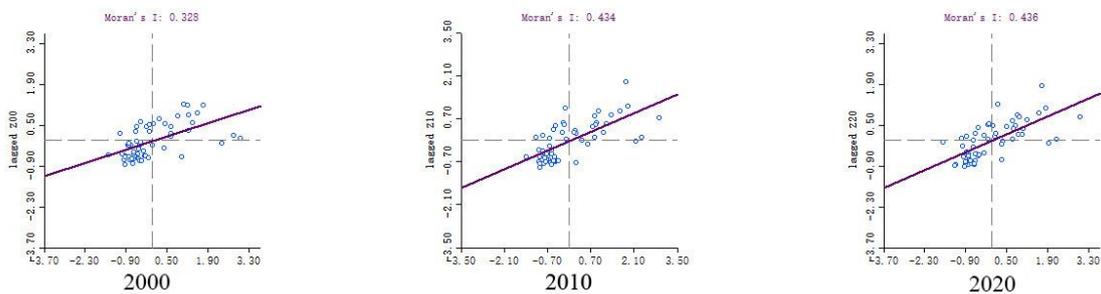
- (socio)environmental impacts .The International Journal of Life Cycle Assessment.202429:99–115
- [54]Locatelli B, Lavorel S, Sloan S, et al.Characteristic trajectories of ecosystem services in mountains[J].Frontiers in Ecology and the Environment, 2017,15(3):150-159.
- [55]Gashaw T, Tulu T, Argaw M, et al.Estimating the impacts of land use/land cover changes on Ecosystem Service Values:The case of the Andassa watershed in the Upper Blue Nile basin of Ethiopia[J].Ecosystem Services, 2018, 31: 219-228.
- [56]Notter B, Hurni H, Wiesmann U,et al.Modelling water provision as an ecosystem service in a large East African river basin[J].Hydrology and Earth System Sciences, 2012,16(1):69-86.
- [57] Jiang, Y.; Ouyang, B.; Yan, Z. Multiscale Analysis for Identifying the Impact of Human and Natural Factors on Water-Related Ecosystem Services. Sustainability ,2024, 16,1738.
- [58]程珂怡,郭传旭,张婷等.江苏省生态系统服务价值时空分异及影响因素研究[J/OL].自然资源情报,1-11[2023-12-27].
- [59]危小建,辛思怡,张颖艺等.不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及其影响因素差异——以大南昌都市圈为例[J].生态学报,2023,43(18):7585-7597.
- [60]刘军,岳梦婷,问鼎.旅游业对目的地生态系统服务价值的影响——以神农架为例.生态学报,2023,43(15) :6212-6224.
- [61]胡雪.山西省生态经济系统协调度演变格局及其影响因素[J].水土保持通报,2023,43(2):285 292.
- [62]冯一凡,李翊,冯君明.基 GTW 模型的济南都市圈生态系统服务价值对城市扩张时空响应[J].北京林业大学学报,2024,46(1):104–118.
- [63]杨磊,刘凤莲.昆明市生态系统服务价值时空演变及驱动因素研究[J].国土资源导刊,2023,20(04):125-136.
- [64]丁振民,姚顺波.陕西省耕地转移对生态系统服务价值的影响[J].资源科学,2019,41(6):1070-1081.
- [65]欧阳晓,贺清云,朱翔.多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值

- 的影响——以长株潭城市群为例[J].经济地理,2020,40(01):93-102.
- [66]荔琢,蒋卫国,王文杰等.基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究[J].自然资源学报,2019,34(08):1654-1665.
- [67]欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].应用生态学报,1999,10(5):635-640.
- [68]Pearce D.W,Turner R K.Economics of Natural Resources and the Environment[M].Baltimo:the Johns Hopkins University Press,1999.
- [69]Turner R K,Georgiou S,Fisher B.Valuing ecosystem services:The case of multifunctional wetlands [M].Earthscan Ltd:i London & Washinton;DC,2011:158-164.
- [70]钱翌,张培栋.环境经济学[M].化学工业出版社:青岛,2015.
- [71]孙静,刘学录,王淑媛等.黄河流域甘肃段高质量发展水平演变及驱动力分析[J].国土与自然资源研究,2023,(03):33-37.
- [72]萧峻琼,郝洁,徐高洪,等.长江经济带土地利用时空演变及相关社会要素分析[J].人民长江,2022,53(5):69-74.
- [73]赵方圆,杨宇翔,张华堂,等.土地利用及景观格局动态变化分析——以甘肃省党河流域为例[J].水土保持研究,2021,28(3):235-241.
- [74]孙兴辉,张海庆,白秀莲.呼和浩特市土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].内蒙古财经大学学报,2019,17(02):51-55.
- [75]曾杰,李江风,姚小薇.武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征[J].应用生态学报,2014,25(03):883-891.
- [76]吴翠霞,冯永忠,赵浩,等.基于土地利用变化的甘肃省黄河流域生态系统服务价值研究.中国沙漠,2022,42(6):304-316.
- [77]张玉娟,曲建光,王强,等.结合均匀度理论和 Moran's I 指数、广义 G 指数的景观格局全局自相关分析[J].测绘通报,2018,11:36-39.
- [78]曹玉红,陈晨,张大鹏,等.皖江城市带土地利用变化的生态风险格局演化研究[J].生态学报,2019,39(13):4773-4781.
- [79]陈仲新,张新时.中国生态系统效益的价值[J].科学通报,2000,45(1):17-22.
- [80]Curtis I A.Valuing ecosystem goods and services:a new approach using a surrogate

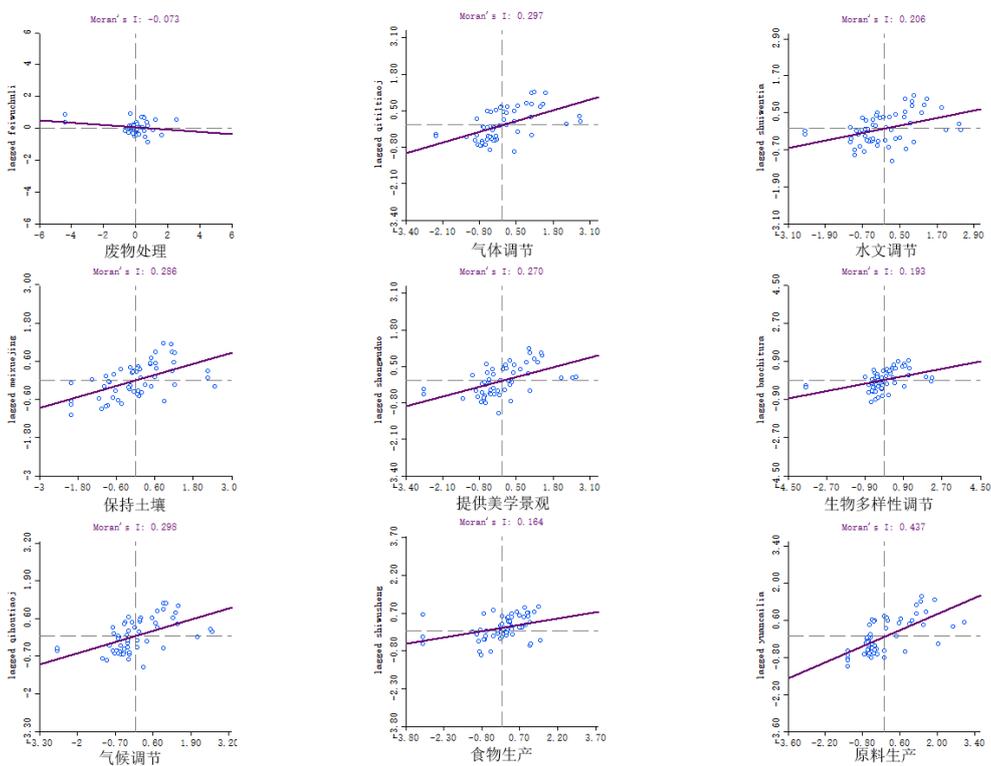
market and the combination of a multiple criteria analysis and a Delphi panel to assign weights to the attributes[J].*Polymer Engineering & Science*,2004,50(3/4):163-194.

- [81]熊鹰,张方明,龚长安,等.LUCC 影响下湖南省生态系统服务价值时空演变[J].*长江流域资源与环境*,2018,27(6):1397- 1408.
- [82]周侗,姚豪.基于 LUCC 的盐城市生态系统服务价值评估及其驱动力分析[J].*江苏林业科技*,2023,50(04):17-24.
- [83]闫晓露,潘婧雪.辽西北生态系统服务价值时空演化及其驱动力多维探测[J].*辽宁师范大学学报(自然科学版)*,2023,46(02):244-255.
- [84]王若思,潘洪义,刘翊涵,等.基于动态当量的乐山市生态系统服务价值时空演变及驱动力研究[J].*生态学报*,2022,42(01):76-90.

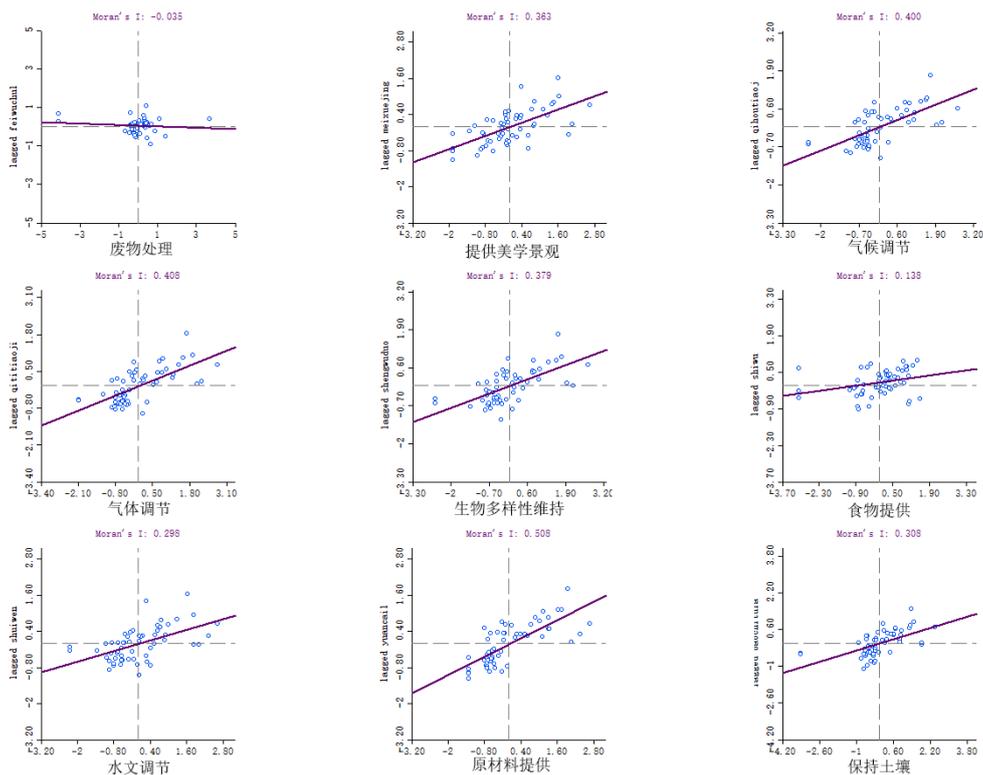
附录



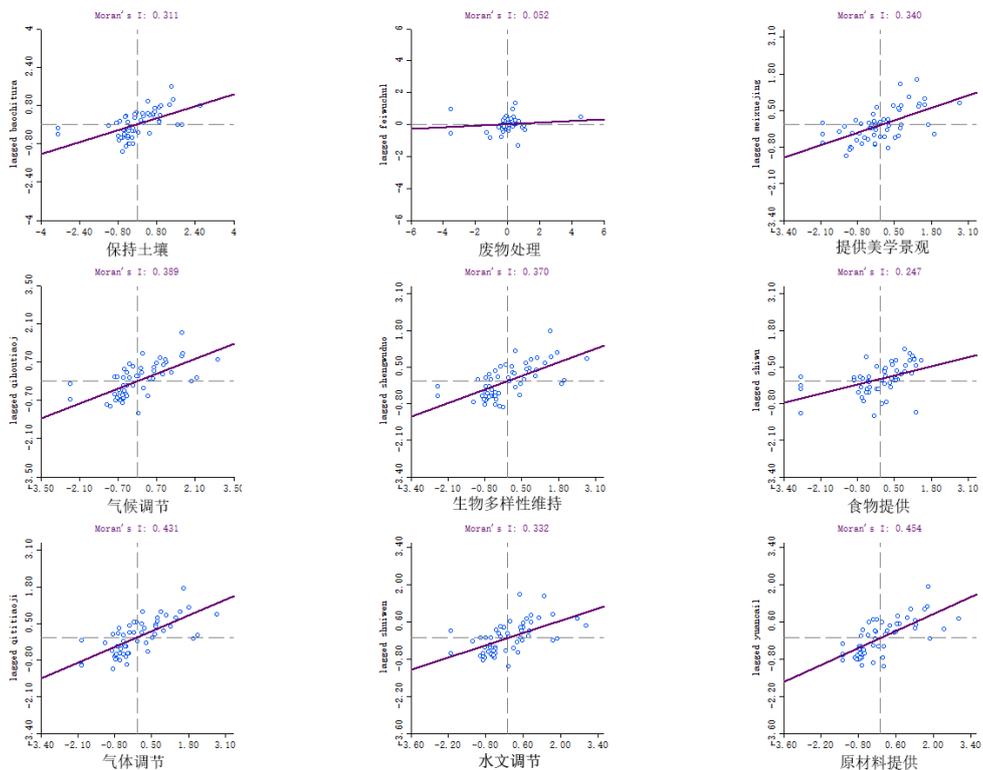
附图 1 2000-2020 年生态系统服务总价值 Moran 散点图



附图 2 2000 年单项生态系统服务价值 Moran 散点图



附图 3 2010 年单项生态系统服务价值 Moran 散点图



附图 4 2020 年单项生态系统服务价值 Moran 散点图

附表 1 人民生活情况

名称	地区生产总值 (亿元)	农村居民人均可支配收入 (元)	城镇居民人均可支配收入 (元)
城关区	1061.2	28948.4	45233.5
七里河区	492.1	21940.8	38549.9
西固区	391.5	21815.5	44360.5
安宁区	240.7	空	40668.9
红古区	100.0	22689.0	34610.8
永登县	112.6	12601.9	26763.5
皋兰县	81.0	12730.0	25651.0
榆中县	171.7	12422.6	27138.2
白银区	211.4	16930.4	40152.4
平川区	75.7	11521.3	38851.7
靖远县	75.7	11307.2	28324.0
会宁县	72.5	8858.4	20818.9
景泰县	62.0	12670.3	29394.7
秦州区	206.2	10488.8	32757.7
麦积区	168.8	9093.2	30505.2
清水县	36.9	8252.0	28405.6
秦安县	79.4	9212.2	29637.7
甘谷县	79.3	9096.9	29381.1
武山县	65.4	9463.6	28090.7
张家川县	30.9	8197.8	27700.5
天祝县	48.8	8843.6	27736.0
崆峒区	151.7	12156.5	31123.6
泾川县	40.4	11286.8	28341.3
灵台县	33.6	9762.9	25231.4
崇信县	39.6	9371.1	37157.2
庄浪县	68.3	7934.1	30861.0
静宁县	77.0	8919.6	28437.3
华亭市	65.6	10460.4	36787.7
西峰区	248.5	11700.1	35383.9
庆城县	78.9	10080.4	33656.2
环 县	109.6	10032.2	33127.7
华池县	96.8	10043.9	34484.2
合水县	57.7	10290.5	32337.5
正宁县	24.7	11309.2	31875.0
宁 县	59.6	10378.1	33491.6
镇原县	79.0	10121.7	32184.0
安定区	114.8	9205.5	28934.8
通渭县	54.7	7973.3	26071.3
陇西县	76.9	9781.0	26893.2
渭源县	40.1	8815.2	26562.1
临洮县	79.4	9294.9	27597.5
漳 县	24.4	8329.0	26774.5

岷 县	51.2	8347.8	27013.5
临夏市	95.9	16014.0	23961.5
临夏县	44.8	8545.7	23106.3
康乐县	22.4	8266.1	23034.8
永靖县	60.5	8032.6	23087.3
广河县	18.0	8913.8	22257.0
和政县	27.1	7691.3	22593.9
东乡县	36.2	6390.6	22053.8
积石山县	26.4	6858.7	22512.4
合作市	57.1	9298.0	27644.7
临潭县	26.1	8716.6	27300.0
卓尼县	29.1	8975.0	27654.7
玛曲县	21.6	10913.2	28895.6
碌曲县	14.4	10788.0	28424.7
夏河县	22.7	9162.1	27630.6

附表 2 2000 年黄河流域甘肃段各县区土地利用类型面积 (km²)

名称	耕地	林地	草地	水体	建设用地
安定区	2600.0	146.2	914.2	3.0	9.9
安宁区	22.4	0.0	37.3	4.3	19.5
白银区	316.0	34.9	964.1	6.8	39.5
城关区	42.9	0.5	115.0	4.9	47.1
崇信县	335.4	296.6	215.8	0.7	1.3
东乡县	747.3	0.3	735.9	36.3	6.4
甘谷县	1230.9	150.0	180.0	2.2	27.3
皋兰县	684.7	44.9	1734.6	5.3	15.3
广河县	399.3	0.1	133.9	0.9	6.2
合水县	535.9	1776.2	618.6	2.8	4.1
合作市	267.3	37.4	1802.1	3.0	5.9
和政县	456.2	33.4	543.5	1.0	2.1
红古区	131.9	0.8	387.5	5.6	12.4
华池县	1696.7	769.2	1321.9	3.9	1.6
华亭市	522.2	430.6	247.8	0.9	2.7
环县	3482.3	58.3	5648.2	5.8	4.9
会宁县	3850.8	97.6	1722.9	2.6	14.3
积石山县	547.0	12.0	348.9	2.7	2.4
泾川县	812.3	361.2	263.0	18.0	7.3
景泰县	1434.2	52.2	2514.0	16.6	33.6
靖远县	2091.9	66.9	2692.1	36.2	75.1
静宁县	1782.8	34.1	371.7	2.2	9.3
康乐县	622.3	4.1	330.7	0.4	7.5
崆峒区	1105.1	278.1	505.8	16.5	28.9
临潭县	575.1	117.2	831.4	3.5	9.9
临洮县	1845.2	32.0	962.8	18.8	23.8

续附表 2

名称	耕地	林地	草地	水体	建设用地
临夏市	69.1	0.0	5.7	0.1	15.0
临夏县	696.6	10.5	467.8	6.1	4.6
灵台县	812.9	816.6	348.0	1.0	2.0
陇西县	1989.4	3.0	405.3	1.1	26.0
碌曲县	116.2	65.1	4124.7	95.8	4.1
玛曲县	224.9	3.3	8928.7	639.2	3.7
麦积区	1018.7	2340.1	91.7	10.1	38.6
岷县	1388.6	1325.4	842.2	9.2	40.3
宁县	1003.1	900.3	715.6	6.6	28.7
平川区	690.5	31.5	1181.8	7.6	14.8
七里河区	250.8	4.9	109.6	2.2	30.8
秦安县	1467.8	15.9	113.0	1.4	14.2
秦州区	1317.7	850.9	187.0	0.5	29.4
清水县	1191.3	639.6	157.4	0.3	2.3
庆城县	1327.6	45.0	1309.5	4.6	7.1
天祝县	890.6	1710.5	3615.5	30.8	10.5
通渭县	2402.2	33.5	487.5	0.7	3.3
渭源县	1364.3	5.4	689.9	2.3	10.2
武山县	1064.0	437.3	478.3	1.8	29.9
西峰区	549.3	65.9	371.6	2.4	13.4
西固区	104.2	0.0	207.1	8.8	41.7
夏河县	323.6	62.0	5945.1	19.3	6.3
永登县	2140.4	83.4	3338.6	5.1	52.9
永靖县	718.7	1.2	1136.1	61.9	5.4
榆中县	1918.6	156.0	1227.6	6.9	13.6
张家川县	784.7	357.2	110.2	0.4	6.3
漳县	941.9	158.5	1072.9	0.0	11.0
镇原县	2388.9	18.2	1091.0	4.8	10.5
正宁县	444.4	585.5	291.9	0.6	11.4
庄浪县	1178.4	139.7	177.1	1.0	15.3
卓尼县	425.1	2509.5	2230.2	8.5	6.0

附表 3 2010 年黄河流域甘肃段各县区土地利用类型面积 (km²)

名称	耕地	林地	草地	水体	建设用地
安定区	2593.1	146.0	913.0	1.2	13.2
安宁区	20.5	0.0	37.5	2.7	22.2
白银区	318.4	34.8	961.2	4.7	36.6
城关区	44.7	0.5	114.8	3.5	45.8
崇信县	338.9	299.4	218.0	0.5	1.3
东乡县	737.3	0.3	730.2	40.7	6.2

续附表 3

名称	耕地	林地	草地	水体	建设用地
甘谷县	1212.4	215.7	125.0	4.6	34.7
皋兰县	686.5	44.4	1725.4	4.9	10.3
广河县	397.1	0.1	133.3	0.9	5.4
合水县	543.3	1804.5	627.1	4.1	5.7
合作市	259.4	586.2	1235.4	3.1	11.6
和政县	452.8	207.7	363.9	1.3	1.8
红古区	135.8	0.8	385.1	3.7	8.0
华池县	1722.6	778.9	1342.5	2.1	2.1
华亭市	525.4	433.0	250.2	0.1	5.0
环县	3516.4	58.9	5704.5	4.8	5.0
会宁县	3863.1	97.7	1724.6	1.5	4.0
积石山县	539.4	11.1	345.5	4.9	2.8
泾川县	838.7	358.0	273.9	1.2	7.4
景泰县	1445.0	14.1	2547.5	6.3	14.6
靖远县	2112.5	32.4	2722.1	30.8	57.7
静宁县	1787.9	34.1	372.8	1.8	10.5
康乐县	618.6	169.4	162.3	0.6	7.7
崆峒区	1129.7	279.7	511.1	0.7	29.6
临潭县	546.1	913.3	40.5	9.9	16.9
临洮县	1843.1	38.3	953.5	11.2	21.3
临夏市	62.5	0.0	5.8	1.5	19.4
临夏县	672.4	42.3	430.4	15.3	14.0
灵台县	825.3	872.3	304.0	0.2	2.2
陇西县	1976.1	122.4	289.0	0.3	32.6
碌曲县	109.7	1.2	4145.4	86.9	7.3
玛曲县	354.2	0.6	8184.5	1032.6	7.7
麦积区	998.8	2443.3	25.0	6.4	45.6
岷县	1371.1	2137.4	17.4	9.7	56.3
宁县	1017.6	913.5	727.3	6.0	30.2
平川区	694.4	31.4	1182.0	5.4	12.0
七里河区	248.6	4.8	109.0	2.0	31.4
秦安县	1471.9	23.8	109.9	0.0	12.1
秦州区	1294.5	1013.5	52.5	0.4	32.2
清水县	1173.4	816.1	10.0	0.1	2.4
庆城县	1344.2	45.5	1326.6	5.3	7.2
天祝县	884.4	1050.5	4470.5	28.3	6.9
通渭县	2403.8	46.0	476.4	0.2	3.3
渭源县	1357.2	343.6	348.2	1.5	12.8
武山县	1040.6	925.4	0.1	1.9	42.1
西峰区	553.3	66.8	376.9	1.8	16.8

续附表 3

名称	耕地	林地	草地	水体	建设用地
西固区	105.6	0.1	205.6	8.0	40.0
夏河县	304.2	304.1	5646.5	15.3	8.2
永登县	2137.6	49.4	3345.6	4.9	36.8
永靖县	702.3	1.2	1126.0	65.3	12.1
榆中县	1919.5	155.1	1223.2	7.0	5.8
张家川县	787.3	385.6	87.9	0.2	5.7
漳县	919.9	1231.3	9.1	0.1	17.0
镇原县	2416.0	18.4	1103.1	2.4	10.6
正宁县	441.3	626.0	266.4	0.3	22.1
庄浪县	1184.9	140.4	178.1	0.2	15.7
卓尼县	403.6	4013.9	692.0	17.2	11.1

附表 4 2020 年黄河流域甘肃段各县区土地利用类型面积 (km²)

名称	耕地	林地	草地	水体	建设用地
安定区	2570.6	5.6	1024.1	1.9	71.1
安宁区	7.2	0.0	35.5	2.5	38.2
白银区	300.7	0.4	963.6	6.3	89.6
城关区	32.1	0.0	94.6	3.2	80.4
崇信县	315.9	296.3	214.5	0.2	22.9
东乡族自治县	728.9	0.3	727.4	47.4	22.2
甘谷县	1179.3	215.3	125.1	4.8	65.8
皋兰县	594.3	0.6	1714.7	6.2	169.4
广河县	374.8	0.1	133.5	0.9	31.1
合水县	527.6	1773.5	616.3	0.6	19.6
合作市	248.8	683.0	1149.8	5.2	28.9
和政县	431.1	299.5	280.4	1.4	23.8
红古区	117.9	0.8	385.5	4.9	29.1
华池县	1691.5	762.4	1324.1	0.0	15.3
华亭市	492.1	427.6	248.6	0.2	35.6
环县	3470.8	57.8	5638.1	0.6	32.6
会宁县	3851.6	5.4	1715.3	3.8	112.3
积石山县	504.2	139.0	237.2	6.5	26.1
泾川县	764.7	352.9	269.9	0.3	73.8
景泰县	1438.1	24.4	2510.6	11.8	97.3
靖远县	2086.5	1.9	2656.8	42.1	192.3
静宁县	1737.1	33.9	373.1	6.6	49.3
康乐县	598.5	184.9	154.3	0.6	26.7
崆峒区	1077.8	277.3	504.6	0.7	74.0
临潭县	535.4	915.5	42.7	10.9	32.7
临洮县	1810.0	20.2	953.2	16.3	82.9
临夏市	46.5	0.0	5.4	1.2	36.9
临夏县	608.5	283.2	220.7	23.5	49.7

续附表 4

名称	耕地	林地	草地	水体	建设用地
灵台县	780.9	866.9	298.7	0.5	33.6
陇西县	1955.8	110.9	282.3	0.5	75.3
碌曲县	108.6	292.6	3902.8	91.1	10.8
玛曲县	343.2	0.5	8059.1	1367.9	9.9
麦积区	946.0	2427.4	24.3	6.3	95.2
岷县	1409.7	2090.2	17.8	11.1	76.8
宁县	964.5	902.3	715.1	0.9	71.4
平川区	682.0	10.4	1175.1	10.3	48.3
七里河区	224.0	29.2	85.7	1.5	57.7
秦安县	1438.0	23.8	111.7	0.7	38.0
秦州区	1250.2	1005.3	52.2	0.6	77.3
清水县	1137.3	809.1	9.7	0.1	34.5
庆城县	1310.7	44.7	1305.9	0.2	32.3
天祝县	850.7	1298.9	4052.5	30.1	35.9
通渭县	2364.4	23.4	496.5	0.1	42.8
渭源县	1342.5	364.8	327.3	3.1	34.2
武山县	1036.3	915.3	0.1	1.8	57.8
西峰区	510.5	65.8	369.6	1.8	54.9
西固区	84.0	0.0	201.4	7.6	68.7
夏河县	285.3	419.9	5593.9	21.2	35.3
永登县	2011.8	119.6	3290.0	8.2	200.3
永靖县	714.3	1.2	1107.3	74.5	26.1
榆中县	1813.5	97.1	1277.0	7.7	127.5
张家川县	746.9	387.1	81.7	0.3	42.7
漳县	914.5	1233.2	5.8	0.1	30.7
镇原县	2347.7	18.1	1090.3	1.2	56.2
正宁县	428.2	612.9	262.3	0.5	30.0
庄浪县	1155.4	138.9	175.0	0.4	41.6
卓尼县	391.6	4278.3	456.3	20.7	32.4

附表 5 2000 年黄河流域甘肃段各县区单项生态系统服务价值 (亿元)

名称	食物生产	原材料生产	气体调节	气候调节	水文调节	保持土壤	废物处理	保持生物多样性	保持美学景观
安定区	0.9	0.5	1.1	1.3	1.2	1.8	1.5	1.4	0.4
安宁区	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
白银区	0.2	0.2	0.5	0.6	0.6	0.8	0.5	0.7	0.3
城关区	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
崇信县	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	0.6	0.2
东乡县	0.3	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.7	0.6	0.3
甘谷县	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.8	0.6	0.7	0.2
皋兰县	0.4	0.3	0.9	1.0	1.0	1.5	1.0	1.2	0.5

续附表 5

名称	食物生产	原材料生产	气体调节	气候调节	水文调节	保持土壤	废物处理	保持生物多样性	保持美学景观
广河县	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1
合水县	0.4	1.6	2.6	2.5	2.5	2.7	1.3	2.8	1.2
合作市	0.3	0.2	0.9	0.9	0.9	1.3	0.8	1.1	0.5
和政县	0.2	0.1	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4	0.5	0.2
红古区	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.1
华池县	0.7	1.0	1.9	2.0	1.9	2.4	1.6	2.2	0.9
华亭市	0.2	0.4	0.7	0.8	0.7	0.9	0.5	0.8	0.3
环县	1.7	1.0	3.2	3.6	3.3	5.1	3.6	4.1	1.6
会宁县	1.3	0.7	1.6	1.9	1.7	2.8	2.2	2.2	0.7
积石山县	0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.1
泾川县	0.3	0.4	0.7	0.8	0.8	0.9	0.7	0.9	0.3
景泰县	0.8	0.5	1.8	1.9	1.9	2.8	1.9	2.3	1.0
靖远县	1.0	0.6	1.8	2.0	2.1	2.9	2.2	2.4	1.0
静宁县	0.6	0.3	0.6	0.7	0.6	1.0	0.9	0.8	0.2
康乐县	0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.1
崆峒区	0.4	0.4	0.8	0.9	0.9	1.1	0.8	1.0	0.4
临潭县	0.3	0.2	0.6	0.7	0.6	0.9	0.6	0.8	0.3
临洮县	0.6	0.3	0.8	1.0	1.0	1.4	1.2	1.1	0.4
临夏市	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
临夏县	0.3	0.1	0.4	0.4	0.4	0.6	0.5	0.5	0.2
灵台县	0.4	0.8	1.3	1.3	1.3	1.5	0.9	1.5	0.6
陇西县	0.6	0.3	0.6	0.7	0.6	1.1	0.9	0.8	0.2
碌曲县	0.6	0.5	1.9	2.0	2.4	2.8	2.0	2.4	1.2
玛曲县	1.3	1.0	4.0	4.4	7.3	5.9	6.2	5.5	3.0
麦积区	0.5	2.1	3.1	3.0	3.0	3.2	1.6	3.4	1.5
岷县	0.6	1.4	2.3	2.3	2.3	2.6	1.6	2.6	1.1
宁县	0.5	1.0	1.6	1.6	1.6	1.9	1.1	1.8	0.8
平川区	0.4	0.2	0.7	0.8	0.8	1.1	0.8	0.9	0.4
七里河区	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.0
秦安县	0.4	0.2	0.4	0.5	0.4	0.7	0.6	0.5	0.1
秦州区	0.5	0.9	1.4	1.4	1.4	1.6	1.0	1.6	0.6
清水县	0.4	0.7	1.1	1.1	1.1	1.3	0.8	1.3	0.5
庆城县	0.5	0.3	0.9	1.0	0.9	1.4	1.1	1.1	0.4
天祝县	0.9	2.0	4.0	4.0	4.1	4.9	2.8	4.6	2.1
通渭县	0.7	0.3	0.7	0.9	0.8	1.4	1.2	1.0	0.3
渭源县	0.5	0.2	0.6	0.7	0.6	1.0	0.8	0.8	0.2
武山县	0.4	0.5	1.0	1.0	1.0	1.3	0.8	1.1	0.4
西峰区	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.2
西固区	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
夏河县	0.8	0.7	2.7	2.8	2.8	4.0	2.5	3.4	1.6

续附表 5

名称	食物生产	原材料生产	气体调节	气候调节	水文调节	保持土壤	废物处理	保持生物多样性	保持美学景观
永登县	1.0	0.7	2.0	2.2	2.1	3.1	2.2	2.5	1.0
永靖县	0.4	0.2	0.6	0.7	1.0	1.0	1.0	0.9	0.4
榆中县	0.7	0.5	1.1	1.3	1.2	1.8	1.3	1.4	0.5
张家川县	0.3	0.4	0.6	0.7	0.6	0.8	0.5	0.7	0.3
漳县	0.4	0.3	0.8	0.9	0.9	1.3	0.9	1.1	0.4
镇原县	0.8	0.4	1.0	1.2	1.0	1.7	1.4	1.3	0.4
正宁县	0.2	0.6	0.9	0.9	0.9	1.0	0.6	1.0	0.4
庄浪县	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.8	0.6	0.6	0.2
卓尼县	0.6	2.4	4.1	4.0	4.0	4.5	2.3	4.5	2.1

附表 6 2010 年黄河流域甘肃段各县区单项生态系统服务价值 (亿元)

名称	食物生产	原材料生产	气体调节	气候调节	水文调节	保持土壤	废物处理	保持生物多样性	保持美学景观
安定区	0.9	0.5	1.1	1.3	1.1	1.8	1.4	1.4	0.4
安宁区	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
白银区	0.2	0.2	0.5	0.6	0.6	0.8	0.5	0.7	0.3
城关区	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
崇信县	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	0.6	0.2
东乡县	0.3	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.7	0.6	0.3
甘谷县	0.4	0.3	0.6	0.6	0.6	0.8	0.7	0.7	0.2
皋兰县	0.4	0.3	0.9	1.0	1.0	1.4	1.0	1.2	0.5
广河县	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	0.1
合水县	0.4	1.7	2.6	2.5	2.5	2.7	1.4	2.8	1.3
合作市	0.3	0.7	1.3	1.3	1.3	1.6	0.9	1.5	0.7
和政县	0.2	0.3	0.5	0.5	0.5	0.7	0.4	0.6	0.2
红古区	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.1
华池县	0.7	1.0	1.9	2.0	1.9	2.5	1.6	2.2	0.9
华亭市	0.2	0.5	0.7	0.8	0.7	0.9	0.5	0.8	0.3
环县	1.7	1.0	3.2	3.6	3.3	5.2	3.6	4.2	1.6
会宁县	1.3	0.7	1.7	1.9	1.7	2.8	2.2	2.2	0.7
积石山县	0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.1
泾川县	0.3	0.4	0.7	0.8	0.7	0.9	0.6	0.9	0.3
景泰县	0.8	0.5	1.7	1.9	1.8	2.8	1.9	2.3	1.0
靖远县	1.0	0.6	1.8	2.0	2.0	2.9	2.2	2.4	1.0
静宁县	0.6	0.3	0.6	0.7	0.6	1.0	0.9	0.8	0.2
康乐县	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4	0.5	0.2
崆峒区	0.4	0.4	0.8	0.9	0.8	1.1	0.8	1.0	0.4
临潭县	0.2	0.8	1.3	1.2	1.3	1.3	0.7	1.4	0.6
临洮县	0.6	0.3	0.8	1.0	0.9	1.4	1.2	1.1	0.4

续附表 6

名称	食物生产	原材料生产	气体调节	气候调节	水文调节	保持土壤	废物处理	保持生物多样性	保持美学景观
临夏市	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
临夏县	0.3	0.2	0.4	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.2
灵台县	0.4	0.9	1.4	1.4	1.3	1.5	0.9	1.5	0.6
陇西县	0.6	0.4	0.7	0.8	0.7	1.2	1.0	0.9	0.2
碌曲县	0.6	0.4	1.8	1.9	2.3	2.7	2.0	2.3	1.1
玛曲县	1.3	1.0	3.7	4.4	9.2	5.5	7.6	5.5	3.4
麦积区	0.5	2.2	3.2	3.1	3.1	3.2	1.6	3.5	1.5
岷县	0.6	2.0	2.9	2.9	2.9	3.0	1.6	3.2	1.4
宁县	0.5	1.0	1.6	1.7	1.6	1.9	1.2	1.9	0.8
平川区	0.4	0.2	0.7	0.8	0.7	1.1	0.8	0.9	0.4
七里河区	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.0
秦安县	0.4	0.2	0.4	0.5	0.4	0.7	0.6	0.5	0.1
秦州区	0.5	1.0	1.5	1.6	1.5	1.7	1.0	1.7	0.7
清水县	0.4	0.8	1.3	1.3	1.2	1.4	0.9	1.4	0.5
庆城县	0.6	0.3	0.9	1.0	1.0	1.5	1.1	1.2	0.4
天祝县	0.9	1.5	3.5	3.6	3.6	4.6	2.7	4.1	1.9
通渭县	0.7	0.4	0.8	0.9	0.8	1.4	1.2	1.0	0.3
渭源县	0.5	0.5	0.9	0.9	0.9	1.2	0.8	1.0	0.4
武山县	0.4	0.9	1.4	1.4	1.3	1.5	0.9	1.5	0.6
西峰区	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.2
西固区	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
夏河县	0.8	0.9	2.9	3.0	3.0	4.1	2.5	3.5	1.6
永登县	1.0	0.6	1.9	2.2	2.0	3.1	2.2	2.5	1.0
永靖县	0.3	0.2	0.6	0.7	1.0	1.0	1.0	0.9	0.4
榆中县	0.7	0.5	1.1	1.3	1.2	1.8	1.3	1.4	0.5
张家川县	0.3	0.4	0.7	0.7	0.7	0.8	0.5	0.8	0.3
漳县	0.4	1.1	1.7	1.7	1.6	1.8	1.0	1.9	0.8
镇原县	0.8	0.4	1.0	1.2	1.0	1.7	1.4	1.3	0.4
正宁县	0.2	0.6	1.0	1.0	0.9	1.1	0.6	1.1	0.5
庄浪县	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.8	0.6	0.6	0.2
卓尼县	0.6	3.5	5.3	5.1	5.2	5.2	2.5	5.7	2.6

附表 7 2020 年黄河流域甘肃段各县区单项生态系统服务价值 (亿元)

名称	食物生产	原材料生产	气体调节	气候调节	水文调节	保持土壤	废物处理	保持生物多样性	保持美学景观
安定区	0.9	0.4	1.0	1.2	1.0	1.7	1.4	1.3	0.4
安宁区	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
白银区	0.2	0.1	0.5	0.5	0.5	0.7	0.5	0.6	0.3
城关区	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0

续附表 7

名称	食物生产	原材料生产	气体调节	气候调节	水文调节	保持土壤	废物处理	保持生物多样性	保持美学景观
崇信县	0.1	0.3	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	0.6	0.2
东乡县	0.3	0.2	0.5	0.6	0.7	0.8	0.8	0.6	0.3
甘谷县	0.4	0.3	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6	0.7	0.2
皋兰县	0.4	0.3	0.9	0.9	0.9	1.3	0.9	1.1	0.5
广河县	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1
合水县	0.4	1.6	2.6	2.5	2.5	2.6	1.3	2.8	1.2
合作市	0.3	0.7	1.4	1.4	1.4	1.6	0.9	1.6	0.7
和政县	0.2	0.3	0.6	0.6	0.6	0.7	0.4	0.7	0.3
红古区	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1
华池县	0.7	1.0	1.9	1.9	1.8	2.4	1.5	2.2	0.9
华亭市	0.2	0.4	0.7	0.7	0.7	0.9	0.5	0.8	0.3
环县	1.7	1.0	3.2	3.5	3.3	5.1	3.5	4.1	1.6
会宁县	1.3	0.6	1.5	1.8	1.6	2.7	2.2	2.1	0.6
积石山县	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5	0.2
泾川县	0.3	0.4	0.7	0.7	0.7	0.9	0.6	0.8	0.3
景泰县	0.8	0.5	1.7	1.9	1.8	2.7	1.9	2.3	1.0
靖远县	1.0	0.5	1.7	1.9	2.0	2.8	2.2	2.3	0.9
静宁县	0.5	0.3	0.6	0.7	0.6	1.0	0.9	0.8	0.2
康乐县	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4	0.5	0.2
崆峒区	0.4	0.4	0.8	0.8	0.8	1.1	0.8	0.9	0.4
临潭县	0.2	0.8	1.3	1.2	1.3	1.3	0.7	1.4	0.6
临洮县	0.6	0.3	0.8	1.0	0.9	1.4	1.2	1.1	0.4
临夏市	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
临夏县	0.2	0.3	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	0.3
灵台县	0.3	0.9	1.4	1.4	1.3	1.5	0.8	1.5	0.6
陇西县	0.6	0.3	0.7	0.8	0.7	1.1	0.9	0.9	0.2
碌曲县	0.6	0.7	2.1	2.2	2.5	2.9	2.0	2.6	1.3
玛曲县	1.3	1.0	3.7	4.5	10.9	5.5	9.0	5.7	3.8
麦积区	0.5	2.2	3.2	3.1	3.1	3.2	1.6	3.4	1.5
岷县	0.6	1.9	2.9	2.8	2.8	3.0	1.6	3.1	1.3
宁县	0.4	0.9	1.6	1.6	1.6	1.9	1.1	1.8	0.8
平川区	0.3	0.2	0.7	0.7	0.7	1.1	0.8	0.9	0.4
七里河区	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
秦安县	0.4	0.2	0.4	0.5	0.4	0.7	0.6	0.5	0.1
秦州区	0.5	1.0	1.5	1.5	1.5	1.7	1.0	1.7	0.7
清水县	0.4	0.8	1.2	1.3	1.2	1.4	0.9	1.4	0.5
庆城县	0.5	0.3	0.9	1.0	0.9	1.4	1.0	1.1	0.4
天祝县	0.9	1.7	3.6	3.7	3.8	4.6	2.8	4.3	2.0
通渭县	0.7	0.3	0.7	0.9	0.8	1.3	1.1	1.0	0.3
渭源县	0.5	0.5	0.9	0.9	0.9	1.2	0.8	1.0	0.4

续附表 7

名称	食物生产	原材料生产	气体调节	气候调节	水文调节	保持土壤	废物处理	保持生物多样性	保持美学景观
武山县	0.4	0.9	1.3	1.3	1.3	1.5	0.9	1.5	0.6
西峰区	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.2
西固区	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
夏河县	0.8	1.0	3.0	3.1	3.1	4.2	2.5	3.6	1.7
永登县	1.0	0.7	2.0	2.2	2.1	3.1	2.1	2.5	1.0
永靖县	0.4	0.2	0.6	0.7	1.0	1.0	1.0	0.9	0.4
榆中县	0.7	0.4	1.0	1.2	1.1	1.7	1.3	1.4	0.5
张家川县	0.3	0.4	0.7	0.7	0.7	0.8	0.5	0.8	0.3
漳县	0.4	1.1	1.7	1.7	1.6	1.8	1.0	1.9	0.8
镇原县	0.8	0.4	1.0	1.2	1.0	1.7	1.4	1.3	0.4
正宁县	0.2	0.6	1.0	0.9	0.9	1.0	0.6	1.1	0.5
庄浪县	0.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.8	0.6	0.6	0.2
卓尼县	0.6	3.7	5.5	5.3	5.4	5.4	2.5	5.9	2.7

附表 8 黄河流域甘肃段各县区单项生态系统服务价值局部空间自相关分析

食物生产	2000年	HH:永靖县、临洮县、安定区、会宁县、通渭县、静宁县、庄浪县、秦安县	LL:碌曲县、皋兰县	LH: 华亭市	无
	2010年	HH:安定区、会宁县、通渭县、静宁县、庄浪县、秦安县	LL:碌曲县、皋兰县	LH: 华亭市、永靖县	HL: 临夏县、七里河区
	2020年	HH:临洮县、安定区、会宁县、陇西县、通渭县、静宁县、庄浪县	LL:皋兰县	LH: 麦积区	HL: 永登县、七里河区
原林株生产	2000年	HH:秦川区、清水县、泾川县、宁县	LL:临夏县、东乡县、永靖县、七里河区、城关区、西固区、安宁区、临洮县、榆中县、皋兰县	LH: 秦安县	HL: 红古区
	2010年	HH:卓尼县、临潭县、渭源县、漳县、岷县、宁县	LL: 景泰县、靖远县、会宁县、榆中县、临洮县、永靖县、红古区、西固区、七里河区、城关区、安宁区、皋兰县	无	无
	2020年	HH:卓尼县、临潭县、漳县、岷县、宁县	LL:景泰县、靖远县、平川区、会宁县、安定区、榆中县、白银区、皋兰县、安宁区、西固区、红古区	无	HL: 七里河区
气体调节	2000年	HH:宁县	LL:会宁县、通渭县、安定区、临洮县、东乡县、七里河区、西固区	无	HL: 城关区

续附表8

气候调节	2010年	HH:卓尼县、临潭县、漳县、岷县、环县	LL:静宁县、会宁县、榆中县、皋兰县、永靖县、东乡县、临洮县、七里河区、西固区	LH: 碌曲县	HL: 城关区
	2020年	HH:碌曲县、卓尼县、临潭县、漳县、岷县、合作市	LL:东乡县、临洮县、西固区、七里河区、城关区、安宁区、榆中县、皋兰县、安定区、会宁县、静宁县	无	无
	2000年	HH: 宁县、崇信县	LL:临夏县、东乡县、永靖县、临洮县、七里河区、安宁区、皋兰县	无	HL: 城关区
	2010年	HH:碌曲县、卓尼县、漳县、岷县	LL:永靖县、东乡县、临洮县、榆中县、皋兰县、西固区、七里河区	LH: 碌曲县	HL: 城关区
水文调节	2020年	HH:碌曲县、卓尼县、临潭县、漳县、岷县、合作市	LL:临洮县、安定区、会宁县、榆中县、皋兰县、七里河区、西固区、安宁区	无	HL: 城关区
	2000年	HH:碌曲县、宁县	LL:安定区、通渭县、静宁县	无	HL: 城关区、西固区
	2010年	HH: 碌曲县、卓尼县、临潭县、漳县、岷县	LL:东乡县、榆中县、安定区、会宁县、静宁县、通渭县	无	HL: 城关区、西固区
废物处理	2020年	HH:碌曲县、卓尼县、临潭县、漳县、岷县、合作市	LL:皋兰县、西固区、七里河区、临洮县、榆中县、会宁县、安定区、通渭县、静宁县	无	HL: 城关区
	2000年	HH:永靖县	无	LH: 红古区、安宁区	无
	2010年	HH:碌曲县	无	无	无
保持土壤	2020年	HH:碌曲县、积石山县	LL:皋兰县、西固区	LH: 临夏市	HL: 城关区
	2000年	HH:碌曲县、宁县	LL:东乡县、西固区、七里河区	无	HL: 皋兰县
	2010年	HH:碌曲县、卓尼县、临潭县、漳县、岷县	LL:东乡县、西固区、七里河区、城关区、皋兰县	无	无
维持生物多样性	2020年	HH:碌曲县、卓尼县、临潭县、漳县、岷县、合作市	LL:东乡县、西固区、七里河区、城关区、皋兰县	无	无
	2000年	HH:环县	LL:东乡县、临洮县、七里河区、城关区、安定区、通渭县	无	HL: 西固区
	2010年	HH:卓尼县、临潭县、漳县、岷县、环县	LL:东乡县、临洮县、七里河区、城关区、皋兰县、榆中县、安定区、会宁县、通渭县、静宁县	LH: 碌曲县	HL: 西固区
2020年	HH:卓尼县、临潭县、漳县、岷县、环县	LL:红古区、西固区、安宁区、皋兰县、白银区、景泰县、靖	无	HL: 城关区	

		远县、平川区、会宁县、安定县、榆中县			
	2000年	HH:碌曲县、合作市、环县	LL:临洮县、安定区、榆中县、通渭县、静宁县、城关区、安宁区、七里河区	无	HL: 西固区
提供美学景观	2010年	HH:碌曲县、卓尼县、临潭县、漳县、岷县	LL:皋兰县、榆中县、安定区、会宁县、通渭县、静宁县、城关区、七里河区、安宁区	无	HL: 西固区
	2020年	HH:碌曲县、合作市、卓尼县、漳县、岷县	LL:皋兰县、榆中县、安定区、会宁县、通渭县、静宁县	无	HL: 城关区

致谢

自 2021 年进入兰州财经大学经济学院以来,我无数次得到来自导师、学院、师门的帮助与指导,迷茫时刻也拥有家人朋友的理解与支持。毕业之际,首先要感谢我的导师许静教授,许老师敬业爱岗的工作精神、事必躬亲的科研态度、自律高效的生活习惯等,无一不对我产生深刻的影响。与许老师每一次敞开心扉的谈话,都使我更加了解自己、相信自己;在每一次日常组会中,许老师也会身体力行给学生做出表率。硕士论文写作期间,许老师耐心指导,促使我进一步理清思路,明确研究问题。课题项目工作中,许老师因材施教,注重培养我的文献阅读能力和写作能力,在鼓励的同时也会一针见血指出不足。日常生活中,许老师对我无条件的信任和竭尽所能的支持,常常帮助我很快解决学业、生活和感情等方面的问题,走出迷茫困惑。经师易得,人师难求,何其幸运遇到对我偏爱有加的人生导师。

其次,感谢教授本专业课程的刘建国老师、张永凯老师、石志恒老师、周茅先老师、武翠芳老师、苑莉老师、胡莉莉老师,每周的辛苦教学不断丰富我的知识体系,学习到了很多相关知识。

还要感谢同门师姐师弟,和大家在自习室坚持的每一天、一起参加的每一场学术会议,都见证了我们每天进步一点点的过程,山水一程,三生有幸。感谢刘慧在求学路上的一路默默陪伴,所谓深情不及久伴,希望未来能够走得更远。

最后感谢父母,春晖寸草,难以回报。没有家人的支持和关爱,我就没有足够的能量和精力在学校完成科研和工作任务。