

分类号 F224.0/82
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 “三生空间”下土地利用生态效率研究

研究生姓名: 徐方圆

指导教师姓名、职称: 王永瑜 教授

学科、专业名称: 应用经济学、数量经济学

研究方向: 计量经济学方法与应用

提交日期: 2023 年 5 月 30 日

独创性声明

本人声明所提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： 徐方圆 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 王永瑜 签字日期： 2023.5.30

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： 徐方圆 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 王永瑜 签字日期： 2023.5.30

Research on the effective of the use of the land in the eye of “three living spaces”

Candidate: Xu Fangyuan

Supervisor: Wang Yongyu

摘要

土地资源是一种有限资源，其特点之一是空间位置相对固定。随着我国经济建设的持续推进，人民生活的物质质量不断提升，由此产生的生态问题日益突出。由于工业化和城镇化的发展速度较快，我国城市建设用地规模不断扩大，道路硬化面积持续增加，农村生产用地和生态用地面积被动缩小，生产空间、生活空间和生态空间三者之间的矛盾愈演愈烈。为解决这一问题，必须加快转变生产方式，持续优化土地空间利用格局，以提高土地利用生态效率。基于此，本文通过构建“三生空间”下的土地利用生态效率的指标评价体系，明确三个子系统的土地利用生态效率在全国、区域及省域层面的具体状况，并在此基础上分析三个子系统的耦合协调度情况，探究“三生空间”下土地利用生态效率的影响因素，对推动区域协调发展具有重要意义。

本文首先梳理了近年来学者们关于“三生空间”及土地利用生态效率的基本内涵、指标体系的构建及测度方法的选择、时空特征和影响因素研究的相关文献，由于“三生空间”下子系统的耦合研究文献较少，本文对研究经济—社会—生态三者耦合协调的相关文献进行梳理，重点总结了土地利用生态效率的测度方法和实证研究方面存在的不足。其次，本文通过深入分析“三生空间”和土地利用生态效率的基本内涵，确认“三生空间”下土地利用生态效率指标体系构建的理论基础，从生产空间、生活空间和生态空间构建土地利用生态效率的指标评价体系，其中生产空间和生活空间包括城镇和农村两部分内容。基于此采用考虑非期望产出的超效率 SBM 模型测算除西藏、港澳台外我国 30 个省份 2003-2020 年“三生空间”下各子系统土地利用生态效率值，再通过运用熵权法求得“三生空间”下土地利用生态效率综合值；基于测算结果，对其时空特征进行分析；同时，由于“三生空间”是由三个子系统构成的，本文利用耦合协调度模型，度量了生产空间、生活空间和生态空间下的土地利用生态效率值的耦合协调水平，以进一步分析“三生空间”下土地利用生态效率的协调发展状况；最后，为进一步明晰导致“三生空间”下土地利用生态效率的差异化原因，本文通过构建个体时间双固定空间杜宾模型，分析不同影响因素对其影响程度的大小。研究结论如下：

(1) “三生空间”下土地利用生态效率的测算结果及变化趋势。从全国层面来看，2003-2020 年“三生空间”下我国土地利用生态效率综合值的平均值为

0.499, 处于中低水平, 变化趋势呈现“M”型; 其中, 三个子系统土地利用生态效率的排序为: 生产空间>生态空间>生活空间, 平均值分别为 0.826、0.517 和 0.333; 从区域层面来看, “三生空间”下七大地理区的土地利用生态效率整体波动范围在“0.4-0.6”之间; 其中, 生产空间下华北地区的土地利用生态效率值最高, 华中地区的土地利用生态效率最低; 生活空间下七大地理区整体保持下降状态; 生态空间下七大地理区之间的土地利用生态效率具有明显差异, 华南地区远高于其他地理区; 从省域层面来看, “三生空间”下我国 30 个省份的土地利用生态效率在 2003-2005 保持增长, 此后出现下滑; 其中, 生产空间下我国 30 个省份的土地利用生态效率优于生活空间和生态空间, 生态空间下土地利用生态效率水平最低。

(2) “三生空间”下土地利用生态效率的空间特征。研究表明, “三生空间”下我国土地利用生态效率空间差异显著, 华北地区和华东地区较高, 东北地区较低; 生产空间和生活空间下的土地利用生态效率具有明显的空间聚集现象, 而生态空间因其内部构成基本保持不变, 不存在显著的空间相关性。

(3) “三生空间”下土地利用生态效率的耦合协调度结果。生产空间、生活空间和生态空间的土地利用生态效率的耦合协调度处于轻度失调的水平, 即三者之间的良性耦合程度较低。

(4) “三生空间”下土地利用生态效率的影响因素分析。我国“三生空间”下土地利用生态效率存在显著的空间溢出效应, 空间滞后项系数显著为正, 即某个省份“三生空间”下土地利用生态效率的提升会对相邻省份产生正面影响。在考虑空间溢出效应的前提下, 经济发展对于“三生空间”下土地利用生态效率仍就呈现“U”型, 产业结构、人口密度和对外开放水平的提高会促进“三生空间”下土地利用生态效率的改善; 生产用地占比、土地开垦程度和土地财政压力的增加会对“三生空间”下土地利用生态效率产生负作用; 提高科技水平、增加环境污染治理投资有利于推动“三生空间”下土地利用生态效率的改善。

关键词: “三生空间” 土地利用生态效率 非期望产出的超效率 SBM 模型 耦合协调度 空间杜宾模型

Abstract

Land resources are a limited resource, and one of their characteristics is that their spatial location is relatively fixed. As China's economic construction continues to advance, the material quality of people's lives continues to improve and the resulting environmental problems become increasingly prominent. Due to the rapid development of industrialization and urbanization, the scale of China's urban construction land is expanding, the area of hardened roads continues to increase, the area of productive and ecological land in rural areas is passively shrinking, and the conflict among production space, living space and ecological space intensify. To solve this problem, it is necessary to accelerate the transformation of production methods and continuously optimize the spatial land use pattern to improve the ecological efficiency of land use. Based on the above, this paper constructs an indicator evaluation system for the ecological efficiency of land use under the "three living spaces" and clarifies the specific status of the ecological efficiency of land use in the three subsystems at the national, regional and provincial levels, and explores the factors influencing the ecological efficiency of land use under the "three living spaces". It is important to investigate the factors influencing the ecological efficiency of land use under the "three living spaces", which is important to promote the coordinated development of the region.

This paper firstly compares the literature on the basic connotation of the "three living spaces" and land use eco-efficiency, the construction of the indicator system and the selection of the measurement method of land use eco-efficiency, and the spatial and temporal characteristics of land use eco-efficiency, and influencing factors in recent years. "This paper compares the literature on the coupling and coordination of economic-social-ecological systems and summarizes the shortcomings in the measurement methods and empirical studies of land use eco-efficiency. Secondly, through an in-depth analysis of the basic connotations of the "three living spaces" and land use eco-efficiency, this paper identifies the theoretical basis for the construction of a land use eco-efficiency index system under the "three living spaces", and constructs a land use eco-efficiency index evaluation system from production space, living space and ecological space. The evaluation system of land use eco-efficiency indicators is constructed from production space, living space and ecological space, in which production space and living space include both urban and rural areas. Based on this, the super-efficient SBM model, which takes into account non-expected output, is used to measure the eco-efficiency values of land use in each sub-system under the "three living spaces" in 30 provinces in China from 2003 to 2020, except for Tibet, Hong Kong, Macao and Taiwan, and then the entropy weight method is applied to obtain the comprehensive eco-efficiency of land use under the "three living spaces". "Finally, since the "three living spaces" are composed of three subsystems, this paper uses the coupling coordination model to measure the ecological efficiency values of land use in the production space, living space and ecological space. At the same time, as the "three living spaces" are composed of three subsystems, this paper uses the coupled coordination model to measure the coupled coordination level of land use

eco-efficiency values in the production space, living space and ecological space, to further analyze the coordinated development of land use eco-efficiency in the "three living spaces". Finally, in order to further clarify the reasons for the differentiation of land use eco-efficiency in the "three living spaces", this paper analyzes the magnitude of the influence of different influencing factors by constructing an individual-time bifixed SDM. The findings of the study are as follows:

(1) The results and trends of land-use eco-efficiency under the "Three Life Spaces". At the national level, the average value of China's land use eco-efficiency under the "three living spaces" from 2003 to 2020 is 0.499, which is at a medium-low level, and the trend of change is "M"; among them, the three sub-systems of land use eco-efficiency are at the regional level, the overall land use eco-efficiency of the seven geographic regions under the "three living spaces" fluctuates between 0.4 and 0.6; the production space more than ecological space, which greater than living space. The mean value of them are 0.826, 0.517 and 0.333 respectively. At the regional level, the overall land use eco-efficiency of the seven geographic regions under the "Three Life Spaces" fluctuates between 0.4-0.6; among them, the highest land use eco-efficiency value is found in North China under the production space, the lowest in Central China, and the overall decline in the seven geographic regions under the living space; there are obvious differences in the land use eco-efficiency among the seven geographic regions under the ecological space, with South China being much higher than the other geographic regions; at the provincial

level, the At the provincial level, the land use eco-efficiency of 30 provinces in China under the "three living spaces" kept increasing from 2003 to 2005, and then declined thereafter; among them, the land use eco-efficiency of 30 provinces in China under the production space is better than that of the living space and the ecological space, and the land use eco-efficiency level under the ecological space is the lowest.

(2) Spatial characteristics of land use eco-efficiency in the "three living spaces". The study shows that the spatial differences in land use eco-efficiency under the "three living spaces" are obvious, with higher levels in northern and eastern China and lower levels in northeastern China; the spatial aggregation of land use eco-efficiency under the production space and living space is obvious, while there is no significant spatial correlation in the ecological space as its internal composition remains basicall unchanged. The spatial correlation between the ecological space and the production space is not significant because the internal composition of the space remains the same.

(3) The results of the coupling and coordination of land-use eco-efficiency under the "three living spaces". The degree of coupling and coordination of land-use eco-efficiency among production space, living space and ecological space is at a mildly dysfunctional level, i.e. the degree of benign coupling among the three is low.

(4)Analysis of the factors influencing the eco-efficiency of land use in

the "three-living space". There is a significant spatial spillover effect on the ecological efficiency of land use under the "three living spaces" in China, and the coefficient of the spatial lag term is significantly positive, that is, the improvement of ecological efficiency of land use under the "three living spaces" in one province will have a positive impact on the neighboring provinces. Under the premise of the spatial spillover effect, the economic development still shows a "U" shape on the ecological efficiency of land use in the "three living spaces", and the improvement of industrial structure, population density and openness level will promote the ecological efficiency of land use in the "three living spaces". The increase of industrial structure, population density and openness will improve the ecological efficiency of land use in the "three living spaces"; the increase of the proportion of productive land, the degree of land reclamation and the pressure of land finance will have a negative effect on the ecological efficiency of land use in the "three living spaces"; the improvement of science and technology and the increase of investment in environmental pollution control will help promote the ecological efficiency of land use in the "three living spaces". Improving the level of science and technology and increasing investment in environmental pollution control are conducive to the improvement of ecological efficiency of land use in the "three living spaces".

Keywords: "Three living spaces" Ecological efficiency of land use;
Super-efficient SBM model of undesired output; Coupled coordination
degree ; SDM

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	3
1.2 文献综述	3
1.2.1 “三生空间”及土地利用生态效率的内涵研究进展	4
1.2.2 土地利用生态效率的指标体系与测度方法的研究进展	5
1.2.3 土地利用生态效率实证研究进展	9
1.2.4 文献述评	11
1.3 研究内容与主要创新点	12
1.3.1 研究内容	12
1.3.2 主要创新点	13
1.4 研究方法与技术路线	13
1.4.1 研究方法	13
1.4.2 技术路线图	15
2 相关概念与理论基础	16
2.1 概念界定	16
2.1.1 生态效率	16
2.1.2 土地利用生态效率	16
2.1.3 “三生空间”	16
2.2 理论基础	17
2.2.1 土地规模报酬递减理论	17
2.2.2 生态经济学理论	17
2.2.3 土地资源可持续利用理论	18
3 “三生空间”下土地利用生态效率的测度框架	20
3.1 “三生空间”下土地利用生态效率指标体系的构建	20
3.1.1 构建原则	20
3.1.2 指标体系的构建逻辑	20

3.1.3 测度指标与说明	21
3.1.4 数据来源与说明	27
3.2“三生空间”下的土地利用生态效率的测度	28
3.2.1 测度模型的选择	28
3.2.2“三生空间”下土地利用生态效率的测度	29
3.3“三生空间”下土地利用生态效率的时空特征分析	31
3.3.1 时间趋势特征分析	31
3.3.1 空间趋势特征分析	38
4“三生空间”下土地利用生态效率耦合协调性分析	42
4.1“三生空间”下土地利用生态效率耦合协调机制	42
4.2“三生空间”下土地利用生态效率耦合协调模型	42
4.3“三生空间”下土地利用生态效率耦合协调度结果分析	43
5“三生空间”下土地利用生态效率的影响因素分析	46
5.1“三生空间”下土地利用生态效率影响因素的选择	46
5.2“三生空间”下土地利用生态效率影响因素实证分析	47
5.2.1 空间计量模型的选择	48
5.2.2 权重矩阵的设定	49
5.2.3 变量选取与数据来源	50
5.2.4 空间回归结果分析	51
5.2.5 稳健性检验	53
6 结论与建议	54
6.1 研究结论	54
6.2 政策建议	55
参考文献	57
致谢	62

1 绪论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

土地资源的不同的利用方式承担着不同功能,主要包括生产功能和生态功能等(刘超等,2016)。自1992年里约峰会以来,中国已经从低收入发展中国家转变为世界第二大经济体,走上了工业化和城镇化的道路(Lu Y, et al.,2019)。在加快实现工业化和城镇化建设的过程中,城市建设用地面积持续增加,由此导致的自然生态用地面积被动缩小,社会的生产-生活-生态布局构造发生改变。同时,在空间布局上,生活空间处于被生产空间支配的地位,伴随生产空间引致而来的生活空间持续扩张,二者空间扩张速度已然超出了生态空间自我调控能力的范围之外(许伟,2020),因此生产、生活和生态之间的空间结构处于失衡状态,空间矛盾问题亟待解决(廖李红等,2017;于婧等,2020)。从生产空间的功能出发,主要包括城镇建设用地和农业生产用地。生产空间视角下的城镇建设用地和农村生产用地的利用效率较低,工业生产用地是城镇生产用地的重要组成部分,其生态效率整体呈现下降趋势(黄和平,2020);在城镇化建设和工业化持续推进的进程中,存在耕地变荒地的现象,同时我国粮食生产重心向轮作指数低的华北转移,生态脆弱区的耕地利用效率低,整体可用耕地减少(Ting ting Li,2017);加之粗放的耕地利用方式,耕地利用生态效率持续降低(刘蒙罢等,2021)。因此,生产空间和生活空间对于生态空间的挤压是生态环境质量下降的重要因素(杨清可等,2018)。

根据2020年6月8日生态环境部、国家统计局和农业农村部联合发布的《第二次全国污染源普查公报》,其中显示2017年中国农业水污染物排放量已经远超工业水污染源排放量,其中化学需氧量、总氮、总磷排放量分别为1067.13万吨、141.49万吨和21.20万吨,分别占各自总排放的49.77%、46.52%和67.21%,农业生产所产生的污染不容忽视;工业污染源在水污染源的排放量虽低于农业污染源,但其大气污染物排放量惊人,其中二氧化硫529.08万吨,氮氧化物645.90万吨,颗粒物1270.50万吨,挥发性有机物481.66万吨;工业固体排放物、

伴生放射性矿的排放量较大。除此之外，生活源水排放量中城镇生活源水污染源排放量同农村生活源水污染源排放量相当。生产空间和生活空间所产生的污染排放量不容忽视。基于此，国家基于土地利用现存问题，制定了一系列的政策，以实现优化土地利用方式和改善土地利用结构的目的。2014年，《国家新型城镇化（2014-2020年）》中提出在兼顾土地利用结构持续优化和城镇化发展格局改善的基础上，进一步推动城市规模结构合理化建设，加快实现土地利用方式高效绿色。除此以外，在城市化建设过程中，以生态文明理念为指导，加快构建绿色城市，实现土地利用集约化，提高土地利用效率。2017年，《全国国土规划纲要（2016-2030年）》中提出在国土空间规划进程中，既要推动城乡协调发展，又要提升土地利用的协调性，不断提高土地利用可持续能力。党的十九大报告中再次表明为持续推动土地空间开发格局的协调性，提高土地利用开发效率，必须要完善自然资源管理制度，采取多种措施以加快推动我国生态国土建设。2020年11月，习近平总书记在江苏考察时强调，“处理好城市的生产空间、生活空间和生态空间之间的关系，既有益于经济高质量发展，又可改善人们生活水平”。同时在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》（后文简称“《纲要》”）中，提出把乡村建设摆在社会主义现代化建设的重要位置，优化生产生活生态空间，持续改善村容村貌和人居环境，建设美丽宜居乡村。因此，优化生产-生活-生态布局，要兼顾城镇和农村，从两方面入手，共同实现生产-生活-生态空间的布局优化。

社会经济的发展离不开土地作为其重要的空间载体，既要注重土地满足社会经济发展的需要，也要重视土地利用生态效率，合理配置各类资源，提升土地的集约和节约利用。因此，本文结合“三生空间”中的生产空间、生活空间和生态空间的内涵，即生产空间的主要功能是工农业产品的生产；生活空间则以为人类的居住、消费和休闲等活动提供场地为主导功能；生态空间一方面承担着生态调节的功能，另一方面也担负着向生产和生活空间提供生态产品与服务的职能（邹利林等，2018；黄金川等，2017），厘清“三生空间”下生产空间、生活空间和生态空间三者之间的关系，展开对“三生空间”下土地利用生态效率的研究，明晰土地利用生态效率的内涵，构建合理的指标体系对其进行测度，同时通过对比分析30个省份生产空间、生活空间和生态空间的土地利用生态效率的耦合协调

度的区域差异性，分析造成“三生空间”下土地利用生态效率差异性的原因，以期为我国土地利用生态效率的提高提出更有价值的政策建议，同时为我国不同区域进一步优化土地利用结构提供相应的理论依据。

1.1.2 研究意义

自 2021 年以来，我国进入新发展阶段，开启全面建设社会主义现代化国家新征程。在《纲要》中提出加强土地节约集约利用，完善土地复合利用。以地市（州）为单位，确立了逐年减少 10% 的污染物排放总量控制目标，以缓和生态环境与工业发展之间的关系（Lin et al., 2016）。因此，从空间视角理解土地利用生态效率，有利于实现“三生空间”之间的协调发展，有利于实现可持续发展。因此本文的研究在理论和现实方面都具有重要意义。

（1）理论意义

首先，要明晰“三生空间”下我国土地利用生态效率的时空差异、耦合协调度水平及影响因素，则需对土地利用生态效率进行准确测度。目前关于土地利用生态效率的测度方法较多，方法各有优劣。通过对比和梳理不同测度方法，结合本文研究所需选择更合适的方法，可以为今后的研究提供方法选择的参考；其次，目前鲜有学者从“三生空间”下对土地利用生态效率综合值进行测度分析，同时多数学者从生产空间视角对土地利用生态效率进行测度，鲜少有学者从生活空间和生态空间视角出发，构建指标体系对土地利用生态效率进行测度，本文试图充实这部分的理论研究内容。

（2）现实意义

提高土地利用生态效率是实现土地高效利用的重要举措，是实现“三生空间”协调发展的重要途径。通过构建“三生空间”下土地利用生态效率的指标体系并对其进行测度，在分析其时空特征、耦合协调度和影响因素的基础上，有针对性的提出相关政策建议，对于实现区域间以及区域内部“三生空间”的协调发展具有重要的现实意义。

1.2 文献综述

本文对“三生空间”下土地利用生态效率进行研究。通过查阅已有文献，关于“三生空间”下土地利用生态效率的研究相对较少，为了研究需要，接下来主

要梳理“三生空间”及土地利用生态效率的基本内涵、指标体系的构建及测度方法的选择、时空特征及影响因素研究的相关文献，由于“三生空间”下子系统的耦合研究文献较少，本文对经济—社会—生态三者耦合协调的相关文献加以梳理和评述。

1.2.1 “三生空间”及土地利用生态效率的内涵研究进展

(1) 关于“三生空间”的内涵研究

党的十八大以来，构建秀美、集约、宜居的三生空间是优化国土开布局的目标和原则，目前，众多学者对于三生空间的理论内涵和框架展开深入研究（崔家兴等，2018；刘继来等，2017）。对于“三生空间”的划分，最为常见的方法是地类归并法，这一方法的基本思路是系统是复杂的、难以识别，但主导功能形式是独特和稳定的，相同的土地类型具有相同的土地功能。（李晓青，2019）。因此，目前普遍认可的“三生空间”的划分依据是土地功能，即生产空间的主导功能是生产工农业产品；生活空间的主要功能是为人类的居住、消费和休闲等活动提供场地；生态空间的主要功能则是生态调节和生态产品与服务的提供（邹利林等，2018；黄金川等，2017）。

(2) 关于土地利用生态效率基本内涵

土地作为一种自然资源，其生态效率的内涵亦是从投入产出的视角出发，但关于土地利用生态效率的内涵的具体定义尚未形成统一意见。现有学者主要基于生产空间角度，对城市用地土地利用生态效率或是从产业角度对土地利用生态效率进行测度，存在多种名称，如“城市用地生态效率”、“耕地生态效率”、“土地生态效率”“土地利用绿色效率”、“土地利用环境效率”等。其均是从投入产出视角，利用测度方法度量土地利用过程中一定生产要素投入所能实现的社会经济产出最大化和环境污染最小化的大小，以其表征土地利用生态效率的大小。

首先，生态效率的概念由德国著名学者 Schaltegger 等（1990）首次提出的。他认为生态效率由经济增加值和环境影响之间的比值来衡量的。随后，世界可持续发展工商委员会（WBSCD）在 1992 年首次从工业角度分析了生态效率，认为其是以满足人类生产发展为目的的，基于此提出用最终产品服务与生态环境影响的比值来表示生态效率；1998 年经济发展合作组织（OECD）从经济产出与环境投入的比值关系入手，将生态效率定义为生态资源满足人类需求的效率水平；

欧洲环境署（EEA）对生态效率的定义是资源的投入和消耗的最小化，人类社会福利的最大化。生态效率不仅考虑资源消耗对环境的影响（Korhonen & Luptacik, 2004），同时要考虑废弃物排放对环境的影响，综合考量二者对环境所造成的污染才是生态效率（Dyckhoff & Allen, 2001）。学者们（诸大建（2005）、田炯等（2009））从经济和社会的关系出发，用经济价值同资源消耗的比值来度量生态效率，其中有学者（郭艳桃（2010））用财务指标代替经济指标对生态效率进行测度；亦有学者（史丹、王俊杰（2016））从经济和生态的关系出发，利用生态足迹法对生态效率进行测度。

其次，以生态效率为基础探究土地利用生态效率的内涵。目前，关于土地利用生态效率的内涵并未形成完全统一意见，多数学者从投入-产出视角出发，以经济要素为投入，经济效益和生态效益为产出，也有学者从供求视角出发，土地覆被为土地供给，经济建设为土地需求，基于此对土地利用生态效率进行分析。两种内涵具体如下：一是将土地利用生态效率理解为土地利用过程中资本等要素的投入所带来的经济效益和环境污染,实现经济效益最大化的同时环境成本最小化，如我国研究土地利用生态效率的学者游和远等（2011）、谢曼曼和李秀霞（2015）、姚成（2015）、钟成林（2019）从投入产出的视角来研究资源消耗与生态利用价值问题，将土地利用生态效率定义为基于过程耦合土地利用与生态影响，以土地利用成本最小时生态价值最大化。为进一步分析土地利用生态效率值，宋家鹏等（2021）用单位面积土地投入的各类资源所产生的经济效益，以及该经济效益下单位面积土地所承担的生态成本来表征土地利用生态效率；二是以土地利用强度和结构为视角，土地利用的生态结果用景观指数加以表示，作为土地利用过程的产出，用人为占用初级生产力表征土地利用需求，作为土地利用过程的投入，基于以上数据对土地利用生态效率进行测度分析（李晓阳（2019））。本文参考土地利用生态效率的第一类内涵，即土地利用生态效率是土地利用过程中经济、社会要素投入所带来的经济、社会和生态效益的大小，以及在此过程中流入生态空间的废弃物的数量，用其来衡量土地利用生态效率。

1.2.2 土地利用生态效率的指标体系与测度方法的研究进展

由于学者们对土地利用生态效率基本内涵虽有不同理解，指标构建有所差异，但土地利用生态效率的测度方法基本一致，主要有指标体系法、基于参数的生产

函数测度法（SFA）和非参数效率测算法（DEA）。

（1）关于土地利用生态效率的指标体系的构建

衡量土地利用生态效益的指标体系已经从单一投入、单一产出发展到多投入、多产出，但还没有形成统一的指标体系。就研究视角而言，现有文献主要是从单一的生产空间视角下对土地利用生态效率进行测度，即城镇土地利用生态效率和农村生产用地生态效率研究，而在生活空间和生态空间这两个视角下对土地利用生态效率的研究相对较少。

首先是单指标评价法，主要基于单投入单产出的比例进行测度（韩峰和赖明勇，2016）。其次是多指标综合评价法，即构建土地利用生态效率指标体系，通过使用各种不同的方法计算各指标的权重，再通过综合加权对效率值进行计算（方先知，2004；曹银贵等，2012；Zhang et al., 2020；杨斌等，2018）。

关于指标体系中投入和产出指标的选择，郭艳桃等（2010）选取多种废弃物排放量、总能耗、总电耗为输入指标，以地区地均 GDP 为输出指标，计算省际土地利用生态效率，并对空间差异进行分析。与前者相反，游和远等（2011）选取多种生产要素衡量土地利用的投入情况，用 GDP 表征土地利用的期望产出情况，并将工业废物等作为非期望产出纳入计算中，同郭艳桃等（2010）将其作为投入指标不一；基于游和远等（2011）构建的土地利用生态效率的指标体系，学者们结合本省经济发展现状对省域土地利用生态效率进行测度（盖兆雪等（2014）；姚成（2015））；钟成林（2019）等学者基于游和远（2011）对土地利用生态效率指标体系构建的基础上，认为土地生态效率是基于过程耦合土地利用与土地生态影响，即既定期望产出下资源投入最小、生态环境代价最小，基于此从投入产出角度构建指标体系，投入指标为地均资本、地均非农产业劳动力水资源消耗量和地均原煤消费量，期望产出为非农产业 GDP，非期望产出为地均工业废水、工业粉尘和二氧化硫排放量。在省域研究的基础上，学者们从产业层面出发，对农业用地生态效率进行测度。田伟等（2014）、田云等（2015）、卢新海等（2018）、Kuang et al.（2020）、张晓雨（2020）在计算农业碳排放的基础上，将其纳入非期望产出并测度了我国农业环境效率，事实上其只考虑到农业生产过程产生的各种污染物对其影响，而忽视了农业生产过程中消耗资源所带来的消极影响。Xie et al.（2018）将农业面源污染纳入到农业用地利用效率评价指标体系中，将其作为

非期望产出，探究 1997-2009 年间中国 31 个省农业生产利用效率水平。封永刚等（2015）、盖兆雪等（2017）等在前者的基础上，为进一步完善耕地利用效率的指标体系，将耕地面源污染和碳排放量的大小作为耕地生产的限制条件，再对耕地利用生态效率进行细化研究分析。吴振华等（2018）、刘蒙罢（2021）以资源消耗量和污染物排放量作为投入要素，以农业产出值衡量产出水平，从资源、环境和经济三个维度出发，构建农业土地利用生态效率的指标评价体系并对其进行测度分析。

（2）关于土地利用生态效率测度方法

由于单一指标法无法全面的反映土地利用生态效率，多指标方法在权重选择时具有较大的主观性，测度结果不够客观。因此，为避免以上问题，多数学者在指标体系构建的基础上，运用生产前沿分析方法对其进行测度。以两种方法为代表，分别是 SFA（随即前沿分析）参数法和非参数方法 DEA（数据包络分析）。

首先，SFA 方法是通过确认生产前沿函数的参数值，再进行效率测度，测度结果为绝对效率值。从省域视角出发，金贵等（2018）在研究广东省农业生产效率的过程中，由于农业自身具备碳汇和碳源的双重属性下，兼顾二者对耕地利用生态效率的影响，使用 SFA 对其土地利用生态效率进行测度；Liu et al.（2020）对城市土地利用生态效率展开研究，通过构建随机前沿生产函数模型，对其效率值进行测度，研究发现城市土地利用生态效率时空差异显著。

数据包络分析（Data Envelopment Analysis, DEA）通过求解线性规划来确定生产前沿面，测度结果为相对效率，其优点是不需要特定生产函数，可以对多种投入和产出要素进行客观评价，并被广泛用于衡量城市土地利用生态效率水平（田浩辰，2018；Zhu et al., 2019）。Hoang & Alauddin（2012）使用投入为导向的 DEA 模型测对 30 个经合组织国家的农业生态效率进行测度。郭艳桃（2010）、谢曼曼和李秀霞（2015）、吴振华和雷琳（2018）分别从全国、省域层面出发，利用传统 DEA 对土地利用生态效率进行测度。Coluccia et al.（2020）采用 DEA 模型对意大利地区农业生态效率进行剖析，研究结果显示南部农场相较于北部农场更加关注土地的永续利用问题，而北部市场则将土地生产力的上限值作为重中之重进行考量。

基于传统 DEA 模型改进的非径向、非角度的 SBM 模型正越来越多的被应

用与生产空间下城镇土地利用生态效率的测度。学者们既从城市群、省级和市级层度对城镇土地利用生态效率进行分析,亦从更加微观的层面即产业角度展开分析。首先,从研究层面来看,针对城镇土地利用生态效率,杨清可等(2014)、李长健和苗苗(2017)运用含非期望产出的 SBM 模型对城市群的土地利用生态效率进行度量;也有学者(Yu et al.(2019))以土地利用和经济发展的耦合状况为基础,借助非期望 SBM 模型对城市群的土地利用生态效率进行测度;为将非期望纳入指标体系中,聂雷等(2017)采用了非期望 SBM 和 Meta-frontier 模型方法,以中国地级市为研究区域,对研究期 2000-2014 间城镇土地利用生态效率进行研究;陈振等(2019)在构建 SBM-DEA 模型的过程中加入非期望产出,基于此再对河南省 18 个地市的农业生产效率进行测算;其次,从产业角度来看,学者们多聚焦于农业用地的土地利用生态效率研究。李博等(2016)结合碳排放视角,围绕农业生态效率测度问题,运用包含非期望产出的 SBM 模型对我国各省份 1998-2012 的农业生态效率进行具体的量化分析。

需要指出的是,非期望 SBM 模型在测度时仍存在短板,即当决策单元效率值大于 1 时,多个决策单元之间的效率差异情况无法进行比较分析,仅可得出二者实现完全有效的结论,而考虑非期望产出的 Super-SBM 模型解决了这一不足,学者们将这一方法应用于城市土地利用生态效率中的测度(侯孟阳和姚顺波,2018;Zhu et al.,2019;卢新海等,2020)。也有学者将其应用到对农业生态效率进行测算,使得测度结果更加贴合实际,提高了测度的精准性,便于为实际问题提供新的解决路径(邹秀清等,2019;张义祥等,2020)。不同于以往学者聚焦于经济群的土地利用生态效率的测度,有学者将自然研究区作为自己的研究区域,刘蒙罢(2021)年以洞庭湖平原为研究区域,利用耕地利用 2007-2017 的面板数据,从耦合角度构建耕地利用生态效率评价指标体系,结合超效率 DEA-SBM 模型对洞庭湖平原内耕地利用生态效率进行测度。

通过对上述测度方法的对比,从本文实际研究需要出发,选择采用含非期望产出的超效率 SBM 模型来度量“三生空间”下土地利用生态效率,因为这一方法不依赖于生产函数的设定,且可以在多个单元值同时为 1 时进行大小比较,也包含了非期望产出,可以更加全面的对土地利用生态效率进行测度。

1.2.3 土地利用生态效率实证研究进展

基于土地利用生态效率的测度结果，学者们对其时空特征和影响进行分析。由于现有文献中，较少学者从“三生空间”对土地利用生态效率进行综合测度，因此，本文通过梳理现有文献中关于社会经济发展同土地利用生态效率的耦合协调研究，以期为本文构建耦合协调度模型提供理论支持。

(1) 关于土地利用生态效率的时空特征研究

盖兆雪等（2014）在测度土地利用生态效率的基础上，发现各个城市生态效率存在明显差异且变化不同，不同规模和类型的城市之间也存在差别，大中城市明显低于小城市，煤炭城市低于非煤炭城市。黄鑫等（2018）运用探索性空间数据分析（ESDA）对土地利用效率的时空异质性进行分析，研究结果显示在研究期内中国土地利用生态效率水平处于较低水平，空间上呈现出西高东低、南北分异的分布特点；郑德凤等（2018）从县级层面出发，采用考虑非期望产出的 SBM 模型对甘肃省 2000-2014 年间农业生态效率进行测算，再基于 ESDA 阐明空间布局现状，研究结果为甘肃省空间集聚现象显著，东西差异大于南北差异，整体变化趋势呈现自西向东、自南向北递减态势。刘蒙罢等（2021）运用非期望 SBM 模型、空间自相关模型及马尔可夫链模型研究长江中下游粮食耕地利用生态效率，其主要观点为长江中下游粮食主产区在 2007-2018 年间平均耕地利用生态效率值区域发展不平衡，耕地利用生态效率在中低效率区间波动，呈现下降趋势。马林燕等（2022）选择省级耕地利用生态效率作为研究对象，采用核密度估计和趋势面分析方法对其进行研究，其结果表明各省耕地利用生态效率空间差异明显，效率值范围在研究期 2007-2018 年间由 0.408-3.976 缩小至 0.353-2.046，尽管各区域耕地利用生态效率均值持续下降，但东北地区不仅高于全国水平，还呈现上升趋势。张诗嘉等（2022）以黄河下游城市群为研究区域，利用空间自相关模型分析其空间相关性，研究发现 2006-2018 年间，黄河下游城市群土地利用生态效率整体水平较低，整体呈现波动上升趋势；存在显著正向的空间相关性，具有空间溢出效应。

(2) 关于社会经济发展同土地利用生态效率的耦合协调度研究

伴随经济发展而来的生态环境问题日益被关注，我国诸多学者从经济发展和生态环境二者之间的关系出发，对其耦合协调度进行分析。方创琳等（2016）构

建了城镇化同生态环境的交互耦合效应的基本理论框架,首次从理论上分析特大城市群的人地系统的耦合情况;姜磊等(2017)通过构建省域经济、资源和环境的耦合协调模型,对全国31个省份的耦合协调水平进行研究,发现空间是呈现随机分布;刘海猛等(2019)构建城镇化同生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架,刘玉凤等(2019)以京津冀为研究区域,定量分析了城镇化、经济增长与环境生态之间的耦合作用,白帅等(2022)从城市角度出发,以河南省为研究对象,分析城市韧性同土地利用的耦合协调性,以期分析城市发展同城市周边生态系统的协调发展状况;刘希朝(2022)从人系统和地系统的耦合协调度出发,以江苏省为例分析其与“三生空间”的空间适配性,这为本文构建“三生空间”下土地利用生态效率的耦合协调度模型提供了理论支持。

(3) 关于土地利用生态效率的影响因素研究

基于土地利用生态效率的测度结果,有学者对土地利用生态效率的影响因素进行分析,主要通过自然、社会、经济、政策等角度进行影响因素分析,也有学者从具体的某个影响因素的视角出发,如经济聚集、城镇化建设等视角分析其对于土地利用生态效率的影响机制和影响程度。

生产空间视角下,学者们从城市层面出发,对土地利用生态效率的影响因素展开分析。总的来看,城市土地利用效率的影响因素研究主要集中于自然地理条件、经济发展水平、产业结构、人口因素、政策制度等方面。通过测度我国建设用地利用效率,赵伟等(2016)从自然、行政、社会、经济和环境视角出发,运用Tobit模型分析城市建设用地利用效率的影响因素;研究发现,产业结构、用地规模、农业结构、相关政策和环境因素是导致城市土地利用效率差异化的主要原因(胡碧霞等,2018;杨浩然等,2017);李国煜等(2020)结合碳排放约束分析城镇建设用地利用效率的影响因素,发现产业结构、土地城镇化、外商直接投资力度对城镇建设用地利用效率的提高有积极作用,能源结构系数有抑制作用;亦有学者从农村层面出发,对农业用地生态效率的影响因素展开分析,研究发现,产业结构差异、农业结构差异、受灾害程度、农村人口素质等对中国农业生产效率的区域差异产生较大影响(李博等,2016;吴振华等,2018;郭思源等,2019);吴振华等(2018)通过引入环境变量对农业土地生态效率进行测度,研究发现城镇化水平对农业土地生态效率有正向也有负向的影响,农业财政支出的增加会抑

制农业土地生态效率，第三产业占比增加会推动农业土地生态效率的改善；

同时，学者们从某一因素出发，分析其对土地利用生态效率的影响程度。生产空间视角下，卫晓庆等（2020）从城镇化视角下，运用 STRIPAT 模型开展城镇化水平对土地利用生态效率的影响，发现其对于提升土地利用生态效率具有积极作用；王辰璇等（2022）从农业科技支出出发，利用面板门槛回归分析农业科技支出对于农业生态效率的影响，研究发现其对于农业生态效率具有正向作用，存在明显的空间差异，即东部地区较早实现了农业科技支出对农业生态效率的拉动作用；马林燕等（2022）在耕地利用生态效率的基础上，利用地理加权模型分析其影响因素，研究发现资源禀赋、经济发展水平、自然条件和生产条件均对耕地利用生态效率产生影响，但影响方向和程度在不同年份、不同区域有差异。张诗嘉等（2022）运用 SDM 模型对土地利用生态效率的影响因素进行研究，研究发现经济发展水平、产业结构、科技投入对提高土地利用生态效率具有积极作用，而财政压力和生态压力产生抑制作用。

1.2.4 文献述评

综上所述，目前由较多学者以土地利用生态效率的测度作为研究内容，对其展开深入分析。伴随着学者们对土地利用生态效率的内涵理解的逐渐深入，同时生产空间、生活空间以及生态空间的概念日益清晰，众多学者从城市、区域层面对土地利用生态效率的测度、时空特征、影响因素进行了不同程度的研究，但从目前研究成果来看仍存在以下不足：

（1）关于土地利用生态效率的指标体系的构建尚未形成统一的标准，学者主要针对土地利用的某一具体类型的生态效率展开分析，在全局视角下对土地利用生态效率进行探讨的文献相对稀缺。

（2）关于研究视角，学者主要集中于生产空间的土地利用生态效率研究，部分学者开始关注农业用地生态效率，但鲜有学者关注生活用地的生态效率，同时对于生态空间中的研究中，土地利用数据多采用截面数据而非面板数据，缺乏一定的连续性。

（3）关于系统协调发展，学者主要集中于经济发展同生态环境的耦合协调水平，较少有学者关注到生活空间人类活动同生态空间的耦合协调水平。

1.3 研究内容与主要创新点

1.3.1 研究内容

本文针对“三生空间”下的土地利用生态效率的时空特征及耦合协调度进行研究，以土地利用生态效率为主线，通过梳理现有国内外相关文献并给与述评，研究区域为我国除西藏及港澳台地区的 30 个省份。论文的具体研究内容如下：

第一章绪论。主要包括研究背景与研究意义、国内外研究现状分析、研究内容及可能的创新点、研究方法与技术路线图。

第二章土地利用生态效率的相关概念及理论基础。在明晰生态效率的前提下，进一步厘清土地利用生态效率的基本内涵；同时明确“三生空间”的具体内涵及划定方法与依据。

第三章构建“三生空间”下土地利用生态效率的指标体系的测度框架。通过梳理文献，明晰土地利用生态效率基本内涵，结合“三生空间”的划分标准，对照《1980-2020LUC分类体系》及《城市用地分类与规划建设用地标准》，明确不同空间下土地面积，从投入产出视角出发，构建“三生空间”下土地利用生态效率的指标体系。通过对现有文献中关于土地利用生态效率的测度方法的梳理和比较，运用包含非期望产出的超效率 SBM 模型分别对子系统土地利用生态效率进行测度，在此基础上，运用熵权法求得“三生空间”下土地利用生态效率综合值。

第四章“三生空间”下土地利用生态效率时空特征分析。时间上，通过计算“三生空间”下我国 30 个省份土地利用生态效率综合值及子系统效率值，从全国、区域和省域层面对展开土地利用生态效率的比较分析；空间上，在分析我国 30 个省份土地利用生态效率的空间分布格局的基础上，利用莫兰指数对我国 30 各省份土地利用生态效率是否存在空间相关性进行进一步验证。

第五章“三生空间”下土地利用生态效率的耦合协调度研究。通过构建耦合协调度模型，计算“三生空间”下三个子系统之间的土地利用生态效率的耦合协调度水平，并对不同地区的生产空间、生活空间同生态空间的耦合协调度差异化进行分析。

第六章“三生空间”下土地利用生态效率影响因素分析。通过参考现有文献，

构建影响因素的影响机制，选定人均 GDP、产业结构、对外开放程度、人口密度、生产用地占比、生态用地占比、土地开垦程度、科技水平、环境污染治理力度、财政压力为影响因素，运用空间杜宾模型进行分析。

第七章结论与建议。通过进一步梳理“三生空间”下土地利用生态效率综合值及三个子系统的效率值及其时空差异，明晰三个子系统的耦合协调水平，厘清“三生空间”下土地利用生态效率的影响因素，为提高区域土地利用生态效率提供针对性的政策建议。

1.3.2 主要创新点

(1) 新视角。本文综合考虑“土地功能论”和“空间用地论”，明晰“三生空间”的具体内涵，进一步分析“三生空间”之间的生产、生活和生态空间之间的转变关系，不仅对生产空间下城镇建设用地生态效率进行分析，同时分析了农村生产用地以及城乡居民生活空间的生态效率，综上对土地利用生态效率进行综合测度。

(2) 新内容。在研究内容上，本文以我国除西藏、港澳台地区外的 30 个省份为研究区域，对“三生空间”下土地利用生态效率进行多层次和多空间的深入研究。通过“三生空间”中生产空间和生活空间对生态空间的挤压来反映不同区域及区域内部所面临的不同的生态压力，以期为不同生态压力的不同区域提供相应的建议，为实现区域协调发展提供理论支持。

1.4 研究方法与技术路线

1.4.1 研究方法

本文主要采用文献分析和实证分析相结合的研究方法，对“三生空间”下土地利用生态效率进行测度，并对其时空特征和耦合协调度展开研究，包括以下研究方法：

(1) 文献分析法

借助于现有文献中对于某一具体用地的生态效率的研究，在其基础上梳理土地利用生态效率和“三生空间”的相关研究进展。在土地利用生态效率方面，明确现有研究对于土地利用生态效率的基本定义，同时通过对比归纳不同测度方法

在土地利用生态效率测算过程中的局限性和优势，以此来选择适合本文研究的测度方法；同时厘清学者们对于其时空特征、影响因素及“三生空间”下三个子系统耦合协调度的研究现状；在“三生空间”方面，主要明确了关于“三生空间”的具体划分标准，为本文构建指标体系提供支撑。

（2）理论分析法

本文通过相关经济理论对土地利用生态效率的相关概念进行梳理，并通过分析“三生空间”之间的逻辑关系，在明晰不同土地所承担的不同功能和差异化的土地利用方式的基础上构建土地利用生态效率的指标体系，对其进行测度；根据测度结果进行时空特征、耦合协调度及影响因素分析。

（3）定性分析和定量分析相结合的分析方法

本文主要采用包含非期望产出的超效率 SBM 方法测算除港、澳、台和西藏外我国 30 个省份土地利用生态效率。相较于传统 DEA，SBM 模型可以避免径向和角度选择带来的测度偏差的出现，在 SBM 模型中加入非期望产出，提供模型的测算的准确性，加之超效率可以有效解决多个决策单元效率值为 1 无法比较的问题，这为本文更加准确地测度“三生空间”下土地利用生态效率值提供技术支持。由于“三生空间”由三个子系统构成，在单个子系统测算结果的前提下，使用熵权法确认每一部分的权重，对每一系统效率值进行赋权，加权求得“三生空间”下土地利用生态效率综合值。

基于土地利用生态效率的测算值，利用探索性空间分析方法综合分析土地利用生态效率的时空特征，采用耦合协调度模型对生产空间、生活空间和生态空间之间的土地利用生态效率的耦合协调发展状况进行分析，在此基础上，运用个体时间双固定空间杜宾模型展开影响因素分析，以期有针对性的提出相关政策建议，推动区域协调强可持续发展。

基于“三生空间”下土地利用生态效率的时空特征、三个子系统的耦合协调度的省份之间差异显著这一前提，本文运用空间杜宾模型对“三生空间”下土地利用生态效率的影响因素展开进一步分析，以期提供更有效的建议。

1.4.2 技术路线图

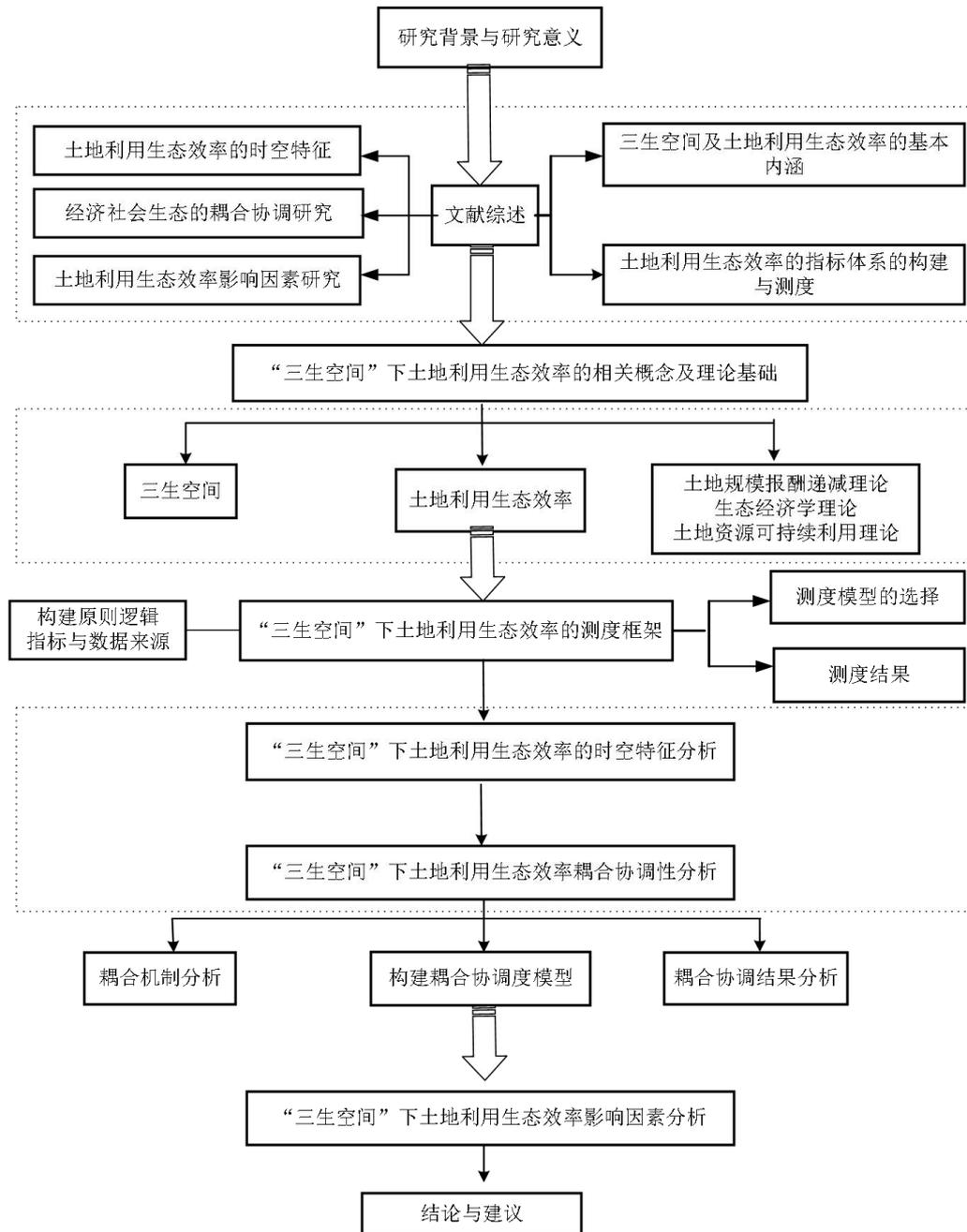


图 1.1 技术路线图

2 相关概念与理论基础

2.1 概念界定

2.1.1 生态效率

通过梳理现有文献，发现生态效率内涵衡量指标存在少许差异，但均以实现价值最大化为前提，以实现资源消耗和环境污染最小化为目标，同时兼顾经济发展与生态保护。基于此，本文在构建“三生空间”下土地利用生态效率测度指标体系时，以实现生态效率最大化为目标，兼顾生产空间、生活空间和生态空间三者的协调关系，投入角度考虑各类要素的投入效率，产出角度更加关注生态期望产出及非期望产出。

2.1.2 土地利用生态效率

通过总结现有文献，诸多学者从投入产出视角，采用土地利用过程中要素投入带来的社会经济产出和污染物排放量的比值来表征土地利用生态效率。本文用土地利用过程中资本等要素的投入所带来的经济效益、社会效益和生态效益同其产生环境污染的大小来衡量土地利用生态效率。

2.1.3 “三生空间”

在经济快速发展过程中，环境问题日益受到重视。因此，国家在提出人与自然和谐发展等绿色发展理念后，进一步推动“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的“生产—生活—生态”空间（简称“三生空间”）发展战略的实施。本文参考张红旗等（2015）对于“三生空间”的划分，将土地利用空间划分为生产空间、生活空间、生态空间。生产空间由城镇生产用地和农村生产用地构成，其主要以向人类提供生产服务为主要目标；生活空间包括城镇生活用地和农村生活用地两部分构成，其主要功能是为人类居住、消费等提供活动场所；生态空间主要是生态用地，即生产用地和生活用地的其他土地，包括冰雪、荒漠等未利用土地，其承担着生态调节和生态产品供给的任务，是人类和其他物种得以生存的基本保障。

2.2 理论基础

2.2.1 土地规模报酬递减理论

土地报酬递减规律最早由威廉·配第在 17 世纪提出，他认为其是在一定的技术水平下，土地的生产力存在一个最佳生产点，如若超过临界值，土地等生产要素的持续增加并不会提高土地的生产能力。规模报酬指的是在技术水平不变的前提下，通过同比例的增加或减少生产过程中的生产要素的数量，由此得到的收益会同生产要素增加量呈现同比例增加或者减少的现象，是厂商在长期生产过程中面临的生产效益问题。根据效益和要素投入的变化方向，将其划分为三种类型，分别是规模报酬递增、规模报酬不变和规模报酬递减。土地规模报酬递减指的是在技术水平和其他生产要素均保持在稳定的投入水平下，对单位面积的土地接连增加要素投入所带来的边际收益，其变化趋势为先增后减。就目前我国城市土地利用现状而言，土地规模报酬理论共包含三个阶段，第一阶段当边际产出持续增加时，也就是要素投入会带动总效益的增加，此时应不断增加投入，以实现提高产出的目的；第二个阶段边际收益为正值，但低于平均收益，此时的总产出依旧在增加，但其增加速度放缓，此时，继续追加要素投入依旧可以拉动效益增长；第三个阶段边际效益为负值，总产出和平均产出呈现下降趋势，此时追加要素投入会使得总产出减少。因此，根据土地规模报酬的三个阶段可知，在一定技术水平下的土地利用要素的投入数量低于某一固定值时，存在效率损失；同样在土地利用要素投入数量高于某一固定值时，效率水平依旧会呈现下降趋势就。综上，在土地利用开发过程中，通过不断提高技术水平，延长最佳阈值的绝对值，延缓第三阶段的到来，持续增加单位面积土地的收入。

基于土地规模报酬递减理论，土地利用生态效率的提高不能只从增加要素投入这一视角出发，除此以外，更要考虑要素投入和产出的变化量是否呈现同方向、同比例的变化趋势。只有把握好土地利用投入要素和产出收益的变化关系，遵循客观规律，才能找到最佳的投入和产出量，不断改进投入产出水平，从而提高土地利用生态效率。

2.2.2 生态经济学理论

美国经济学家肯尼斯·鲍尔丁首次结合经济学和生态学两个学科，提出了生

态经济学 (Ecological Economy) 这一理论。该理论表明经济发展受区域内生态承载力的限制, 其试图通过综合经济、生态等系统方法, 极尽所能的推动企业生产方式的变革, 以高效生产模式代替粗放式发展方式, 同时, 强调人类消费方式对于生态的影响, 因此要积极引导居民树立绿色消费理念。其认为经济发展要立足于单位产出清洁高效的产业, 致力于推动制度合理、生态友好的自然环境保护工作。这一理论主要由三方面的含义, 分别为: 第一, 经济系统和生态系统二者之间的平衡关系及内在机理; 经济系统和生态系统的内部结构、主要职能和既定目标; 第二, 在整个生态系统中, 人类经济活动所带来的经济和社会效益之间的联系; 第三, 随着经济的发展, 人地系统之间的关系日益复杂, 人系统中的人口、城乡建设同地系统中的资源、环境的耦合情况复杂多变 (何盛明, 1990)。从经济学的角度出发, 将生态系统和经济系统组合而成的符合系统作为研究对象, 通过分析其内部结构、功能和变化规律, 以实现经济和生态的永续发展。究其本质, 就是要在保持生态环境良好的前提下经济发展具有可持续性。作为既包含经济层面, 又涵盖生态层面的分析理论, 生态经济学理论为研究“三生空间”下土地利用生态效率提供必不可少的理论基础。

2.2.3 土地资源可持续利用理论

土地资源可持续这一思想最早是印度农业研究会和美国 Rodale 研究所在新德里举行的土地研究会上提出的, 其从代际公平的角度出发, 具体内涵为在保证土地资源不受到毁损的情况下, 不断提高土地资源的经济生产力和环境承载力, 减轻其对经济发展的制约。土地资源数量和质量的永续使用是土地资源可持续利用的两个主要内涵。具体内涵由以下四方面构成: 一是存在形态的可持续性。一个地区的经济发展必须以一定数量和种类的土地资源为基础, 只有土地资源的数量和种类得以保证, 该地区才有实现经济可持续发展的可能性。因此, 相对固定数量和种类的土地资源是地区发展最基本的条件。二是物质生产能力的可持续性。对于生物生产性的土地资源而言, 只有不断提高科技水平和经营管理能力, 才能保证区域内土地资源的物质生产能力不退化, 或是降低其退化速度。三是经济产出效益的可持续性。只有当土地资源的利用对人类产生适量的、可持续的经济效益时, 人类才会去采取相关措施对其进行保护。因此, 在土地利用过程中, 各部门均以经济利益最大化为追求目标, 实现功能最大化。四是生态环境的可持续性。

人类经济活动必然会对生态环境产生副作用,因此要将这一副作用控制在土地资源自身的承载能力范围之内,避免因不合理的土地利用方式造成土地资源环境恶化。如前所述,土地资源可持续发展以协调公平为核心,即保持社会、经济和环境三者之间的协调发展是土地资源实现可持续利用的核心。只有实现土地资源利用方式的可持续性,才可以为后代提供高质量的土地。

人类生存和发展离不开国土空间,生存和发展所需的一切资源、能源等都依赖于国土空间,土地利用方式的类型决定了“三生空间”各子系统的整体位置相对固定,其中生态空间作为生态产品和服务的供给方,其提供生态产品和服务的能力是有限的,因此人类社会发展对资源需求的无限性同生态系统自身能力的有限的矛盾日益突出。为解决这一矛盾,务必要以可持续发展理论指导土地利用空间的合理布局。为实现强可持续发展,更要进一步优化生产空间、生活空间和生态空间的空间布局,提高其合理化、科学化水平,以实现“三生空间”下土地资源利用的可持续性。

3 “三生空间”下土地利用生态效率的测度框架

3.1 “三生空间”下土地利用生态效率指标体系的构建

3.1.1 构建原则

(1) 科学性原则

为全面客观的测度“三生空间”下土地利用生态效率的实际水平，在指标选取过程中，秉持科学性原则，降低人为原因对测度结果的影响。

(2) 代表性原则

“三生空间”下土地利用生态效率值由三个子系统构成，在对每一子系统土地利用生态效率测度时，必须选择足以代表该系统土地利用投入和产出的实际情况，符合每一空间下土地利用生态效率的本质要求。除此之外，鉴于本文“三生空间”下土地利用生态效率研究是基于考虑生产空间、生活空间和生态空间下的土地利用生态效率的协调发展角度，所选指标除反映“三生空间”下各子系统土地利用生态效率的指标外，同时考虑三者之间的关系，增加体现生产空间、生活空间和生态空间的关系指标。

(3) 系统性原则

“三生空间”由生产空间、生活空间和生态空间三部分构成。考虑到我国经济发展的独特性，即城镇和农村呈现二元经济形态，本文从城镇和农村两个角度构建生产空间和生活空间的土地利用生态效率，由于生态空间较为复杂，依据城镇和农村划分生态空间的技术难度较大，因此本文对于生态空间不再进行细分。通过对“三生空间”及其子系统的进一步划分，不仅体现“三生空间”下土地利用生态效率的本质要求，还反映生产空间、生活空间和生态空间三者的内在联系。

(4) 独立性原则

构建指标体系过程中，保持各指标的相互独立是科学构建指标体系的基础。由于“三生空间”及其子系统之间相互影响、相互作用，更应保证指标的独立性，才能更加真实的反映“三生空间”下土地利用生态效率的实际水平。

3.1.2 指标体系的构建逻辑

生活空间是“三生空间”的基础，生产空间是“三生空间”经济发展的载体，

生态空间是“三生空间”长期可持续发展的保证，三者相互作用，共同促进“三生空间”稳定和可持续运行。基于对“三生空间”的基本内涵及三个子系统之间关系的理解，参照杨斌（2021）对生产空间和生态空间下土地利用生态效率的评价指标体系的选取，本文从生产空间（A）、生活空间（B）和生态空间利用效率（C）三个维度构建“三生空间”下土地利用生态效率测度指标体系。其中，每个维度均由投入、产出指标构成。同时，考虑到我国城镇和农村现有发展水平差异较大，在生产空间和生活空间的指标体系的构建过程中，从城镇和农村两个角度出发，即生产空间包含城镇生产（A1）、农业生产（A2），生活空间包括城镇生活（B1）、农村生活（B2），加上生态空间（C），“三生空间”下土地利用生态效率评价指标体系共包含 23 个具体指标（见表 3.5）。

3.1.3 测度指标与说明

“三生空间”是由生产空间、生活空间和生态空间共同组成的，所以本文分别对各子系统下土地利用生态效率指标选择加以说明。

首先，生产空间下土地利用生态效率指标体系的构建由生产空间下城镇土地利用生态效率和农村土地利用生态效率两个测度指标体系构成。具体来看：一是生产空间下城镇土地利用生态效率的测度指标选择。其中，用固定资产投资总额、二三产业就业人数来表示生产空间下城镇土地利用的资本和劳动投入，用城镇建设用地面积表示土地要素投入，用城镇生产用水总量表示生产空间下城镇生产的资源投入，以此反映生态空间对生产空间经济发展的支撑作用；相应地，以二三产业总产值度量生产空间下城镇土地利用的经济产出水平，以城镇职工平均工资代表其社会产出，反映生产空间的产出为生活空间多服务，以城市绿地面积表示生产空间下土地生产过程中产生的生态效益，表示的是生产空间主动修复生态空间，除以上期望产出外，生产空间下城镇土地利用过程中不可避免会出现环境污染问题，本文用工业废水、工业 SO₂ 和工业烟尘的排放量来描述生产空间对于生态空间的侵害程度；

二是生产空间下农村土地利用生态效率测度指标选择。同生产空间下城镇土地利用生态效率指标的选取思想保持一致，用农业机械总动力、农用薄膜使用量、化肥使用量作为生产空间下农村生产的投入要素；用第一产业从业人数度量生产空间下农村生产过程中的劳动力投入水平；由于农作物播种面积比年末耕地面积

更能代表农村生产过程中土地的投入情况 (Liu Y et al., 2020)，因此，本文选用农作物的播种面积度量土地要素投入；生产空间下农村土地利用过程中除却对降水量的需求外，农村生产需通过取水工程获取生产用水来满足农村生产需要，本文选用农业用水总量来表示生产空间下农村生产的资源投入。与之相对应的是生产空间下产出指标的选择，本文用第一产业产值表示生产空间下农村土地利用所带来的经济产出，用农村居民人均收入表示其社会产出；用造林面积表示生产空间下农村土地利用过程中所产生的生态效益；伴随生产空间下农村土地利用过程中机械、化肥、薄膜等使用所产生的生态污染，是生产过程中的非期望产出，本文沿用封永刚等 (2015) 和 Liu Y et al., (2020) 的做法，选取农业碳排放量作为农业空间利用的非期望产出。

农业碳排放量的主要来源于化肥、农药、农用塑料膜、农业工作机械、农业灌溉过程中产生的直接或者间接的碳排放，其估算公式如下：

$$C = \sum E_i \times \varepsilon_i \quad (3-1)$$

式 3.1 中， C 为农业生产碳排放总量， E_i 为各种碳源的排放量， ε_i 为碳源对应的碳排放系数。根据相关研究成果，碳排放系数如表 3.1 所示。

表 3.1 农业碳排放系数

碳源	排放系数	单位
化肥	0.896	kg/kg
农药	4.934	kg/kg
农用薄膜	5.170	kg/kg
农业机械总动力	0.18	kg/kw
灌溉面积	20.476	kg/hm ²

其次，生活空间亦由城镇生活空间和农村生活空间两部分构成。在此视角下，生活空间是为人类提供居住、消费、娱乐等分类场所，无论是城镇生活空间还是农村生活空间，其高效利用均有利于为生产空间输入劳动，提供人力支持。同时减少生活废水和生活垃圾的排放，有利于降低对于生态空间的影响。因此，生活空间下土地利用生态效率评价指标体系的构建遵循生活空间的基本功能。考虑到其基本功能实现的量化问题，本文以 2015 年 9 月联合国公布的可持续发展目标

2030, 参考黄甘霖(2016)、杨武(2021)等研究, 从城镇和农村两个视角建立人类福祉指数评价体系, 分别从物质生活指数、人类发展指数、城乡发展指数三个维度构建城镇和农村人类福祉指数的评价指标体系, 共包含 15 个具体指标(见表 3.3), 利用熵权法进行计算, 其计算公式如下:

(1) 原始数据标准化:

$$\begin{aligned} \text{正向指标: } x'_{ij} &= (x_{ij} - \bar{x}) / s_j \\ \text{负向指标: } x'_{ij} &= (\bar{x} - x_{ij}) / s_j \end{aligned} \quad (3-2)$$

式中, x_{ij} 为第 i 个样本、 j 项指标的原始数值, x'_{ij} 为标准化后的指标值, \bar{x} 和 s_j 分别为第 j 项指标的平均值和标准差。标准化后的数值不能直接使用, 原因在于熵权法在后续计算中需要采用对数, 而标准化后可能出现的负值无法进行对数运算, 因此需要对其进行平移处理:

$$Z_{ij} = x'_{ij} + A \quad (3-3)$$

式中, Z_{ij} 是平移后数值, A 为平移幅度。

(2) 将各指标同度量化, 计算第 j 项指标下, 第 i 城市占该指标比重(p_{ij}):

$$p_{ij} = Z_{ij} / \sum_{i=1}^n Z_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (3-4)$$

式中, n 为省份个数, m 为指标个数。

(3) 计算第 j 项指标熵值 (e_j):

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}), k = 1/\ln(n), e_j \geq 0 \quad (3-5)$$

(4) 计算第 j 项指标的差异系数(g_j):

$$g_j = 1 - e_j \quad (3-6)$$

(5) 对差异化系数归一化, 计算第项指标的权重(w_j):

$$w_j = g_j / \sum_{j=1}^m g_j \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (3-7)$$

(6) 计算第 i 省人类福祉指数(H_i):

$$H_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} P_{ij} \quad (3-8)$$

表 3.2 人类福祉评价指标体系

目标层	准则层	一级指标	二级指标	指标属性
人类福祉指数	城市人类福祉指数	城镇物质生活指数	城镇居民恩格尔系数 (%)	-
			卫生员数 (人)	+
		城镇人类发展指数	医院床位数 (张)	+
			平均受教育年限 (年)	+
		城镇发展指数	城镇年末就业人数 (人)	+
			建成区面积 (km ²)	+
			城镇居民人均可支配收入 (元)	+
			65 岁以上人口比重 (%)	-
	农村人类福祉指数	农村物质生活指数	农村居民恩格尔系数 (%)	-
			农村卫生员数 (人)	+
		农村人类发展指数	乡村医院床位数 (张)	+
			农村平均受教育年限 (年)	+
		农村发展指数	乡村从业人数 (人)	+
			农村居民人均居住面积 (m ²)	+
			农村居民人均可支配收入 (元)	+
			农村养老服务机构年末收养人数 (人)	-

基于上述数据的计算,本文选用城镇生活用水总量和城镇住宅建筑面积作为生活空间下城镇土地利用的投入指标,城镇人类福祉指数作为期望产出,生活垃圾清运量和生活废水排放量作为非期望产出;其次,本文选用农村生活用水总量和农村住宅建筑面积作为生活空间下农村土地利用的投入指标,农村人类福祉指数作为其期望产出,由于农村生活空间下生活垃圾清运量数据缺失,本文只选用农村生活污水排放量作为非期望产出。

最后,生态空间下土地利用生态效率测度指标应体现生态空间向生活空间提

供生态产品和生态服务的能力。因此,本文选择生态用地面积作为生态空间下土地利用过程中的土地要素投入,为更好区分生产空间、生活空间和生态空间,本文将土地利用类型中除却耕地、城镇建设用地及居民点以外的林地、草地、水域和未利用土地面积之和定义为生态用地;要维持生态空间的供给能力,同样需要投入资源要素,本文用生态用水量来表示资源投入;立足生态空间向生产空间和生活空间提供产品和服务这一着力点,本文选用生态系统服务价值作为生态空间下土地利用的期望产出;由于生态空间自身具有净化能力,其自身运行过程中的废物排放在其自身承载范围内,因此,生态空间下土地利用过程中不存在非期望产出。

其中,生态系统服务价值通过计算可得,通过确定生态系统服务价值当量表、统计不同土地利用类型的面积来测算生态系统服务价值。参考谢高地等(2015)的研究成果,生态系统服务价值的计算模型如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^n (LUC_i \times VC_i) \quad (3-9)$$

上式中, ESV 为研究区生态系统服务总价值(亿元); LUC_i 代表土地利用类型 i 的面积 (hm^2); VC_i 代表土地利用类型 i 对应的生态系统服务价值系数 ($元 \cdot hm^{-2}$), n 代表研究区域土地利用类型的数量。为满足本文研究需求,本文将对现有土地利用类型进行归并计算,农田用地对应农田生态系统,草地和灌木对应草地生态系统,森林对应森林生态系统,冰雪和水域对应水域生态系统,湿地对应湿地生态系统,未利用土地对应荒漠系统,建成区对应建设用地,其中建成区的生态系统服务价值系数均为 0。生态系统服务价值的具体过程如下:

(1) 确定生态系统服务价值当量表。本文在参照谢高地(2015)的生态系统服务价值当量表中关于每一生态系统服务的当量因子的数值,求得农田、林地、草地、湿地、荒漠、水域和建成区在提供供给服务、调节服务支持服务和文化服务这四种服务中的当量因子值,再通过整理历年《全国农产品成本收益汇编》,获得全国三种主要农产品(玉米、稻谷和小麦)的平均价格,采用粮食经济价值法对生态系统服务价值当量表(见表 3.4)进行调整,利用生态系统服务价值模型计算结果。

表 3.4 生态系统服务价值当量表

	生态系统服务	农田	林地	草地	湿地	荒漠	水域	建成区
供给	食物生产	1.11	0.25	0.23	0.51	0.01	0.40	0.00
	原料生产	0.25	0.58	0.34	0.50	0.02	0.12	0.00
	水资源供给	1.33	0.30	0.19	2.59	0.01	5.23	0.00
调节	气体调节	0.89	1.91	1.21	1.90	0.07	0.48	0.00
	气候调节	0.47	5.71	3.19	3.60	0.05	1.42	0.00
	净化环境	0.14	1.67	1.05	3.60	0.21	2.86	0.00
	水文调节	1.50	3.74	2.34	24.23	0.12	54.69	0.00
支持	土壤保持	0.52	2.32	1.47	2.31	0.08	0.47	0.00
	维持养分循环	0.16	0.18	0.11	0.18	0.01	0.04	0.00
	生物多样性	0.17	2.12	1.34	7.87	0.07	1.28	0.00
文化	美学景观	0.08	0.93	0.59	4.73	0.03	0.99	0.00

基于以上对“三生空间”下土地利用生态效率内涵的阐述及三个子系统下土地利用生态效率的指标体系的指标选取说明与解释，“三生空间”下土地利用生态效率测度指标体系构建如下。

表 3.5 “三生空间”下土地利用生态效率测度指标体系

目标层	维度层	准则层	指标层	单位	属性	
三生空间下土地利用生态效率	生 产	投 入	固定资产投资额 (A1I-1)	亿元	投入	
			二三产业就业人数(A1I-2)	万人	投入	
			城镇建设用地(A1I-3)	公顷	投入	
		城镇生产空间土地	城镇生产用水总量(A1I-4)	吨	投入	
			二三产业总产值(A1O-1)	亿元	期望产出	
			城镇职工平均工资(A1O-2)	元	期望产出	
	效 率 (A1)	产 出	城市绿地面积(A1O-3)	公顷	期望产出	
			工业废水排放量(A1O-4)	万吨	非期望产出	
			工业 SO2 排放量(A1O-5)	万吨	非期望产出	
			工业烟尘排放量(A1O-6)	万吨	非期望产出	
			农村生产空间	农业机械总动力(A2I-1)	万千瓦	投入
				农用薄膜使用量(A2I-2)	万吨	投入
化肥施用量(A2I-3)	万吨	投入				
土地利用生态效率 (A2)	生态效率	第一产业从业人数(A2I-4)	万人	投入		
		农作物的播种面积(A2I-5)	公顷	投入		
		农用用水总量(A2I-6)	吨	投入		

续表 3.5 “三生空间”下土地利用生态效率测度指标体系

目标层	维度层	准则层	指标层	单位	属性	
空 间		产 出	第一产业产值(A2O-1)	亿元	期望产出	
			农村居民人均收入(A2O-2)	元	期望产出	
			造林面积(A2O-3)	公顷	期望产出	
			农业碳排放量(A2O-4)	万吨	非期望产出	
生 活 空 间	城镇生活 空间土地 利用生态 效率(B1)	投 入	生活用水总量(B1I-1)	吨	投入	
			住宅建筑面积(B1I-3)	平方米	投入	
	农村生活 空间土地 利用生态 效率(B2)	投 入	生活用水总量(B2I-1)	吨	投入	
			住宅建筑面积(B2I-3)	平方米	投入	
	生态空间 土地利用 生态效率 (C)	投 入	生态用水(CI-1)	吨	投入	
			生态用地(CI-2)	公顷	投入	
	空 间	生态效率 (C)	产 出	人类福祉指数(B1O-1)	%	期望产出
				生活垃圾清运量(B1O-2)	吨	非期望产出
			生活废水排放量(B1O-3)	吨	非期望产出	
			生活废水排放量(B2O-3)	吨	非期望产出	
			生态系统服务价值(CO-1)	亿元	期望产出	

3.1.4 数据来源与说明

本文运用 32 个具体指标对“三生空间”下我国 30 个省份土地利用生态效率综合值及三个子系统值进行测算，关于数据由以下说明：（1）由于部分省份在个别年份存在数据缺失情况，为满足研究需要，本文采用线性插值法进行补充；

（2）城镇和农村居民平均受教育年限通过对每一教育阶段的受教育年份来进行赋值，本文参考卢亚娟和殷君瑶（2021）对受教育年限的赋值方法，分别对“未上小学、小学、初中、高中高职、大专、本科及研究生”赋值“0、6、9、12、15、16、19”，在此基础上进行计算所得；（3）由于我国农村多数老年人并未缴纳社会养老保险，亦未享受社会养老保险，本文为反映农村集体所承担的社会养老压力状况，运用农村养老服务机构年末收养人数来代替 65 岁以上人口比重，表征社会养老压力；（4）生态系统服务价值和人类福祉指数均通过计算求得；

（5）生态用地面积是根据武汉大学杨杰和黄鑫教授团队公开的 2003-2020 全国土地覆被数据，通过计算栅格面积得到生态用地的总面积。

指标体系中的所有原始数据主要来源于国家统计局、中国国家粮食局、文化部、中宣部和国家新闻出版广电总局、全国《统计年鉴》、各省统计年鉴、《中

国环境统计年鉴》、《农村统计年鉴》、《中国房地产统计年鉴》、《中国城市建设统计年鉴》、《全国农产品成本收益汇编》及统计公报。

3.2 “三生空间”下的土地利用生态效率的测度

3.2.1 测度模型的选择

数据包络分析 (Data Envelopment Analysis, DEA) 是一种非参数效率测算方法, 具有不要求设定特定生产函数、能够对多要素投入多要素产出进行客观评价的优点, 但其是径向、角度模型, 在计算效率时会忽略投入或产出, 同客观实际有所差别。为克服这一问题, Tone (2001) 构建了非径向、非角度 DEA 模型, 即 SBM 模型。SBM 模型中存在有效决策单元效率值无法再分解的问题, 在进行效率评估时, 当存在多个单元效率值为 1 时无法进一步比较其大小的问题, Tone (2002) 进一步构建了超效率 SBM 模型。同时, 随着经济的发展方式的转换, 绿色低碳成为社会生产生活的追求目标, 因此, 本文采用含非期望产出的超效率 SBM 模型分别对城市生产空间土地利用生态效率、农村生产空间土地利用生态效率、城市生活空间土地利用生态效率、农村生活空间土地利用生态效率和生态空间土地利用生态效率, 在此基础上利用熵权法求得“三生空间”下土地利用生态效率综合值及三个子系统的效率值。

在规模报酬不变的条件下, 考虑非期望产出的超效率 SBM 模型如下:

$$\gamma^* = \min \frac{\theta - \varepsilon_x \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i \bar{x}_i}{x_{ik}}}{\varphi + \varepsilon_y \sum_{r=1}^s \frac{\omega_r^+ y_r^-}{y_{rk}} + \varepsilon_b \sum_{p=1}^q \frac{\omega_p^{b-} y_p^-}{b_{pk}}} \quad (3-10)$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j + \bar{x}_i = \theta x_{ik}, i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - \bar{y}_r = \theta y_{rk}, r = 1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n b_{pj} \lambda_j + \bar{y}_p^{b-} = \varphi b_{pk}, i = 1, 2, \dots, q \\ \lambda_j \geq 0, \bar{x}_i, \bar{y}_r^+, \bar{y}_p^{b-} \geq 0 \end{cases} \quad (3-11)$$

式中: γ^* 为土地利用生态效率值; 分别用 x_{ik} 、 y_{rk} 和 b_{pk} 表示决策单元 k 的投入、期望产出和非期望产出; 投入、期望产出和非期望产出的松弛变量依次为

\bar{x}_i 、 \bar{y}_r^+ 、 \bar{y}_p^{b-} ，权重分别为 ω_i 、 ω_r^+ 、 ω_p^{b-} ，产出值为 m 、 s 、 q ，其非径向范围内重要性参数依次为 ε_x 、 ε_y 、 ε_b ，其中 ε 取值范围在0到1之间； λ 为线性组合系数； θ 为规划参数。

3.2.2 “三生空间”下土地利用生态效率的测度

为更加深入分析“三生空间”下不同区域、省份的土地利用生态效率的差异程度，本文运用包含非期望产出的超效率SBM模型对“三生空间”下土地利用生态效率综合值及其子系统值进行测算，具体包括生产空间下城镇土地利用生态效率、生产空间下农村土地利用生态效率、生活空间下城镇土地利用生态效率、生活空间下农村土地利用生态效率及生态空间下土地利用生态效率。由于本文将土地利用空间划分为生产空间、生活空间和生态空间，从城市和农村两个视角进行分析，因此在计算生产空间和生活空间下土地利用生态效率时，采用熵权法确认城镇和农村各自的权重；同理，在“三生空间”下土地利用生态效率综合效率值时，亦采用熵权法确认三个子系统的权重，基于此进行计算，其计算公式如下：

$$E = \sum_{i=1}^n E_i v_i \quad (3-12)$$

上式中， E 为“三生空间”下土地利用生态效率综合值， E_i 分别为生产空间土地利用生态效率、生活空间土地利用生态效率和生态空间土地利用生态效率， v_i 为每一空间下土地利用生态效率的权重。同理，利用该公式求得生产空间土地利用生态效率和生活空间土地利用生态效率。

通过运用考虑非期望产出的超效率SBM模型测算除西藏外我国大陆30个省份2003-2020年的土地利用生态效率，由于篇幅有限，表3.6列示我国30个省份2003、2006、2009、2012、2015、2018和2020年土地利用生态效率测算结果。根据表3.6的测算结果，近十八年来我国土地利用生态效率平均值约为0.602，同时土地利用生态效率变化趋势整体呈现“M”型，整体变化幅度较大。总之，“三生空间”下的土地利用生态效率仍有较大的改进空间。

表 3.6 我国 30 个省份土地利用生态效率

地区	2003	2006	2009	2012	2015	2018	2020
安徽	0.461	1.679	0.135	0.378	1.011	2.980	0.268

续表 3.6 我国 30 个省份土地利用生态效率

地区	2003	2006	2009	2012	2015	2018	2020
北京	0.554	1.774	0.273	0.575	1.112	2.182	0.297
福建	0.397	1.574	0.178	0.449	1.036	1.613	0.165
甘肃	0.368	1.493	0.161	0.426	1.005	1.699	0.168
广东	0.345	1.608	0.233	0.448	1.049	1.109	0.165
广西	0.313	1.550	0.141	0.413	1.006	0.980	0.139
贵州	0.473	2.126	0.197	0.349	1.055	0.813	0.171
海南	0.526	2.134	0.259	0.406	1.052	0.898	0.203
河北	0.441	1.917	0.178	0.348	1.013	1.096	0.168
河南	0.256	1.725	0.101	0.304	0.944	1.349	0.103
黑龙江	0.320	1.848	0.155	0.362	0.965	2.539	0.162
湖北	0.219	1.897	0.149	0.307	0.971	0.328	0.100
湖南	0.197	1.828	0.140	0.338	0.993	0.310	0.410
吉林	0.361	1.578	0.170	0.341	0.989	0.266	0.328
江苏	0.231	1.314	0.247	0.322	0.943	0.204	0.258
江西	0.164	1.261	0.146	0.333	0.884	6.762	0.289
辽宁	0.215	1.198	0.321	0.358	0.979	0.248	0.287
内蒙古	0.300	1.565	0.282	0.373	1.069	0.215	0.318
宁夏	0.458	0.544	1.235	0.454	0.767	0.440	0.489
青海	0.517	0.472	1.035	0.450	0.462	0.351	0.551
山东	0.379	0.199	0.789	0.226	0.220	0.094	0.259
山西	0.457	0.252	0.835	0.214	0.241	0.125	0.335
陕西	0.382	0.420	1.057	0.392	0.502	0.142	0.451
上海	0.451	0.478	1.160	0.509	0.546	0.303	0.383
四川	0.298	0.239	0.298	0.217	0.206	0.118	0.350
天津	0.552	0.340	0.543	0.503	0.481	0.408	0.659
新疆	0.335	0.260	0.338	0.261	0.221	0.132	0.356
云南	0.254	0.410	0.402	0.180	0.190	0.141	0.314
浙江	0.225	0.258	0.327	0.188	0.168	0.107	0.299
重庆	0.398	0.248	0.258	0.148	0.175	0.105	0.216
全国均值	0.362	1.140	0.391	0.352	0.742	0.935	0.289

3.3 “三生空间”下土地利用生态效率的时空特征分析

3.3.1 时间趋势特征分析

通过对“三生空间”下土地利用生态效率综合值及三个子系统效率值进行测度,本文全国、区域和省域层面对“三生空间”下土地利用生态效率综合值及其子系统效率值进行时间趋势分析。本文参照杨斌(2021)对于不同空间下土地利用生态效率的划分,将其从高至低依次分为4类,分别是:高水平(>0.7000)、中高水平($0.5001-0.7000$)、中低水平($0.3501-0.5000$)和低水平($0.0000-0.3500$)。

(1) 全国层面时间趋势特征分析

图 4.1 是 2003-2020 年我国“三生空间”下土地利用生态效率综合值及三个子系统土地利用生态效率值的变化趋势。首先,根据测算结果,“三生空间”下我国土地利用生态效率值存在以下特征:第一,“三生空间”下土地利用生态效率综合值变化幅度较大,最低年份为 2019 年,为 0.174,最高年份为 2006 年,达到 1.140,约为最低年份的 6.6 倍,这说明“三生空间”下我国土地利用生态效率的整体水平存在较大的改善空间;第二,相较于 2011 年,2012 年我国土地利用生态效率上涨了 40.81%,效率值为 0.352,这得益于全国主体功能区规划的推进与落实,全国各省积极推动优化国土空间开发布局,加快转变经济发展方式,助力改善土地利用现状,提高“三生空间”下土地利用生态效率;第三,“三生空间”下土地利用生态效率达到超效率水平,缘于 2017 年我国开始设定生态保护红线,在这一政策的推动下,各省积极开展生态保护红线的划定工作,在生态用地保护方面取得一定成效,一定程度上遏制了城镇化建设的无序扩张;第四,2019-2020 年我国“三生空间”下土地利用生态效率值较 2018 年呈现下降趋势,这是由于随着我国经济进入新发展阶段,原有粗放式经济模式不再适用,同时经济的加入发展中各种资源的不断投入造成投入冗余的结果,导致“三生空间”下土地利用生态效率的下降。

从生产空间、生活空间和生态空间三个子系统的测算结果来看:第一,生产空间下土地利用生态效率的变化幅度较小,其平均值为 0.826,整体保持在高效率水平;第二,生活空间下土地利用生态效率呈现递减趋势,研究期起初 2003 年为 0.605,为最高值,2020 年生活空间下土地利用生态效率为 0.162,降幅约

为 73.2%，生活空间下随着乡村人口流失，流入城市，生活垃圾清运量和生活废水的排放量日益增加，2010 年《第一次全国污染源普查公报》及 2020 年公布的《第二次全国污染源普查公报》中生产空间和生活空间下污染物排放量较大；第三，生态空间下土地利用生态效率整体变化幅度较小，保持在 0.517，在 2018 年达到最大值 0.776，是由于政策。总的来说，三个子系统的土地利用生态效率水平的变化幅度较为平稳，除却生活空间下土地利用生态效率呈现下降趋势外，生产空间和生态空间下土地利用生态效率保持在较为稳定的水平，并在 2020 年呈现递增趋势，这主要得益于我国全面完成三条红线的划定工作，保证城镇化建设不再占用生态用地；同时，耕地红线的划定，避免耕地硬化为城市建设用地，这表明我国土地利用方式基本保持不变；三个子系统中，生产空间下土地利用效率值最大，意味着我国在保护生态环境的前提下，我国的经济建设仍就取得较大成就，经济发展高质量水平不断提升，生活空间下土地利用生态效率值最小，这说明我国需要继续加强基础设施建设，完善教育、医疗和住房等方面的基础设施建设，提高生活垃圾和生活废水的重复利用率，减少生活废物的排放，在不降低或是在提高人民福祉水平的前提下，减少人类活动对于环境的负影响。

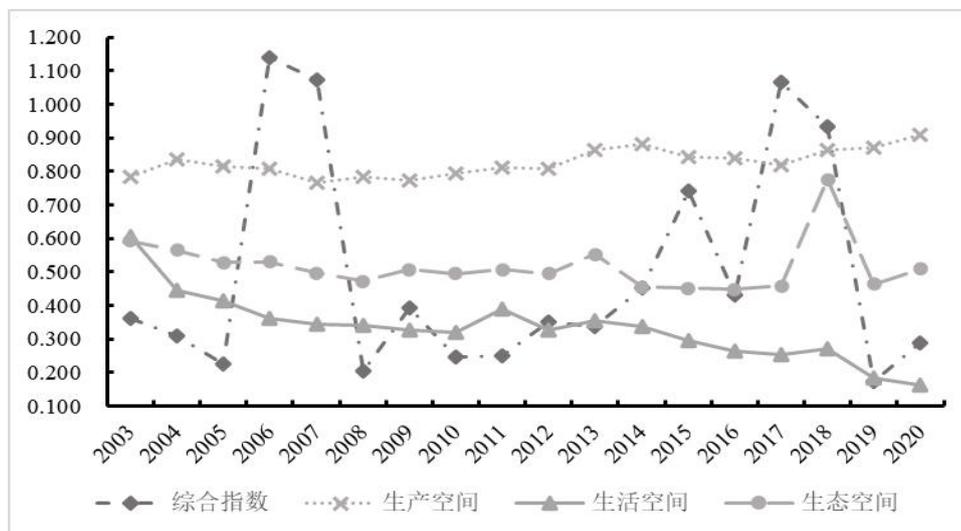


图 4.1 “三生空间”下土地利用生态效率值

由于我国经济发展的独特性，二元经济是我国在城镇化建设进程中出现的较为特殊的一种经济形式，因此本文从城镇和农村两个角度进一步对生产空间和生活空间下我国土地利用生态效率值进行测度和分析，其整体水平和变化幅度如图 4.2 所示。

首先，生产空间下，城镇生产空间下土地利用生态效率和农村生产空间下土

地利用生态效率整体处于有效水平,其中城镇生产空间下土地利用生态效率值基本保持稳中有涨的趋势,在2010年效率值为1.000,实现完全有效,从2010-2020年,城镇生产空间下土地利用生态效率值均大于1.000,即处于超效率水平,由此可知城镇生产空间下的土地利用生态效率达到完全有效状态。相较于生产空间下城镇土地利用生态效率达到完全有效水平,生产空间下农村土地利用生态效率水平尚未达到完全有效水平,这是由于城镇化建设快于农村现代化建设,农村基础设施尚不完善,乡村治理体系和治理能力亟待强化。就生产空间下农村土地利用生态效率而言,其整体变化幅度较小,整体上处于中高水平,整体效率值为0.656。同时随着2018年乡村振兴战略的提出,农村潜在生产力的不断释放,农村生态文明建设的不断加强,2020年生产空间下农村土地利用生态效率相较于2019年实现小幅上涨。

其次,生活空间下,无论是生活空间下城镇土地利用生态效率还是生活空间下农村土地利用生态效率,除却个别年份有所提高外,整体上呈现连年下降趋势。其中,生活空间下城镇土地利用生态效率水平高于生活空间下农村土地利用生态效率,这是因为城镇的基础设施建设相较于农村更加完善,在生活污水、生活垃圾的清运、处理和二次利用的综合能力高于农村。

综上,无论是生产空间还是生活空间,生产空间下城镇土地利用生态效率和生活空间下城镇土地利用生态效率均高于农村,因此,继续推进乡村振兴,加快农业供给侧结构性改革,增加农民收入,改善农村民生,有利于进一步提高生产空间和生活空间下农村土地利用生态效率。

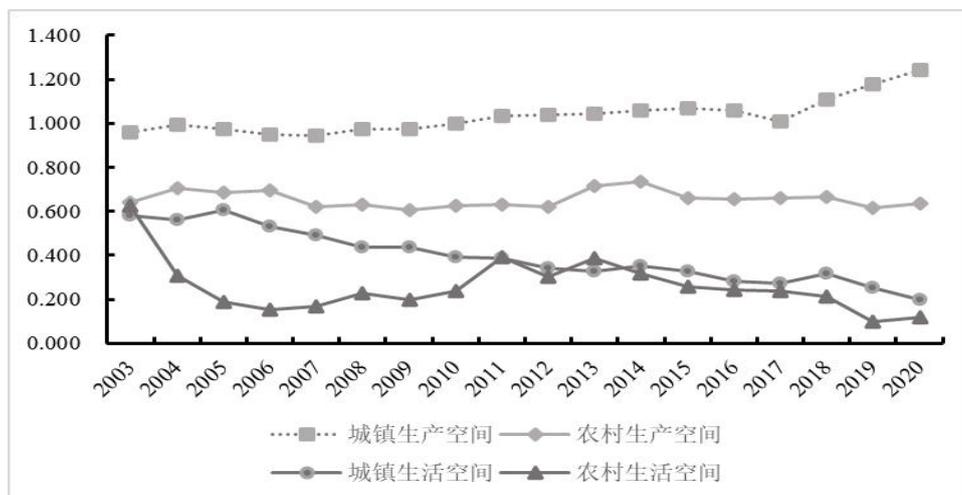


图 4.2 城镇和农村两个角度下生产空间和生活空间下土地利用生态效率值

(2) 区域层面时间趋势特征分析

为全面掌握区域发展动态,本文更多考虑地理位置对于土地利用生态效率的影响,因此本文按照地理位置的划分,将30个省份分为华北地区、东北地区、华东地区、华中地区、中南地区、华南地区、西南地区、西北地区七个地理区,基于以上划分,对不同区域的“三生空间”下土地利用生态效率综合值及其子系统的土地利用生态效率值进行分析,以期为区域的协调发展提供现实依据。

(1) “三生空间”下我国七大地理区土地利用生态效率的时间变化特征

首先,从综合值来看,“三生空间”下我国七大地理区的土地利用生态效率综合值如图4.3所示。从“三生空间”下土地利用生态效率的整体变化趋势来看,七大地理区的整体波动趋势相似,平均值在0.4-0.6之间,总体上维持在中等效率水平上,这表明我国需进一步采用多种措施不断提高“三生空间”下我国土地利用生态效率;从“三生空间”下七大地理区土地利用生态效率值来看2003-2005年呈现下降趋势,相较于2005年,“三生空间”下土地利用生态效率值2006年增幅较大,其中,华北、东北、华中、华南均达到完全有效状态;2008-2014年,“三生空间”下七大地理区土地利用生态效率值均未达到有效水平;2015-2018年,“三生空间”下七大地理区土地利用生态效率取得较大提升,其中华南、西南和华东三个地理区达到超效率水平,这离不开基于生态文明的国土空间开发保护制度,不断改变土地利用方式,提高土地利用质量;2019-2020年,“三生空间”下土地利用生态效率区域差异较小,但整体效率偏低。

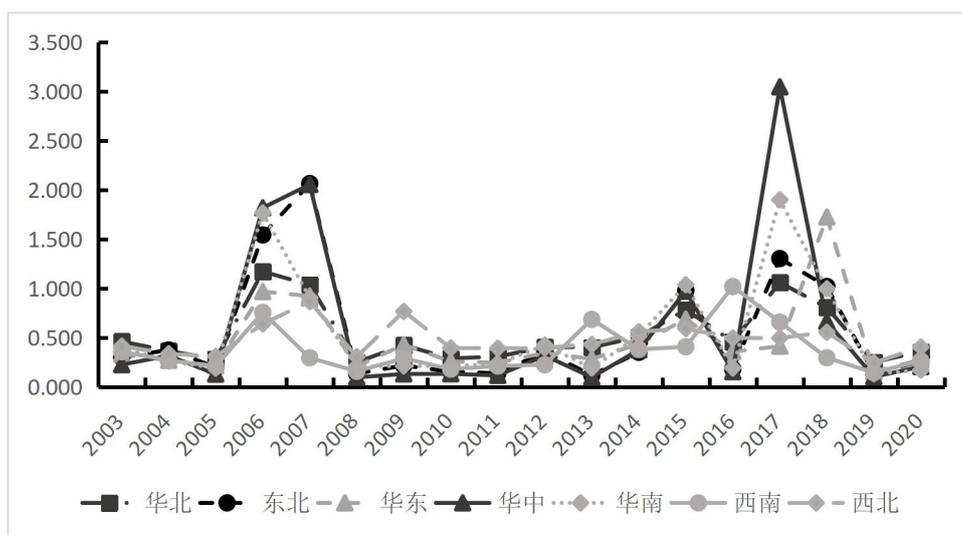


图 4.3 “三生空间”下七大地理区的土地利用生态效率

(2) “三生空间”下七大地理区土地利用生态效率各子系统效率的特征

为进一步分析“三生空间”下七大地理区土地利用生态效率综合值的变化原因,本文进一步对七大地理区的三个子系统土地利用生态效率值分析,具体结果见图 4.4-图 4.6。

第一,从生产空间下土地利用生态效率值来看,七大地理区的变化趋势基本呈现波动上升,整体水平由高到低排序依次为:华北>华南>西北>西南>华东>东北>华中,其中华北和华南地区达到完全有效水平,西北、西南和华东地区处于高效率水平,而东北和华中地区整体生产效率较低,这是因为华中和东北地区是我国粮食的主产区,第一产业比重较大,农业潜力仍需不断释放。

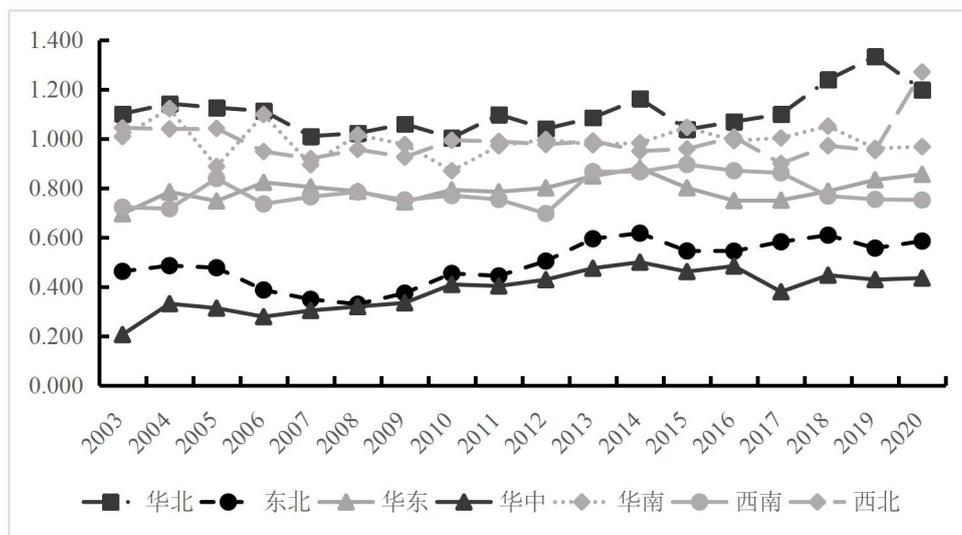


图 4.4 生产空间下七大地理区土地利用生态效率值

第二,生活空间下七大地理区土地利用生态效率均呈现递减趋势,在 2013 年生活空间下七大地理区土地利用生态效率均有所提升,这是由于 2013 年我国大力推进建设资源节约型和环境友好型社会,人类福祉指数有所提升,由此带动生活空间下土地利用生态效率的提升。就具体数值而言,西北>华北>华东>东北>华南>西南>华中。这是由于西北地区地域辽阔,人员密集度低于其他地区,生活空间下由于人类活动而产生的流入生态空间的污染物量较小,对于生态的负面影响较小,随着近年乡村振兴的推进,以陕西省为核心的西北经济圈逐渐形成,人口流入对生态产生一定影响;华东和华南地区经济相对发达,人口密集,但其社会基础设施完善,生活垃圾和生活污水的整体处理水平优于其他地理区域,因此其生活空间下土地利用生态效率相对高于其他地区;东北、西南和华中地区的生活空间下土地利用生态效率较低,原因在于人口流失较多,生活基础设施建设有待完善,人类福祉水平有待提高。

同时，七大地理区的生活空间下城镇土地利用生态效率和生活空间下农村土地利用生态效率的变化趋势同生活空间下土地利用生态效率值的变化趋势一致，因此，本文不再对七大地理区生活空间下城镇土地利用生态效率和农村土地利用生态效率进行进一步分析，其差异原因同生活空间下土地利用生态效率原因一致。

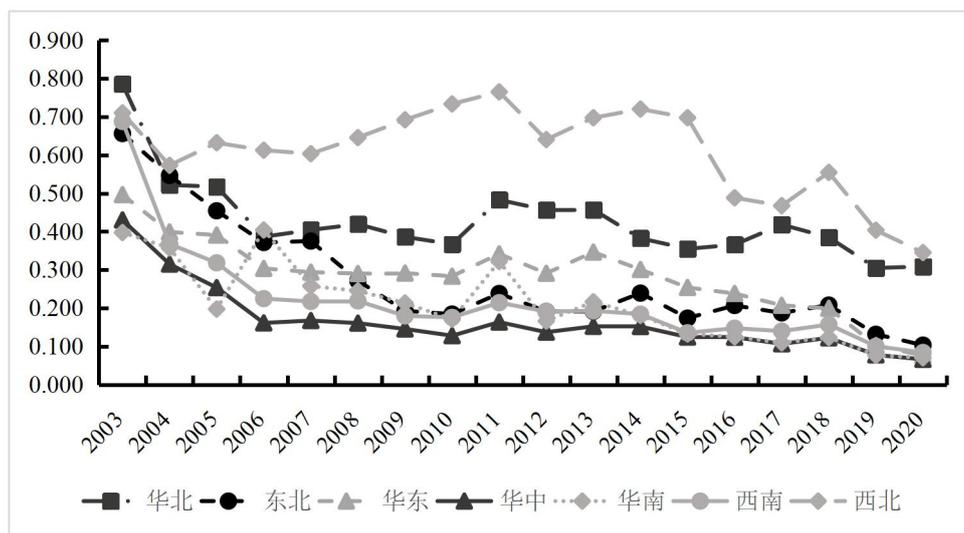


图 4.5 生活空间下七大地理区土地利用生态效率

第三，生态空间下七大地理区土地利用生态效率整体变动幅度较小，区域差异显著，具体结果如图 4.6 所示。其中，华南地区生态空间下土地利用生态效率远远高于其他地区，得益于其独特的地理优势，植被覆盖率高，生态系统服务价值高；华东地区虽略低于华南地区，但自 2017 年以后，实现完全有效；华北、东北、华中、西南和西北地区的生态空间下土地利用生态效率呈现递减趋势，基本处于低效率水平。这是由于过往过度追求经济发展速度，忽略高污染高排放对于生态环境的影响，从而造成生态空间下土地利用生态效率较低。

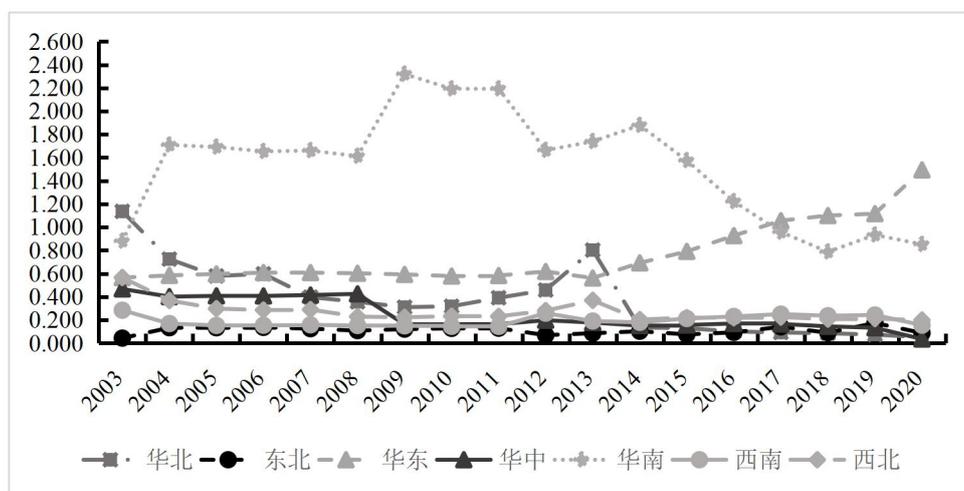


图 4.6 生态空间下七大地理区土地利用生态效率

(3) 省域层面时间趋势特征分析

在分析“三生空间”下全国及七大地理区土地利用生态效率的基础上, 本文从省域视角出发, 运用 Arcgis 自然间断分级法进一步分析“三生空间”下 30 个省份土地利用生态效率水平及其各子系统的发展差异。图 4.9 (a)-图 4.9(d)分别为“三生空间”下 30 个省份 2003、2009、2015、2020 年土地利用生态效率综合值, 图 4.10(a)-图 4.10(d) 分别为生产空间下 30 个省份 2003、2009、2015、2020 年土地利用生态效率值, 图 4.10(e)-图 4.10(h) 分别为生活空间下 30 个省份 2003、2009、2015、2020 年土地利用生态效率值, 图 4.10(i)-图 4.10 (l) 分别为生态空间下 30 个省份 2003、2009、2015、2020 年土地利用生态效率值。

首先, 从“三生空间”下土地利用生态效率综合之来看, 30 个省份整体变化趋势相近, 2003-2015 年呈现增长趋势, 2015-2020 年呈现下降趋势。其中, 相较于 2003、2009 和 2020 年, 2015 年我国 30 个省份土地利用生态效率整体达到最高水平, 共有 10 个省份实现完全有效, 10 个省份达到高效率水平, 2 个省份达到中高效率水平, 2 个省份处于中低效率水平, 6 个省份仍处于低效率水平。

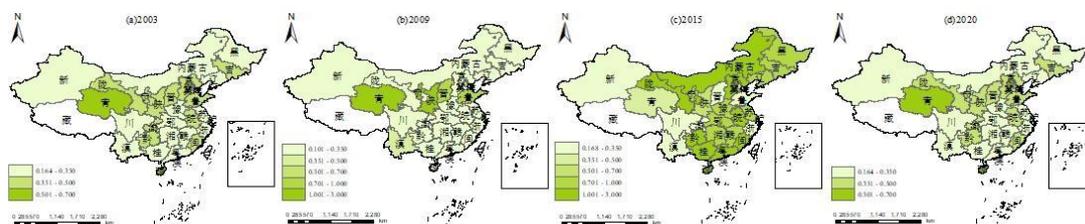


图 4.7 “三生空间”下 30 个省份土地利用生态效率综合值

其次, 对“三生空间”下三个子系统土地利用生态效率值进行分析。第一, 生产空间下土地利用生态效率值高于生活空间和生态空间下土地利用生态效率值, 这是因为原有经济发展模式较为粗放, 城镇化的快速推进带来的城镇建设占用耕地, 挤压生活空间, 侵占生态用地, 从而生活空间和生态空间下土地利用生态效率低于生产空间下土地利用生态效率; 第二, 生活空间下土地利用生态效率水平较低, 其中 2003-2015 年, 上海、天津、宁夏和青海处于中高效率水平, 其他省份处于中低效率水平或低效率水平, 2015-2020 年天津生活空间下土地利用生态效率呈现递增趋势, 居民生活幸福指数较高, 宁夏和青海保持在中高效率水平, 这得益于在其发展过程中, 并未经历过重工业化城市建设; 相较于青海和宁夏, 西北五省中的甘肃、新疆和陕西均有过重工业化建设的历史, 虽然近年来,

地方政府不断推动产业结构优化,但其对于生活空间的影响在短期内的改善效果难以显现;第三,生态空间下的土地利用生态效率处于三个子系统中的最低值,这是因为生产空间下城镇化建设挤压生态用地,农村生产大规模使用化肥、农药等产生的污染物流入生态空间;生活空间下人口涌入城市以及农村空心化对生态空间造成的负面影响,在生产空间和生活空间的双重挤压下,生态空间土地利用生态效率难以提升。

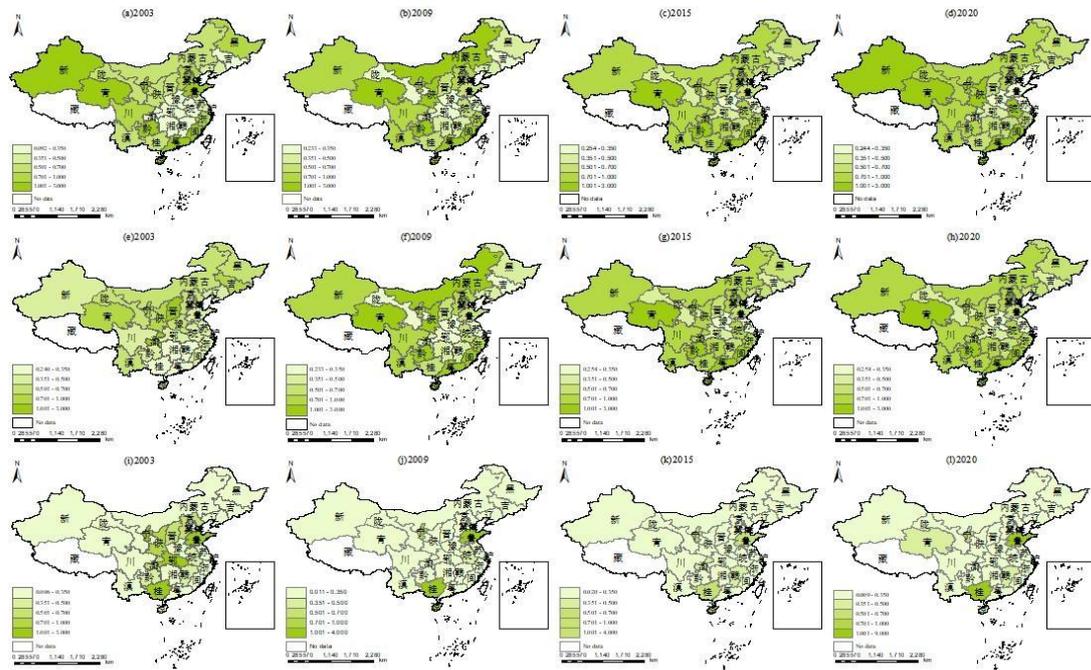


图 4.10 “三生空间”下 30 个省份各子系统土地利用生态效率值

注: 地图依据审图号为 GS(2022)1873 的地图绘制, No data 表示数据缺失地区, 同上。

3.3.1 空间趋势特征分析

我国经济发展过程中形成了多个城市群,其内部联系紧密。为进一步分析“三生空间”下土地利用生态效率综合值的空间变化趋势及子系统的空间变化趋势特征,本文分别从综合效率和子系统两个角度展开分析。

(1) 综合效率空间趋势特征分析

从“三生空间”下各省土地利用生态效率综合值来看(见图 4.11),其具有明显的空间差异,就具体数值而言,共有 14 个省份高于平均值水平,其中华北地区 3 个,东北地区 1 个,华东地区 3 个,华中地区 2 个、华南地区 1 个,西南地区 1 个,西北地区 3 个,其余省份土地利用生态效率均低于全国平均水平,由此可知,“三生空间”下我国土地利用生态效率区域和省域之间的空间分布差

异显著。

根据各省土地利用生态效率的测算结果，绘制 2003-2020 年各省土地利用生态效率平均值及整体平均值的雷达图。从图中可知，“三生空间”下我国 30 个省份的土地利用生态效率尚未实现完全有效，其中，华中和东北地区作为我国的粮食生产主要区，其土地利用生态效率受到农产品价格及自然气候的影响，因此其波动较大，但综合平均值水平较高；同时，以自然地理地貌作为经济发展着力点的海南、青海和宁夏的土地利用生态效率综合值高于平均水平，处于高效率状态，者离不开其绿色的发展方式，当然也与其工业化足迹较低有关；而工业化足迹相对较高的吉林、辽宁、山西和新疆在我国现代化建设中，为全国各省提供能源支持，与之伴随的是当地生态环境遭受破坏，其“三生空间”下土地利用生态效率值偏低；而山东是我国的蔬菜基地，也处于黄河入海口，受到中上游经济粗放发展的影响，其生态环境面临较大的压力，“三生空间”下土地利用生态效率处于低效率水平状态；地形复杂的西南地区内部差异明显，相较于四川、重庆和云南，贵州“三生空间”下土地利用生态效率值高于全国平均水平，缘于其近年来第三产业的发展，生产空间下土地利用生态效率有所改善，从而带动综合值的上升。由此推断，我国 30 个省份之间、地理区内部之间存在者显著的空间差异，因此本文从空间相关性角度展开进一步分析。

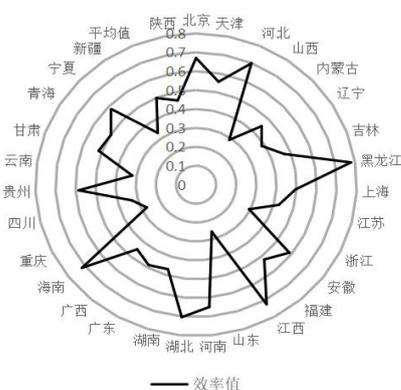


图 4.11 “三生空间下”我国 30 个省份的土地利用生态效率综合值及整体平均值

(2) 子系统空间趋势特征分析

通过测算全局莫兰指数 (Global Moran's I)，发现除我国 30 个省市区存在空间相关性。基于此，为更加深入分析我国 30 个省份的空间相关性，本文基于局部莫兰指数对“三生空间”下三个子系统的土地利用生态效率分别进行分析，结果如图 4.12 所示。其中，散点图的四个象限中第 I 象限表示 H-H (高-高) 集

聚，第II象限表示H-L（高-低）异常，第III象限表示L-L（低-低）集聚，第IV象限表示L-H（低-高）异常。

第一，2003-2020年我国各省份生产空间土地利用生态效率Moran's I指数均大于0，呈现逐年下降趋势，这是由于部分省份处于流域沿线，生产用水的投入之间存在着影响关系，随着经济的发展，生产用水量日益增加，其空间相关性有所影响，从而引致正相关性聚集特征的不断减弱。同时，2003-2020年期间内大部分点落在第I、III象限，表明我国各省份生产空间土地利用生态效率表现为高高集聚和低低集聚，即效率高值区域与周边的高值区域呈现空间集聚现象，效率低值区域与周边的低值区域呈现空间集聚现象；落入第II、IV象限的点数相对较少，表明较少发生区域自身效率值与周边区域效率明显差异的现象。

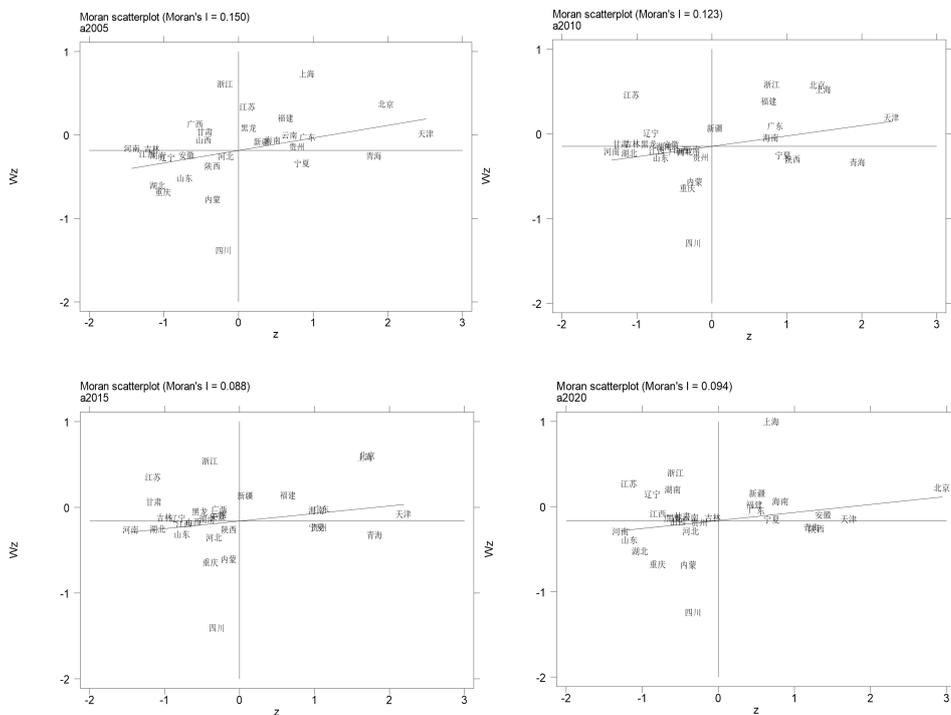


图 4.12 2005、2010、2015、2020 年 30 个省份生产空间土地利用生态效率散点图

第二，计算生活空间土地利用生态效率Moran's I指数，并生成散点图（图4.4）。可以发现，2005-2015年，我国各省份生活空间土地利用生态效率Moran's I指数均大于0，其亦呈现逐年下降趋势，其原因是部分省份处于流域沿线，同时经济发展伴随的人口流动带来的生活用水量的变化、生活居住面积的变化等均会对生活空间土地利用生态效率产生影响，其空间相关性有所影响，从而导致的正相关性聚集特征的不断减弱。除此之外，2005-2015大部分点落在第I、III象

限,表明我国各省份生活空间下土地利用生态效率值存在空间集聚现象;同样落入第II、IV象限的点数相对较少,表明较少发生区域自身效率值与周边区域效率明显差异的现象。但是在2020年,我国各省生活空间莫兰指数小于0,说明各省生活空间土地利用生态效率不存在显著空间相关性,随着经济发展进入高质量发展阶段,我国人口流动变化幅度低于经济发展前期,人口的相对稳定是生活空间土地利用生态效率由空间相关转变为空间不相关的重要原因。

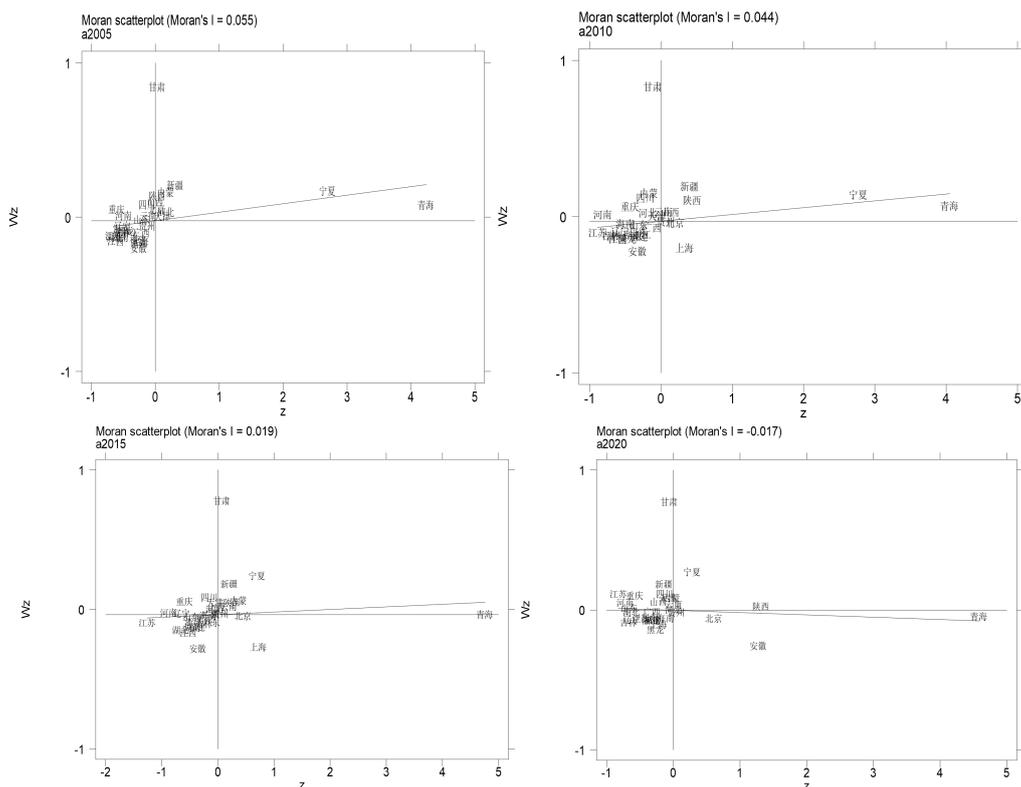


图 4.13 2005、2010、2015、2020 年我国各省份生活空间土地利用生态效率散点图

第三,生态空间土地利用生态效率的局部莫兰指数小于0,即不存在显著的空间相关性,这是因为我国各省份土地面积总量是固定的,省界线保持稳定不变,各省份的土地利用类型的变化会对其自身生态系统服务价值产生影响,但对于其相邻省份的生态系统服务价值的影响较小。

4 “三生空间”下土地利用生态效率耦合协调性分析

4.1 “三生空间”下土地利用生态效率耦合协调机制

生产空间、生活空间和生态空间下土地利用生态效率的协调发展是“三生空间”下土地利用生态效率的本质和内涵。生产空间作为“三生空间”经济发展的载体，其以获取经济收益和提供社会生活服务为主要目标；生活空间为人类提供居住、消费、娱乐等活动区域，其以提高人类福祉指数为目标，同时也为生产空间的劳动要素输入提供保障，人类绿色的生活方式一定程度上会缓解生态环境压力，减少生活空间废弃物的排放，由此可得，生活空间是“三生空间”持续发展的基础；生态空间作为生产空间和生活空间永续存在的基础，主要通过生态产品的供给和生态系统服务的提供这两种途径，向生产空间和生活空间提供支持。由此可知，生产空间、生活空间和生态空间三者相互作用，三者协调发展才能共同促进“三生空间”长久运行。

基于此，本文试图通过对“三生空间”下三个子系统的土地利用生态效率的耦合协调水平进行定量测度，探讨三者之间的耦合协调程度以进一步更加准确把握“三生空间”下土地利用生态效率水平及其变化情况。

4.2 “三生空间”下土地利用生态效率耦合协调模型

基于上述论证，依据“三生空间”下土地利用生态效率三个子系统的测算值，利用熵权法计算出“三生空间下”土地利用生态效率综合值 T 。计算公式为：

$$T = \alpha F_1 + \beta F_2 + \gamma F_3 \quad (5-1)$$

式中， α 、 β 、 γ 分别为生产空间、生活空间和生态空间的待定系数，且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ， F_i 为各系统土地利用生态效率标准化后的值。

根据耦合系统模型，得到耦合度 C 的计算公式为：

$$C = \left[\frac{F_1 \times F_2 \times F_3}{\left(\frac{F_1 + F_2 + F_3}{3} \right)^3} \right]^{1/3} \quad (5-2)$$

耦合协调度反映三个子系统的协调发展水平，耦合协调度 D 计算公式为：

$$D = \sqrt{T \times C} \quad (5-3)$$

4.3 “三生空间”下土地利用生态效率耦合协调度结果分析

通过构建生产空间土地利用生态效率、生活空间土地利用生态效率和生态空间土地利用生态效率耦合协调度模型，测算出我国 30 个省份的耦合协调度结果，结果见表 5.1。为便于研究，本文将“三生空间”土地利用生态效率的耦合协调度划分为 5 种类型标准，依次为严重失调（0-0.199）、轻度失调（0.2-0.399）、基本耦合协调（0.4-0.599）、中度耦合协调（0.6-0.799）和高度耦合协调（0.8-1）。

首先，从整体来看，生产空间、生活空间和生态空间土地利用生态效率的耦合协调度整体上处于轻度失调水平，通过查验计算过程，发现我国生产空间、生活空间和生态空间的耦合度较高，也就是说三个子系统之间相互作用强度较大，而协调度处于相对较低的水平，即三个子系统间相互作用中良性耦合程度较低。换言之，在经济发展的过程中，生产空间的持续扩张，生活空间和生态空间被持续侵占，而生活空间产生的生活污染亦增加了生态空间的负担，因此，“三生空间”下三个子系统之间良性耦合程度较低。

其次，通过对比七大地理区各省份的耦合协调度水平，可知，华北地区中河北、山西和内蒙古耦合处于轻度失调水平，天津处于基本耦合水平，北京逐渐由基本耦合转变为轻度失调；东北地区、华中地区和西南地区一直处于轻度失调水平；华东地区中上海处于基本耦合水平，江苏、浙江、安徽、福建、江西和山东处于轻度失调水平；华南地区除广东外，广西和海南处于基本耦合水平；西北五省中甘肃和新疆的耦合协调度水平低于陕西、宁夏和青海。通过上述对比分析，发现以第三产业为核心产业的上海和开发程度相对较低的宁夏和青海基本处于基本耦合水平。

最后，具体到每个省份来看，2003 年末，我国仅有 7 个省份的耦合协调度达到基本耦合协调水平，包括北京、天津、山西、上海、湖北、广西、贵州和宁夏；其余省份基本处于轻度失调水平；2006 年末，山西、湖北耦合协调度水平下降至轻度失调水平，这是因为山西省作为能源大省，煤矿业发展的同时伴随着生态污染，因而其耦合协调度出现下滑趋势；海南耦合协调度水平上升至基本耦

合水平，缘于旅游业的兴起，海南得天独厚的自然条件成为全国游客的旅游目的地之一，在保护当地生态环境的前提下带动当地经济发展；2009年末，北京、宁夏耦合协调度下降至轻度失调水平，宁夏地处西北，荒漠地貌存在，加之受到上游地区工业发展带来的环境影响，生态空间下土地利用生态效率降低，三个子系统的耦合协调水平下降；自2009年起，北京耦合协调度呈现递减趋势，这是由于经济发展，大量人口涌入，生产空间和生活空间不断扩张，生态空间不断被迫缩小所造成的；2012-2015年，“三生空间”下30个省耦合协调度基本和2009保持在同意协调水平上；2018年末，天津耦合协调度上调至中度耦合水平，这得益于天津湿地生态补偿办法的推行，推动湿地保护和修复，提升生态空间下土地利用生态效率，逐步实现“三生空间”下三个子系统的协调发展；2020年末，受到新冠肺炎疫情的影响，生产空间下的土地利用生态效率有些许波动，同时加之自然灾害频发，生态用地面积减少，生态空间下土地利用生态效率降低，在此背景下，“三生空间”下我国30个省份三个子系统的耦合协调度水平基本和2018保持一致。

表 5.1 生产空间、生活空间和生态空间土地利用生态效率的耦合协调度

地区	2003	2006	2009	2012	2015	2018	2020
北京	0.468	0.475	0.390	0.380	0.339	0.356	0.310
天津	0.544	0.551	0.449	0.476	0.350	0.613	0.353
河北	0.361	0.307	0.303	0.302	0.308	0.274	0.271
山西	0.455	0.310	0.278	0.280	0.281	0.313	0.266
内蒙古	0.287	0.258	0.272	0.272	0.366	0.275	0.371
辽宁	0.336	0.281	0.267	0.282	0.256	0.340	0.254
吉林	0.209	0.256	0.248	0.280	0.268	0.251	0.267
黑龙江	0.273	0.265	0.260	0.263	0.273	0.272	0.318
上海	0.403	0.456	0.424	0.510	0.530	0.522	0.530
江苏	0.236	0.281	0.356	0.275	0.275	0.268	0.226
浙江	0.242	0.253	0.249	0.296	0.271	0.255	0.234
安徽	0.320	0.404	0.382	0.359	0.330	0.338	0.432
福建	0.377	0.384	0.355	0.322	0.407	0.416	0.407
江西	0.258	0.318	0.316	0.294	0.297	0.315	0.331
山东	0.395	0.416	0.382	0.375	0.366	0.368	0.360
河南	0.160	0.213	0.301	0.232	0.230	0.212	0.217
湖北	0.429	0.349	0.261	0.305	0.284	0.316	0.233
湖南	0.250	0.229	0.246	0.273	0.413	0.307	0.367
广东	0.294	0.302	0.403	0.368	0.350	0.303	0.339
广西	0.439	0.512	0.471	0.441	0.437	0.421	0.498

续表 5.1 生产空间、生活空间和生态空间土地利用生态效率的耦合协调度

地区	2003	2006	2009	2012	2015	2018	2020
海南	0.366	0.483	0.509	0.469	0.588	0.413	0.480
重庆	0.250	0.249	0.354	0.289	0.286	0.277	0.257
四川	0.265	0.264	0.374	0.279	0.261	0.282	0.273
贵州	0.455	0.357	0.338	0.340	0.363	0.398	0.316
云南	0.291	0.262	0.247	0.265	0.377	0.279	0.311
陕西	0.370	0.288	0.294	0.311	0.407	0.283	0.442
甘肃	0.354	0.233	0.245	0.246	0.272	0.302	0.295
青海	0.358	0.366	0.433	0.400	0.365	0.378	0.379
宁夏	0.442	0.428	0.372	0.475	0.387	0.372	0.372
新疆	0.383	0.277	0.255	0.280	0.253	0.260	0.236

5 “三生空间”下土地利用生态效率的影响因素分析

通过测度“三生空间”下土地利用生态效率、分析其时空特征及三个子系统的耦合协调水平，发现“三生空间”下土地利用生态效率存在空间自相关关系，因此本文通过构建空间计量模型对“三生空间”下土地利用生态效率的影响因素展开分析，以为提高“三生空间”下土地利用生态效率提供支持。基于此，本文通过参考现有相关文献，对“三生空间”下土地利用生态效率的影响因素机制进行理论分析，利用空间杜宾模型进行实证分析。

5.1 “三生空间”下土地利用生态效率影响因素的选择

不同的土地利用方式承担着不同的功能，“三生空间”下土地利用生态效率是将各生产要素投入到土地上，通过人类的生产和生活活动，实现“三生空间”下土地利用生态效率的最大化，即生产空间、生活空间和生态空间下的土地利用生态效率处于较高的水平。“三生空间”下土地利用生态效率不仅受到社会经济活动的影响，也会受到自然因素的影响。考虑到数据的可获得性，本文主要从社会经济视角出发，兼顾自然因素，开展“三生空间”下土地利用生态效率的影响因素分析。

经济发展水平的高低直接关系到“三生空间”下土地利用生态效率的要素投入量的大小，从而影响到“三生空间”下土地利用生态效率（樊鹏飞等，2018）。经济水平对于“三生空间”下土地利用生态效率的影响分为两个阶段：第一个阶段是抑制阶段，即为追求经济量的发展，以牺牲生态为代价，发展方式粗放，造成土地利用低效，生产空间不断挤压生活空间和生态空间；第二阶段为促进阶段，随着经济发展水平的提高，科技不断进步，土地资源的整体利用效率会相对有所提升。同时，我国政府开展了三条红线的划定工作，即18亿亩的耕地红线、生态红线以及城镇开发边界；政府部门通过约束生产空间的用地规模，提高单位土地面积的生态效率；除此之外伴随在经济发展水平的提高，人们的生活观念也会发生变化，绿色生活观念逐渐深入人心，综合作用下，不断提升“三生空间”下土地利用生态效率的。

其次，产业结构的升级有利于土地利用集约化，从而有利于提高“三生空间”

下的土地利用生态效率(Xie等, 2018)。产业结构升级可以优化土地资源配置, 通过产业结构升级, 改变原有的土地利用方式, 降低工业污染物的排放, 提高现有土地利用方式的经济效应和生态效应, 进而有利于减少土地资源的浪费(薛丹, 2021), 从而提高“三生空间”下土地利用生态效率。

同时, 人口密度的增加可以推动土地的集约利用, 随着人口密度的不断增加, 其对于现有建筑的容积率和密度有着更高的要求, 因此有利于提高生产空间和生活空间下的土地利用生态效率; 同时人口密度增加会带来集聚效应, 提高土地利用的生态效率, 但当人口密度过高时, 也会带来生态破坏等负面作用(张志辉等, 2014)。

对外开放是经济发展的重要推动力之一, 各地区可以通过对外开放参与到国际分工中, 其对土地利用生态效率既有促进又有抑制作用。各地区通过引进外资, 获得技术外溢效应(Sadik & Bolbol, 2001), 推动本地区产业发展和结构调整, 推动经济的集约发展, 有益于生产空间下土地利用生态效率的进一步改善; 同时对外开放过程中存在地价转让土地现象, 也会承担发达国家的污染专业, 污染物排放增加(Copeland等, 2004), 对“三生空间”下土地利用生态效率产生抑制作用。

土地利用方式对于土地功能的实现和土地利用生态效率的改善有着重要的影响。生产空间是经济发展的重要载体, 生态空间是生产空间和生活空间存在的基础。生产空间土地的增加并不意味着其经济收益和社会生活服务能力的提高, 一定程度上生产空间下的土地利用生态效率依赖于其他要素的投入, 在经济发展过程中, 生产空间的土地的无需扩张更是挤压了生活空间和生态空间, 导致生活空间下人们居住用地面积受限, 居住成本上升, 生态空间用地缩小导致其生态系统服务能力的下降, 土地利用方式对于“三生空间”下土地利用生态效率的影响受制于土地利用方式的转变。除此以外, 土地开垦程度、财政压力、科技水平、环境污染治理力度同样会影响到“三生空间”下土地利用生态效率。

5.2 “三生空间”下土地利用生态效率影响因素实证分析

基于“三生空间”下土地利用生态效率影响因素的机制分析, 加之“三生空间”下土地利用生态效率呈现空间自相关特征, 因此本文运用空间计量模型进行

实证分析。

5.2.1 空间计量模型的选择

空间计量模型包括空间自回归模型、空间误差模型和空间杜宾模型，通过 LM 检验和 LR 检验的结果来判定使用哪一个空间计量模型。LM 的检验统计量包括四个，分别是 LM-lag、LM-err、稳健 LM-lag 和稳健 LM-err。检验结果如表 6.2.1 所示。

表 6.2.1 空间计量模型检验结果

检验方法	检验统计量	P 值
LM-lag 检验	207.734	0.0000
Robust LM-lag 检验	23.785	0.0000
LM-err 检验	230.102	0.0000
Robust LM-err 检验	23.152	0.0000
LR-sdm-sar	20.13	0.0099
LR-sdm-sem	18.78	0.0161
Hausman 检验	24.69	0.0009
Wald 检验	19.18	0.0139

由表 6.2.1 可知，LM-lag 和 LM-err 在 1% 下均显著，稳健 LM-err 和稳健 LM-lag 亦通过了 1% 的显著性检验；基于此，本文通过 LR 检验拒绝将空间杜宾模型退化为空间误差模型和空间自回归模型；Hausman 检验统计量和 Wald 检验统计量在 5% 水平下显著，因此本文选择基于个体时间双固定效应的空间杜宾模型，构建“三生空间”下土地利用生态效率的影响因素模型如 (6-1) 所示。

$$Y_{it} = \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} Y_{jt} + \sum_{q=1}^m \beta_{iq} X_{it} \theta + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (6-1)$$

式中， Y_{it} 为被解释变量，表示第 i 个省份第 t 期的“三生空间”下土地利用生态效率； X_{it} 表示的是各个影响因素的向量； ρ 为空间自回归参数，代表的是本省“三生空间”下土地利用生态效率受到邻近省份的影响程度； W_{ij} 为 n 阶空间权重矩阵； β_{iq} 为影响因素的系数； θ 为空间滞后项的系数向量，表示邻近省份的影响因素对本省“三生空间”下土地利用生态效率的影响程度； μ_i 表示的是个体固定的空间效应； δ_t 表示的是时间固定效应； ε_{it} 为随机干扰项； i 和 j 分别表示的是第 i 个省份和第 j 个省份； t 表示时间。

5.2.2 权重矩阵的设定

(1) 逆地理矩阵

根据地理学第一定律,相对距离近的事物比相对距离远的事物联系更加密切。本文借鉴胡安军(2019)的做法,将逆地理矩阵设置为两个省份球面距离平方的倒数。具体公式如下:

$$W_b = \begin{cases} \frac{1}{d_{ij}^2}, i \neq j \\ 0, i = j \end{cases} \quad (6-2)$$

式中, d_{ij} 通过经纬度计算两个省份之间的球面距离。

(2) 0-1 矩阵

又称为空间邻接矩阵,也是最常见的空间矩阵之一。通过各个省份是否相邻来设置,即相邻为 1,不相邻为 0。

(3) 经济距离矩阵

经济体之间不仅在地理位置上存在相邻关系,在经济上也存在这相邻关系(Torre 等, 2000),具体公式如下:

$$W_2 = \begin{cases} \frac{1}{|Y_i - Y_j|}, i \neq j \\ 0, i = j \end{cases} \quad (6-3)$$

式中, Y_i 代表的是研究期内 i 省的地区生产总值的平均值, Y_j 表示的是研究期内 j 省地区生产总值的平均值。

(4) 经济地理嵌套矩阵

同经济距离矩阵和地理矩阵不同的是,经济地理嵌套矩阵即考虑了地理距离的影响,又考虑了经济因素的影响。因此,本文选择使用经济地理嵌套矩阵来进行实证分析,其具体公式如下:

$$W_d = \begin{cases} \partial W_b + (1 - \partial) W_c, i \neq j \\ 0, i = j \end{cases} \quad (6-4)$$

式中, ∂ 参照李小平等(2020)的做法,取值为 0.5。

5.2.3 变量选取与数据来源

(1) 变量选取

在“三生空间”下土地利用生态效率影响因素机制分析的基础上,发现经济发展水平、产业结构、人口密度、对外开放程度、土地利用方式、财政压力、科技支出和环境污染治理投资都会对“三生空间”下土地利用生态效率产生影响。本文选择用人均 GDP 来表示经济发展,记作 x_1 ;考虑到经济发展的不同阶段的不用影响,本文加入经济水平的二次型,记作 x_2 ;用第三产业和第二产业的产值比表示该地区的产业结构,记作 x_3 ;用人口密度用单位面积的人口数量来表示,记作 x_4 ;同时考虑到引用外资对于“三生空间”下土地利用生态效率的影响,用实际利用外资额来表示对外开放程度,记作 x_5 ;土地利用方式用生产空间下的土地面积比值来代替,由于生活空间较为集中,相对每个省的整体面积占比相对较小,并且人口密度一定程度上可以表示生活空间下土地利用对于“三生空间”下土地利用生态效率的影响,因此本文主要选用生产用地占比和生态用地占比,分别记作 x_6 和 x_7 ;同时考虑到我国存在荒地变耕地现象,本文用总播种面积同该省份的总面积之比来表示土地开垦程度,记作 x_8 ;本文用公共财政支出同土地转入收入的比值来表示土地财政压力,值越大,则土地财政压力其值越大,记作 x_9 ;科技支出表示该地区的科技水平,用每个省的科技经费支出来表示,记作 x_{10} ;环境污染治理投资额的大小表示现有环境治理程度,记作 x_{11} 。本文的被解释变量为第三章测算出的“三生空间”下土地利用生态效率的综合值,记为 y 。为解决不同影响因素的不同量纲问题,本文对人均 GDP 及其二次项、对外开放水平、科技支出和环境污染治理投资进行对数化处理。

表 6.2 影响因素指标说明

影响因素	变量名称	变量测度
经济发展	人均 GDP x_1 和 x_2	人均 GDP 及二次项作对数处理
产业结构	二三产业之比 x_3	第三产业增加值/第二产业增加值
人口规模	人口密度 x_4	总人口/总面积
对外开放	实际利用外资额 x_5	对数化处理
土地利用方式	生产用地占比 x_6	生产用地面积/总面积
	生态用地占比 x_7	生态用地面积/总面积
土地开垦程度	总播种面积占比 x_8	总播种面积/总面积
土地财政	土地财政压力 x_9	公共支出/土地转让收入
科技水平	科技支出 x_{10}	对数化处理

续表 6.2 影响因素指标说明

影响因素	变量名称	变量测度
环境治理力度	环境污染治理投资 x11	对数化处理

(2) 数据来源

影响因素的数据来源于国家统计局、地方统计年鉴及统计公报，对于缺失值数据，本文运用线性插值进行补充。表 6.3 为各变量的描述性统计结构。

表 6.3 各变量的描述性统计结果

变量	平均值	标准差	最小值	最大值
x1	10.368	0.752	8.19	12.013
x2	108.053	15.387	67.068	144.313
x3	1.064	0.604	0.494	5.297
x4	5.44	1.278	2.001	8.281
x5	4.153	4.278	0.045	5.880
X6	28.603	21.265	0.5953	90.8422
X7	56.833	25.457	0.08	98.49
X8	17.193	13.569	0.14	62.35
X9	5.905	1.558	2.306	11.428
x10	3.583	1.331	0.024	7.064
x11	1.394	0.760	0.035	4.625

5.2.4 空间回归结果分析

从解释变量的回归系数来看，经济发展水平的一次项是负数，二次项是正数，在 10%的水平下是显著的，说明我国经济发展水平对“三生空间”下土地利用生态效率的影响目前仍呈现“U”型，这同前文的机理分析具有一致性；产业结构的系数为正，虽然未通过显著性检验，这同我国现有的不平衡不充分的地区差异发展相关，但可通过优化产业结构，进而提高土地利用生态效率，因此推动产业协调发展对于“三生空间”下土地利用生态效率的提高有着积极作用；人口密度的回归系数为正数，在 5%的水平下显著，说明现有经济发展阶段，提高人口密度有利于提高“三生空间”下土地利用生态效率，因为随着人口密度的增加，对于地区经济发展可形成一定的规模效应，进而带动土地利用生态效率的改善；对外开放的系数为正数，在 5%的水平下显著，这表明利用外资可以达到提高“三生空间”下土地利用生态效率的目的，同对外开放伴随而来的环境污染问题仍值得关注，不同省份应根据自身现有的整体对外开放程度进行相应的选择；土地利用方式中，生产用地占比的系数为负数，通过了 5%的显著性水平检验，即随着

经济建设而来的生产用地的扩张导致生态空间的被动缩小,生态系统服务价值降低,从而导致“三生空间”下土地利用生态效率降低,因此,进一步优化现有生产结构,提高土地的垂直利用效率,进而为改善“三生空间”下土地利用生态效率较低的情况提供可能性;生态用地的系数为正数,通过了5%的显著性水平检验,即随着生产用地对生态用地的挤压,生态用地日益萎缩,其生态系统服务价值也呈现下降趋势,从而“三生空间”下土地利用生态效率会进一步退化,因此,确保生态用地对于维持和改善“三生空间”下的土地利用生态效率至关重要;土地开垦程度的系数为负值,通过了1%的显著性水平检验,即随着土地开垦面积的增加,该地“三生空间”下的土地利用生态效率会呈现下降趋势,由于我国山区占地面积大于平原地区,机械化并不足以在山区推广,传统农业生产模式的扩张会导致土地覆被减少,从而导致“三生空间”下土地利用生态效率的下降,因此,在保证耕地红线不动的前提下,不断优化现有农业结构,进一步探索适宜本地区长远发展的农业模式,为提供“三生空间”下土地利用生态效率提供基础;科技水平和环境污染治理投资额的系数均为正数,表明科技水平和环境治理力度的提升对于改善“三生空间”下土地利用生态效率具有积极作用,科技水平虽未通过显著性检验,但科技水平表示我国现有的技术水平,其对于推动产业结构优化有着积极作用,有助于“三生空间”下土地利用生态效率的进一步改善;在生产和生活总,大量污染物流入环境中,环境污染治理投资额的增加,有助于降低生产生活空间产生的污染对于“三生空间”下土地利用生态效率的影响。

表 6.4 “三生空间”下土地利用生态效率影响因素的空间杜宾模型回归结果

变量	回归系数	T 统计量	Wx	T 统计量
x1	-2.444*	-1.711	-2.828	-0.301
x2	0.117*	1.664	0.136	0.297
x3	0.078	0.497	-1.507	1.588
x4	1.857***	2.835	13.758***	2.951
x5	0.021**	1.992	-0.011**	-2.111
x6	-0.001**	-2.321	0.007***	3.347
x7	0.030**	1.972	-0.002*	-1.942
x8	-0.034***	-2.808	-0.044	-0.573
x9	0.037	1.396	0.179	0.846
x10	0.014	0.353	0.686**	2.182
x11	0.024*	1.658	0.26	1.61

(*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1)

5.2.5 稳健性检验

空间权重的选择对于空间杜宾模型的结果有着重要的影响，本文再次运用 0-1 矩阵、逆地理矩阵、经济地理矩阵来计算个体时间双固定空间杜宾模型的结果。表 6-3 中，分别列出基于 0-1 矩阵、逆地理矩阵和经济地理矩阵的个体时间双固定空间杜宾模型的回归结果，见表 6.5。通过对比，发现三种空间矩阵的回归结果的空间自回归系数均为正值，并在 5% 的显著水平上显著。三个模型的回归结果基本稳定，整体上可以认为本文的回归结果具有稳健性。

表 6.5 基于不同空间权重矩阵的稳健性检验

变量	0-1 矩阵	逆地理矩阵	经济地理矩阵
x1	-2.517* (-1.799)	-2.846** (-2.127)	-3.136** (-2.246)
x2	0.121* (1.764)	0.138** (2.094)	0.147** (2.141)
x3	0.043 (0.297)	0.003 (0.018)	0.192 (1.428)
x4	1.250* (1.784)	1.360** (2.09)	1.623*** (2.622)
x5	0.004 (0.573)	0.003 (0.280)	0.001 (0.38)
x6	-0.002 (-1.202)	-0.002 (-0.813)	-0.006 (-1.441)
x7	-0.001 (-0.688)	-0.001 (-0.868)	-0.002 (-0.451)
x8	-0.032*** (-2.683)	-0.028** (-2.399)	-0.022* (-1.93)
x9	0.033 (1.445)	0.022 (0.963)	0.021 (0.957)
x10	0.008 (0.187)	0.004 (0.099)	0.028 (0.69)
x11	0.017 (0.748)	0.012 (0.528)	0.009 (0.389)

(*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1)

6 结论与建议

6.1 研究结论

在构建“三生空间”下土地利用生态效率指标体系的基础上，首先采用包含非期望产出的超效率 SBM 模型进行计算，再运用熵权法确认三个子系统的权重，最终求得“三生空间”下土地利用生态效率综合值。基于测算结果及三个子系统固有的关系，本文对其展开时空特征和耦合协调度及影响因素研究，具体结论如下：

(1) “三生空间”下土地利用生态效率的测算结果和时间趋势变化状况。从全国层面来看，2003-2020 年“三生空间”下我国土地利用生态效率综合值的平均值为 0.499，处于中低水平，变化趋势呈现“M”型；其中，三个子系统土地利用生态效率的排序为：生产空间>生态空间>生活空间，平均值分别为 0.826、0.517 和 0.333；从区域层面来看，“三生空间”下七大地理区的土地利用生态效率整体波动范围在“0.4-0.6”之间；其中，生产空间下华北地区的土地利用生态效率值最高，华中地区的土地利用生态效率最低，生活空间下七大地理区整体保持下降状态；生态空间下七大地理区之间的土地利用生态效率具有明显差异，华南地区远高于其他地理区；从省域层面来看，“三生空间”下我国 30 个省份的土地利用生态效率在 2003-2005 保持增长，此后出现下滑；其中，生产空间下我国 30 个省份的土地利用生态效率优于生活空间和生态空间，生态空间下土地利用生态效率水平最低。

(2) “三生空间”下土地利用生态效率的空间特征分析。研究表明，“三生空间”下我国土地利用生态效率空间差异明显，华北地区和华东地区较高，东北地区较低；生产空间和生活空间下的土地利用生态效率具有明显的空间聚集现象，而生态空间因其内部构成基本保持不变，并不存在显著的空间相关性。

(3) “三生空间”下土地利用生态效率的耦合协调度结果分析。生产空间、生活空间和生态空间的土地利用生态效率的耦合协调度处于轻度失调的水平，即三者之间的良性耦合程度较低。

(4) “三生空间”下土地利用生态效率的影响因素分析。我国“三生空间”

下土地利用生态效率存在显著的空间溢出效应，空间滞后项系数显著为正，即某个省份“三生空间”下土地利用生态效率的提升会对相邻省份产生正面影响。在考虑空间溢出效应的前提下，经济发展对于“三生空间”下土地利用生态效率仍就呈现“U”型，产业结构、人口密度和对外开放水平的提高会促进“三生空间”下土地利用生态效率的改善；生产用地占比、土地开垦程度和土地财政压力的增加会对“三生空间”下土地利用生态效率产生负作用；提高科技水平、增加环境污染治理投资有利于推动“三生空间”下土地利用生态效率的改善。

6.2 政策建议

针对“三生空间”下我国土地利用生态效率现状及其所面临的问题，提出以下建议：

(1) 生产空间下，优化经济发展路径，提高土地利用的循环次数，推动土地利用的高效集约发展。生产空间下城镇生产用地效率已然达到完全有效状态，城镇生产中土地要素的边际收益远低于农村生产用地，因此要控制城镇生产过程中土地要素的投入数量，不断提升土地利用的空间垂直效率水平来满足城镇生产中的土地需求；生产空间下的农村生产用地效率相对城镇生产用地效率而言，依旧处于较低的利用水平，这是因为我国地形地貌复杂，多数省份单块耕地面积小，分布零散，现代化机械生产的开展受到自然条件的限制。为进一步提高生产空间下农村土地利用生态效率，应逐步完善生态农业用地的补偿机制，鼓励休耕休牧，加快推动农村生产经济高效这一目标的实现。

(2) 优化土地利用布局，提高生态用地和生活用地比重，推动生产空间、生活空间和生态空间下的土地合理布局。土地作为一个整体，其主要承载着三个功能，即经济生产、居民生活和生态稳定。目前，我国土地利用格局以生产空间为核心，低估了生活用地和生态用地对于提升土地利用生态效率的拉动作用。为改善“三生空间”下土地利用生态效率，要增加生活用地和生态用地，以实现推动生态循环的土地利用目标。

(3) 采取多项举措提高处于低效率水平省份的土地利用生态效率。按照“木桶原理”，应将注意力集中在土地利用生态效率较低的省份，提高土地的整体利用效率。在当前经济发展背景下，原有经济发展方式无法满足生态绿色发展的

要求,这是土地利用生态效率低下的主要原因。对于尚未达到高效率水平的省份,需要合理配置生产要素,控制生产要素的投入比例,增强区域产业实力,促进土地集约利用,不断提高土地利用生态效率水平。

参考文献

- [1]Lu, Yonglong, Zhang, Yueqing, Cao, Xianghui, et al. Forty years of reform and opening up: China's progress toward a sustainable path[J]. SCIENCE ADVANCES, 2019, 5(8):9413.
- [2]Aijun, Lin, Yuan, et al. China's partial emission control[J]. Science, 2016, 351(627): 674.
- [3]Li Tingting, Long Hualou, Zhang Yingnan, Ge Dazhuan, Li Yurui. Analysis of the spatial mismatch of grain production and farmland resources in China based on the potential crop rotation system. Land Use Policy, 2017, 60:26-36.
- [4]Kelejian H H, Prucha I R. Estimation of Simultaneous Systems of Spatially Interrelated Cross Sectional Equations[J]. Journal of Econometrics, 2004, 118(1): 27~50.
- [5]Stigson B, Eco-efficiency: Creating more value with less impact[R]. WBCSD. 2000:5-36.
- [6]Cornwell T, Bettina. State of the Art and Science in Sponsorship-Linked Real Estate Marketing [J] Journal of Financial Economics, 2008, 37(3):41-55.
- [7]Huppel G, Davidson M D, Kuyper J, et al. Eco-efficiency environmental policy in oil and gas production in the Netherlands[J]. Ecological Economics, 2007, 61(1):43-51.
- [8]Zhang L, Zhang L, Xu Y, et al. Evaluating urban land use efficiency with interacting criteria: An empirical study of cities in Jiangsu China[J]. Land Use Policy, 2020, 90: 104292.
- [9]Kuang B, Lu X, Zhou M, et al. Provincial cultivated land use efficiency in China: Empirical analysis based on the SBM-DEA model with carbon emissions considered[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 151: 119874.
- [10]Xie H, Chen Q, Wang W, et al. Analyzing the green efficiency of arable land use in China[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2018, 133: 15-28.
- [11]Hoang V N, Alauddin M. Input-Oriented Data Envelopment Analysis Framework for Measuring and Decomposing Economic, Environmental and Ecological Efficiency: An Application to OECD Agriculture[J]. Environmental and Resource Economics, 2012, 51(3): 431~452.
- [12]Coluccia B, Valente D, Fusco G, et al. Assessing agricultural eco-efficiency in Italian Regions[J]. Ecological Indicators, 2020, 116: 106483.
- [13]Liu S, Xiao W, Li L, et al. Urban land use efficiency and improvement potential in China: A stochastic frontier analysis[J]. Land Use Policy, 2020, 99: 105046.
- [14]Zhu X, Li Y, Zhang P, et al. Temporal-spatial characteristics of urban land use efficiency of China's 35 mega cities based on DEA: Decomposing technology and scale efficiency[J]. Land Use Policy, 2019, 88: 104083.
- [15]Yang, J. and Huang, X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019, Earth Syst. Sci. Data, 13, 3907–3925, 2021.
- [16]刘超,许月卿,孙丕苓,刘佳.土地利用多功能性研究进展与展望[J].地理科学进展, 2016, 35(09): 1087-1099.
- [17]廖李红,戴文远,陈娟,黄万里,江方奇,胡秋凤.平潭岛快速城市化进程中三生空间冲突分析[J].资源科学, 2017, 39(10):1823-1833.

- [18]于婧,陈艳红,唐业喜,陈雨秋,娄昭君,聂艳.基于国土空间适宜性的长江经济带“三生空间”格局优化研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2020,54(04):632-639.
- [19]许伟.“三生空间”的内涵、关系及其优化路径[J].东岳论丛,2022,43(05):126-134.
- [20]刘蒙罢,张安录,文高辉.长江中下游粮食主产区耕地利用生态效率时空格局与演变趋势[J].中国土地科学,2021,35(02):50-60.
- [201]杨清可,段学军,王磊,金志丰.基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应——以长江三角洲核心区为例[J].地理科学,2018,38(01):97-106.
- [22]第二次全国污染源普查公报[J].环境保护,2020,48(18):8-10.
- [23]中共中央 国务院印发《国家新型城镇化规划(2014—2020年)》[J].农村工作通讯,2014(06):7.
- [24]国务院关于印发全国国土规划纲要(2016—2030年)的通知[J].中华人民共和国国务院公报,2017(06):35-64.
- [25]邹利林,王建英,胡学东.中国县级“三生用地”分类体系的理论构建与实证分析[J].中国土地科学,2018,32(04):59-66.
- [26]黄金川,林浩曦,漆潇潇.面向国土空间优化的三生空间研究进展[J].地理科学进展,2017,36(03):378-391.
- [27]崔家兴,顾江,孙建伟,罗静.湖北省三生空间格局演化特征分析[J].中国土地科学,2018,32(08):67-73.
- [28]刘继来,刘彦随,李裕瑞.中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J].地理学报,2017,72(07):1290-1304.
- [29]李晓青,刘旺彤,谢亚文,徐修桥,代杰.多规合一背景下村域三生空间划定与实证研究[J].经济地理,2019,39(10):146-152.
- [30]诸大建,邱寿丰.生态效率是循环经济的合适测度[J].中国人口·资源与环境,2006(05):1-6.
- [31]田炯,王翠然,陆根法.层次分析法在生态效率评价中的应用研究[J].环境保护科学,2009,35(01):118-120.
- [32]史丹,王俊杰.基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价[J].中国工业经济,2016(05):5-21.
- [33]郭艳桃,夏红雨,周银燕.我国省际土地利用生态效率评价[J].商业时代,2010(26):13-14+41.
- [34]游和远,吴次芳,林宁,沈萍.基于数据包络分析的土地利用生态效率评价[J].农业工程学报,2011,27(03):309-315.
- [35]谢曼曼,李秀霞.基于数据包络分析法的吉林省土地利用生态效率时空演化规律研究[J].水土保持通报,2015,35(03):225-230.
- [36]姚成.安徽省各地级市土地利用生态效率分析[J].长沙大学学报,2015,29(04):14-17.
- [37]钟成林,胡雪萍.异质性环境规制、制度协同与城市建设用地生态效率[J].深圳大学学报(人文社会科学版),2019,36(06):70-81.
- [38]李晓阳.江汉平原土地利用生态效率研究[D].华中农业大学,2019.
- [39]李永乐,舒帮荣,吴群.中国城市土地利用效率:时空特征、地区差距与影响因素[J].经济地理.2014,34(1):133~139.

- [40]杨斌,王占岐,胡学东.基于改进可拓物元模型的土地整治项目绩效评价及影响因素分析[J].中国土地科学,2018,32(07):66-73.
- [41]吴小庆,王亚平,何丽梅,陆根法.基于 AHP 和 DEA 模型的农业生态效率评价——以无锡市为例[J].长江流域资源与环境,2012,21(06):714-719.
- [42]盖兆雪,赵映慧,曲长祥.黑龙江省东部煤电化基地土地利用生态效率时空特征分析[J].中国矿业,2014,23(09):61-63+128.
- [43]田伟,杨璐嘉,姜静.低碳视角下中国农业环境效率的测算与分析——基于非期望产出的 SBM 模型[J].中国农村观察,2014(05):59-71+95.
- [44]田云,张俊飏,吴贤荣,等.碳排放约束下的中国农业生产率增长与分解研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(11):7-12.
- [45]卢新海,匡兵,李菁.碳排放约束下耕地利用效率的区域差异及其影响因素[J].自然资源学报,2018,33(04):657-668.
- [46]张晓雨.碳排放约束下中国耕地利用效率研究[D].天津:天津商业大学,2020
- [47]梁流涛.考虑“非意欲”产出的农业土地生产效率评价及其时空特征分析[J].资源科学,2012,34(12):2249-2255.
- [48]潘丹,应瑞瑶.中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析[J].生态学报,2013,33(12):3837-3845.
- [49]徐秋,雷国平,杨厚翔.黑龙江省耕地利用效率时空差异及影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2017,38(12):33-40.
- [50]黄祥芳.面源污染视角下江西省耕地利用效率研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(12):177-183.
- [51]封永刚,彭珏,邓宗兵,等.面源污染、碳排放双重视角下中国耕地利用效率的时空分异[J].中国人口·资源与环境,2015,25(08):18-25.
- [52]盖兆雪,孙萍,张景奇.环境约束下的粮食主产区耕地利用效率时空演变特征[J].经济地理,2017,37(12):163-171.
- [53]吴振华,雷琳.基于三阶段 DEA 模型的农业土地生态效率研究——以河南省为例[J].生态经济,2018,34(10):76-80.
- [54]陈新华,王厚俊.基于生态效率评价视角的广东省农业生产效率研究[J].农业技术经济,2016(04):94-104.
- [55]韩振兴,刘东辉,常向阳.基于 SFA 的我国农业生产效率测算及区域性差异分析[J].江苏农业科学,2018,46(23):388-392.
- [56]金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005-2014 年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].地理学报,2018,73(7):1242-1252.
- [57]吴得文,毛汉英,张小雷,等.中国城市土地利用效率评价[J].地理学报,2011,66(08):1111-1121.
- [58]吴振华,唐芹,蒋红.基于三阶段 DEA 模型的城市土地利用经济效率分析--以江浙沪地区为例[J].现代城市研究,2016(03):106-112.
- [59]田浩辰.基于三阶段 DEA 模型的城市土地利用效率研究[D].天津:天津大学,2018.
- [60]杨清可,段学军,叶磊,等.基于 SBM-Undesirable 模型的城市土地利用效率评价——以长三角地区 16 城市为例[J].资源科学,2014,36(4):712-721.
- [61]聂雷,郭忠兴,彭冲.基于 SBM-Undesirable 和 Meta-frontier 模型的城市建设用地利用效率研究[J].资源科学,2017,39(05):836-845.

- [62]李博,张文忠,余建辉.碳排放约束下的中国农业生产效率地区差异分解与影响因素[J]. 经济地理, 2016, 36(09): 150-157.
- [63]李长健,苗苗.长江中游城市群土地利用效率测算: 现实机理与时空分异[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(12): 157-164.
- [64]陈振,徐瑶瑶,翟振杰,等.基于 SBM-DEA 模型的河南省农业生产效率分析[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(04): 647-652.
- [65]Yu J, Zhou K, Yang S. Land use efficiency and influencing factors of urban agglomerations in China[J]. Land Use Policy, 2019, 88: 104143.
- [66]孙秀梅,张慧,王格.基于超效率 SBM 模型的区域碳排放效率研究——以山东省 17 个地级市为例[J]. 生态经济, 2016, 32(05): 68-73.
- [67]侯孟阳,姚顺波.中国城市生态效率测定及其时空动态演变[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(03): 13-21.
- [68]卢新海,杨喜,陈泽秀.中国城市土地绿色利用效率测度及其时空演变特征[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(08): 83-91.
- [69]李凯.基于 Super-SBM 和 Malmquist 指数的中国农业生产效率研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [70]金巍,刘双双,张可等.农业生产效率对农业用水量的影响[J]. 自然资源学报, 2018, 33(08): 1326-1339.
- [71]侯琳,冯继红.基于超效率 DEA 和 Malmquist 指数的中国农业生产效率分析[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(02): 316-324.
- [72]邹秀清,王英,武婷燕等.江西省农业人口转移对耕地利用效率影响的门槛效应[J]. 资源科学, 2019, 41(08): 1576~1588.
- [73]张义祥,陈雅琪,石杨杨.长江经济带农业现代化对农业生产效率的影响研究[J]. 统计与管理, 2020, 35(12): 100-105.
- [74]胡碧霞,李菁,匡兵.绿色发展理念下城市土地利用效率差异的演进特征及影响因素[J]. 经济地理, 2018, 38(12): 183-189.
- [75]李国煜,王嘉怡,曹宇等.碳排放约束下的福建省城镇建设用地利用效率动态变化与影响因素[J]. 中国土地科学, 2020, 34(04): 69-77.
- [76]李博,张文忠,余建辉.碳排放约束下的中国农业生产效率地区差异分解与影响因素[J]. 经济地理, 2016, 36(09): 150-157.
- [77]郭思源,张敏,吴国春.黑龙江垦区农业生产效率及其影响因素研究[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(12): 68-75.
- [78]王辰璇,姚佐文.农业生态效率的空间特征及其门槛效应[J]. 统计与决策, 2022, 38(05): 49-54.
- [79]郑德凤,郝帅,孙才志.基于 DEA-ESDA 的农业生态效率评价及时空分异研究[J]. 地理科学, 2018, 38(03): 419-427.
- [80]洪开荣,李博.土地资源生态效率时空差异及影响因素研究[J]. 湖北社会科学, 2016(10): 74-81.
- [81]王强,陈田田,李爱迪,张仕超,王跃峰.“三生”视角下的国土空间利用质量评价——以攀西地区为例[J]. 山地学报, 2020, 38(02): 290-302.
- [82]杨皓然,吴群.碳排放视角下的江苏省土地利用转型生态效率研究——基于混合方向性距离函数[J]. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1718-1730.
- [83]马林燕,张仁慧,潘子纯,魏凤.中国省际耕地利用生态效率时空格局演变及影响因素分析——基于 2000—2019 年面板数据[J]. 中国土地科学, 2022, 36(03): 74-85.

- [84]黄鑫,程文仕,焦利民.土地利用生态效率测度、时空异质性及优化配置.生态学杂志(12),3809-3816.
- [85]卫晓庆,王涛,李嘉霖,程贇,刘晓艺.京津冀地区新型城镇化对土地生态效率影响的实证分析[J].生态科学,2020,39(01):118-127.
- [86]张诗嘉,杜书云,刘晓英,牛文涛.黄河下游城市群土地利用生态效率时空差异及影响因素研究[J].资源开发与市场,2022,38(03):280-289.
- [87]杨斌.生态文明背景下国土空间利用效率研究[D].中国地质大学,2021.
- [88]GB 50137-2011,城市用地分类与规划建设用地标准[S].
- [89]刘海猛,方创琳,李咏红.城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架[J].地理学报,2019,74(08):1489-1507.
- [90]刘继来,刘彦随,李裕瑞.中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J].地理学报,2017,72(07):1290-1304.
- [91]刘玉凤,高良谋.京津冀城市群经济与环境的耦合协调发展及时空演化分析[J].统计与决策,2019,35(10):134-137.
- [92]张诗嘉,杜书云,刘晓英,牛文涛.黄河下游城市群土地利用生态效率时空差异及影响因素研究[J].资源开发与市场,2022,38(03):280-289.
- [93]侯孟阳,姚顺波.空间视角下中国农业生态效率的收敛性与分异特征[J].中国人口·资源与环境,2019,29(04):116-126.
- [94]张诗嘉,杜书云,刘晓英,牛文涛.黄河下游城市群土地利用生态效率时空差异及影响因素研究[J].资源开发与市场,2022,38(03):280-289.

致谢

行文至此，十九载校园生活即将要画上句号。三年前，大概也是这个时间，我拿到了自己的考研初试成绩，期望着国家线可以降一点，最后压着数学线拿到调剂资格，五月份收到兰财的录取通知，九月份来到金城开启三年的研究生的学习生活。有幸拜读于师门之下，感谢老师和师兄师姐们师弟师妹们在日常生活中对我的帮助，在此次论文选题、开题和写作过程中，更是十分感谢老师和师兄师姐们对于论文框架和写作细节的指导，感激万分！

在这里，遇到了治学严谨、待人宽厚的导师。我的老师经常和大家分享学术经历，鼓励大家积极参与各项科研活动，帮大家联系师兄分享论文写作经验，也会笑谈调研过程中的趣事，重要节日也会邀请我们这群外地小孩去家中做客，更会在科研过程中，关注大家的心理健康，时常告诉大家不要急，不要有压力，学习太累跑跑步也蛮好的嘛。非常幸运的我遇到的就是这样一位治学严谨，师德宽厚，善良可爱的老师，从老师身上学习到的不只是单纯的理论知识，更有乐观豁达的心态。

在这里，遇到了一群可可爱爱的同门师兄师姐师弟师妹们。同师兄师姐一同进入师门，在这个大家庭里，师姐们像是大姐姐一样，会耐心解答我稀奇古怪的各种脑洞问题，更像是小导师，会在学术上给予我多方帮助；师兄们对我的帮助也非常的大；也要感谢帮我交各种毕业材料和师弟和师妹。师门中的每个人都帮助过我，不论是学习或是生活，大大小小、林林总总的事情不胜其数。在这里，再次向大家表示感谢！

这一段求学路，离不开父母和家人的鼎力支持。求学期间，父母给我提供坚定的后勤保障，也给予了我巨大的精神支撑。每次我受到打击时，妈妈总会说一次失败很正常，下次肯定没问题的，做你想做的就可以。每次回家对我而言就像充电一样，离开时电量满格，外地求学日子里和妈妈的聊天就像是给蓄电池充电，支撑我不断往前走。还有我不善言辞的爸爸和哥哥，他们永远在背后默默地支持着我。

在这段读研时光里，还遇到了超级超级超级好的室友们，技能多多、热心肠的璇，活力满满、拍照技术一流的畅畅、漂亮聪明、生活技能满点的鲁渣渣。有

她们的陪伴，读研生活一点也不枯燥，畅畅能找到好多好多美食，璇能带着我从兰州奇奇怪怪的商场布局走出来，鲁渣渣会满足我好多稀奇古怪的要求。还有我在外地工作的朋友们，会时常陪我聊天，分享他们职场和学习中的小故事。

遇良师，得益友，又有父母兄长爱护，是我拿到最好的人生剧本。至此，我的求学季电影即将落幕，感谢诸位出现在我的人生电影中，期待工作季和生活季的再次相会！

最后，祝愿大家前程似锦，祝愿老师合家安康，工作顺利，祝愿母校教育蒸蒸日上！