

分类号 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_  
编号 10741



# 硕士学位论文

论文题目 黄河流域甘肃段水贫困测度与影响因素研究

研究生姓名: 孙雪梅

指导教师姓名、职称: 张永凯 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: 资源利用与区域发展

提交日期: 2022年5月30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：孙雪梅 签字日期：2022年5月30日

导师签名：张永凯 签字日期：2022.5.30

## 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：孙雪梅 签字日期：2022年5月30日

导师签名：张永凯 签字日期：2022.5.30

# **Research on Water Poverty Measurement and Influencing Factors in the Gansu Section of the Yellow River Basin**

**Candidate :Sun Xuemei**

**Supervisor:Zhang Yongkai**

## 摘要

黄河流域水资源严重短缺,水资源贫困程度直接关系到其生态环境保护和经济社会高质量发展。甘肃地处黄河上游,是重要的水源涵养区与生态保护区,黄河流域甘肃段的水资源状况评估是黄河流域生态安全研究领域的重要组成部分,深入研究和解决水贫困问题,对推进生态文明建设发挥着重要作用。因此,为全面评估黄河流域甘肃段的水资源状况,并对研究区域内社会经济发展提供较为安全的水资源环境,有必要建立一个科学合理的水资源评估体系。

本文选取黄河流域甘肃段作为研究区域,综合考量水贫困影响因素,结合当地社会、经济和生态环境特征,建立“资源—设施—能力—使用—环境”评价体系框架,选取 26 个具有代表性的指标构建黄河流域甘肃段水贫困测度指标体系,并通过熵值法赋予指标权重,分析其水贫困水平。研究表明:(1)时间序列上,2010-2020 年黄河流域甘肃段水贫困指数在 0.424-0.472 之间波动,由 2010 年的 0.447 波动上升至 2020 年的 0.472,上升了 5.593%,年均上升 0.508%,水贫困程度整体上呈现出下降的趋势。其中,兰州、白银、天水、平凉、庆阳的 WPI 值处于较高水平,表明其水贫困程度较弱;定西、临夏、甘南 WPI 值处于较低水平,表明其水贫困程度较强。(2)空间分布上,黄河流域甘肃段 8 市(州)在研究期内水贫困指数都有较好的发展趋势,但各市(州)之间存在着明显差异。其高值区多位于东北部,其次是西南部,水贫困指数的低值区位于中部。(3)在准则层影响因素分析中,按照障碍度从大到小的顺序原则排列,发现水资源状况、使用状况两个系统的障碍度最大。从指标层障碍度看,影响黄河流域甘肃段水贫困状况的影响因素主要集中在资源、能力和环境子系统,主要为地表水源供水量、万元 GDP 用水量、旱水灾成灾面积占比、建成区绿化覆盖率,均对水贫困程度产生较大影响。

**关键词:** 黄河流域 甘肃段 水贫困指数 影响因素

## Abstract

There is a serious shortage of water resources in the Yellow River Basin, and the degree of water poverty is directly related to its ecological environment protection and high-quality economic development. Gansu is located in the upper reaches of the Yellow River and is an important water conservation area and ecological protection area. The assessment of water resources in the Gansu section of the Yellow River Basin is an important part of the field of ecological security research in the Yellow River Basin. Construction plays an important role. Therefore, it is necessary to establish a scientific and reasonable water resource assessment system in order to comprehensively assess the water resources status of the Gansu section of the Yellow River Basin and provide a relatively safe water resource environment for the social and economic development of the study area..

This paper selects the Gansu section of the Yellow River Basin as the research area, comprehensively considers the influencing factors of water poverty, and combines the characteristics of local society, economy and ecological environment, and establishes the evaluation system framework of "resources-facilities-capacity-use-environment", and selects 26 representative evaluation systems. The index constructs a water poverty measurement index system in the Gansu section of the Yellow River

Basin, and assigns weights to the indicators through the entropy method to analyze its water poverty level. The research results show as followed. (i) In terms of time series, the water poverty index in the Gansu section of the Yellow River Basin fluctuated between 0.424 and 0.472 from 2010 to 2020, rising from 0.447 in 2010 to 0.472 in 2020, an increase of 5.593%, with an average annual increase of 0.508%. Overall, there is a downward trend. Among them, the WPI values of Lanzhou, Baiyin, Tianshui, Pingliang, and Qingyang are at high levels, indicating that their water poverty levels are relatively weak; Dingxi, Linxia, and Gannan have low WPI values, indicating that their water poverty levels are relatively strong. (ii) In terms of spatial distribution, the water poverty index of 8 cities (prefectures) in the Gansu section of the Yellow River Basin has a good development trend during the study period, but there are obvious differences among the cities (prefectures). Most of its high-value areas are located in the northeast, followed by the southwest, and the low-value areas of the water poverty index are located in the middle. (iii) In the analysis of influencing factors at the criterion level, according to the principle of order of obstacle degree from large to small, it is found that the two systems of water resources status and use status have the largest obstacle degree. From the perspective of the obstacle degree of the index layer, the influencing factors affecting the water poverty in the Gansu section of the Yellow River Basin are mainly concentrated in the

resources, capacity and environmental subsystems, mainly including surface water supply, water consumption per 10,000 yuan of GDP, the proportion of drought and flood disaster areas, The green coverage rate of built-up areas has a great impact on the degree of water poverty.

**Keywords:** Yellow River Basin; Gansu Section; Water Poverty Index; Influencing Factors

# 目 录

<b>1 绪 论</b> .....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 研究内容、方法及路线.....	3
1.2.1 研究内容.....	3
1.2.2 研究方法.....	4
1.2.3 技术路线.....	4
1.3 本文的创新点与不足之处.....	6
1.3.1 可能的创新点.....	6
1.3.2 不足之处.....	6
<b>2 文献综述</b> .....	7
2.1 水贫困研究进展.....	7
2.1.1 水贫困内涵.....	7
2.1.2 水贫困指数研究.....	7
2.1.3 水贫困空间尺度研究.....	8
2.1.4 水贫困相关影响因素.....	9
2.2 黄河流域水资源短缺研究进展.....	10
2.3 文献述评.....	11
<b>3 研究区概况</b> .....	13
3.1 黄河流域概况.....	13
3.1.1 自然地理.....	13
3.1.2 水资源现状.....	14
3.2 黄河流域甘肃段概况.....	14
3.2.1 地理区位及社会经济发展现状.....	14
3.2.2 水资源概况.....	16



<b>4 黄河流域甘肃段水贫困测度方法与指标体系构建</b> .....	18
4.1 测度指标选取.....	18
4.1.1 水资源.....	18
4.1.2 供水设施.....	18
4.1.3 利用能力.....	19
4.1.4 资源使用.....	19
4.1.5 环境状况.....	19
4.2 数据来源.....	21
4.3 权重确定.....	21
4.4 水贫困指数计算方法.....	24
<b>5 黄河流域甘肃段水贫困测度</b> .....	25
5.1 黄河流域甘肃段水贫困指数时间变化.....	25
5.1.1 兰州市.....	27
5.1.2 白银市.....	27
5.1.3 天水市.....	28
5.1.4 平凉市.....	29
5.1.5 庆阳市.....	30
5.1.6 定西市.....	30
5.1.7 临夏回族自治州.....	31
5.1.8 甘南藏族自治州.....	32
5.2 黄河流域甘肃段水贫困指数空间变化.....	32
5.2.1 资源子系统.....	33
5.2.2 设施子系统.....	34
5.2.3 能力子系统.....	35
5.2.4 使用子系统.....	36
5.2.5 环境子系统.....	37
<b>6 黄河流域甘肃段水贫困的影响因素分析</b> .....	39
6.1 障碍度模型.....	39

6.2 基于障碍度模型黄河流域甘肃段水贫困影响因素分析.....	40
6.2.1 准则层影响因素分析.....	40
6.2.2 指标层影响因素分析.....	41
<b>7 结论与启示.....</b>	<b>44</b>
7.1 主要结论.....	44
7.2 相关启示.....	45
<b>参考文献.....</b>	<b>48</b>
<b>硕士期间发表的论文及参与的课题.....</b>	<b>54</b>
<b>后 记.....</b>	<b>55</b>

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景和意义

### 1.1.1 研究背景

水是生命之源，是人类生存和发展的基础支撑，也是一种重要的生态环境要素。实际上，地球表面上蕴藏的水量也是十分极其的丰富的，但是绝大部分人类都无法直接进行使用。其中，可供人类直接使用的淡水仅占全球总水量的 2.4%，而这 2.4% 的淡水中又有 87% 以冰川、冰帽的形式存在于南北极和高山地区<sup>[1]</sup>。因此，水资源短缺是目前世界水资源发展中存在的主要问题。而随着社会经济的发展、人类生活水平的提高以及需求层次的不断上升，社会经济、生产生活等各方面的用水量均有不同程度的增加，在水资源分布较少而人口和经济活动又相对集中的地区必然要发生短缺现象。因此，与水资源相关的一系列问题也逐渐成为制约经济社会可持续发展的主要瓶颈<sup>[2]</sup>，水资源短缺问题开始引起人们的关注。正是由于水资源短缺对水资源可持续利用造成了较大的挑战，对水资源贫困程度的研究就显得尤为重要<sup>[3]</sup>。用水结构不完善、水质恶化、工农业生产和人类生活挤占生态用水等均会引发水资源贫困，水贫困被称为继经济贫困之后的第二大贫困问题<sup>[4]</sup>。水贫困理论将水资源的开发、利用和管理以及人们使用水资源的社会经济能力有机地结合起来，能够对水资源短缺问题进行更加全面的分析，有助于对系统的水资源管理提供理论依据<sup>[5]</sup>。

我国是联合国所列 13 个贫水国之一。据统计，2020 年，我国水资源总量为 31605.2 亿  $m^3$ ，在世界排名第六，人口总数为 14.12 亿，约占全球 18.9%，而人均水资源量仅为 2239.8 $m^3$ <sup>[6]</sup>，略高于中度缺水线，因此我国是缺水型国家。为缓解水资源紧张问题，我国多措并举，以期实现水资源保护和有效利用。而我国水资源在目前缺水环境下仍存在许多其他问题，水资源污染严重、供需矛盾突出、地域分布不均、南北分布差异大，部分地区缺水严重，与社会经济发展不相适应，这直接制约着区域经济可持续发展。

黄河作为中华民族的母亲河，水资源的利用和保护成为黄河流域社会经济发

展的重大关切。从 20 世纪 70 年代起，黄河下游开始断流，90 年代以来，断流日期越来越提前，断流时间越来越长，断流河段越来越向上延伸。从 1999 年开始，加强了水资源管理，发挥了小浪底水利枢纽调蓄作用，断流情况好转<sup>[7]</sup>。因此，黄河流域的水资源短缺问题较为严重。黄河流域从西到东依次流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东九省（区），同时是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道，拥有三江源、祁连山等多个国家公园和国家重点生态功能区，是我国重要的生态屏障。甘肃作为黄河的重要源头，其甘南草原湿地素有黄河“蓄水池”和“中华塔桥”之称、祁连山也被称为河西走廊的“母亲河”，是构成我国生态屏障的重要组成部分。当前，甘肃生态环境脆弱，水土流失严重、地下水位下降、草场退化、土地沙漠化等均严重威胁着其生态安全，使甘肃逐渐成为我国生态最为脆弱的地区之一，对国家坚持的绿色发展道路提出了不少挑战，而水资源短缺便是威胁该区域生态安全的主要原因。因此，基于黄河流域甘肃段水资源现状，准确把握水资源在社会经济发展与生态环境保护之间关系，形成较为安全的水资源环境符合现实需要。

### 1.1.2 研究意义

水资源短缺是黄河流域经济社会可持续发展的主要“瓶颈”，生态环境保护是黄河流域当前面临的重大难题。甘肃地处黄河上游，黄河流域甘肃段包括黄河干流（包括支流庄浪河、大夏河、祖厉河及直接入干流的小支流）、洮河、湟水、渭河、泾河、北洛河等六个水系<sup>[8]</sup>，自西向东分别流经甘南、临夏、兰州、定西、白银、天水、平凉、庆阳 8 市（州）。通过测算黄河流域甘肃段各市（州）的水贫困指数，不仅能了解当地的水贫困情况，还能够系统全面地反映水资源开发利用中所涉及的各方面。这对黄河流域甘肃段水资源的综合利用、优化配置、有效管理都具有重要的理论和现实意义。

（1）理论意义。甘肃作为黄河流域的重要源区，水资源是影响该地区生态环境保护和经济社会发展的主要因素。从水贫困理论角度出发，以水资源、供水设施、利用能力、资源使用、生态环境五个系统为基础，揭示了影响黄河流域甘肃段水资源贫困的影响因素，从而为黄河流域甘肃段水资源的合理开发利用与水环境的循环可持续发展提供扎实的理论支撑。

(2) 现实意义。黄河流域甘肃段作为我国重要的生态保护区，着重研究其水资源贫困水平的动态变化过程，挖掘影响黄河流域甘肃段水贫困水平的关键影响因素，对于指导该地区水资源的合理利用，维护区域生态安全和促进水资源可持续利用具有积极意义；针对黄河流域甘肃段水贫困问题提出有效地改善措施，对甘肃乃至黄河流域的生态文明建设均具有现实意义。

## 1.2 研究内容、方法及路线

### 1.2.1 研究内容

本文通过收集整理相关文献、梳理了水贫困理论与黄河流域水资源相关研究，通过搜集兰州市、白银市、天水市、平凉市、庆阳市、定西市、临夏回族自治州、甘南藏族自治州相关数据，来分析 2010-2020 年黄河流域甘肃段 8 市（州）的水贫困水平与影响因素。首先分析与描述我国水贫困与黄河流域水资源现状，测算黄河流域甘肃段水贫困指数，并分析其在时间与空间上的变化。其次通过建立障碍度模型对研究区的水贫困问题进行病理性诊断，并深入分析影响其 8 市（州）水贫困的主要影响因素。最后根据上述分析得出相关结论和启示。

研究内容主要分为以下七个方面：绪论、文献综述、研究区概况、黄河流域甘肃段水贫困测度方法与指标体系构建、黄河流域甘肃段水贫困测度、黄河流域甘肃段水贫困的影响因素分析、结论与启示。

第一部分是绪论。首先综合分析了黄河流域甘肃段水资源的背景，在其背景下，讨论了其水贫困研究的理论意义与现实意义；然后根据文章的研究方法与研究内容绘制总体的技术路线图；最后经过文章的整体梳理，提出文章中可能的创新点与不足。

第二部分是文献综述。首先梳理了国内外学者关于水贫困的理论、含义、研究尺度三个方面的相关文献，其次整理了黄河流域现有的水资源短缺相关文献，最后进行总结分析和述评。

第三部分是研究区概况。一方面梳理了黄河流域整体自然地理与水资源概况，另一方面分析了黄河流域甘肃段的地理区位与 8 市（州）社会经济发展现状、水资源现状。

第四部分是黄河流域甘肃段水贫困测度方法与指标体系构建。运用 WPI 模型从资源、设施、能力、使用和环境五个子系统、26 个指标构建黄河流域甘肃段水贫困测度指标体系，并对熵值法与 WPI 模型进行介绍，并介绍数据来源并列出各指标权重测算结果。

第五部分是黄河流域甘肃段水贫困测度，依据第四部分所列步骤得出黄河流域甘肃段水贫困指数计算结果，列出排名，并对其水贫困结果对其进行综合测度，分析时空变化。

第六部分是黄河流域甘肃段水贫困的影响因素分析。首先从因子贡献度、指标偏离度和障碍度三个层面介绍障碍度模型，然后根据所列公式计算准则层和指标层主要影响因素，并对其结果进行分析与评价。

第七部分是结论与启示。本文在理论基础和实证结果的基础上，得出研究结论，同时结合目前我国黄河流域甘肃段水资源存在的问题以及面临的机遇和挑战，提出如何积极应对水资源短缺，缓解水贫困问题。

## 1.2.2 研究方法

(1) 文献分析法。在研究展开前，大量阅读与水资源、黄河流域相关的资料，先后梳理了国内外学者关于水贫困的理论、含义、研究尺度三个方面的相关文献，整理了与黄河流域水资源短缺有关的文献，并对其总结分析和述评。

(2) 综合评价法。熵值法是一种较为客观的赋权方法，运用此方法计算黄河流域甘肃段水贫困测度指标的权重，根据权重来计算各市州每年的水贫困指数，采用综合评价模型从定量角度刻画黄河流域甘肃段水贫困指数的时间变化态势及空间格局差异特征。

(3) 障碍因子法。通过计算因子贡献度、指标偏离度和障碍度，分别指出影响准则层与指标层的影响因素，并提出有针对性的对策与建议，有效缓解水贫困现状。

## 1.2.3 技术路线

本文首先通过相关文献的梳理和总结，明确了水贫困的理论、含义与研究尺

度，了解了黄河流域的水资源短缺研究进展，确定了黄河流域水资源贫困的测度指标体系和研究方法等内容。通过搜集水资源、供水设施、利用能力、使用效率、环境状况等相关数据，运用相关模型方法，分析黄河流域甘肃段水资源贫困水平随时间变化态势和空间格局差异特征，明确黄河流域甘肃段水贫困现状。采用障碍度评判模型揭示影响黄河流域甘肃段水贫困的影响因素。从而得出黄河流域甘肃段水贫困问题的主要结论与相关启示。研究技术路线如图 1.1 所示：

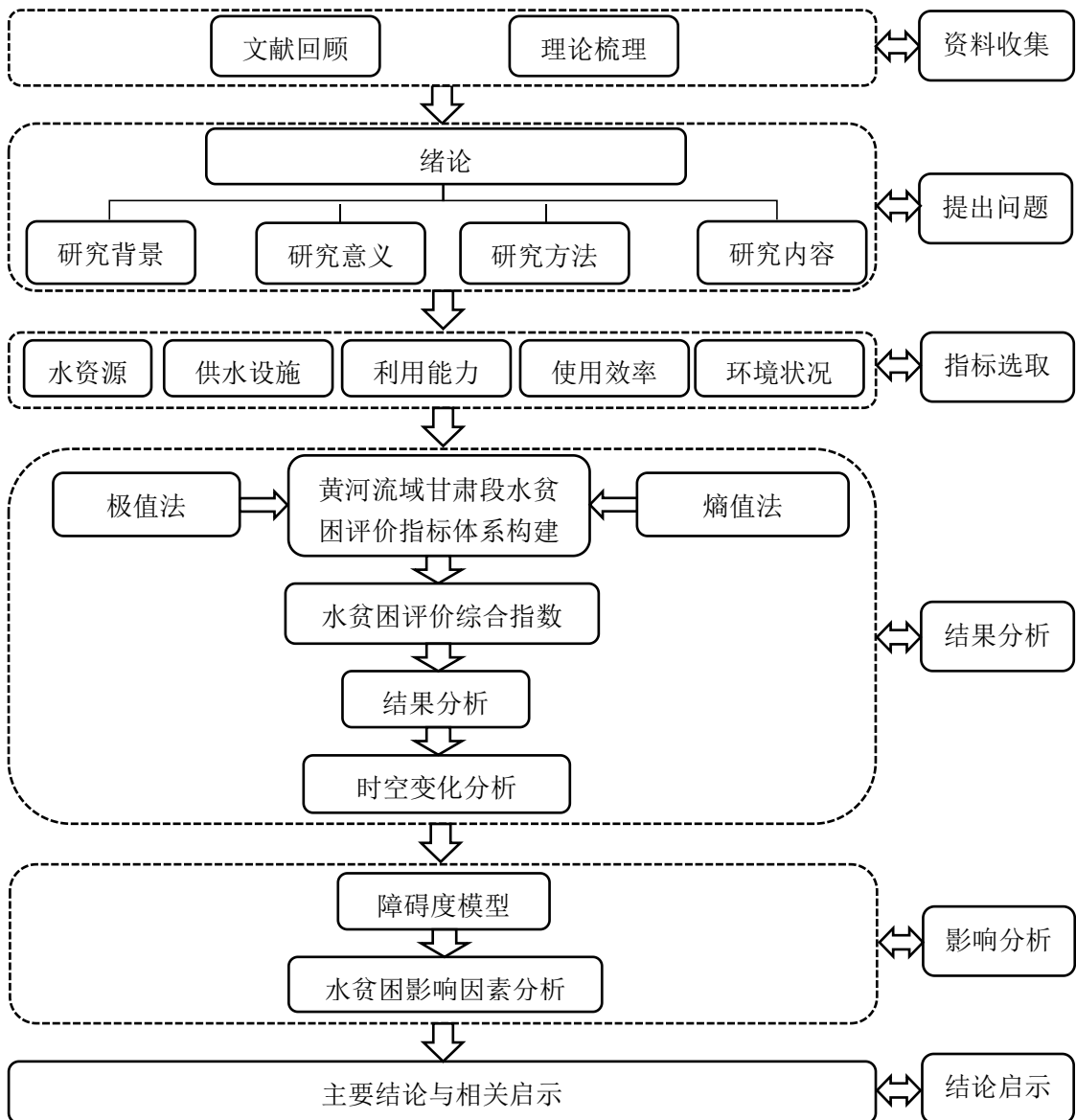


图 1.1 技术路线图

## 1.3 本文的创新点与不足之处

### 1.3.1 可能的创新点

(1) 从研究视角上看, 根据水贫困问题目前已有研究成果, 国外研究较多, 国内研究相对较少, 且国内较偏重于以行政区域划分为视角来研究水贫困。黄河流域是我国重要的生态保护地, 学者们从多个角度研究了其水资源短缺问题, 而鲜有从水贫困角度来对黄河流域水资源短缺问题进行研究。基于此, 本文从水贫困视角切入, 通过构建黄河流域以甘肃段为代表的水贫困测度指标体系, 来测算黄河流域甘肃段 8 市(州) 的水贫困指数, 旨在为黄河流域甘肃段水资源可持续发展提供一定的参考依据。

(2) 从指标体系上看。在构建指标体系时, 总结梳理了以往学者关于水贫困的测度指标, 结合甘肃省发展年鉴的整理情况, 将农林水利事务支出指标放入能力子系统, 用来表示政府层面为使研究区内农林方面水资源更好利用所给予的财政支出, 以此来体现财政对水资源利用能力的影响, 从而进一步丰富了黄河流域甘肃段水贫困指标体系。

### 1.3.2 不足之处

本文的不足之处主要是: (1) 研究周期仅仅采用 10 年左右的数据, 相对较短, 无法对黄河流域甘肃段水贫困长期发展规律进行较为全面的研究, 研究结论还有待长时间验证; (2) 对水贫困的理论研究还有待深入, 尤其在理论与实证相结合的研究方面, 大多借鉴已有学者测度手段, 目前采用的指标体系还存在需要改进和优化的空间。



## 2 文献综述

### 2.1 水贫困研究进展

#### 2.1.1 水贫困内涵

19 世纪 90 年代, Ruth Lister 指出, 在过去 15 年, 以贫困线收入为生的人数急剧上升, 而且许多贫困家庭在支付所需用水方面的难度在逐步增加, 认为水的贫困程度相当于上世纪 70 年代至 80 年代的燃料贫困<sup>[9]</sup>。水的贫困问题虽已提出近 30 年, 但目前尚未形成一个统一的说法, 有关它的定义还一直处于争论之中<sup>[10]</sup>, 直到 2000 年, Salameh 将水贫困定义为某一地区的人口为了家庭生活和食物生产所需水资源的可获得性(丰富程度或者缺乏程度)<sup>[11]</sup>。这一定义虽然考虑了干旱和半干旱地区气候条件的多样性以及用于灌溉的家庭再生水, 丰富了水贫困内涵, 但没有考虑水资源难以利用的社会原因与水资源利用所带来的生态问题。2002 年, Sulliva 将水贫困定义为一个社会没有充足而稳定的水供应的状态<sup>[12]</sup>, Lawrence 认为人们所以会产生水贫困, 是因为两方面的原因: 一是没法得到水, 二是收入贫困<sup>[13]</sup>。这两种说法表明社会经济发展与生活水平是决定水资源可得性的关键因素, 也是影响水贫困与否的重要衡量指标。2003 年, Maggie Black 从八个角度入手, 分别从水资源获取、自然环境威胁、家庭生活水平等多方面对水贫困定义, 是迄今最为全面的定义<sup>[14]</sup>。2004 年, Cullis 和 O.Regan 将水贫困定义为, 获得水的能力的缺乏或者利用水的权利的缺乏<sup>[15]</sup>。该定义从更深层次揭示了水贫困出现不仅受区域内部自身缺水环境的限制, 还涉及到用水者的能力与水资源的管理<sup>[16]</sup>。随着时间的推移, 水贫困研究由单维变多维, 因此, 本文以 Cullis 和 O.Regan 的水贫困定义为基础进行研究。

#### 2.1.2 水贫困指数研究

在水资源短缺评估的早期研究中, Falkenmark 提出用“年人均可再生水量”来评价国家、区域的水资源短缺程度, 其中, 年人均可再生水量 1700m<sup>3</sup>被认为

是水资源短缺的警戒线<sup>[17]</sup>。虽然，他提出的水文胁迫指数（Hydrological Water Stress Index, HWSI）使用方便、分级直观，在当时得到了广泛认可。但其只考虑单个指标属性，忽略了社会经济与生态环境等方面的因素。为弥补单个指标分析的片面性，研究者先后提出多种指数，最终，水贫困指数（Water Poverty Index, WPI）成为水资源短缺领域应用最为广泛的评估工具之一<sup>[18]</sup>。

水资源短缺综合测度方法——水贫困指数（WPI）是由牛津大学的 Sulliva 提出<sup>[12]</sup>，其将可用水资源的物理估计与反映贫困的社会经济变量联系起来，即运用自然科学和社会科学来共同解决水贫困问题，以期能够找到更公平的水资源分配解决方案。随着研究的推进，越来越多的学者投身于水贫困测度方法的研究中来。Ricard Giné Garriga（2010）等为找出一种适合于水贫困评估的方法，综合比较了多种 WPI 构建组合，最终认为加权乘性函数是最合适水贫困综合测度的方法<sup>[19]</sup>。Jemmali（2016）基于改进的多维水贫困指数，将人类经济福利与物理水可获得性联系起来，以指出水资源短缺对非洲人口的影响程度<sup>[20]</sup>。Luke Juran（2016）等利用数据开发了一个情境化的、参与者驱动的水贫困指数，能够衡量多个尺度，更好地解决围绕水的复杂问题<sup>[21]</sup>。Janvier Kini（2017）在可持续发展目标框架下，将穷人和弱势群体纳入，提出了一个由六个部分组成的包容性水贫困指数<sup>[22]</sup>。Breeanna C. Prince（2020）等利用修正的水贫困指数对水贫困进行统计和空间分析<sup>[23]</sup>。

国内学者水贫困理论研究相对较晚，目前仍然处于引进国外理论消化阶段，大多水贫困的研究都是基于 WPI 对不同尺度的水贫困状况的实例研究，以验证水贫困体系为主，尚未建立完整的研究体系<sup>[3]</sup>。2005 年，曹建廷通过实例向国内介绍了水贫困概念、计算公式和具体应用，揭示了水贫困指数在水资源开发利用方面的进步<sup>[24]</sup>。何栋材（2009）系统地梳理了水贫困理论的内涵和发展背景，并详细划分不同尺度上 WPI 各组成要素所采用的变量，为水贫困理论在中国的运用及发展奠定了重要的理论基础<sup>[25]</sup>。

### 2.1.3 水贫困空间尺度研究

目前，国内外关于 WPI 模型应用方面的研究较多，其研究尺度却不尽相同，在此将其分为流域尺度、行政尺度、社区尺度。首先为流域尺度。Marie Wurtz

(2020)等运用水贫困指数对尼泊尔科希河流域的水资源压力水平进行了估算和比较<sup>[26]</sup>。Jay Krishna Thakur (2017) 等针对巴格马蒂河流域上游进行水贫困指数测算, 认为 WPI 可用作综合水资源管理和水资源利用总体规划的有效工具, 以实现可持续发展目标<sup>[27]</sup>。Xia Tang (2016) 等以位于中国西北部的黑河流域为例, 详细介绍了水贫困指数在内陆河流域水资源状况评价中的应用<sup>[28]</sup>。丁继新(2012) 利用 WPI 与主客观赋权法对河西走廊三大内陆河流域的水贫困指数进行了研究<sup>[29]</sup>。曹茜 (2012) 对赣江流域水资源贫困水平进行评估<sup>[30]</sup>。其次为行政尺度。Marie Wurtz(2019)等在墨西哥奇瓦瓦州的社会异质性和半干旱背景下计算 WPI, 增加了 WPI 结果中各种水资源短缺问题的可见性<sup>[31]</sup>。Masoud Jafari Shalamzari (2018)等利用 WPI 来评估伊朗戈勒斯坦省的水资源短缺程度<sup>[32]</sup>。肖洪敏(2018) 通过构建四川省水贫困测度指标体系, 以均衡法赋权, 来测算水贫困指数<sup>[4]</sup>。刘小鹏 (2018) 运用 WPI-Geodetector 测算宁夏五市的水贫困水平并对其地域类型进行划分<sup>[33]</sup>。李欢(2019) 构建了水贫困及城市化发展模型来综合测度湖南省水贫困与城市化发展现状及其二者的耦合协调关系<sup>[34]</sup>。最后为社区尺度。Fernanda Lerner (2016) 等主要研究了巴西朱鲁巴蒂巴国家公园定居点的缺水指数<sup>[35]</sup>。Kallio (2018) 等引入极端季节性变化, 从时间和空间两个维度测度了老挝 8215 个村庄的季节性水贫困指数<sup>[36]</sup>。杨玉蓉 (2013) 等以 WPI 为基本框架, 对湖南澧县梅家港村<sup>[37]</sup>、衡阳县礼梓村<sup>[38]</sup>、3 种地貌类型区 6 个行政村<sup>[39]</sup>的水贫困水平均进行了测度。由此可知, 我国关于水贫困的空间尺度研究当前主要集中在行政单元尺度, 流域尺度与社区尺度研究较少。

#### 2.1.4 水贫困相关影响因素

关于水贫困的影响因素研究, Ladi Tahmineh (2021) 等评估了伊朗的水贫困指数各子系统对人类发展指数的影响, 发现资源系统对伊朗人类发展指数的影响最大<sup>[40]</sup>。Ane Pan (2017) 等利用整体和动态主成分分析来评估中国的水贫困, 认为水环境污染是水贫困的重要驱动因素, 水资源禀赋是影响区域水贫困的第二个重要因素<sup>[41]</sup>。Zoleikhaie Sayyar Leila (2022) 等开发和分析了伊朗西部农业用水贫困指数, 结果表明哈马丹省处于中高水贫困状态, 这种贫困主要是由于资源、能力、获取和使用等因素造成的<sup>[42]</sup>。Saroj Koirala (2020) 等将水贫困指数应用

于尼泊尔科希河流域水资源压力空间分析中,认为在 WPI 得分较低的城市地区应通过水和卫生设施的部门来解决流域的水贫困问题<sup>[43]</sup>。孙冬营(2020)等基于 WPI 模型研究了中国水贫困的时空异质性,地区内部差异是造成我国各省市水贫困差异的主要原因<sup>[44]</sup>。高翔(2019)等运用水贫困指数地理探测器分析了丝绸之路经济带甘肃段水贫困的时空格局与驱动因素,结果显示能力系统对甘肃段水贫困得分的影响最大<sup>[45]</sup>。肖洪敏(2018)等研究了四川省水贫困时空分布格局,发现水资源管理能力的提升和水环境的改善对缓解水贫困起到了关键作用<sup>[4]</sup>。

## 2.2 黄河流域水资源短缺研究进展

黄河流域作为我国重要的农业生产基地和能源化工基地,资源的合理利用与环境的保护是重中之重。水资源作为人类经济社会发展中最迫切需要保护的基础性自然资源之一,不仅是构成生态环境体系的主要要素,也是促进国民经济协调发展和与人类社会可持续发展的战略性资源。而随着我国工、农业生产水平的不断提高以及广大居民对水资源需求的增长,供需矛盾也日益突出。

近年来,许多学者开始关注黄河流域水资源短缺问题,主要从水资源的承载力、资源配置、利用效率等方面入手,旨在解决黄河流域水资源短缺问题。承载力方面,张宁宁(2019)对黄河流域 61 个地级市进行水资源承载力评价,认为 63.9%的地级市处于较低水平<sup>[46]</sup>;左其亭(2020)等运用层次分析法和熵权法组合赋权的 TOPSIS 模型评价了黄河流域九省 2002 年、2007 年、2012 年、2017 年的水资源承载力,发现水资源承载力的提升与生态环境、经济社会相关指标的改善密切相关<sup>[47]</sup>;汪伦焰(2021)为了实现黄河流域生态环境和高质量发展战略,基于 CW-FSPA 测算了九省的水资源承载力并对其障碍因子进行了分析,发现黄河流域各省水资源承载力在 10 年间总体上改善趋势明显<sup>[48]</sup>。

资源配置方面,胡和平(2006)构建了黄河流域水资源配置博弈均衡模型,发现开放式用水势必对流域水资源可持续利用带来严重影响<sup>[49]</sup>;范振林(2020)认为,采用市场化配置手段,推行水权交易制度,是促进水资源节约和保护,引导水资源向高效益、高效率方向转移的重要方式<sup>[50]</sup>。利用效率方面,张慧(2015)对黄河流域九省的农业水资源利用效率进行了评估,结果表明农业水资源利用效率低下主要是受农业基础设施薄弱与灌溉管理机制不完善的影响<sup>[51]</sup>;刘华军

(2020)深入探究了黄河流域用水效率的空间格局及动态演进趋势,发现其呈现“东高西低”的空间分布特征<sup>[52]</sup>;张永凯(2021)运用数据包络分析法和 Malmquist 指数,测算黄河流域 68 个地级行政单元的水资源利用效率,认为技术水平是影响水资源利用效率的关键<sup>[53]</sup>。

黄河流域各地用水紧张,既与黄河流域本身水资源严重短缺有关,也与水源污染、用水效率低下等情况有关,总之,造成当前水资源短缺的因素是多方面的,分析影响因素是解决水资源问题较为常见的一种方法。孙思奥(2020)发现用水强度降低与产业结构升级对黄河流域能起到抑制用水量增长的作用<sup>[54]</sup>。严婷婷(2020)在分析了近 10 年来黄河流域及沿黄九省(区)社会经济发展状况后,认为经济规模、生产用水效率、产业结构三个因素对用水总量的驱动影响较大<sup>[55]</sup>。高孟非(2020)等的研究表明绿色水资源效率不仅受当地经济发展水平、水资源占用量、水资源利用结构、水资源污染程度、产业集聚程度影响,还会受到邻近地区经济发展水平、水资源污染程度的显著影响<sup>[56]</sup>。崔永正(2021)认为,水资源禀赋和农村劳动力受教育水平对黄河流域农业水资源全要素生产率具有正向影响,而水利设施和农业种植结构对其产生负向影响<sup>[57]</sup>。巩灿娟(2020)研究了黄河中下游沿线城市的水资源利用效率,发现环境规制、技术水平、产业结构优化、经济发展水平能够促进水资源利用效率的提高,而城镇化与农田水利设施建设却阻碍水资源利用效率的改善<sup>[58]</sup>。

此外,还有少数学者从水贫困角度切入来研究黄河流域水资源问题,王淑贺(2021)采用水贫困指数模型测度黄河流域 9 省水贫困程度,并运用 Tobit 模型分析其时空分异特征及影响因素<sup>[59]</sup>。因此,黄河流域水资源短缺现状较为严峻,存在诸多亟待解决的问题。

## 2.3 文献述评

综上所述,水贫困理论能为缓解水资源短缺决策提供有效辅助手段,水贫困指数也已成为不同研究尺度衡量水贫困水平的有效工具。水贫困问题最早由西方学者提出,国内研究还处于起步阶段。但由于水贫困领域的研究仍处于发展和探索时期,现有研究尚存在着一定的不足和缺陷:指标选取具有一定主观性,测度方法过于单一。从目前已有成果来看,黄河流域水资源短缺问题主要从水资源的



承载力、资源配置、利用效率等方面入手，鲜有从水贫困角度来对黄河流域水资源短缺进行研究。基于此，本文在充分考虑实际的背景下，构建了黄河流域以甘肃段为代表的水贫困测度指标体系，测算了黄河流域甘肃段 8 市（州）的水贫困指数，并分析其影响因素，旨在为黄河流域甘肃段水资源日后的开发利用、综合管理提供一定的参考依据。

## 3 研究区概况

### 3.1 黄河流域概况

#### 3.1.1 自然地理

黄河作为中华文明最重要的发源地，全长约 5464km，不仅是中国第二长河，也是世界长河之一。其发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地，自西向东分别流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南及山东 9 个省（自治区），最后在东营垦利的黄河口镇汇入渤海。黄河所经地区地形复杂，上游以山地为主，中游流经黄土高原，下游以平原、丘陵为主，河流呈“几”字形分布，由于流经地区夹带了大量的泥沙，因此也被称为世界上含沙量最多的河流。黄河的泥沙主要来自内蒙古呼和浩特和河南洛阳之间，据 2020 年黄河泥沙公报统计，黄河干流重要控制水文站实测输沙量与多年均值比较，唐乃亥和头道拐站分别偏大 56%和 43%，其余站偏小 24%-75%；重要支流控制水文站实测输沙量与多年均值比较均偏小，偏小 67%-100%。

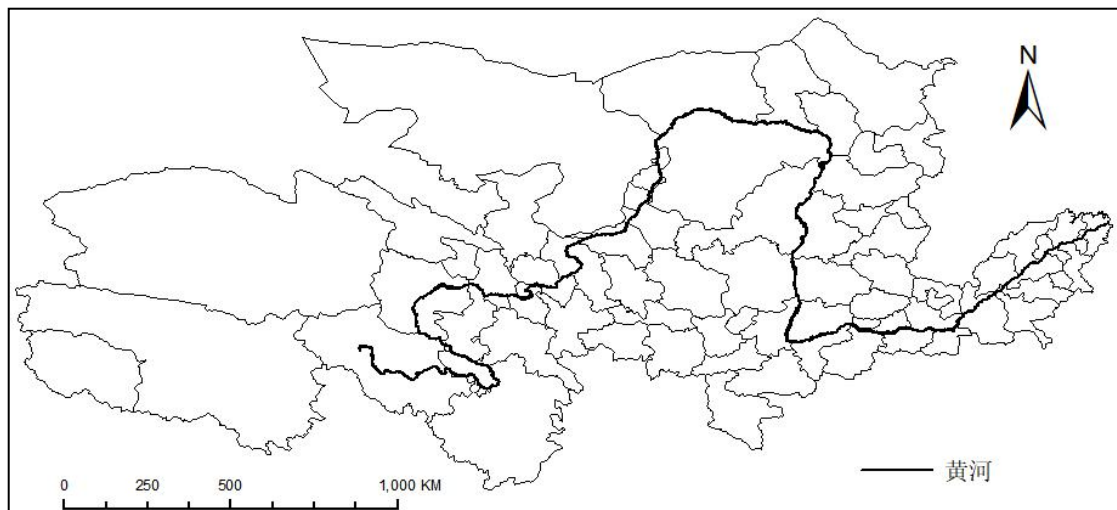


图 3.1 黄河流域示意图

黄河流域（图 3.1）是指黄河水系从源头到入海这条河流所影响的地理生态区域。该流域西起巴颜喀拉山、东临渤海、南至秦岭、北抵阴山，从西到东横跨

青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原四个地貌单元，总面积为 752443km<sup>2</sup>。黄河流域的地势西高东低，西部地区平均海拔在 4000m 以上，主要由巴颜喀拉山、贺兰山等一系列高山组成，常年积雪，水力资源丰富；中部地区海拔在 1000-2000m 之间，以黄土高原地貌为主，水土流失严重；东部平均海拔在 500m 以下，主要为黄河冲积型平原。

### 3.1.2 水资源现状

黄河源区是指位于青海省玛多县多石峡以上的地区，面积为 2.28 万平方公里，位于青海高原，属湖盆宽谷带。盆地四周，山势雄浑，西有雅拉达泽山，东有阿尼玛卿山，北有布尔汗布达山，南以巴颜喀拉山与长江流域为界，其中湖盆西端的约古宗列，即为黄河发源地。根据流域的地理、地质条件及水文情况，黄河干流河道可分为上、中、下游三部分。其中，河源至内蒙古呼和浩特的托克托县为上游，河道长 3471.6 公里，流域面积 42.8 万平方公里，占全河流域面积的 53.8%；自河口镇至河南郑州的荥阳市为中游，中游河段长 1206.4 公里，流域面积 34.4 万平方公里，占全流域面积的 43.3%；从荥阳至山东东营的入海口为下游，河道长 785.6 公里，流域面积仅为 2.3 万平方公里，占全流域面积的 3%<sup>[60]</sup>。其主要支流有白河、黑河、洮河、湟水、洛河、沁河、汾河、渭河、大黑河、窟野河、无定河、金堤河、大汶河、大夏河、祖厉河等。黄河流域原由多个湖盆水系演变而成，现如今只留有河源区的扎陵湖、鄂陵湖和下游的东平湖。

## 3.2 黄河流域甘肃段概况

### 3.2.1 地理区位及社会经济发展现状

黄河流域甘肃段主要位于甘肃省西南部，东临陕宁，南接川渝，西靠青海，位于北纬 33°06'-37°38'，东经 100°44'-108°45'，包括兰州、白银、天水、平凉、庆阳、定西、临夏、甘南 8 个市（州），如图 3.2 所示。

人口方面，近年来，甘肃省年末常住人口呈小幅下降趋势，2020 年为 2501.02 万人，较上年减少 0.31%，其中，城镇人口逐年增加，乡村人口逐年减少，城镇



化率达到 52.23%。

经济发展方面，2020 年，甘肃省全年地区生产总值为 9016.70 亿元，比上年增长 3.42%，三次产业结构比为 15.35：53.45：31.20。其中，第一产业增加值为 1198.14 亿元，增长 13.10%；第二产业增加值为 2852.03 亿元，下降 0.36%；第三产业增加值为 4966.52 亿元，增长 3.54%，第三产业增加值增量最多。按常住人口计算，人均地区生产总值 35995 元，比上年增长 3.71%。

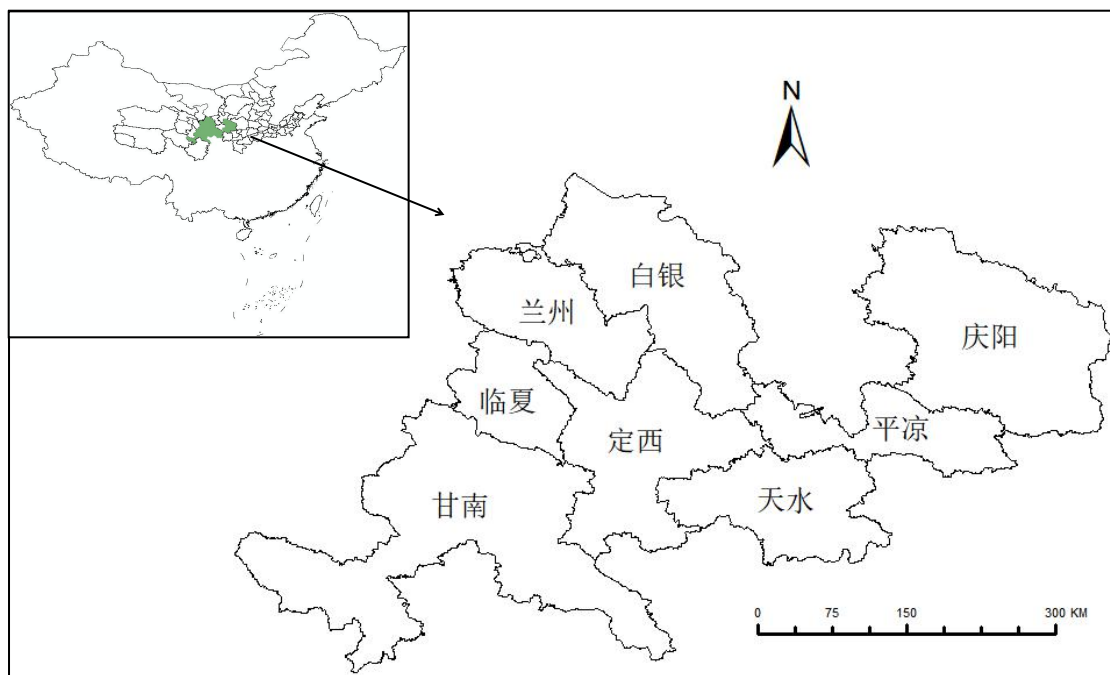


图 3.2 黄河流域甘肃段示意图

表 3.1 2020 年黄河流域甘肃段 8 市（州）社会经济概况

地区	年末常住人口 (万人)	GDP (亿元)	第一产业增加值 (亿元)	第二产业增加值 (亿元)	第三产业增加值 (亿元)	人均 GDP (元)	细颗粒物年平均浓度 (PM <sub>2.5</sub> )	空气质量达到优良天数(天)
兰州	437.18	2886.74	57.43	933.42	1895.90	66680	34	312
白银	150.88	497.27	100.52	170.32	226.42	32700	27	344
天水	298.00	666.90	126.01	161.82	379.06	22251	27	354
平凉	184.49	476.16	109.85	116.70	249.61	25623	22	354
庆阳	217.91	754.73	97.62	356.36	300.75	34593	28	349
定西	252.11	441.36	88.47	70.11	282.78	17430	25	357
临夏	211.24	331.28	53.70	61.29	216.29	15747	28	324
甘南	69.18	219.06	44.05	29.15	145.86	31661	19	342

生态环境方面，甘肃省 2020 年细颗粒物浓度均值为 26 微克/立方米，同比 2019 年持平，14 个市（州）细颗粒物首次全部达到年二级标准；空气质量优良天数比率为 93.7%，同比 2019 年增加 0.6 个百分点。土壤环境总体安全可控，声环境质量保持稳定，生态环境质量无明显变化。黄河流域 8 市（州）具体社会经济概况如表 3.1 所示。（2021 年甘肃发展年鉴，2020 年甘肃省生态环境状况公报）

### 3.2.2 水资源概况

2020 年，甘肃省自产地表水资源量 398.9 亿  $m^3$ ，地下水资源量 158.2 亿  $m^3$ ，去除重复量后水资源约 410.9 亿  $m^3$ ，人均 1162.2  $m^3$ ，分别较上年增加 85 亿  $m^3$ ，411.2 $m^3$ 。甘肃水资源主要划分为黄河、长江、西北诸河 3 个流域一级区，8 个流域二级区，18 个流域三级区，14 个重点流域。其中，黄河流域包含 4 个流域二级区，13 个流域三级区，流域面积为 142663 $km^2$ ，占甘肃面积的 33.5%，占全流域面积的 19.0%。2020 年，黄河流域甘肃段年降水量为 792.21 亿  $m^3$ ，地表水资源量为 172.89 亿  $m^3$ ，地下水资源量为 64.08 亿  $m^3$ ，水资源总量为 178.61 亿  $m^3$ ，产水模数为 12.52 万  $m^3/km^2$ ，基本上远高于境内其他流域一级区。近年来，甘肃水资源使用量逐年减少，2020 年用水总量降至 109.9 亿  $m^3$ ，其中，黄河流域供水能力为 53.8 亿  $m^3$ ，供水总量为 35.4 亿  $m^3$ ，占用水总量的 32.2%。

兰州市域内黄河及其支流湟水主要用于满足城市工农业用水和生活用水。2020 年，兰州市地表水水质总体良好，饮用水水源总取水量为 25493.04 万吨，水质达标率为 100%。黄河干流的什川桥、新城桥、扶和桥、包兰桥与一级支流庄浪河界牌村以及二级支流大通河享堂和先明峡断面均为 II 类水质，且水质状况均为优。白银市由于黄河流域、石羊河流域、黄河一级支流渭河流域均流经该地，所以其地表水源供水量较为充足。黄河流经全市 258 千米且占黄河甘肃段的 58%，流域面积 14710  $km^2$ 。天水市境内涉及黄河流域的渭河，主要位于其北部<sup>[61]</sup>。境内干旱少雨，水资源总量贫乏，降水时空分布不均，水资源利用程度低，农业生态基础脆弱，水土流失严重<sup>[62]</sup>。2020，天水紧盯渭河流域的水污染防治工作，因地制宜、综合施策，积极推进项目治污。全年新改扩建污水管网 46.89 公里，两区、五县的城区污水处理率分别达到 96%和 93.6%。平凉境内河流均属黄河流

域渭河水系的一级支流泾河和葫芦河水系<sup>[63]</sup>。2020年，全市入境水量为6.8亿 $m^3$ ，出境水量为7.7亿 $m^3$ ，径流量11.66亿 $m^3$ ，径流深104.9mm，与上年比较上涨49.4%，多年平均径流量为6.1亿 $m^3$ ，与多年平均比较上涨91.1%。庆阳市总属黄河流域，分属泾河、北洛河、清水河和苦水河4大水系<sup>[64]</sup>。2020年，庆阳市径流量为5.7亿 $m^3$ ，其中入境水量8.9亿 $m^3$ ，出境水量为11.9亿 $m^3$ ，自产水系数为0.05，产水模数为2.4万 $m^3/km^2$ 。定西市水资源贫乏，农耕地多，所需水量大，黄河流域境内集水面积20106.4 $km^2$ ，占全区土地总面积的98.9%，共分洮河、渭河、黄河干流3个水系。临夏属黄河水系，共有黄河干流、洮河、大夏河30多条大小河流流经黄河上游地区，是黄河水补给区的第二大重要来源<sup>[65]</sup>。甘南地区位于黄河的上游源区，在中国西部生态环境系统中处于十分重要的位置，境内星罗棋布的大小湖泊和沼泽草场，构成黄河上游完整的水源体系，是黄河径流主要汇集区，也是黄河上游重要水源涵养区，具有特殊的生态功能<sup>[66]</sup>。而且甘南降水充沛，仅2020年降水量多达275.0亿 $m^3$ ，占甘肃省降水量的18.0%。

## 4 黄河流域甘肃段水贫困测度方法与指标体系构建

### 4.1 测度指标选取

影响水资源环境的因素众多,为避免指标杂乱、重复,在结合黄河流域甘肃段实际情况的基础上,本文以 WPI 为框架,构建与水相关的资源、设施、能力、使用及环境 5 个子系统,经过分类整理,共选取适用该研究区域 26 个指标,组成黄河流域甘肃段水贫困测度指标体系,以对其 8 个地级市(州)的水贫困状况进行评价和分析,如表 4.1 所示。

#### 4.1.1 水资源

水资源(Resources)主要是指研究区内地表和地下水资源的供水量。水资源有可靠性和可变性之分。水资源总量(R2)、地表水源供水量(R3)、地下水源供水量(R3)和其他水源供水量(R4)四个指标受外界影响较小,具有一定可靠性。其中,地表水源供水量、地下水源供水量是衡量研究区水资源是否丰富的重要指标,地表水和地下水供给量越大,代表水资源越丰富,水贫困程度越小,均是正向指标。年降水量变化率(R1)受气候、地形、环境等多方面影响,差异性较大,具有可变性,是衡量研究区水资源的重要动态指标,在此以降水量变化率大小来表示水资源的稳定性,变化率越小,水资源越稳定,水贫困程度越弱,为负向指标。

#### 4.1.2 供水设施

供水设施(Access)是指研究区内与取水、用水、排水等相关的设施状况。设施越健全,人们的水资源使用越安全、有效,水贫困程度越低,该子系统指标均为正向型。其中,取水方面由城市供水普及率(A1)、供水管道长度(A2)表征,分别表示广大居民与清洁水源的接近程度与水源的普及程度;用水方面由有效灌溉面积(A4)表示,表示研究区内农业用水的利用情况;排水方面选取排污口(A3)和废水治理设施数(A5),分别表征废水排放的效率高低与废

水的可回收利用能力。供水设施的健全,能够让人们在水资源的使用上实现安全、高效、便捷,越有利于水贫困的改善,所以设施部分 5 个评级指标均是正向指标。

### 4.1.3 利用能力

利用能力 (Capacity) 是指研究区内对水资源的管理能力,反映了社会经济状况对水行业的影响。主要从居民生活、经济、财政等方面来体现人们对水资源的开发和利用。居民生活方面,选取城镇人均可支配收入 (C3)、农村人均可支配收入 (C4)、城镇居民恩格尔系数 (C5) 三个指标,用来反映研究区内个人经济能力和生活质量的大体水平,均为正向指标;经济方面,以万元 GDP 用水量 (C1) 表征,表示经济发展对水资源的使用效率,使用效率越低,使用量越大,相反,使用效率越高,使用量越小,因此,为负向指标;财政方面,选取农林水利事务支出 (C6) 指标,农林水利事务的支出代表着政府层面对研究区内农业方面水资源给予的财政支出,支出越多,代表政府重视程度越高,为正向指标。

### 4.1.4 资源使用

资源使用 (Use) 是指研究区域内各部门对水资源的使用情况。水资源作为是人类赖以生存和社会生产不可缺少而又无法替代的物质资源,应在保证生活质量和生产达标的基础上,尽可能地减少水资源的使用量,因此资源使用系统的测度指标均为负向。水资源的资源使用主要涉及工业、农业、生活、生态、用水人口等方面,具体通过农业灌溉用水量 (U1)、林牧渔畜用水量 (U2)、工业用水量 (U3)、生活用水量 (U4)、生态用水 (U5) 和用水人口 (U6) 指标来反映黄河流域甘肃段水资源使用情况。

### 4.1.5 环境状况

环境状况 (Environment) 是指研究区域中与水资源有关的环境情况。本文主要从潜在压力、污染排放和植被覆盖三个方面着手,以此来反映了水资源给环境带来的影响。潜在压力层面,选取旱水灾成灾面积占比 (E1) 表征,占比越高,

环境压力越大，水贫困程度越深，为负向指标；污染排放层面，选取废水排放量（E2）、化学需氧量 COD 排放量（E4）和氨氮排放量（E5）三个指标表示，反映了水中物质污染的程度，排放越多，水资源受污染程度越强，水贫困问题越严重，均为负向指标；城市植被环境层面，由建成区绿地覆盖率（E3）表示，其是指建成区的绿化覆盖面积占总体的百分比，能够衡量研究区域内园林绿化发展水平，通常绿地覆盖率越高，水资源越丰富，水贫困程度越弱，为正向指标。

表 4.1 黄河流域甘肃段水贫困指标体系

目标层	准则层	指标层	单位	指标性质
黄河流域甘肃段水贫困评价指标体系	资源（R）	降水量变化率（R1）	%	负向
		水资源总量（R2）	亿 m <sup>3</sup>	正向
		地表水源供水量（R3）	亿 m <sup>3</sup>	正向
		地下水源供水量（R4）	亿 m <sup>3</sup>	正向
		其他水源供水量（R5）	亿 m <sup>3</sup>	正向
	设施（A）	城市供水普及率（A1）	%	正向
		供水管道长度（A2）	亿 m <sup>3</sup>	正向
		排污口（A3）	个	正向
		有效灌溉面积（A4）	万亩	正向
		废水治理设施数（A5）	套	正向
	能力（C）	万元 GDP 用水量（C1）	m <sup>3</sup> /万元	负向
		城镇人均可支配收入（C3）	元	正向
		农村人均可支配收入（C4）	元	正向
		城镇居民恩格尔系数（C5）	%	负向
		农林水利事务支出（C6）	万元	正向
	使用（U）	农田灌溉用水（U1）	亿 m <sup>3</sup>	负向
		林牧渔畜用水（U2）	亿 m <sup>3</sup>	负向
		工业用水（U3）	亿 m <sup>3</sup>	负向
		生活用水（U4）	亿 m <sup>3</sup>	负向
		生态用水（U5）	亿 m <sup>3</sup>	负向
用水人口（U6）		万人	负向	
环境（E）	旱水灾成灾面积占比（E1）	%	负向	
	废水排放量（E2）	万吨	负向	
	建成区绿化覆盖率（E3）	%	正向	
	化学需氧量 COD 排放量（E4）	万吨	负向	
	氨氮排放量（E5）	万吨	负向	

## 4.2 数据来源

本文建立的黄河流域甘肃段水贫困测度指标体系共涉及 5 个子系统 26 个指标，指标数据均来源于《甘肃发展年鉴》（2011-2021 年），《甘肃水资源公报》（2010-2020 年）、《中国城市统计年鉴》（2011-2020 年）等，鉴于数据可得性，部分缺失数据通过间接测算和取中值的方式加以处理。

## 4.3 权重确定

本文选取应用较为普遍的极差标准化法处理指标数据。首先，需划分 26 个指标的正负向。其中，正向指标是指当数值越大时，水贫困的程度越弱，越有利于水环境；负向指标是指当数值越大时，水贫困的程度越强，越不利于水环境。而后在此基础上，运用极差法对数据进行标准化处理。在本文中，正向指标包括地下水源供水量、地表水源供水量、水资源总量、其他水源供水量、城市用水普及率、供水管道长度、排污口、有效灌溉面积、废水治理设施数、城镇人均可支配收入、农村人均可支配收入、农林水利事务支出和建成区绿化覆盖率；负向指标包括降水量变化率、万元 GDP 用水量、城镇居民恩格尔系数、农田灌溉用水、林牧渔畜用水、工业用水、生活用水、生态用水、用水人口、旱水灾成灾面积占比、废水排放量、氨氮排放量和化学需氧量 COD 排放量。具体计算公式如下：

$$\text{正向指标: } x'_{iq} = \frac{x_{iq} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } x'_{iq} = \frac{x_{\max} - x_{iq}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中： $x'_{iq}$  为标准化后第  $i$  个指标的第  $q$  个指标值； $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为同一指标下的最大值和最小值。

权重通常用来反映指标对评价事物的影响程度，其数值大小能够表明该项指标对于评价事物的贡献度，数值越大，则贡献度越大，影响程度越深。主观赋权法和客观赋权法是当前测度权重的两类主要计算方法。主观赋权法通常是指将专家学者对评价事物的主观判断转化为主观权重的方式，随机性较强，差异性较大，无法确定评价结果的客观性，较为常见的有层次分析法、德尔斐法；客观赋权法

是指运用系统性的计算方法对大量指标数据进行整体测算，与主观赋权法相比，更注重客观的指标数据，科学性较强，较为常用的如熵权法、均方差决策法、主成分分析法。通过比较，本文选用熵值法来确定指标的权重。熵值法在确定权重系数的过程中避免了人为因素的干扰，能够较为客观地反映各指标在综合评价指标体系中的重要性，是一种根据各指标数值的差异程度来确定权重系数的方法<sup>[67]</sup>。2010-2020年黄河流域甘肃段水贫困测度各指标权重如表4.2所示，具体步骤如下：

$$1) \text{ 对判断矩阵进行归一化处理, 公式为: } P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \quad (3)$$

$$2) \text{ 求各指标的信息熵, 公式为: } E_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

$$3) \text{ 确定各指标权重, 公式为: } \omega_i = \frac{1 - E_i}{k - \sum_{i=1}^n E_i} \quad (5)$$

式中， $x_{ij}$ 表示第 $j$ 年的第 $i$ 个指标， $i=1, \dots, n$ ， $n=26$ 。



表 4.2 黄河流域甘肃段水贫困测度各指标权重

指标	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
R1	0.0245	0.0258	0.0404	0.0416	0.0274	0.0346	0.0327	0.0320	0.0302	0.0610	0.0581
R2	0.1349	0.1363	0.1359	0.1045	0.1435	0.1555	0.1674	0.0830	0.1366	0.1265	0.1269
R3	0.0632	0.0603	0.0570	0.0679	0.0615	0.0655	0.0578	0.0750	0.0739	0.0714	0.0650
R4	0.0403	0.0404	0.0381	0.0363	0.0412	0.0372	0.0423	0.0485	0.0489	0.0546	0.0488
R5	0.0917	0.0884	0.0856	0.0761	0.0403	0.0400	0.0306	0.0247	0.0279	0.0210	0.0297
A1	0.0353	0.0411	0.0364	0.0426	0.0396	0.0185	0.0172	0.0191	0.0199	0.0212	0.0334
A2	0.0675	0.0593	0.0500	0.0527	0.0539	0.0554	0.0651	0.1318	0.0726	0.0720	0.0767
A3	0.0344	0.0501	0.0426	0.0415	0.0432	0.0438	0.1210	0.0436	0.0489	0.0515	0.0537
A4	0.0352	0.0320	0.0322	0.0327	0.0342	0.0343	0.0313	0.0350	0.0346	0.0357	0.0369
A5	0.0394	0.0498	0.0525	0.0351	0.0319	0.0314	0.0368	0.0511	0.0389	0.0371	0.0387
C1	0.0367	0.0364	0.0355	0.0287	0.0303	0.0336	0.0273	0.0264	0.0331	0.0222	0.0214
C3	0.0286	0.0280	0.0275	0.0256	0.0272	0.0312	0.0295	0.0333	0.0339	0.0327	0.0341
C4	0.0508	0.0465	0.0464	0.0472	0.0515	0.0511	0.0485	0.0547	0.0573	0.0561	0.0593
C5	0.0206	0.0207	0.0197	0.0264	0.0412	0.0197	0.0190	0.0235	0.0222	0.0208	0.0214
C6	0.0521	0.0315	0.0553	0.0538	0.0407	0.0458	0.0382	0.0350	0.0312	0.0398	0.0356
U1	0.0284	0.0291	0.0282	0.0267	0.0273	0.0475	0.0254	0.0246	0.0310	0.0209	0.0243
U2	0.0237	0.0229	0.0221	0.0307	0.0270	0.0485	0.0246	0.0282	0.0393	0.0248	0.0209
U3	0.0190	0.0185	0.0181	0.0177	0.0185	0.0183	0.0172	0.0192	0.0197	0.0185	0.0227
U4	0.0234	0.0226	0.0216	0.0190	0.0205	0.0205	0.0201	0.0217	0.0219	0.0216	0.0205
U5	0.0189	0.0182	0.0176	0.0180	0.0187	0.0189	0.0177	0.0198	0.0201	0.0218	0.0213
U6	0.0195	0.0188	0.0182	0.0178	0.0185	0.0205	0.0175	0.0195	0.0200	0.0190	0.0198
E1	0.0302	0.0366	0.0237	0.0585	0.0609	0.0220	0.0183	0.0271	0.0245	0.0361	0.0331
E2	0.0192	0.0190	0.0182	0.0176	0.0184	0.0186	0.0173	0.0193	0.0197	0.0189	0.0195
E3	0.0237	0.0240	0.0227	0.0273	0.0284	0.0269	0.0279	0.0352	0.0355	0.0271	0.0333
E4	0.0193	0.0210	0.0305	0.0322	0.0325	0.0379	0.0220	0.0414	0.0320	0.0249	0.0251
E5	0.0195	0.0227	0.0240	0.0218	0.0217	0.0228	0.0273	0.0273	0.0262	0.0428	0.0198

#### 4.4 水贫困指数计算方法

水贫困指数 (WPI) 的建立, 让人们对水资源的可获得性、用水安全和人类福利之间的关系有了更好的理解<sup>[25]</sup>。水贫困测度指标体系由资源 (R)、设施 (A)、能力 (C)、使用 (U) 和环境 (E) 5 个系统组成, 共 26 个指标。以熵值法确定权重为基础, 测算各市 (州) 水贫困指数, 从而了解不同地区在不同社会发展水平下与水资源状况是否匹配的客观情况。WPI 作为定量测度国家或地区间相对缺水程度的一组综合性指标, 数值越低, 表明水贫困的程度越高, 水资源短缺的现象就越严重。其公式如下:

$$WPI_k = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} w_{ik} x_{ik}}{\sum_{i=1}^{n_k} w_{ik}} \quad (6)$$

式中,  $WPI_k$  代表第  $k$  个子系统得分;  $x_{ik}$  代表第  $k$  个子系统中的第  $i$  个指标,  $k$  分别代表资源、设施、能力、使用和环境 5 个子系统;  $n_k$  代表  $k$  子系统的指标

$$WPI = \frac{w_r R + w_a A + w_c C + w_u U + w_e E}{w_r + w_a + w_c + w_u + w_e} \quad (7)$$

式中, WPI 为各市 (州) 水贫困指数总得分,  $w_k$  代表利用熵值法所求得资源、设施、能力、使用和环境子系统的权重。

## 5 黄河流域甘肃段水贫困测度

### 5.1 黄河流域甘肃段水贫困指数时间变化

以表 4.2 所测黄河流域甘肃段水贫困各指标权重为依据，得出 2010-2020 年 8 市（州）水贫困指数 WPI（表 5.2）与其变化趋势图（图 5.1）。

表 5.1 黄河流域甘肃段 8 市（州）水贫困指数

年份	兰州	白银	天水	平凉	庆阳	定西	临夏	甘南	甘肃段
2010	0.533	0.432	0.515	0.443	0.482	0.392	0.322	0.458	0.447
2011	0.499	0.406	0.504	0.458	0.503	0.396	0.287	0.464	0.440
2012	0.444	0.403	0.514	0.471	0.515	0.424	0.269	0.461	0.438
2013	0.493	0.419	0.459	0.491	0.493	0.497	0.305	0.455	0.453
2014	0.466	0.385	0.452	0.503	0.537	0.476	0.321	0.474	0.452
2015	0.489	0.408	0.510	0.379	0.545	0.494	0.351	0.496	0.459
2016	0.476	0.351	0.448	0.554	0.456	0.382	0.300	0.424	0.424
2017	0.605	0.400	0.411	0.497	0.374	0.373	0.342	0.460	0.433
2018	0.577	0.420	0.473	0.542	0.494	0.447	0.348	0.465	0.471
2019	0.570	0.394	0.415	0.472	0.452	0.411	0.433	0.480	0.453
2020	0.583	0.504	0.428	0.502	0.495	0.405	0.419	0.438	0.472

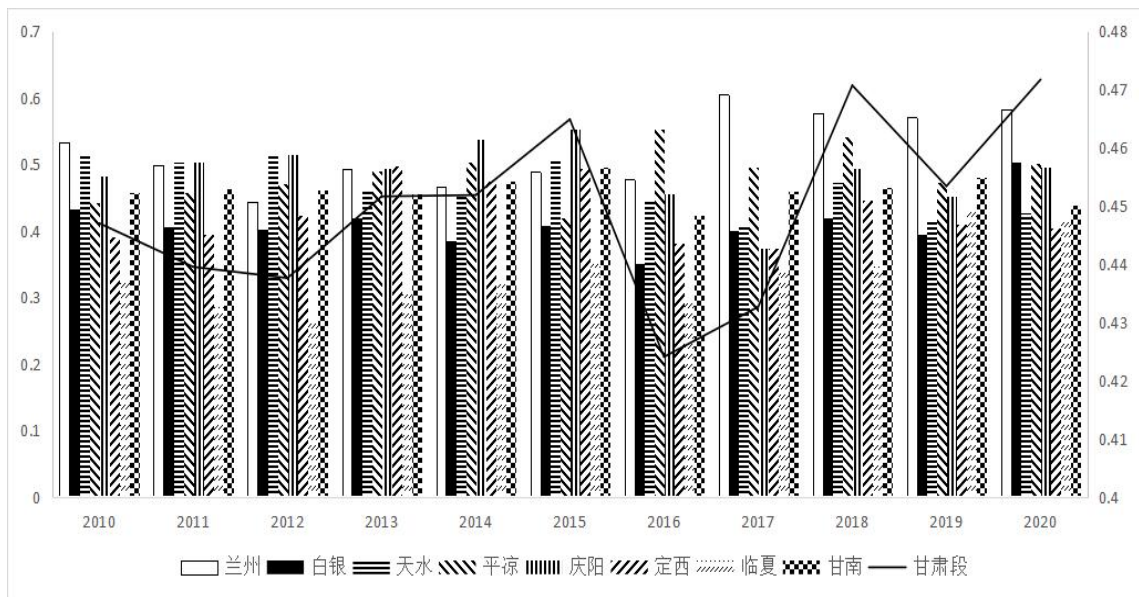


图 5.1 黄河流域甘肃段及各市（州）水贫困指数变化趋势图

水贫困指数是测度国家或地区的相对缺水程度的重要指标,值越大,表明水贫困程度越小。如表 5.1 所示,2010-2020 年黄河流域甘肃段水贫困指数在 0.424-0.472 之间波动,由 2010 年的 0.447 波动上升至 2020 年的 0.472,上升了 5.593%,年均上升 0.508%,水贫困程度整体上呈现出下降的趋势,趋于好转。研究期内,各市(州)的水贫困指数在 0.269-0.605 范围内分布各异,其中,兰州、白银、天水、平凉、庆阳的 WPI 值处于较高水平,表明其水贫困程度较弱;定西、临夏、甘南 WPI 值处于较低水平,表明其水贫困程度较强。通过比较 2010-2020 年各市(州)水贫困指数变化程度,发现兰州、白银、平凉、定西、临夏的水贫困指数上升幅度较大,说明以上市(州)水贫困程度下降趋势明显,对黄河流域甘肃段水贫困“减贫”的贡献较大,天水、庆阳、甘南水贫困指数不升反降,水贫困程度有所上升,说明这些地区水资源系统的发展状况在明显衰退。由此可见,黄河流域甘肃段水贫困状况整体呈现好转。经过比较,发现兰州、白银、平凉、定西、临夏水贫困程度的下降速度也存在较大差异,下降最快的是白银和平凉,下降速度均在 10%以上,下降慢的是庆阳、定西,均在 3%以内。

表 5.2 黄河流域甘肃段 8 市(州)水贫困指数排名

年份	兰州	白银	天水	平凉	庆阳	定西	临夏	甘南
2010	1	6	2	3	5	7	8	4
2011	3	6	1	5	2	7	8	4
2012	5	7	2	3	1	6	8	4
2013	2	7	5	4	3	1	8	6
2014	5	7	6	2	1	3	8	4
2015	5	6	2	7	1	4	8	3
2016	2	7	3	1	4	6	8	5
2017	1	5	4	2	6	7	8	3
2018	1	7	4	2	3	6	8	5
2019	1	8	6	3	4	7	5	2
2020	1	2	6	3	4	8	7	5

基于上文的测度结果,对 2010-2020 年黄河流域甘肃段各市(州)水贫困指数进行均值化处理,进一步得出水贫困的综合排名(表 5.2),根据排名分析水贫困发展趋势。如表 5.2 所示,黄河流域甘肃段 8 市(州)水贫困指数排名年际变化较大。兰州、天水、平凉、庆阳在多数时期水贫困排名较高,表明水资源处

于一种良性发展的状况；临夏在研究期内各个时期的水贫困排名均靠后，仅在七到八之间波动，水贫困程度明显高于其他地区，水资源状况呈恶性发展；定西排名先升后降，波动大，表明水资源发展状况极不稳定；白银、甘南长期处于中等水平。

### 5.1.1 兰州市

2010-2020 年兰州市水贫困指数呈波动式变化（图 5.2），整体由轻微上升趋势，WPI 值由 2010 年的 54.40 上升到 2020 年的 58.26，上升了 7.10%，排名由第一名下降至第五名后重回第一名。水贫困的 5 个子系统对 WPI 值的贡献率排序为：设施>资源>能力>环境>使用。2017 年水贫困指数最高，水贫困程度最弱，主要受设施系统的影响，由于 A2 指标权重提高，且供水管道长度增加，设施系统指数涨幅明显，因此，2017 年兰州水贫困指数为 60.46。从各子系统来看，环境、使用呈明显上升态势，资源、设施先上升后下降，能力呈波动式下降。

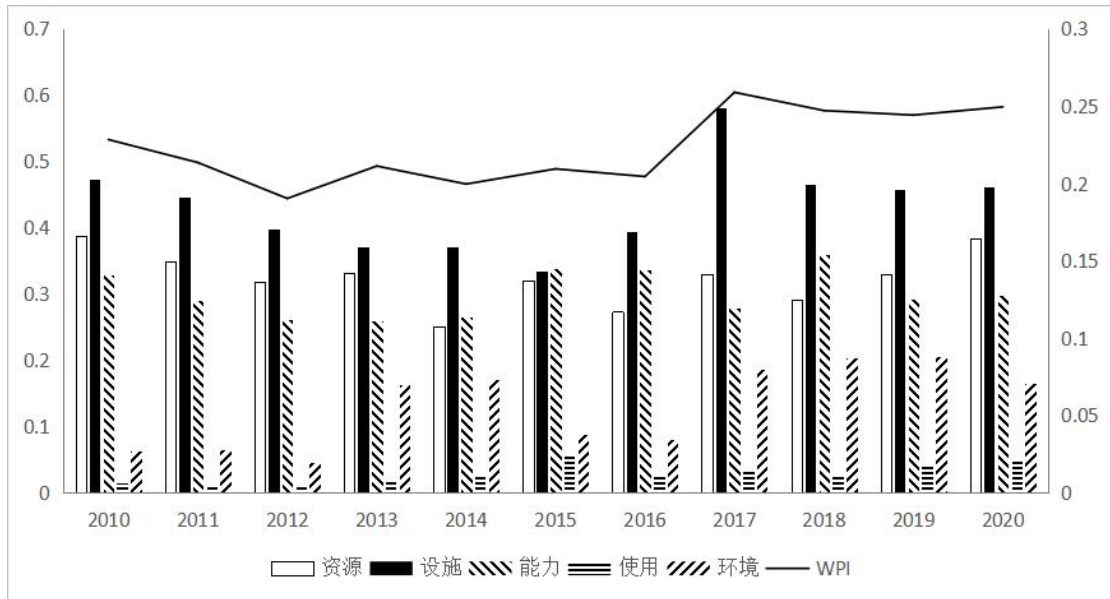


图 5.2 兰州市水贫困指数与各子系统指数

### 5.1.2 白银市

2010-2020 年白银市水贫困指数先下降后上升（图 5.3），WPI 值由 2010 年的 44.57 上升到 2020 年的 50.37，上升了 13.01%，排名提升明显。水贫困的 5

个子系统对 WPI 值的贡献率排序为：设施>资源>环境>使用>能力。2016 年水贫困指数最低，水贫困程度最强，主要受资源、设施、环境系统的影响，其中，废水治理设施数量较其他年份较少且当年旱水灾成灾面积占比较高，拉低其水贫困指数，仅为 35.05。从各子系统来看，资源、环境呈波动式上升，设施、能力、使用均有不同程度下降。

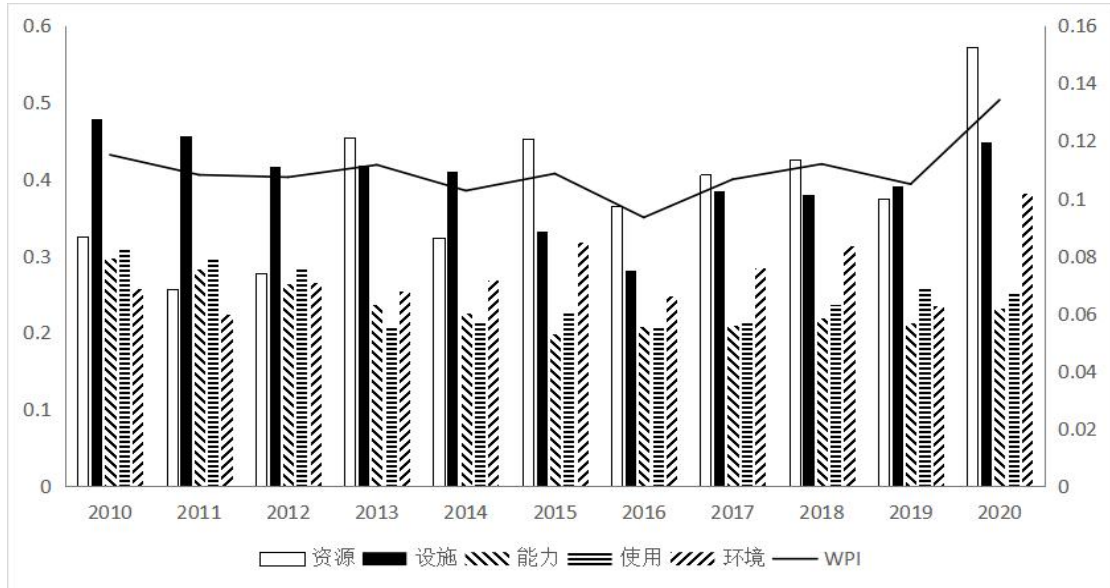


图 5.3 白银市水贫困指数与各子系统指数

### 5.1.3 天水市

2010-2020 年天水市水贫困指数呈波动式下降（图 5.4），WPI 值由 2010 年的 52.13 下降到 2020 年的 42.75，下降了 17.99%，排名由第二名下降至第六名，2017 年水贫困指数最低，仅为 41.11。水贫困的 5 个子系统对 WPI 值的贡献率排序为：资源>使用>能力>环境>设施。从各子系统来看，设施、能力、使用均呈上升态势，资源、环境系统呈下降趋势，因此加强生态保护，使降水量趋于稳定，控制废水等污染物排放，可有效拉动天水水贫困指数的上升，摆脱下降趋势。

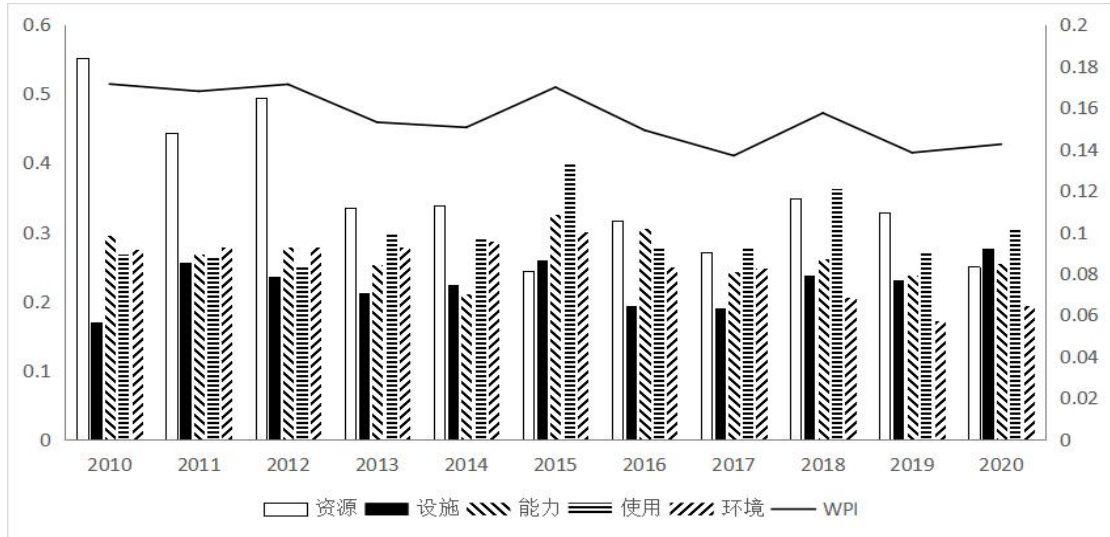


图 5.4 天水市水贫困指数与各子系统指数

### 5.1.4 平凉市

2010-2020 年平凉市水贫困指数波动式上升（图 5.5），WPI 值由 2010 年的 46.54 上升到 2020 年的 50.20 上升了 7.86%，排名波动较小，围绕第三名上下浮动。水贫困的 5 个子系统对 WPI 值的贡献率排序为：设施>使用>环境>资源>能力。受旱水灾成灾面积占比扩大、废水排放量增加、林牧渔畜用水增多等指标影响，2015 年水贫困指数最低，排名第七；2016 年设施系统涨幅明显，主要由于 A3 指标权重提高，且排污口增加带动，因此，2016 年平凉水贫困指数为 55.04，在当年排名第一。从各子系统来看，仅设施系统呈上升趋势，其他系统均为下降。

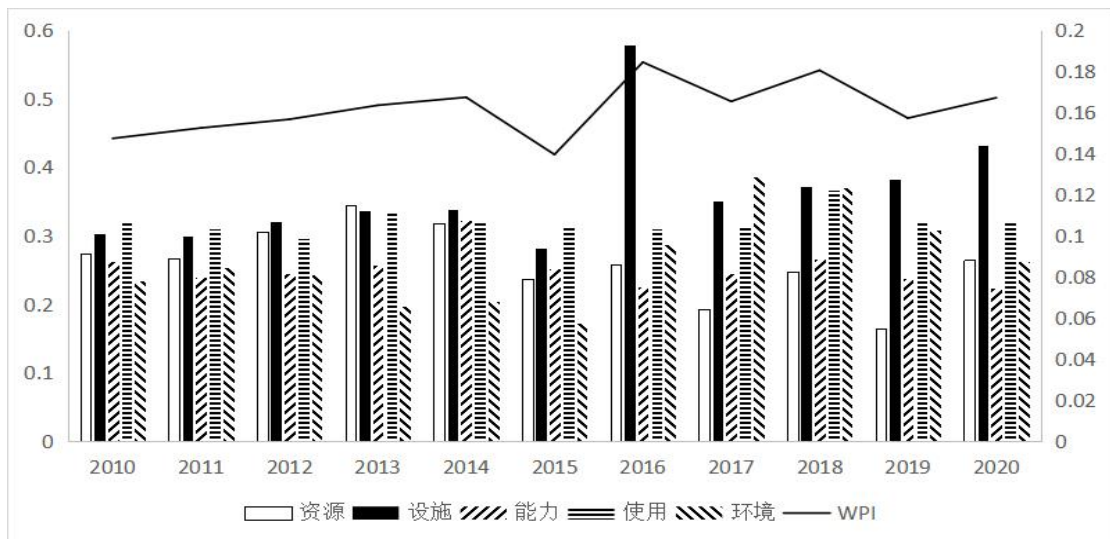


图 5.5 平凉市水贫困指数与各子系统指数



### 5.1.5 庆阳市

2010-2020年庆阳市水贫困指数由轻微波动(图5.6),2010年WPI与2020年无明显变化,排名波动较小,围绕第四名上下浮动。2012-2015年,在建成区绿化覆盖率上升,工业等方面用水减少的影响下,2012、2014、2015年排名均为第一。2016-2017年,排污口数量锐减,加之旱水灾成灾面积占比增加,致使庆阳水贫困指数逐年下跌,降幅较大。水贫困的5个子系统对WPI值的贡献率排序为:能力>使用>设施>环境>资源。从各子系统来看,仅资源系统上升幅度明显,设施、使用系统无明显变化,能力、环境系统呈下降趋势。

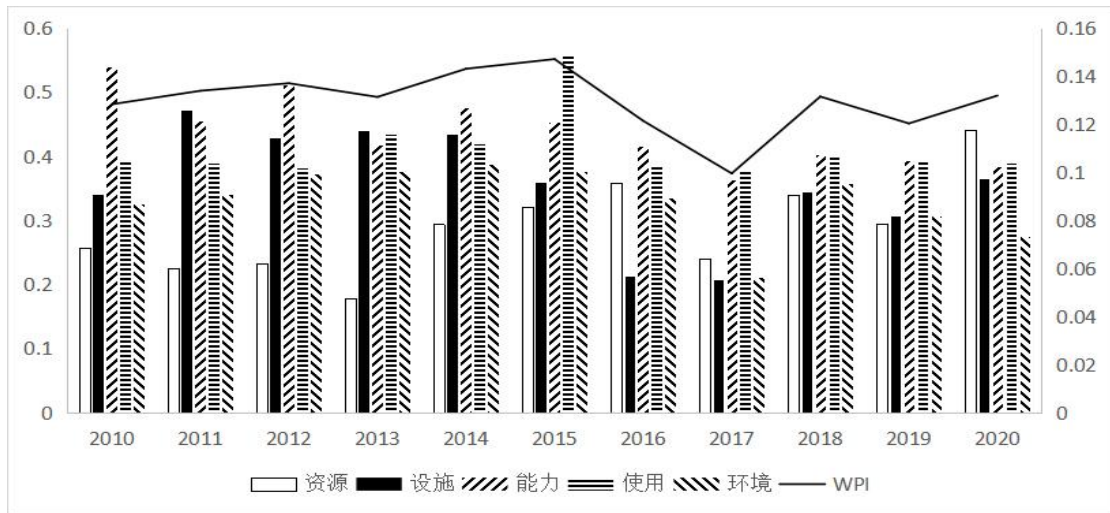


图 5.6 庆阳市水贫困指数与各子系统指数

### 5.1.6 定西市

2010-2020年定西市水贫困指数先上升后下降(图5.7),2010年WPI与2020年无明显变化,排名波动较大。水贫困的5个子系统对WPI值的贡献率排序为:使用>资源>能力>设施>环境。2013年,受降水量变化率、农田灌溉用水、生活用水等指标影响,资源、使用系统指数明显上涨,带动定西水贫困指数排名提升至第一名;2015-2017年,各系统均呈下降趋势,2017年,水贫困指数最低,排名第七。从各子系统来看,仅资源系统呈下降态势,其他系统均为上升。



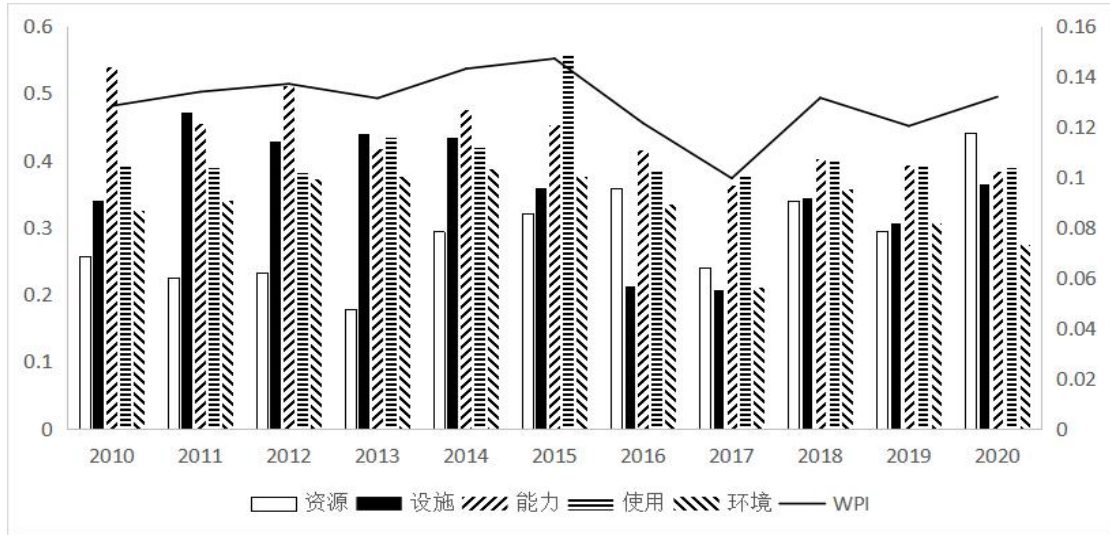


图 5.7 定西市水贫困指数与各子系统指数

### 5.1.7 临夏回族自治区

2010-2020 年临夏回族自治区水贫困指数呈波动式上升（图 5.8），WPI 值由 2010 年的 32.81 上升到 2020 年的 41.93，上升了 27.80%，排名未有明显提升，基本位于第 8 名。水贫困的 5 个子系统对 WPI 值的贡献率排序为：使用>环境>设施>资源>能力。2019 年水贫困指数最高，水贫困程度最弱，主要受资源、能力、环境系统的影响，其中，降水量变化幅度降低，万元 GDP 用水量减少，建成区绿化覆盖率上升等带动其水贫困指数上涨，达到 43.32。从各子系统来看，均有不同程度上降。

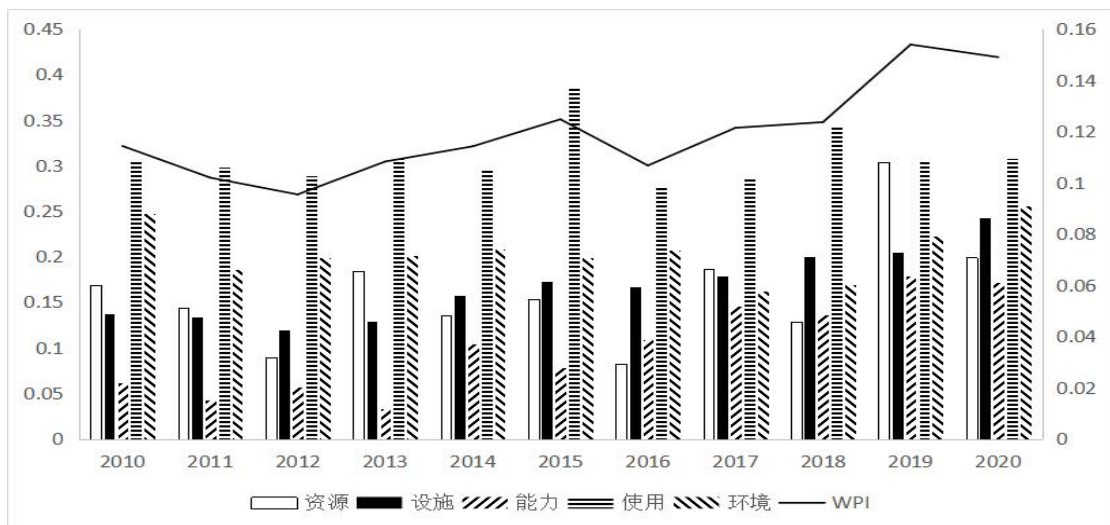


图 5.8 临夏回族自治区水贫困指数与各子系统指数

### 5.1.8 甘南藏族自治州

2010-2020年甘南藏族自治州水贫困指数整体呈下降趋势（图 5.9），波动幅度较大，WPI 值由 2010 年的 46.44 减至 2020 年的 43.79，降低 5.71%，排名波动较大，围绕第四名上下浮动。水贫困的 5 个子系统对 WPI 值的贡献率排序为：资源>使用>环境>能力>设施。2015-2016 年，水贫困指数由最高值降到最低值，下降幅度超 10%，主要受排污口、林牧渔畜用水、旱水灾成灾面积占比等设施、使用、环境系统的影响。从各子系统来看，仅环境系统呈上升趋势，其他系统均为下降态势。

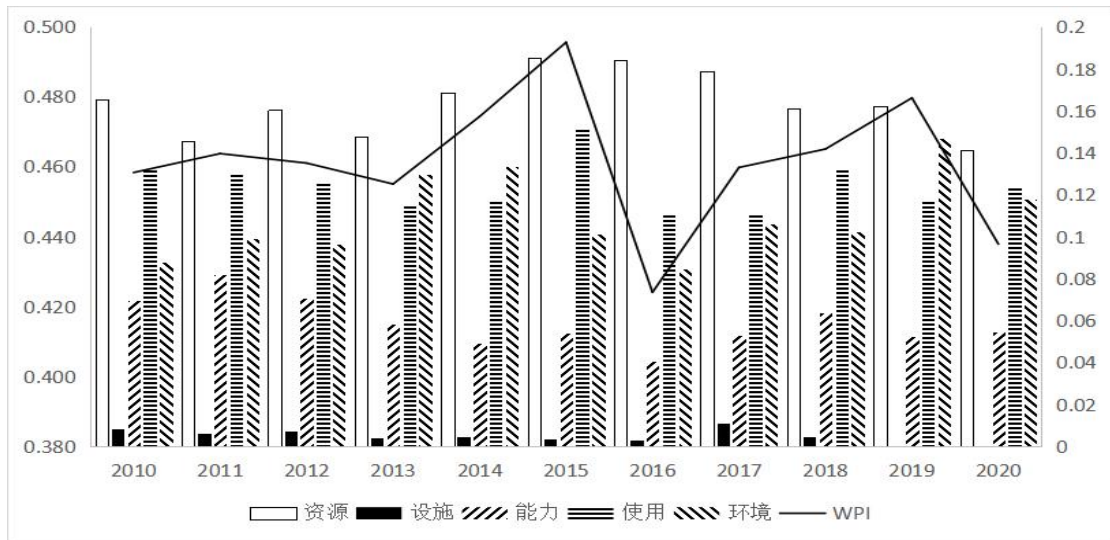


图 5.9 甘南藏族自治州水贫困指数与各子系统指数

## 5.2 黄河流域甘肃段水贫困指数空间变化

为了揭示黄河流域甘肃段水贫困状况差异的空间演变格局，以表 5.2 中各市（州）水贫困指数为基础，运用 ArcGIS 10.2 做出黄河流域甘肃段水贫困空间格局图（图 5.10），并根据自然断点法将黄河流域甘肃段划分水贫困指数划分为低、中、高，分别代表高水贫困地区、中水贫困地区、低水贫困地区。

从空间分布的格局上来看，研究期内，8 市（州）水贫困在空间分布上变化显著。黄河流域甘肃段水贫困指数的高值区多位于东北部，其次是西南部，水贫困指数的低值区位于中部。坐落在黄河流域甘肃段东北部的庆阳，在 2010-2020

年间水贫困指数均位于高值，表明该区域的水资源状况在黄河流域甘肃段中最优，其主要受能力和使用系统影响，说明收入能力、取水能力与水资源利用能力的匹配度较高，水贫困压力较小。甘南是黄河流域甘肃段水资源最为丰富的地区，但由于受设施系统的影响，水贫困指数十年来一直处于中等水平，因此增加取水、用水、排水等基础设施便可有效改善水贫困现状。白银虽水资源量短缺，2020年人均水资源量仅97吨，但通过蓄水、引水、提水等途径，有效缓解当地水资源匮乏问题，加之其重视环境问题，废水等污染物排放较少，从而实现水贫困指数由低等到高等水平的质变。临夏的水贫困指数得分属于低值区，水贫困程度较高，主要是受社会经济适应能力落后影响，水资源利用效率低下，浪费严重。

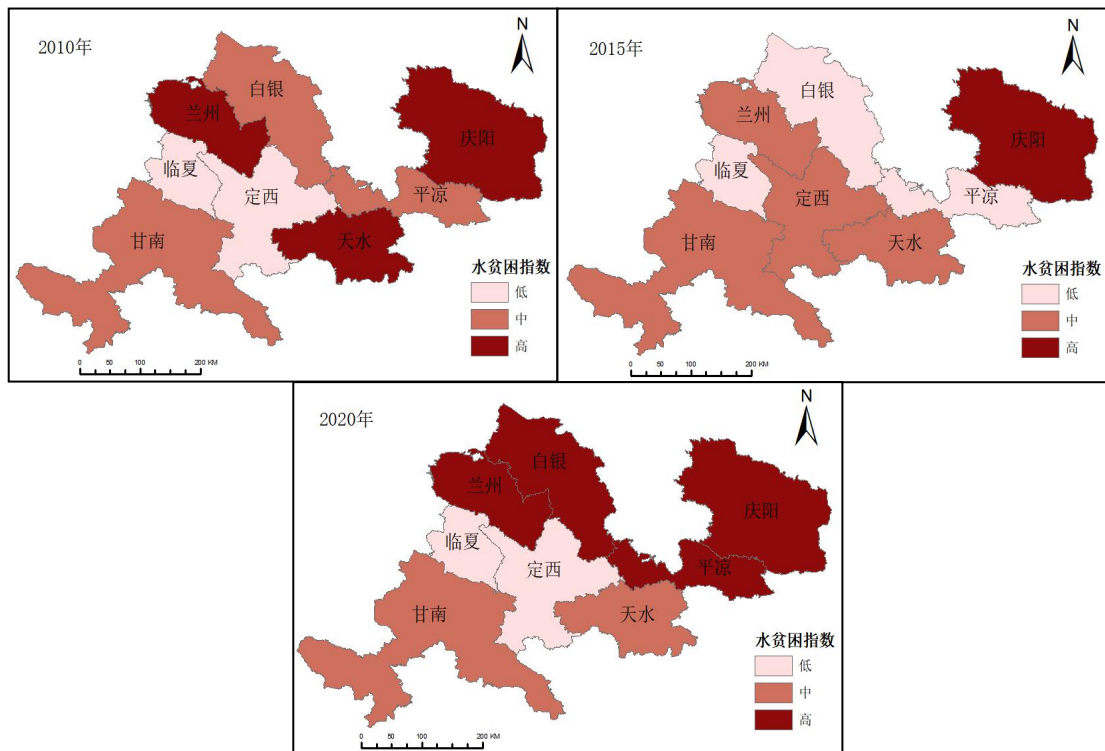


图 5.10 黄河流域甘肃段水贫困指数空间分布对比

### 5.2.1 资源子系统

2010-2020年，8市（州）资源子系统在空间分布上变化为先减后增，整体呈衰退趋势（图 5.11）。总体而言，水资源在西南部分布较多，北部分布较少，前者地处青藏高原东北边缘，地势西北高、东南低，河流纵横，水资源较多，后者地处陇西黄土高原西北边缘及祁连山东延余脉向腾格里沙漠过渡地带，属于黄

河上游甘肃省的中部干旱地区，因而前者相较于后者水资源系统指数等级较高。研究期内，甘南由于水资源丰富，稳居资源子系统的高等水平；定西、天水、平凉由中、高等水平降为低等水平；兰州、白银现阶段指数位于高等水平。

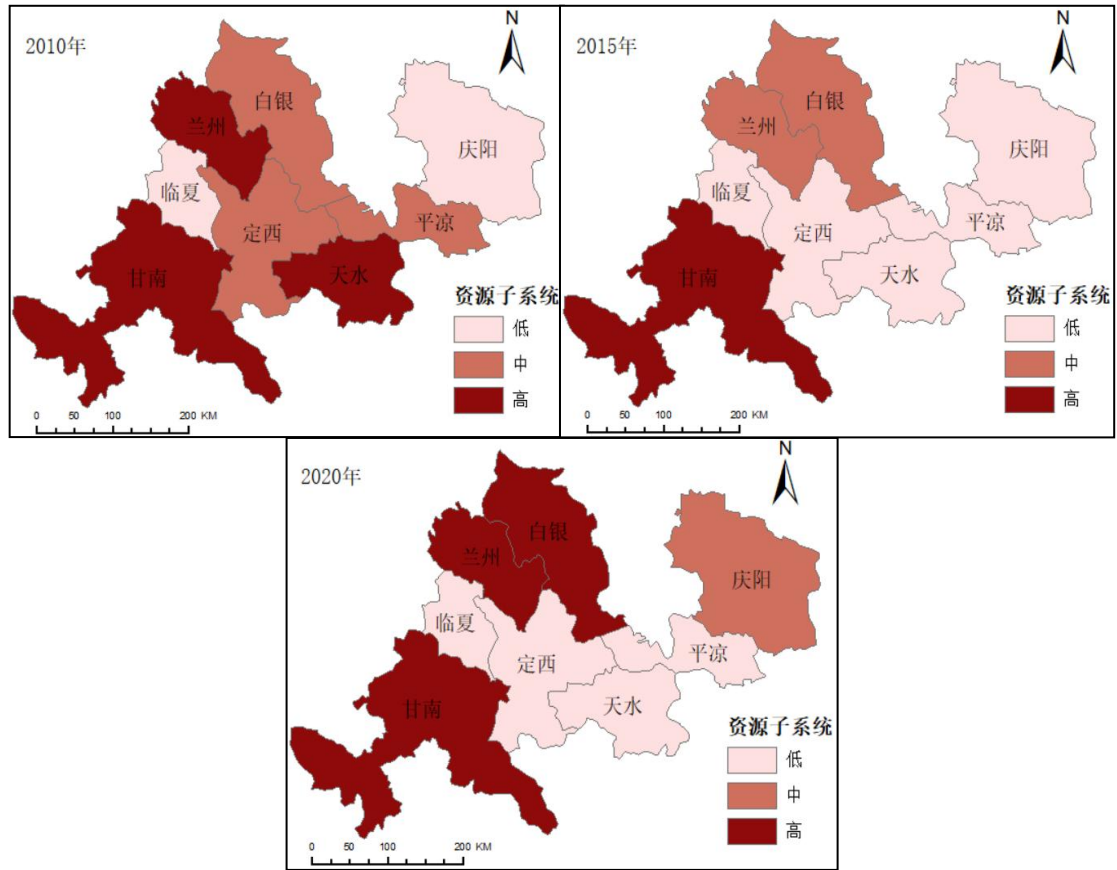


图 5.11 黄河流域甘肃段资源子系统空间分布对比

### 5.2.2 设施子系统

2010-2020年，8市（州）设施子系统在空间分布上先增后稳，整体呈上升趋势（图 5.12）。总体而言，黄河流域甘肃段供水管道长度、排污口、废水治理设施数等设施供给数量均有所提高，且城市供水普及率有一定提升，因此设施系统指数等级上升。而研究期内，甘南由于有效灌溉面积下降比例较高，设施子系统长期居于低等水平；兰州、白银、平凉、庆阳指数水平无明显变化；临夏、定西、天水在 2015 年由低等水平升为中等水平。设施系统指数等级最高区域主要为兰州，说明该地区社会经济相对较高，水利设施方面投入较高；设施系统指数等级最低区域分布西南的甘南，说明该地区社会经济相对较低，水利设施方面投



入较少。

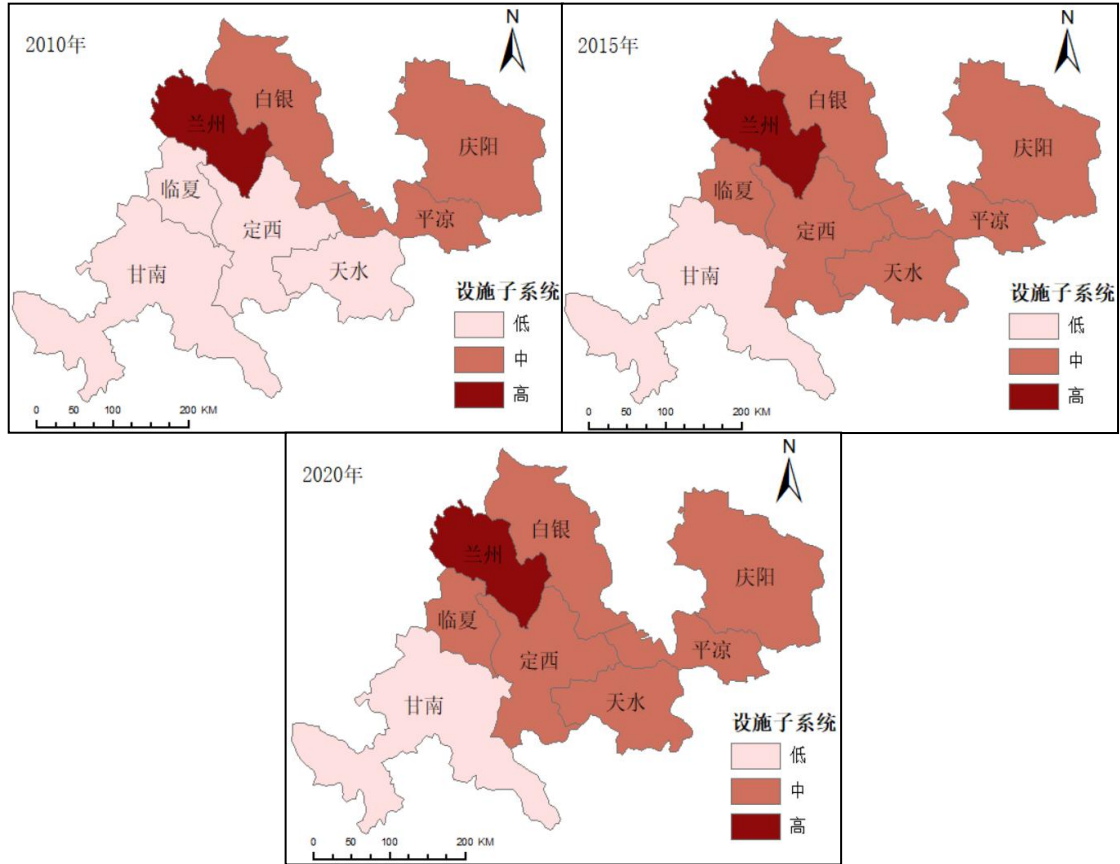


图 5.12 黄河流域甘肃段设施子系统空间分布对比

### 5.2.3 能力子系统

2010-2020 年, 8 市(州)能力子系统在空间分布上整体呈衰退趋势(图 5.13)。具体来说, 黄河流域甘肃段城镇人均可支配收入、农村人均可支配收入、农林水利事务支出等有一定提高, 且万元 GDP 用水量与城镇居民恩格尔系数下降明显, 8 市(州)的利用能力水平提升各不相同, 但资源利用能力与社会经济水平不相匹配, 部分设施系统指数等级有所下降。研究期内, 兰州由于万元 GDP 用水量低的下降比例较高, 能力子系统长期居于高等水平; 白银、平凉、甘南、定西的资源利用能力虽有所改善, 但较其他市(州)相对较弱, 因此指数水平由中等降为低等; 临夏长期处于低等水平; 天水、庆阳在高等与中等水平之间波动。

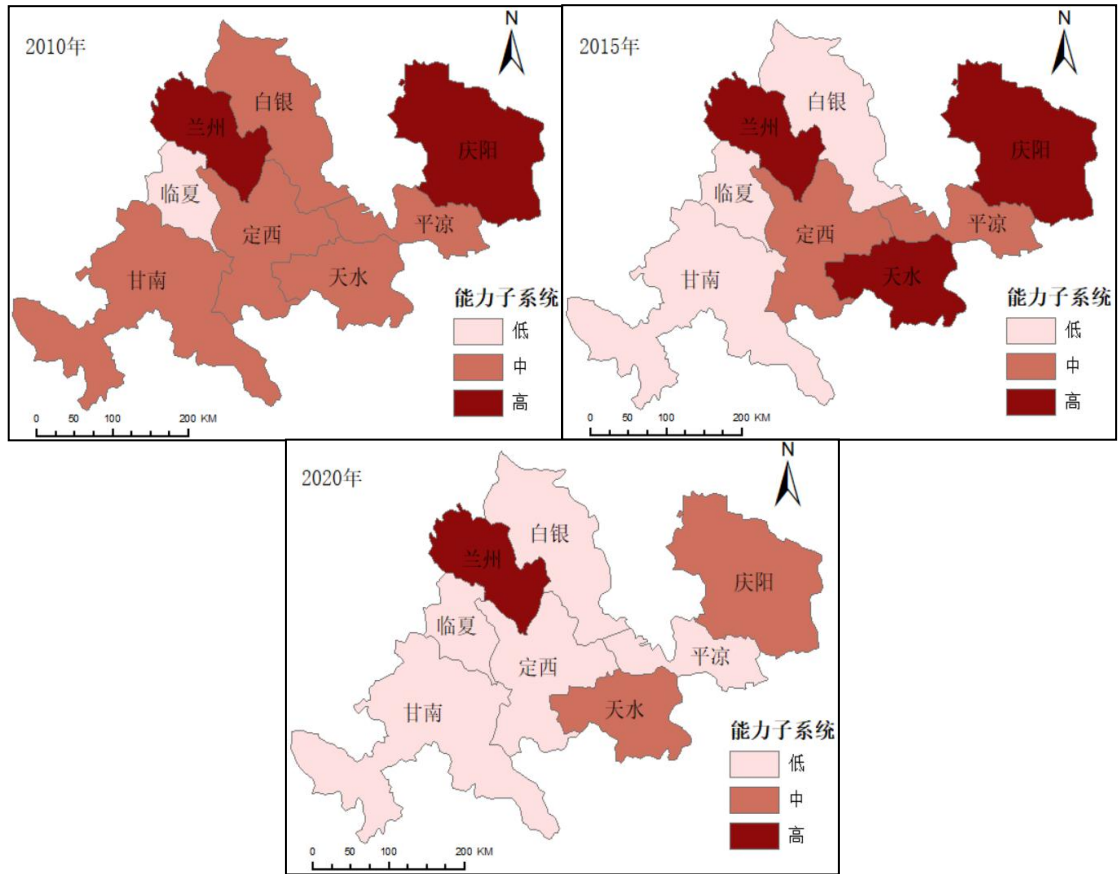


图 5.13 黄河流域甘肃段能力子系统空间分布对比

### 5.2.4 使用子系统

2010-2020 年, 8 市(州)设施子系统在空间分布上整体呈上升趋势(图 5.14)。总体而言, 黄河流域甘肃段农田灌溉、工业、生活等用水量均有所下降, 因此使用系统指数等级上升。在研究期内, 使用系统指数等级处于高等水平的区域主要分布在西南和东北地区, 北部地区等级偏低。其中, 临夏、甘南、庆阳发展相对较慢, 且用水人口较少, 部分水资源使用有下降趋势, 指数等级长期处于高等水平; 兰州受经济影响, 发展相对较快, 水资源较其他市(州)使用较多, 因此长期处于低等水平; 白银、平凉呈波动式变化, 先减后增; 定西、天水由中等水平升为高等。

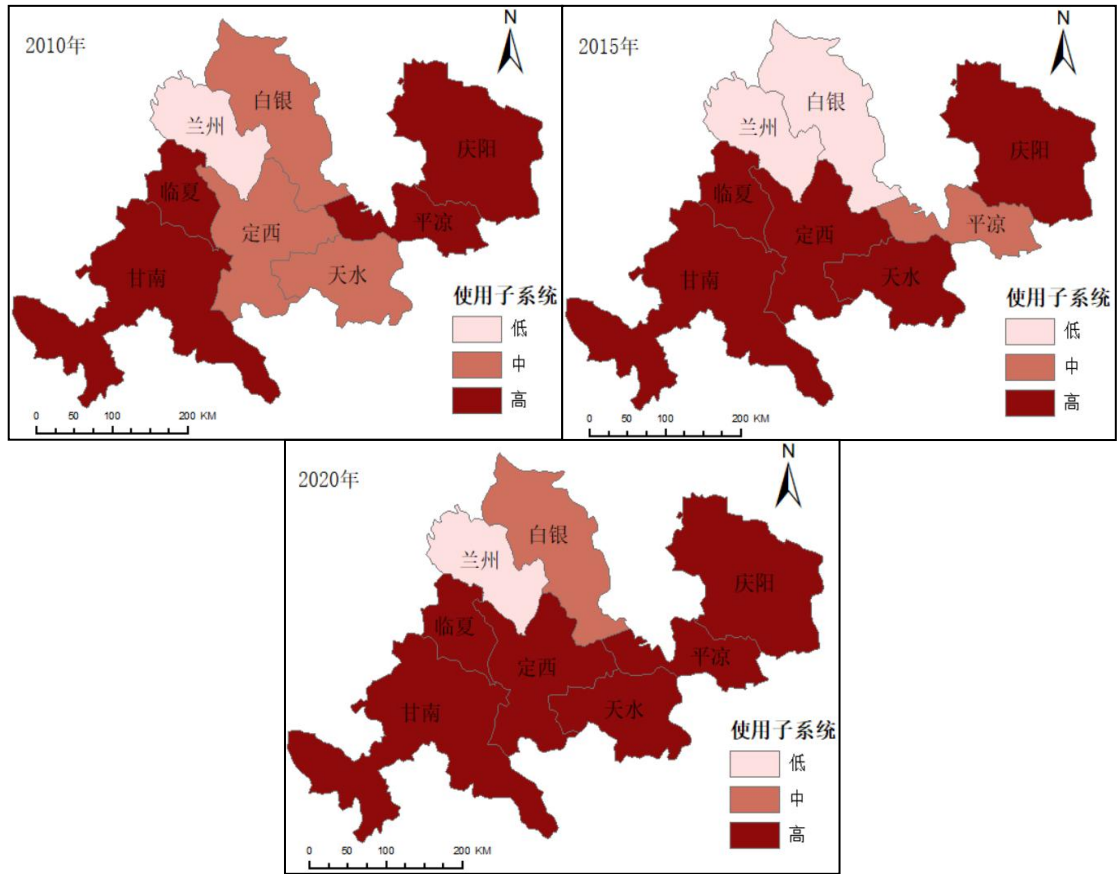


图 5.14 黄河流域甘肃段使用子系统空间分布对比

### 5.2.5 环境子系统

2010-2020 年，8 市（州）设施子系统在空间分布上先增后减，整体呈衰退趋势（图 5.15）。总体而言，黄河流域甘肃段旱水灾成灾面积占比与建成区绿化覆盖率均有所改善，但废水排放量过多，致使天水、庆阳环境子系统等级下降明显。研究期内，环境系统指数等级偏高区域主要集中分布在西南地区；北部地区空间变动不明显，长期处于中、低等水平；其他地区波动较大。其中，兰州环境系统水平较低，表明该地区水资源所处的环境破坏较为严重<sup>[68]</sup>；甘南长期处于高等水平，说明该地区水资源所处的环境破坏较轻。

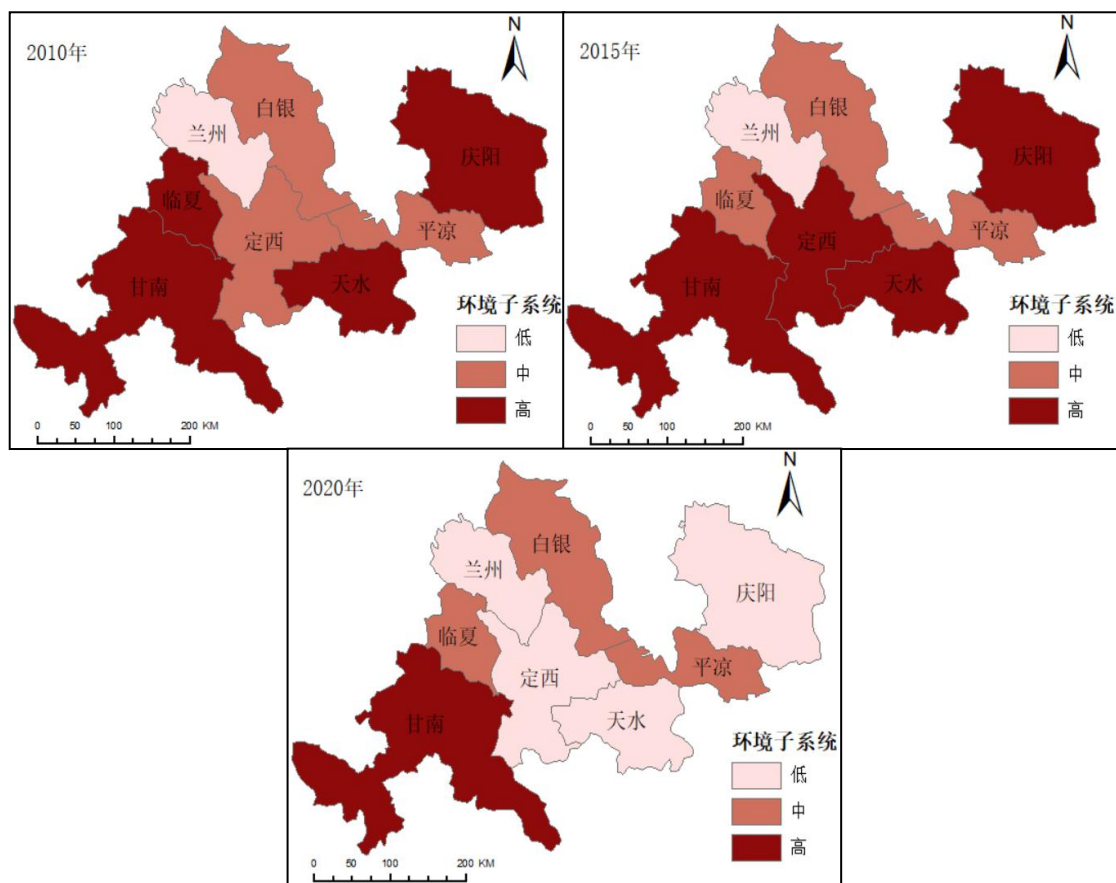


图 5.15 黄河流域甘肃段环境子系统空间分布对比



## 6 黄河流域甘肃段水贫困的影响因素分析

### 6.1 障碍度模型

通过测度黄河流域甘肃段水贫困指数,虽然能够从整体上了解研究区域内水资源环境是否安全,掌握 8 市(州)在研究期内的综合变化规律,但尚不能分析出影响其水贫困的主要原因。为进一步实现水资源循环可持续发展,深入了解影响黄河流域甘肃段水贫困的主要影响因素,本文引入障碍度模型,以便根据各市(州)实际情况,采取有针对性的治理措施来控制影响因素对水资源贫困带来的消极影响,缓解水贫困压力。障碍度模型选取目前运用较多,接受度普遍较高的障碍因子评判模型。该模型从因子贡献度、指标偏离度和障碍度 3 个层面进行分析诊断:①因子贡献度( $\omega_i$ ):单个因素对总目标的贡献程度,即用各指标权重表示;②指标偏离度( $O_{ij}$ ):指单因素指标与系统发展目标的差距,此处设为单项指标标准化值与 100%之差;③障碍度( $I_i$ )为单项评价指标对水贫困灾害风险的影响程度<sup>[69]</sup>。具体公式如下:

$$O_{ij} = 1 - x_{ij} \quad (8)$$

$$I_i = \frac{(O_{ij} \times \omega_i)}{\sum_{i=1}^n O_{ij} \times \omega_i} \quad (9)$$

式中, $\omega_i$ 表示第*i*个指标的贡献度,即指标权重; $x_{ij}$ 表示第*j*年的第*i*个指标的标准化值; $O_{ij}$ 表示第*j*年的第*i*个指标的指标偏离度; $I_i$ 表示第*i*个指标的因子障碍度。

在得出各指标因子障碍度的基础上,进一步研究单个子系统对黄河流域甘肃段水贫困问题影响的障碍度<sup>[70]</sup>,具体公式如下:

$$U_k = \sum I_j \quad (10)$$

式中, $U_k$ 表示各子系统障碍度,其中, $U_R$ 为资源、 $U_A$ 设施、 $U_C$ 能力、 $U_U$ 使用、

$U_E$  为环境。

## 6.2 基于障碍度模型黄河流域甘肃段水贫困影响因素分析

水贫困测度指标体系由资源（R）、设施（A）、能力（C）、使用（U）和环境（E）5个系统，26个指标组成。为探讨黄河流域甘肃段水贫困问题的成因，分别从准则层与指标层诊断影响水贫困问题解决的影响因素，结果如表 6.1 和 6.2 所示。

### 6.2.1 准则层影响因素分析

根据上述公式计算黄河流域甘肃段各市（州）水贫困准则层的障碍度，得出各子系统的障碍度得分，并根据其得分排名高低，找出造成该研究区水贫困的主要原因。从整体上看，影响甘肃段的主要系统是使用状况，表明影响黄河流域甘肃段水贫困治理的短板因素主要是水资源使用效率。然而通过比较各市（州）的子系统障碍得分，发现其主要影响系统各不相同。资源是平凉、庆阳的主要影响系统；设施是天水、甘南的主要影响系统；能力是定西、临夏的主要影响系统；使用是兰州、白银的主要影响系统。各市（州）系统间障碍得分差异最大的两个地区分别是兰州和甘南，极差分别为 2.152 和 1.213，表明兰州和甘南水贫困综合得分较高，但各系统之间发展较不平衡，差异性大，其次是白银和临夏，分别是 0.550 和 0.695；极差最小的是天水和平凉，均为 0.188，表明天水、平凉各子系统间发展水平较为均衡，差异较小。

根据黄河流域甘肃段水贫困各子系统的障碍得分，分析各市（州）水贫困现状。其中，兰州水贫困障碍度总得分最高，主要受使用系统的影响，兰州是西北重要经济中心，农田灌溉、工业、生活、生态用水显著高于其他地区，因此使用系统障碍度较高，若能提高水资源的使用效率，降低使用总量，便能够在现有基础上有效提高水贫困指数，进一步改善水贫困程度。天水、平凉、庆阳、定西的子系统障碍度较小，且分布较为均衡，根据前文计算得到的水贫困指数可知，天水、平凉、庆阳水贫困指数相对较高，水贫困程度较弱，为低水贫困地区；定西水贫困指数比较低，水贫困程度较强，为高水贫困地区。低水贫困地区在水贫困

问题的治理和控制过程中,应进一步加强系统间的联系和影响,处理好系统在发展中所存在的问题,使本区域水贫困问题得到解决。对于高水贫困地区而言,子系统风险较大且系统间的联合阻力作用使水贫困风险陷入不断交织恶化的循环中<sup>[64]</sup>,应以缩小地区差距为目的,采取切实可行的应对措施来提高各系统水贫困指数,逐步实现各障碍系统的有效控制,使本区域水贫困问题得到缓解。

表 6.1 黄河流域甘肃段水贫困各子系统障碍得分

地区	资源 (R)		设施 (A)		能力 (C)		使用 (U)		环境 (E)		总得分	
	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名	得分	排名
兰州	0.469	8	0.257	8	0.328	8	2.409	1	1.271	1	0.993	1
白银	0.560	6	0.407	7	0.828	2	0.957	2	0.643	3	0.691	3
天水	0.549	7	0.686	3	0.498	6	0.551	3	0.581	5	0.583	5
平凉	0.626	4	0.438	6	0.541	5	0.418	4	0.472	7	0.506	7
庆阳	0.629	3	0.555	5	0.349	7	0.376	5	0.483	6	0.487	8
定西	0.610	5	0.624	4	0.643	4	0.382	6	0.621	4	0.582	6
临夏	0.788	1	0.717	2	1.024	1	0.329	7	0.644	2	0.706	2
甘南	0.751	0	1.320	1	0.813	3	0.107	8	0.302	8	0.659	4
甘肃段	0.623		0.626		0.628		0.691		0.627		0.651	

## 6.2.2 指标层影响因素分析

根据上述公式计算黄河流域甘肃段各市(州)水贫困测度指标体系 26 个指标的障碍度,计算结果如表 6.2 所示。根据相关结果进行主次排序,但由于指标较多,为体现影响因素关键性,按照障碍度的大小,本文只筛选罗列出障碍度排名前 5 位的因素。

通过统计频数,发现影响黄河流域甘肃段各市(州)水贫困指数的影响因素主要分布在资源、能力和环境子系统,分别为地表水源供水量、万元 GDP 用水量、旱水灾成灾面积占比、建成区绿化覆盖率,均对三个及以上市(州)的水贫困程度有较大影响。其中,地表水源供水量主要影响天水、平凉、庆阳;万元 GDP 用水量主要影响白银、定西、临夏;旱水灾成灾面积占比平凉、庆阳、定西;建成区绿化覆盖率主要影响定西、临夏、甘南。影响因素的分布结果说明在黄河流域甘肃段各市(州)中分布极不均衡。因此,各市(州)在采取措施改善

本地水贫困现状时,应充分了解致贫原因,综合考虑与水资源相关的多方面因素,有针对性地对现存问题进行整改,以实现水资源的循环可持续利用。

表 6.2 黄河流域甘肃段水贫困指标层主要影响因素及其障碍度

地区	1		2		3		4		5	
	影响 因素	障碍 度	影响 因素	障碍 度	影响 因素	障碍 度	影响 因素	障碍 度	影响 因素	障碍 度
兰州	U5	0.569	U3	0.551	U6	0.514	E2	0.479	U4	0.317
白银	U1	0.310	C1	0.306	U2	0.267	E5	0.223	A3	0.201
天水	E5	0.186	E4	0.179	U4	0.157	A1	0.154	R3	0.150
平凉	R3	0.161	C5	0.159	A4	0.154	E1	0.151	R2	0.150
庆阳	A5	0.182	R3	0.164	R2	0.153	A4	0.152	E1	0.147
定西	E3	0.173	E1	0.163	C2	0.158	C1	0.156	C3	0.152
临夏	C1	0.261	E3	0.234	C2	0.230	R4	0.211	C4	0.182
甘南	A1	0.467	C4	0.272	E3	0.266	R5	0.238	A5	0.219

然而,除上述主要影响因素外,水资源总量(R2)、城市供水普及率(A1)、有效灌溉面积(A4)、废水治理设施数(A5)、城镇人均可支配收入(C2)、城镇居民恩格尔系数(C4)、生活用水(U4)和氨氮排放量(E5)同样对黄河流域甘肃段8市(州)的水贫困问题有较强的负面影响。其中水资源总量来自资源系统,是造成水贫困的根本性原因,除通过蓄水、引水、提水等途径缓解,还应注重水资源的合理利用;城市供水普及率、有效灌溉面积和废水治理设施数是设施系统的指标,说明反映了城市地区的供水普及率不够,用水得不到保障,农村地区在农业方面有效灌溉面积不够,废污水的回收利用能力不强,同时也间接反映了居民公用事业方面的投资需要增加;城镇人均可支配收入、城镇居民恩格尔系数属于能力系统,社会经济水平的提升能有效改善居民对水资源的开发和利用,进一步提升本地的水管理能力,应积极扩大市场,增加就业机会,提高居民收入,从而有效促进居民生活水平的提高;生活用水属于使用系统的指标,在此系统中,应注重水资源的保护,培养大众节水意识,建设节水型社会;氨氮排放量所属系统为环境系统,研究期内,氨氮排放量呈倒U型变化,虽排放量较小,但变化幅度较大,在保持现有排放量的基础上,应进一步优化设施,降低排放,减缓水贫困程度。

黄河流域甘肃段水贫困各市(州)影响水贫困解决的主要影响因素不尽相同,

应具体分析。在研究期内，兰州的水贫困指数综合值最高，是全市最不水贫困的地区，该区以使用系统的工业、生活、生态用水与用水人口为主要影响因素，均集中在使用方面。甘南是研究区域内水资源总量最为丰富的地区，其影响因素主要是设施系统的指标，城市供水普及率与废水治理设施数，反映了甘南地区水利基础设施薄弱，水资源使用效率低。白银，临夏是黄河流域甘肃段水贫困最严重的地区，这两个地区水资源禀赋较差，经济发展水平较为落后，对水资源的开发和利用率较其他市（州）相对不高，因此应着重关注与资源、能力和环境系统有关的指标。

## 7 结论与启示

### 7.1 主要结论

本文在水贫困理论的基础上,依据数据的可获得性原则,从水资源状况(R),供水设施状况(A)、利用能力(C)、使用状况(U)及环境(E) 5个方面建立黄河流域甘肃段水贫困评价指标体系。指标体系以2010-2020年截面数据为基础,采用客观权重熵值法对研究区内8个市(州)的水贫困状况进行时空分析,并运用障碍度模型判断黄河流域甘肃段水贫困问题的主要影响因素,根据判定结果来了解和把握解决水贫困问题的阻碍因素。通过上述分析,主要得出如下研究结论:

(1) 从时间序列的变化上看,2010-2020年黄河流域甘肃段水贫困指数在0.424-0.472之间波动,由2010年的0.447波动上升至2020年的0.472,上升了5.593%,年均上升0.508%,水贫困程度整体上呈现出下降的趋势。研究期内,各市(州)的水贫困指数在0.269-0.605范围之内,其中,兰州、白银、天水、平凉、庆阳的WPI值处于较高水平,表明其水贫困程度较弱;定西、临夏、甘南WPI值处于较低水平,表明其水贫困程度较强。通过比较2010-2020年各市(州)水贫困指数变化程度发现,兰州、白银、平凉、定西、临夏的水贫困指数呈上升趋势,且上升幅度较明显,说明其对黄河流域甘肃段水贫困“减贫”有较大贡献,仅天水、庆阳、甘南水贫困指数有小幅下降。由此可见,黄河流域甘肃段水贫困状况整体呈现好转。从各市(州)水贫困的综合排名结果来看,兰州、天水、平凉、庆阳在多数时期水贫困排名较高,表明水资源处于一种良性发展的状况;临夏在各个时期水贫困排名靠后,仅在七到八之间波动,水贫困程度较高,表明水资源处于一种恶性发展的状况;白银、甘南长期处于中等水平;定西变化最为明显,排名先升后降,在第一名和第七名之间波动,表明水资源发展状况极不稳定。以上述分析结果为依据,对黄河流域甘肃段2010-2020年各市州水贫困的时间序列变化情况展开特征分析。

(2) 从空间分布的格局上看,黄河流域甘肃段8市(州)在研究期内水贫困指数都有较好的发展趋势,但各市(州)之间存在着明显差异。其高值区多位

于东北部，其次是西南部，水贫困指数的低值区位于中部。坐落在黄河流域甘肃段东北部的庆阳，在 2010-2020 年间水贫困指数均位于高值，表明该区域的水资源状况最好，能力和使用系统的得分高，反映了其具有较高水平的收入能力、取水能力和水资源利用能力，同时说明强大的社会适应能力有助于缓解水贫困压力。甘南是黄河流域甘肃段水资源最为丰富的地区，但由于受设施系统的影响，水贫困指数 10 年来一直处于中等水平，因此增加取水、用水、排水等基础设施便可有效改善水贫困现状。白银虽水资源量短缺，2020 年人均水资源量仅 97 吨，但通过蓄水、引水、提水等途径，有效缓解当地水资源匮乏问题，加之其重视环境问题，废水等污染物排放较少，从而实现水贫困指数由低等到高等水平的质变。临夏的水贫困指数得分属于低值区，主要原因是由于社会经济适应能力落后，水资源利用效率低下，浪费严重。以上述分析结果为依据，分析黄河流域甘肃段 2010 年、2015 年、2020 年 5 个子系统的空间变化。

(3) 在准则层影响因素分析中，按照障碍度从大到小的顺序原则，发现水资源状况、使用状况两个系统的障碍度最大。各市（州）系统间障碍得分差异最大的两个地区分别是兰州和甘南，极差分别为 2.152 和 1.213，表明兰州和甘南水贫困综合得分较高，但各系统之间发展较不平衡，差异性大，其次是白银和临夏，分别是 0.550 和 0.695；极差最小的是天水和平凉，均为 0.188，表明天水、平凉各子系统间发展水平较为均衡。从指标层障碍度看，影响黄河流域甘肃段水贫困状况的影响因素主要分布在资源、能力和环境子系统，分别为地表水源供水量、万元 GDP 用水量、旱水灾成灾面积占比、建成区绿化覆盖率，均对三个及以上市（州）的水贫困程度有较大影响，说明影响黄河流域甘肃段水贫困问题的主要影响因素在各市（州）中分布不均衡，环境系统较为严重。

## 7.2 相关启示

基于以上研究结论，本文得出以下几点启示：

(1) 黄河流域甘肃段水资源贫困水平在 2010-2020 年间有一定下降趋势，各市（州）时空变化不尽相同，差异明显。其中，定西与临夏水贫困问题虽有一定缓解，但水贫困程度相对较深，应贯彻新发展理念，结合其自身水资源禀赋特点，来缓解水贫困现状。定西位于甘肃中部，水资源较为匮乏，由于时空分布不

均, 降雨稀少, 干旱缺水成为定西社会经济发展的主要制约因素, 加之受技术条件的限制, 水资源循环利用能力较弱, 浪费严重。应切实加强治水力度, 重视水资源开发, 加强水资源保护, 改善水环境: 解放思想, 转变观念, 并以节水为中心, 加大节水措施推广力度, 加强高新节水技术探索, 加快技术源头创新; 积极增开地表水源, 增加地下蓄水能力, 抓好集雨节灌工程, 缓解农业用水压力; 坚持不懈地大力开展水土保持和小流域综合治理<sup>[71]</sup>。临夏近些年随着经济社会的发展, 资源被过度开发利用, 导致境内生态失衡, 植被涵养水源的能力有所下降, 无法充足补给黄河水源, 使其成为黄河上游水土流失最为严重的地区。而且水土流失加快了河床的抬高, 下游河道的泥沙不断淤积, 对中下游人民群众的生产生活以及防汛造成极大隐患。应加大关注黄河一级支流大夏河流域的综合治理问题, 进一步完善水利工程管护, 提高储水能力, 建立临夏州节水激励机制、生态补偿机制、水源地安全紧急预案等方式<sup>[65]</sup>。

(2) 为使黄河流域甘肃段整体的水贫困程度能够持续下降, 以甘肃段水资源的现实特征为基础, 针对其指标体系的 5 个子系统, 提出相应的水资源管理措施, 来改善其水安全水平。在资源系统方面, 应建立高效协调的水资源管理体制, 建成完善的水资源优化配置体系, 来应对水资源在地理上的分布不均。设施系统方面, 应对现有河流和水源地增建供水、排水设施, 提高水资源循环和可持续利用的能力, 加大具有节水功能的用水设备投入, 增建集中供水设施, 提高供水普及率。水资源综合利用率的提高, 缓解水资源短缺矛盾, 减轻水体污染。能力系统方面, 主要依靠经济的发展和政府层面的财政支持, 二者不仅能带动人民生活水平提高, 使居民普遍拥有水资源的利用能力, 还能为水资源的开发和利用提供强有力的保障。因此, 利用能力的提高主要与现代社会发展水平相适应, 应从有效管理入手, 稳中求进中实现经济高质量发展。使用系统方面, 应遵循“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期水利工作方针<sup>[72]</sup>, 建设节水型社会, 减少用水浪费。其中, 在农业用水中, 应实施节水灌溉工程, 推广先进节水灌溉技术, 注重灌溉水利用率的提高, 减少水量损耗; 在工业用水中, 应在生产力合理布局的基础上, 调整产业结构, 加强废污水的循环利用; 在生活用水中, 加强全民节水教育, 培养节水意识, 推动民众主动参与节水; 在生态用水上, 履行绿色低碳要求, 科学进行城市环境用水和部分河流、湿地的人工补水。环境系



统方面，应切实减轻生态环境压力，进一步加强水环境保护力度。

(3) 地表水源供水量、万元 GDP 用水量、旱水灾成灾面积占比、建成区绿化覆盖率是黄河流域甘肃段水贫困的主要影响因素，应采取针对性措施来有效缓解其影响。地表水源供水量，其在一定程度上是定量的，是大自然的直接供给，因此应坚持开源与节流并重的方针，培养市民的节水意识，提高各行各业的用水效率和效益。并且，在节水的基础上，加大水资源的开发力度，采取蓄水、引水、提水等有效手段丰富其地表水资源供水量，使黄河流域甘肃段水资源安全得到保障。万元 GDP 用水量，代表水资源的利用效率，效率越低，使用量则越大，因此，应逐步优化水资源配置体系，实现地表水、地下水与外调水的合理配置与科学使用，优化产业结构，提高水资源利用效率，从而保障居民生活、生产用水和社会经济的可持续发展。旱水灾成灾面积占比，属于水环境状况的潜在压力层面，占比越高，环境压力越大，水贫困程度越深。其中，旱灾的主要防治措施是借助于兴修水利、营造水土保持林与农田防护林等各种水利工程对农作物进行灌溉及进行其他方面的水资源补充；洪涝灾害多采取修建蓄洪、滞洪工程来控制调蓄和疏导排泄相结合的措施防治。

## 参考文献

- [1]毕雪燕. 黄河流域水文化资源开发与利用研究[M].中国农业出版社, 2021.
- [2]左其亭, 李可任.最严格水资源管理制度理论体系探讨[J].南水北调与水利科技, 2013, 11(01):34-38.
- [3]杨倩, 王梅, 韩林芝, 刘志辉, 郑江华.水贫困评价问题研究进展[J].生态经济, 2016, 32(01):170-175.
- [4]肖洪敏, 倪福全, 邓玉, 闻豪, 王珊.四川省水贫困时空分布格局研究[J].南水北调与水利科技, 2018, 16(01):100-107.
- [5]王雪妮. 中国水贫困问题研究[D].辽宁师范大学, 2012.
- [6]中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [7]李雪松. 中国水资源制度研究[D].武汉大学, 2005.
- [8]张正苹, 成自勇, 沈国云, 张芮.黄河流域向甘肃省可供水资源优化配置研究[J].华南农业大学学报, 2014, 35(02):105-109.
- [9]Ruth Lister. Water poverty[J]. The Journal of the Royal Society for the Promotion of Health,1995,115(2).
- [10]V. Komnencic,R. Ahlers,P. van der Zaag. Assessing the usefulness of the water poverty index by applying it to a special case: Can one be water poor with high levels of access?[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2008,34(4).
- [11]Elias Salameh. Redefining the Water Poverty Index[J]. Water International,2000,25(3).
- [12]Caroline Sullivan. Calculating a Water Poverty Index[J]. World Development,2002,30(7).
- [13]Lawrence P , Meigh J , Sullivan C . The Water Poverty Index: an International Comparison[J]. Development and Comp Systems, 2002.
- [14]Maggie Black. Anti-poverty and integrated water resources management.GWP-China Technical Advisory Committee Context Paper-8, December 2003, 1-33.
- [15]Cullis James,O Regan Dermot. Targeting the water-poor through water poverty

- mapping[J]. *Water Policy*,2004,6(5).
- [16]何栋材. 水贫困理论及其在内陆河流域的应用[D].西北师范大学, 2009.
- [17]Falkenmark M,Lundqvist J,Widstrand C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches. Aspects of vulnerability in semi-arid development.[J]. *Natural resources forum*,1989,13(4).
- [18]Junguo Liu,Hong Yang,Simon N. Gosling,Matti Kummu,Martina Flörke,Stephan Pfister,Naota Hanasaki,Yoshihide Wada,Xinxin Zhang,Chunmiao Zheng,Joseph Alcamo,Taikan Oki. Water scarcity assessments in the past, present, and future[J]. *Earth's Future*,2017,5(6).
- [19]Ricard Giné Garriga,Agustí Pérez Foguet. Improved Method to Calculate a Water Poverty Index at Local Scale[J]. *Journal of Environmental Engineering*,2010,136(11).
- [20]Janvier Kini. Inclusive water poverty index: a holistic approach for helping local water and sanitation services planning[J]. *Water Policy*,2017,19(4).
- [21]Luke Juran,Morgan C. MacDonald,Nandita B. Basu,Shane Hubbard,Raj Rajagopal,Prema Rajagopalan,Ligy Philip. Development and application of a multi-scalar, participant-driven water poverty index in post-tsunami India[J]. *International Journal of Water Resources Development*,2016,33(6).
- [22]Janvier Kini. Inclusive water poverty index: a holistic approach for helping local water and sanitation services planning[J]. *Water Policy*,2017,19(4).
- [23]Breeanna C. Prince,Luke Juran,Venkataramana Sridhar,Anamaria Bukvic,Morgan C. MacDonald. A statistical and spatial analysis of water poverty using a modified Water Poverty Index[J]. *International Journal of Water Resources Development*,2020.
- [24]曹建廷.水匮乏指数及其在水资源开发利用中的应用[J].*中国水利*, 2005(09):22-24.
- [25]何栋材, 徐中民, 王广玉.水贫困测量及应用的国际研究进展[J].*干旱区地理*, 2009, 32(02):296-303.
- [26]Saroj Koirala,Yiping Fang,Nirmal Mani Dahal,Chenjia Zhang,Bikram

- Pandey,Sabita Shrestha. Application of Water Poverty Index (WPI) in Spatial Analysis of Water Stress in Koshi River Basin, Nepal[J]. Sustainability,2020,12(2).
- [27]Jay Krishna Thakur,Mahesh Neupane,Anju Andezhath Mohanan. Water poverty in upper Bagmati River Basin in Nepal[J]. Water Science,2017,31(1).
- [28]Xia Tang,Qi Feng. The temporal–spatial assessment of water scarcity with the Water Poverty Index: a study in the middle basin of the Heihe River, northwest China[J]. Water Supply,2016,16(5).
- [29]张辉, 丁继新, 王继峰.水贫困指数在河西走廊三大内陆河流域的应用[J].人民黄河, 2012, 34(07):42-44.
- [30]曹茜, 刘锐.基于 WPI 模型的赣江流域水资源贫困评价[J].资源科学, 2012, 34(07):1306-1311.
- [31]Marie Wurtz,Alexandra Angeliaume,María Teresa Alarcón Herrera,Frédérique Blot,Martin Paegelow,Víctor Manuel Reyes. A spatial application of the water poverty index (WPI) in the State of Chihuahua, Mexico[J]. Water Policy,2019,21(1).
- [32]Masoud Jafari Shalamzari,Wanchang Zhang. Assessing Water Scarcity Using the Water Poverty Index (WPI) in Golestan Province of Iran[J]. Water,2018,10(8).
- [33]刘小鹏, 王可, 叶均艳, 温胜强.宁夏水贫困地域分异的 WPI-Geodetector 测度与分析[J].干旱区地理, 2018, 41(01):160-169.
- [34]李欢, 李景保, 王凯.湖南省水贫困与城市化水平测度及其时空耦合协调研究[J].水资源与水工程学报, 2019, 30(04):105-112.
- [35]Fernanda Lerner,Maria Inês Paes Ferreira. Assessment of Water Shortage in Rural Communities in the Surroundings of Integral Protection Conservation Units: Water Poverty Index in the João Batista Soares Settlement, Jurubatiba National Park, RJ, Brazil[J]. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego,2016,10(2).
- [36]Marko Kallio,Joseph H. A. Guillaume,Matti Kummu,Kirsi Virrantaus. Spatial Variation in Seasonal Water Poverty Index for Laos: An Application of

- Geographically Weighted Principal Component Analysis[J]. *Social Indicators Research*,2018,140(3).
- [37]杨玉蓉,张青山,邹君.基于村级尺度的农村水贫困评价——以常德澧县梅家港村为例[J].*生态经济*,2013(07):24-28.
- [38]杨玉蓉,张青山,邹君.南方丘陵区农村社区水贫困调查——以湖南省衡阳县礼梓村为例[J].*资源开发与市场*,2013,29(03):289-293.
- [39]杨玉蓉,张青山,邹君.基于村级尺度的湖南农村水贫困比较研究[J].*长江流域资源与环境*,2014,23(07):1027-1034.
- [40]Ladi Tahmineh,Mahmoudpour Asrin,Sharifi Ayyoob. Assessing impacts of the water poverty index components on the human development index in Iran[J]. *Habitat International*,2021,113.
- [41]Ane Pan,Darrell Bosch,Huimin Ma. Assessing Water Poverty in China Using Holistic and Dynamic Principal Component Analysis[J]. *Social Indicators Research*,2017,130(2).
- [42]Zoleikhaie Sayyar Leila,Naderi Mahdei Karim,Shabanali Fami Hossein,Motaghd Mahsa. Developing and Analyzing the Agricultural Water Poverty Index in West Iran[J]. *Sustainability*,2022,14(3).
- [43]Saroj Koirala,Yiping Fang,Nirmal Mani Dahal,Chenjia Zhang,Bikram Pandey,Sabita Shrestha. Application of Water Poverty Index (WPI) in Spatial Analysis of Water Stress in Koshi River Basin, Nepal[J]. *Sustainability*,2020,12(2).
- [44]孙冬营,刘新波,龙兴乐,张陈俊.基于 WPI 模型的中国水贫困时空异质性研究[J].*南京工业大学学报(社会科学版)*,2020,19(05):104-114+116.
- [45]高翔,王可.基于水贫困指数地理探测器的丝绸之路经济带甘肃段水贫困时空格局及驱动分析[J].*兰州大学学报(自然科学版)*,2019,55(03):290-297+304.
- [46]张宁宁,粟晓玲,周云哲,牛纪莘.黄河流域水资源承载力评价[J].*自然资源学报*,2019,34(08):1759-1770.
- [47]左其亭,张志卓,吴滨滨.基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J].*水资源保护*,2020,36(02):1-7.

- [48]汪伦焰, 黄昕, 李慧敏.基于 CW-FSPA 的黄河流域九省水资源承载力评价研究[J].中国农村水利水电, 2021(09):67-75.
- [49]彭祥, 胡和平.黄河水资源配置博弈均衡模型[J].水利学报, 2006(10):1199-1205.
- [50]范振林, 刘文敏.黄河流域水资源市场化配置思路与对策[J].国土资源情报, 2020(12):3-11.
- [51]张慧, 刘秋菊, 史淑娟.黄河流域农业水资源利用效率综合评估研究[J].气象与环境科学, 2015, 38(02):72-76.
- [52]刘华军, 乔列成, 孙淑惠.黄河流域用水效率的空间格局及动态演进[J].资源科学, 2020, 42(01):57-68.
- [53]张永凯, 孙雪梅.黄河流域水资源利用效率测度与评价[J].水资源保护, 2021, 37(04):37-43.
- [54]孙思奥, 汤秋鸿.黄河流域水资源利用时空演变特征及驱动要素[J].资源科学, 2020, 42(12):2261-2273.
- [55]严婷婷, 刘定湘, 颜霜, 郭姝姝.黄河流域“以水而定, 量水而行”的思考与建议——基于用水变化及驱动因素分析[J].水利发展研究, 2020, 20(10):54-58.
- [56]高孟菲, 于浩, 郑晶.黄河流域绿色水资源效率及空间驱动因素研究[J].生态经济, 2020, 36(07):44-50.
- [57]崔永正, 刘涛.黄河流域农业水资源全要素生产率测度及其影响因素研究[J].中国农村水利水电, 2021(06):126-129.
- [58]巩灿娟, 徐成龙, 张晓青.黄河中下游沿线城市水资源利用效率的时空演变及影响因素[J].地理科学, 2020, 40(11):1930-1939.
- [59]王淑贺.黄河流域水贫困时空分异及影响因素研究[J].人民珠江, 2021, 42(11):91-98.
- [60]谢朋轩.黄河流域蓝绿水资源、水足迹和水短缺评价[D].西北农林科技大学, 2021.
- [61]天水市统计局.天水发展五十年[M].北京: 中国统计出版社, 2000: 58-75.
- [62]安乐平, 李茹虹, 刘玉春, 张红红.天水市水资源现状及可持续利用探讨[J].水资源与水工程学报, 2008(03):109-112.

- [63]赵钰.浅析平凉市水资源管理现状[J].甘肃农业, 2021(04):96-99.
- [64]杨阳, 胡爱萍.庆阳市水资源现状及供需平衡分析[J].灌溉排水学报, 2018, 37(S1):100-103.
- [65]王茜茹. 临夏回族自治州水资源保护现状及其对策研究[D].西北民族大学, 2015.
- [66]杨帆, 赵庆云, 张武.甘南高原气候变化及对水资源的影响[J].干旱气象, 2012, 30(03):404-409.
- [67]朱喜安, 魏国栋.熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J].统计与决策, 2015(02):12-15.
- [68]冉启智, 廖和平.西南地区水贫困测度和空间格局分析——以重庆市为例[J].中国农业资源与区划, 2021, 42(11):109-120.
- [69]孙才志, 董璐, 郑德凤.中国农村水贫困风险评价、障碍因子及阻力类型分析[J].资源科学, 2014, 36(05):895-905.
- [70]吴永杰. 大连市水贫困评价与障碍因子分析[D].辽宁师范大学, 2018.
- [71]段耀峰.定西地区水资源及其可持续利用问题[J].甘肃农业, 2001(05):36-38.
- [72]鄂竟平. 坚持节水优先强化水资源管理[N]. 人民日报, 2019-03-22(012).

## 硕士期间发表的论文及参与的课题

### 一、发表的论文：

张永凯，孙雪梅.黄河流域水资源利用效率测度与评价[J].水资源保护，2021，37(04):37-43.

### 二、参与课题：

- 1.国家社会科学基金一般项目“全球化视角下我国区域创新系统的演化机制研究”（项目编号：15BGL208）。
- 2.兰州财经大学丝绸之路经济研究院 2017 年度科研项目“甘肃省农村贫困的空间演化及其影响因素研究”（项目编号：JYYY201701）。



## 后 记

光阴似箭，日月如梭，三年的硕士研究生求学即将结束。回想期间的学习和生活，面对培育我的母校，心中无限感慨。

首先，我要感谢我的导师张永凯教授，感谢三年来您对我的悉心教导，是您带我走进科研的大门。三年前，我初入师门，对很多事情都是一知半解，懵懵懂懂，了解不深，对我的论文研究方向更是毫无头绪、一筹莫展，但老师并没有批评责怪我，而是细心指导、耐心讲解，指引我找到了感兴趣的论文选题。老师学风严谨，在思考问题时讲究逻辑，在学术问题上注重细节，无不体现着老师的能力与智慧。老师不仅在学习生活中给予了我巨大帮助，还让我明白了很多做人做事的道理，让我的这三年受益匪浅，对我以后的学习和工作也将起到很大指导作用。在未来的日子里，希望老师身体健康，工作顺利，家庭幸福。同时，我还要感谢刘建国老师、石志恒老师、武翠芳老师、许静老师、苑莉老师以及其他曾给人口、资源与环境经济学任教的老师们，正是您们毫不保留地传授知识，才让我得以成长；感谢本专业以及经济学院的小伙伴们，我们曾为了一个目标而共同努力过；感谢同门的兄弟姐妹在学习生活中给予的关心和帮助；感谢同门同届的甄妮、杨万宝同学，这三年我们一起奋斗、一起努力；也同样感谢 709 的小伙伴们以及在日常生活中给予过我帮助的同学。谢谢你们，正是因为有你们，我的研究生生活才能够丰富多彩。由衷地希望大家能够在工作上事业有成、学习上心想事成、生活上顺心如意，开开心心过好每一天。最后要感谢的是我的家人朋友们，是你们在我迷茫时给予信心，在我焦虑时给予力量，你们的鼓励与支持让我克服了许多让我头大的挑战与难题。谢谢你们的包容与理解，希望大家都能够健康平安，幸福顺遂！

三年，在人生的旅程中不过短短一段，而它对我的教育意义却不只有三年。再次感谢在这三年中给予我关心与帮助的人，祝我们都能够永远心情愉快，事事如意！