

摘 要

本文以 2005—2020 年河南省及省辖 18 个地市水资源资料为基础，结合河南省水资源利用现状，利用水资源生态足迹模型，分析河南省水资源生态足迹、生态承载力及水资源生态压力等指标的时空分布特征，借助 ESTDA 模型对水资源生态足迹广度、深度和压力进行时间路径、时空跃迁动态分析，构建水生态足迹的 LMDI 因素模型，探索水资源利用的驱动因素，以为河南省水生态环境的绿色发展、建设和谐用水环境提供理论参考。主要研究结论如下：

(1) 时间分布上，研究期内，河南省水资源生态足迹、水质生态足迹及水量生态足迹总体呈波动上升趋势；农业、工业、城乡生活和生态环境用水生态足迹呈现波动变化趋势，历年平均占比为 55%、22%、23%，农业耗水比重大；研究期内，水资源生态承载力呈波动下降趋势，且受年降水量的影响大；生态足迹为赤字状态；水资源可持续指数低于 0.5，处于不可持续利用状态；空间分布上，人均水资源生态足迹北高南低，人均水资源生态承载力北低南高，除豫南地区有生态盈余外，省内其他地市研究期内均为生态赤字，省会郑州尤其突出；豫南和豫东地区水生态足迹广度大，豫西地区较小。

(2) LISA 时间路径和时空跃迁动态研究发现：水资源生态足迹广度、深度及水资源生态压力指数相对长度的空间分布存在重合。水资源生态足迹广度、深度及压力弯曲度均大于 1，存在较强的空间依赖性。水资源生态足迹广度、深度及水资源生态压力的时间路径的平均弯曲度依次上升，表明局部空间结构在空间依赖方向上的波动性增大。广度、深度、压力在研究期内没有明显的时空跃迁，属于 Type₀ 型跃迁，莫兰散点大多始终位于同一象限内，空间聚集性强，稳定性高。

(3) 研究期内，经济效应对水生态足迹增长正向驱动效果明显，技术效应则起到抑制作用，结构效应和人口效应对水资源足迹增长起到促进作用。

关键词：水资源生态足迹；ESTDA；时空跃迁；LMDI；河南省

Abstract

Water is a strategic resource for social development. With the development of society and the increase of population, the demand for water resources has increased dramatically, and most provinces in China are facing the problem of water shortage. Henan Province, as a large agricultural and population province, has a large demand for water resources and an outstanding contradiction between supply and demand. Therefore, it is important to clarify the real occupation status of water resources and promote the coordinated development of water resources utilization and economy to ensure the high-quality development of Henan Province. Based on the water resources data of Henan Province and 18 municipalities under the jurisdiction of Henan Province from 2005 to 2020, this thesis analyzes the spatial and temporal distribution characteristics of water resources ecological footprint, ecological carrying capacity and water resources ecological pressure in Henan Province by using the water resources ecological footprint model, and analyzes the water resources ecological footprint breadth, depth and pressure in Henan Province with the help of ESTDA model. The study also analyzes the temporal path and spatial and temporal leap dynamics of water ecological footprint, constructs the LMDI factor model of water ecological footprint, and explores the driving factors of water resources utilization in order to provide theoretical reference for the green development of water ecological environment and the construction of harmonious water use environment in Henan Province. The main research findings are as follows:

(1) In terms of time distribution, during the study period, the ecological footprint of water resources, water quality ecological footprint and water quantity ecological footprint of Henan Province showed an overall fluctuation and upward trend. The ecological footprint of water in agriculture, industry, urban and rural life and ecological environment showed a fluctuating trend, with the average proportions of 55%, 22% and 23% over the years, and the proportion of agricultural water consumption was significant. During the study period, the ecological carrying capacity of water resources showed a fluctuating downward trend and was greatly affected by annual precipitation. The ecological footprint was in deficit, and the water resources sustainability index was less than 0.5, which was in

an unsustainable state of use. In terms of spatial distribution, the per capita water resources ecological footprint was high in the north and low in the south, the per capita ecological carrying capacity of water resources was low in the north and high in the south, except for the ecological surplus in the southern Henan region, other cities in the province were ecological deficits during the study period, especially in the provincial capital Zhengzhou. The water ecological footprint in southern and eastern Henan was large, and the western part of Henan was small.

(2) The LISA time path and spatio-temporal leap dynamics study found that the distributions of water resources ecological footprint breadth, depth and water resources ecological pressure index relative to length overlap. The water resources ecological footprint breadth, depth and pressure curvature are all greater than 1, and there is a strong spatial dependence. The average curvature of the temporal paths of the water resources ecological footprint breadth, depth and water resources ecological pressure in Henan Province increases sequentially, indicating that the fluctuation of the local spatial structure in the direction of spatial dependence increases. The breadth, depth and pressure have no obvious spatio-temporal leap during the study period and belong to Type₀ type leap, and the Moran scattering points are always located in the same quadrant with spatial aggregation and high stability.

(3) During the study period, the economic effect on the growth of water ecological footprint was obvious, the technical effect played a suppressive role, and the structural effect and population effect played a role in promoting the growth of water footprint.

Keywords: Ecological footprint of water resources; ESTDA; Spatio-temporal leap; LMDI; Henan Province

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与研究意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 研究内容及技术路线.....	6
第 2 章 研究区概况与研究方法	8
2.1 研究区概况.....	8
2.2 研究方法.....	11
2.3 数据来源.....	19
2.4 相关参数确定.....	19
第 3 章 河南省水资源生态足迹时空特征	21
3.1 河南省水生态足迹年际变化	21
3.2 河南省各市水资源生态足迹空间差异分析	32
3.3 本章小结.....	41
第 4 章 河南省水资源生态足迹时空动态格局	42
4.1 全局空间自相关.....	42
4.2 LISA 时间路径分析.....	43
4.3 LISA 时间路径移动方向分析.....	46
4.4 LISA 时空跃迁分析.....	47
4.5 本章小结.....	48
第 5 章 河南省水资源生态足迹驱动因素分析	50
5.1 LMDI 模型驱动因素分析	50
5.2 河南省水资源利用建议.....	52
5.3 本章小结.....	54
第 6 章 结论与展望	56
6.1 结论.....	56
6.2 特色与创新点.....	57
6.3 不足与展望.....	58
参考文献.....	59

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

水是人类生存发展不可或缺的重要资源，社会经济的快速发展和人口的增加，对水资源的需求量逐渐增加，导致各地区水资源面临着资源短缺、污染严重、水资源生态恶化等问题。2022 年召开的第九届世界水论坛以“水安全促进和平与发展”为主题，旨在促进实施关于水及环境卫生的具体对策与行动。中国是水资源严重缺少的国家，相关统计显示，中国人均水资源量仅为世界平均水平的 1/4^[1]。基于中国水资源总量少，时空分布不均匀的总体特点^[2]，须要对我国区域水资源利用现状进行研究。

河南省地跨长江、淮河、黄河、海河四大流域，担负着长江经济带、黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略^[3]。作为农业大省，河南省面积广阔，人口众多，但是全省多年平均水资源总量仅为 403.5 亿 m^3 ，居全国第 19 位，全省年平均降水量仅 500—900 mm，人均水资源占有量约 383 m^3 ，低于国际人均 500 m^3 的水资源标准，属于极度缺水地区^[4]；全省水资源时空分配不均，水资源总量豫南地区大于豫北地区，山区大于平原地区^[5]，而且，全省人口的分布与水资源的分布不匹配，水资源紧缺、供需矛盾更加突出。全省农业用水、工业用水、居民生活用水、生态环境用水利用不合理，水资源污染严重，社会发展及生态环境各方面面临挑战，习近平总书记在郑州召开的黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上提出，“要坚持以水定城、以水定地、以水定人、以水定产，把水资源作为最大的刚性约束”^[6]。如何以有限的水资源保障经济社会的可持续发展是当前重要的研究课题。因此，厘清水资源真实占用状况，可以促进水资源的合理利用，对保障河南省高质量发展具有重要意义。

1.1.2 研究意义

(1) 理论意义

水资源生态足迹模型广泛应用于社会生态环境等多个领域的生态足迹研究中，本文对水资源生态足迹的相关理论进行整理，将三维水资源生态足迹模型与 ESTDA

模型相结合，分析河南省水资源的时空分布特征，并对水资源生态足迹广度、深度及压力进行时间路径和时空跃迁分析，充实了我国水资源生态足迹的研究内容。

(2) 现实意义

河南省地处我国中部地区，不仅是我国的农业大省，还是我国重要的交通枢纽中心。由于水资源总量的有限性，因此需要厘清河南省水资源的利用状况。本文分别从省域和市级视角，计算河南省 2005—2020 年水资源生态足迹、水资源生态承载力、广度、深度及压力等指标，分析河南省水生态足迹时空分布特征，并针对水资源存在的问题提出建议，为河南省水资源管理提供理论支持。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 生态足迹研究

社会的发展演化过程中，伴随着人口的增加，科学技术水平的提高，同时也会导致资源短缺、环境污染等问题，社会发展面临着严酷的挑战^[7]。如何合理分配和使用资源，使其与社会发展相匹配，一直是人类需要解决的问题，其中最基础的研究课题是对自然资源进行有效的利用和评估^[8]。生态足迹(Ecological Footprint, EF)是加拿大生态经济学家 William Rees 在 1992 年提出，并于 1996 年与 Wackernagel 对模型加以完善^[9,10]，生态足迹可以衡量人类对生态系统造成的压力，量化资源利用率，并反映人类对自然环境的胁迫状况。根据生产力的差异将生物生产性土地面积划分为六种：林地、耕地、水域、牧草地、建设用地和化石能源用地，计算它们与生态承载力的差值，进而评价区域可持续发展的模型。为了能够厘清人类消费和生物承载力的可能关系，William Rees 和 Wackernagel 计算出 52 个地区及国家的生态足迹^[11,12]。生态盈余/赤字就是生态足迹与生态承载力的差值，用来衡量区域可持续发展现状^[11]；区域提供给人类最大的生态生产性土地面积为生态承载力^[9]；万元 GDP 生态足迹用来判断区域资源的利用效率^[12]。由于生产力水平的不同，各类生物生产性土地单位面积存在差异，在使用生态足迹进行的过程中，需要给各类生物生产面积乘一个系数，就是均衡因子，以转化为可以相互比较的生产性面积^[13]，由于资源状况、社会条件、气候、地域背景等存在差异，六类基本生态生产性土地之间、同类型土地间的生产力也存在差异。所以，需要使用一个换算系数也就是产量因子对不同区域同类生物生产性土地面积进行标准化处理^[14]。生态足迹模型计算简单便捷^[15-20]，对研究区域及领域适用性强，形成了诸多方面的研究成果。生态足

迹与生态承载力紧密相关,国外对承载力及生态足迹的研究较多^[21-25]。伴随着社会经济的发展,生态足迹在经济和旅游方面的研究比较多^[26-30],涉及经济与生态环境的关系、旅游在生态足迹质量中的作用、旅游对生态足迹的影响等方面的研究。

国外对生态足迹的研究不断发展进步,涉及的层面有以国家尺度、城市尺度、甚至单个家庭为单位的不同层面。在国家尺度上,Meidad等^[31]通过以以色列为研究区,研究测算了近20年小麦消费生态足迹。Marti等^[32]根据生态足迹和人口数据,研究非洲45个国家的环境效率。Baz等^[33]探究了能源消耗和经济增长对巴基斯坦生态足迹的影响。Fang等^[34]将生态足迹扩展到三维模式,用于衡量人类引起的自然资本占用。Shterionov等^[35]从神经机器翻译模型的训练和推理开始,论述神经机器翻译系统的生态足迹。Dada等^[36]研究了1984—2017年马来西亚的金融发展与生态足迹关系。在城市尺度上,Pannunzio等^[37]对2010—2017年阿根廷恩特雷奥斯省的三个品种蓝莓生态足迹进行研究;Ferrero等^[38]对阿根廷地区的柠檬生态足迹进行了研究,研究弥补了有关柠檬行业可持续性的知识空白;Gallia^[39]以墨西哥城市为研究区,论述了生态足迹核算的基本原理和政策效用。

生态足迹模型在1999年被徐中民、张志强等^[40]引入中国,该模型通过对地区或国家的可持续发展进行测算,比较某区域人们对自然资源的消耗是否超过自然资源的承载能力,判断和分析此区域的可持续发展状况。生态足迹在我国应用发展起来,进行不同尺度的研究,如郭秀锐等^[41]以广州为例把生态足迹理论引入到具体的城市,计算了广州市的生态足迹。学者们不断改进生态足迹方法^[42-45],并用改进后的方法进行了多方面的研究。Wu等^[46]利用生态足迹理论对中国资源型城市城镇化过程中不同尺度的生态可持续性进行估算。Lee^[47]根据台湾省的统计数据库,计算2018年台北的混合生态足迹。付秀梅等^[48]基于科学知识图谱,对生态足迹研究演进、框架前沿作中外比较叙述。

1.2.2 水资源生态足迹研究

生态足迹是分析资源是否存在被过度利用情况的工具,广泛应用于不同的研究方向。水资源生态足迹是生态足迹在水资源研究领域的应用。范晓秋^[49]在Wadcmengel提出的生态足迹基础上进行了创新性的研究,将水资源账户引入到生态足迹中,完善了生态足迹在水资源研究方面的缺失,使水资源生态足迹模型在国内外得到学者们的广泛应用。

经过国内外学者的研究,水资源生态足迹已趋向成熟,有关水生态足迹的研究

多集中于国家^[50]、省区^[51]、城市^[52,53]等尺度。如, Hoekstra^[54]提出了水足迹的概念, 从新视角进行讨论说明建立水足迹基准的必要性, 并测算和衡量了世界各国的水足迹。Jenerette 等^[55]在城市淡水供应中将生态足迹与生态系统估值联系起来, 估算美国 33 个城市的水资源状况为赤字状态。Chapagain 等^[56]核算了全球水稻水足迹, 研究是对世界水足迹研究的进一步完善。Jackson^[57]从生态足迹角度, 计算世界粮食援助的生态足迹, 研究结果表明美国是最大的食物援助贡献国, 接受食物援助而带来水足迹最多的国家多分布在非洲。Ansorge 等^[58]运用水足迹理论计算捷克共和国的灰水足迹。Gallo 等^[59]认为目前关于食物的研究忽略个性化的食物推荐, 从水足迹角度出发对食物进行研究。

国内对水资源生态足迹的研究有以下特点。从研究尺度看, 研究尺度具有多元化的特点。从国家尺度到省市县等小尺度, 还有不同尺度地区的生态足迹的对比研究。从国家尺度来看, 徐中民等^[60]研究了我国 1999 年的生态足迹, 并表明我国大多省份存在生态赤字且地区间差异明显; 并基于国外生态足迹研究^[61], 发现模型中欠缺问题并给出建议。谭秀娟等^[62]采用 ARIMA 模型全面研究了我国水资源生态足迹状况, 研究结果表明我国处于不安全的状态。刘某承等^[63]对年我国 1949—2008 年人均生态足迹和承载力进行研究, 在此基础上建立一个非线性的动态预测模型, 进行长时间的模拟验证, 并根据我国人均生态足迹情况提出发展建议。在省域尺度上, 刘子刚^[64]初步界定水资源生态承载力的内涵, 对湖州市的水生态足迹进行研究, 得出湖州市处于健康的状态。丁华等^[65]对上海市等地区的水资源生态足迹进行研究。左其亭等^[66]运用生态足迹模型, 计算黄河沿线九省区的水资源生态足迹的时空分布特点, 结果表明各省市水资源生态足迹存在的差异较大。刘宁^[67]以京津冀为研究区, 核算在 1994—2013 年五个部门水足迹, 通过分析找出水资源优化配置的最佳方案。

从研究方法看, 水资源生态足迹的研究方法不断改进和创新。任志远等^[68]提出水资源压力指数, 衡量区域水资源生态安全程度。孙才志等^[69]对水资源流量和存量资本进行区分, 引入对水足迹广度与深度的测算。张智雄等^[70]把水生态足迹与灰水足迹结合, 测算中国各省市的人均灰水生态足迹变化的驱动因素。王刚毅等^[71]改进了水生态足迹模型, 计算中原城市群水量和水质生态足迹, 研究区域经济发展与水环境协调关系。Li^[72]等研究采用固定效应回归模型, 利用 2006—2018 年长江经济面板数据, 并对区域的可持续发展提供建议。

通过对水资源生态足迹的研究现状分析可知, 当下国际社会对水资源生态足迹的研究多, 研究结果发现国际国内普遍存在水资源利用不当、水资源短缺等问题。借助水资源生态足迹对区域水资源进行评价是研究水问题的较好切入点。

1.2.3 水资源利用评价研究

随着水资源可持续理念的提出，人们越来越重视对水资源利用的评价研究。许多学者将水资源利用评价作为自己的研究课题，从水资源分布现状、水资源消耗、水资源保护等方面入手，分析目前水资源面临的现状，寻找缓解水资源生态现状，保护水资源的方法途径，以适应全球水资源保护利用的要求。

对水资源利用评价的研究多集中在以下几个方面：碳水足迹的评价研究^[73,74]、水土资源结合的评价研究^[75-79]、水资源足迹评价的研究^[80,81]等方面。研究尺度涵盖了国家^[82-86]、流域区^[87-92]、省区^[93-95]、市域^[96-101]等不同尺度的评价分析。河南省水资源在水资源研究评价上研究众多，研究多集中在对水资源短缺^[102]、水资源利用管理^[103]、水资源与经济评价^[104]等方面。研究多为对全省、某市或城市群水资源承载力^[105,106]进行评价。如：王富强等^[107]以郑州市为研究对象，对 2013 年郑州市水生态文明城市建设现状进行评价。陈海涛等^[108]对河南省 2008—2017 年水资源承载力进行评价，安强等^[109]对河南省中原城市群 10 个城市的水资源承载力进行评价，刘明洋^[110]对 2011—2015 年周口市的水资源承载力进行评价，李小萌^[111]对郑州市 1998—2013 年的水资源承载力进行评价，杜华民^[112]对河南省 18 个地级市 2011 年的水资源承载力进行评价。贾璐璐等^[113]结合残差灰色—马尔可夫耦合模型，预测 2016—2025 年河南省的水生态足迹和水生态承载力，得出水生态承载力的变化与降雨量密切相关。李友光等^[114]将能值理论与水生态足迹相结合，对 2008—2018 年河南省水资源可持续利用进行分析评价。

现有关于河南省水资源生态足迹的研究一般以省为研究区，或者研究单个地市或城市群，一般以年份为尺度，研究水资源生态足迹的某些指标，如产量因子用河南省的数据，没有具体计算各地市具体产量因子，河南省南北东西跨度大，受地形影响，不仅在时间上有变化，在空间上变化更大，基于此，为更好分析河南省及各地市水资源生态足迹的时空动态趋势，本文在计算各地市产量因子的基础上，以河南省总生态足迹（时间）、各市生态足迹（空间）为基础进行研究，运用 Rey 等^[115]提出的 ESTDA 模型，通过运用 LISA 时间路径、LISA 时空跃迁等方法，从空间和时间耦合的角度研究河南省水资源足迹的时空动态性，从自然资源、社会经济、技术水平和生态环境等 4 个方面探究河南省水资源生态足迹的驱动因素，并针对河南省水资源存在的问题提出建议，以期为其他区域的研究提供理论参考。

1.2.4 研究述评

水资源生态足迹的研究范围广阔,包含生态足迹模型的应用、理论完善的研究,研究方法不断革新,及水资源利用评价等多方面。

在模型应用方面,生态足迹模型应用不仅包含生态足迹的测算、生态承载力的核算、还有生态评价指标体系(生态盈余/赤字、万元 GDP 生态足迹、压力指数、可持续指数等)、LMDI 模型、ARIMA、BP 神经网络、LCA、ESTDA 等模型的应用,模型种类多,应用领域广。

在理论方面,主要包含两方面:水资源生态足迹、水足迹研究,它们的基本原理和计算思想都是受到生态足迹模型的启示,不同的是研究的侧重点,水资源生态足迹是以研究人类对资源的利用状况为重点的研究,而水足迹侧重于消费、贸易与水之间的研究。国外对水资源的研究更倾向于水足迹分析,国内则是对水资源生态足迹和水足迹均有研究,本论文基于水资源生态足迹对河南省进行研究。

在生态足迹评价方面,对不同地区进行的评价有差别,比如对水资源生态足迹的评价从区域存量开始测算,评价地区水资源的足迹、广度、深度及压力等指标,目前的研究特别注意与当地的社会经济发展相适应。进行比较热门的碳足迹的研究、土地资源的研究、旅游业生态足迹的研究、食物足迹等的研究。

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 研究内容

本文根据河南省水资源利用特点,在借鉴、利用已有研究理论成果和方法的基础上,开展研究工作,主要研究内容如下:

(1)水资源生态足迹时空特征分析:运用三维水生态足迹模型分析河南省及 18 个地市水资源生态足迹、水生态承载力、水生态足迹广度、深度、水资源生态盈余/赤字、万元 GDP 足迹、水资源生态压力、可持续性指数的变化情况;分析河南省 18 个地市的水生态足迹、承载力、广度、深度及水资源生态盈亏的空间分布特征。

(2)水资源生态足迹与生态压力的时空动态分析:基于 ESTDA 模型,通过全局、局部空间自相关的方法,运用 LISA 时间路径和 LISA 时空跃迁的方法分析河南省水资源生态足迹广度、深度和压力的空间的关系、格局、变迁等特征。

(3)水资源生态足迹驱动因素分析:构建河南省水资源生态足迹的 LMD 因素分解模型,分析结构效应、技术效应、经济效应和人口效应对水生态足迹的驱动力,探讨影响生态足迹变化的因素;并针对河南省水利用存在的问题给出具体的建议。

1.3.2 技术路线

本文的技术路线如图 1-1 所示。

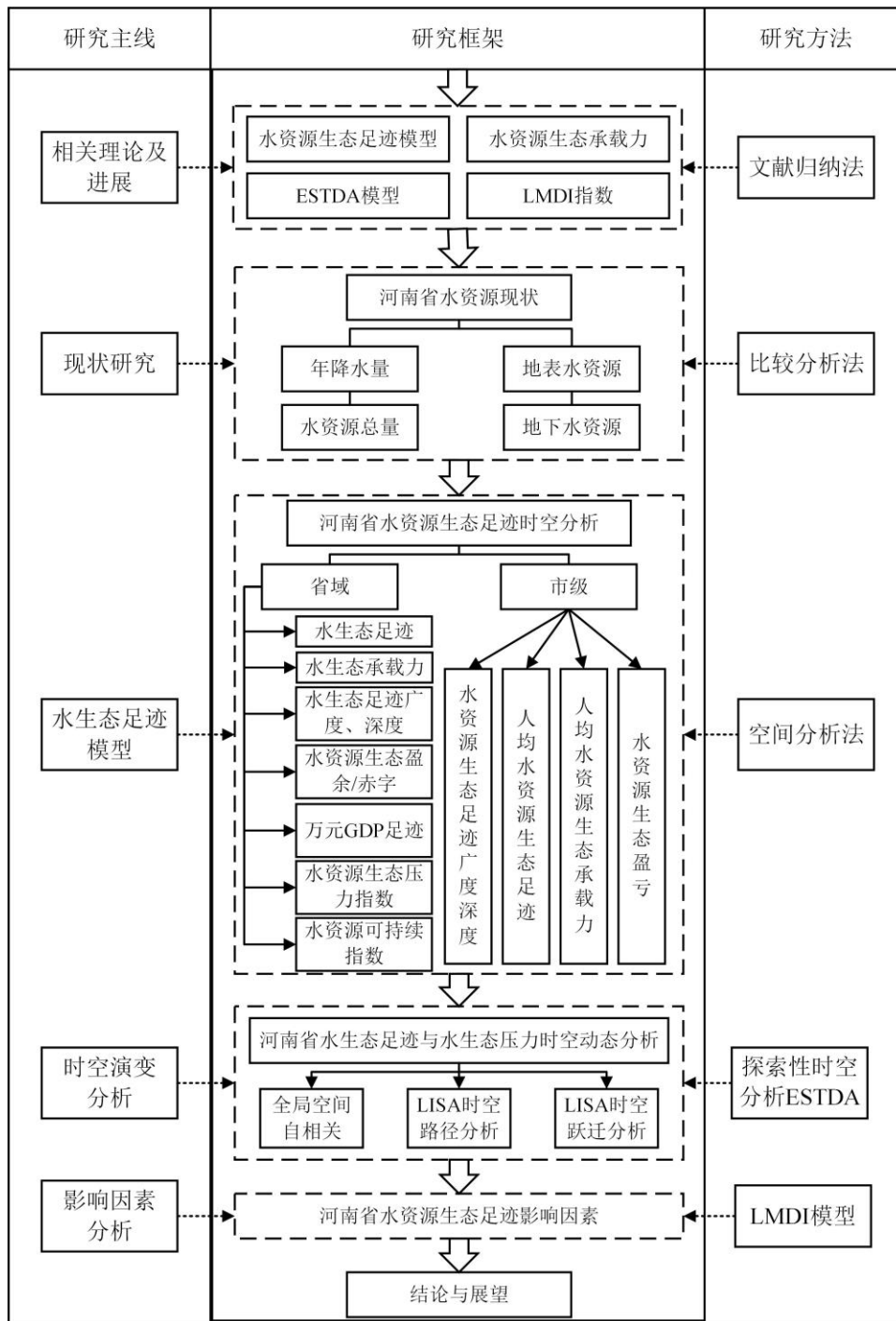


图 1-1 技术路线图

第 2 章 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

2.1.1 自然状况

河南省位于东经 110°21'~116°39', 北纬 31°23'~36°22' 之间 (图 2-1), 地处我国中部偏东、黄河中下游地区, 与河北省、山东省、安徽省、湖北省、陕西省、山西六省接壤, 全省总面积 16.7 万 km^2 ^[116,117], 占全国总面积的 1.73%。地势西高东低, 北、西、南三面太行山、伏牛山、桐柏山、大别山沿省界呈半环形分布, 中东部为黄淮海冲积平原, 西南部为南阳盆地, 西部为豫西山地, 东南部为大别山区。全省平原和盆地面积约 9.3 万 km^2 ^[109], 约占全省总面积的 55.7%, 山地和丘陵面积约 7.4 万 km^2 , 约占全省总面积的 44.3%。

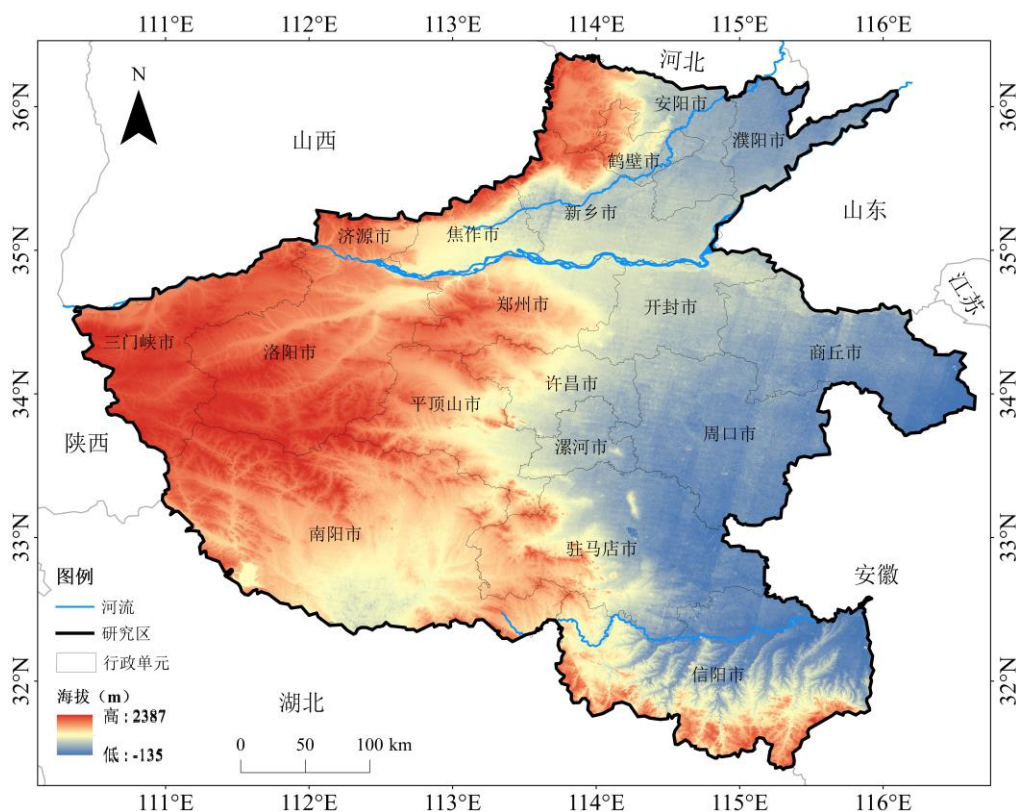


图 2-1 研究区概况图

本省大部分地区地处暖温带^[116,117], 南部跨亚热带, 属北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候, 具有四季分明、雨热同期、复杂多样的特点, 由南向北平均气

温为 15.7~12.1℃, 年均降雨量 1380.6~532.5 mm, 降雨以 6—8 月份最多, 年均日照 1848.0~2488.7 h, 南部及西部山区降水较多, 东南部大别山区可达 1100 mm 以上, 全省全年降水量约 50%集中在夏季^[117]。

2.1.2 社会经济状况

河南省地处沿海开放地区与中西部地区的结合部, 是我国经济由东向西梯次推进发展的中间地带。管辖郑州市、开封市、洛阳市、平顶山市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市、濮阳市、许昌市、漯河市、三门峡市、南阳市、商丘市、信阳市、周口市、驻马店市、济源市 18 个地级市^[111,116,117]。河南省覆盖区域范围大, 人口集中。截至 2020 年^[109], 河南省常住人口 9941 万人, 人口密度为每平方公里 595 人, 城镇人口 5510 万人, 农村人口 4431 万人。河南省城镇化率增长较快, 在 2020 年达到 55.43%^[109], 2020 年末河南省的地区生产总值 54997.07 亿元^[109,116,117], 比上年增长 1.3%, 经济总量全国第五位, 第一产业增加值 5353.74 亿元, 增长 2.2%; 第二产业增加值 22875.33 亿元, 增长 0.7%; 第三产业增加值 26768.01 亿元, 增长 1.6%。研究时间内河南省 GDP 增长速度。全省粮食总产量 1365.16 亿斤, 创历史新高。工业生产逐步恢复, 规模以上工业增加值增长 0.4%。服务业稳步复苏, 全年服务业增加同比增长 1.6%, 成为拉动经济增长的主要力量, 2020 年全省财政总收入 6267.39 亿元。其中一般公共预算收入 4155.22 亿元、增长 2.8%, 居民人均可支配收入 24810.1 元, 增长 3.8%。

2.1.3 水资源状况

河南省地跨长江、淮河、黄河、海河四大流域^[116], 省内河流大多发源于西部、西北部和东南部山区, 流域面积 100 km² 以上的河流有 560 条, 全省多年平均水资源总量 405 亿 m³, 居于全国第 19 位, 人均水资源占有量不足 420 m³, 相当于全国平均水平的 1/5。基于水资源匮乏的现状, 本文对河南省水资源的现状进行深入的分析。

(1) 降水量

2020 年河南省的年降水量为 874.3 mm (表 2-1), 较 2019 年增加了 65.2%, 较多年均值降水量 (771.1 mm) 偏多 13.4%, 属于偏丰年份^[110]。由表 2-1 可知, 2005—2020 年, 河南省年降水量变化较大, 最大为 2005 年的 905.8 mm, 最小值为 2019 年的 529.1 mm。

表 2-1 河南省 2005—2020 年年降水量和水资源总量

年份	年降水量/mm	水资源总量/亿 m ³
2005	905.8	558.6
2006	714.7	321.8
2007	787.0	465.2
2008	738.1	371.3
2009	753.8	328.8
2010	841.7	534.9
2011	736.2	327.9
2012	605.2	265.5
2013	576.6	215.2
2014	725.9	283.4
2015	704.1	287.2
2016	787.1	337.3
2017	827.8	423.1
2018	755.0	339.8
2019	529.1	168.9
2020	874.3	408.6

由图 2-2 可知，全省 18 个地市 2020 年降水量与多年均值相比，偏多的区域主要分布于豫东、豫南及豫西南，其中信阳市多 41.9%，增幅最大；其次商丘市偏多 30.7%，周口市偏多 23.1%，驻马店、漯河、南阳 3 个市偏多 20~10%之间。降水量偏少的区域主要分布于豫北、豫西及中部，其中鹤壁市偏少 19.0%，减幅最大；其次济源市偏少 11.9%。安阳、三门峡、郑州 3 个市偏少 9.9~6.8%之间；降水量基本持平的区域主要为平顶山、焦作 2 个市。

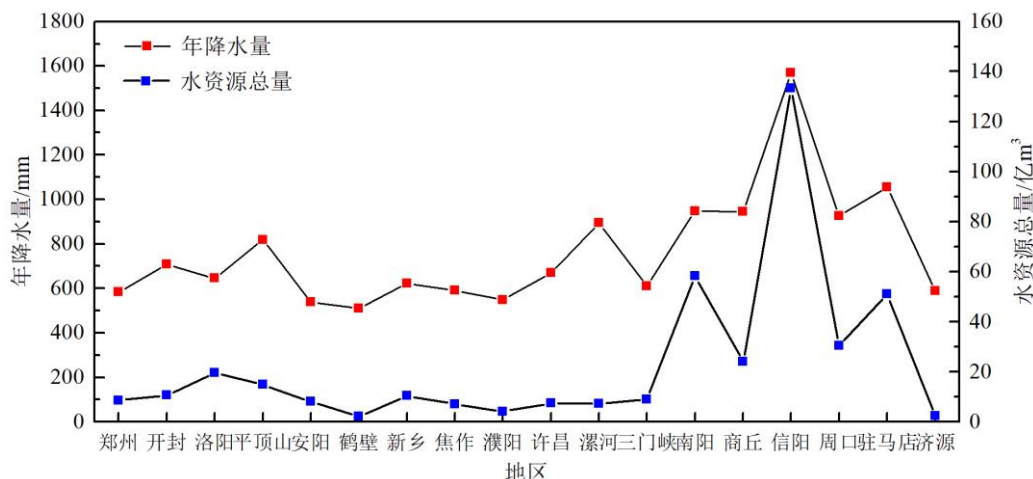


图 2-2 河南省 2020 年各市年降水量及水资源总量变化趋势图

(2) 地表水资源量

2020 年全省地表水资源量为 294.85 亿 m^3 ，折合径流深 1781 mm，比多年均值（304.0 亿 m^3 ）偏少 3.0%，比上年度偏多 178.7%。省辖海河流域地表水资源量 7.12 亿 m^3 ，比多年均值偏少 56.5%；黄河流域 29.50 亿 m^3 ，比多年均值偏少 35.2%；淮河流域 210.62 亿 m^3 ，比多年均值偏多 18.1%；长江流域 47.61 亿 m^3 ，比多年均值偏少 26.0%。

全省各市级行政区地表水资源量与多年均值相比，鹤壁市、安阳市偏少 60% 以上，其中偏少最多的鹤壁市偏少 72.6%；郑州、洛阳、新乡、濮阳、三门峡等 5 个市偏少幅度在 30%~50% 之间；平顶山、焦作、许昌、漯河、南阳、周口、驻马店、济源等 8 个市偏少幅度在 30% 以内；信阳、开封、商丘等 3 个市较多，年均值明显偏大，其中偏大最多的信阳市偏多 55.1%。

(3) 地下水资源量

2020 年全省地下水资源量 189.37 亿 m^3 ，地下水资源模数平均 11.44 万 m^3/km^2 。其中山区丘陵 63.40 亿 m^3 ，平原区 136.44 亿 m^3 。全省地下水资源量比多年均值减少 3.4%，比 2019 年增加 58.5%；省辖海河、黄河、淮河、长江流域地下水资源量分别为 17.19 亿 m^3 、32.16 亿 m^3 、116.99 亿 m^3 、23.03 亿 m^3 。

(4) 水资源总量

2005—2020 年河南省水资源总量变化情况（图 2-2），水资源总量呈波动下降趋势，最大值为 2005 年的 558.6 亿 m^3 ，最小值为 2019 年的 168.9 亿 m^3 。2020 年全省水资源总量为 408.59 亿 m^3 ，其中，地表水资源量 294.85 亿 m^3 ，地下水资源量 189.37 亿 m^3 。水资源总量比多年均值增加 1.3%，比 2019 年增加 141.9%。

由图 2-2 可知，与多年均值比较，大部分市级行政区水资源总量不同程度减少，其中三门峡市减幅最大达 44.2%，鹤壁、安阳、郑州、洛阳、新乡、濮阳、济源、平顶山、许昌、南阳、开封、焦作等市减幅在 6.9%~43.9% 之间。信阳、商丘、周口、漯河、驻马店等市有不同程度增加，其中信阳市增幅最大达 50.5%，其余增幅在 3.1%~21.4% 之间。

2.2 研究方法

由生态足迹的基础上发展而来的水资源生态足迹，具有直观具体、操作性强、具有可比性强等优点，成为评估区域水资源状况的重要指标。本文基于三维水资源生态足迹模型，分析河南省水资源生态足迹（水量、水质）、水资源生态承载力、

万元 GPD 水资源生态足迹、水资源生态压力、水资源生态盈余/赤字、水资源广度、深度以及水资源可持续指数的变化状况，研究其时空特征。

2.2.1 水资源生态足迹模型

根据 Wackernagel 的生态足迹模型，水资源账户用来描述区域水资源状况，将消耗的水资源量转化为相应帐户的生产面积即水资源用地面积，水资源生态足迹由水量生态足迹、水质生态足迹以及水产品生态足迹（囿于数据限制，水产品数据无法计算，本文暂不考虑）组成，分别表示人类生产生活对水资源的消耗和将污染物稀释至某标准的水资源消耗^[83,118]。

根据谭秀娟等^[62]的研究及河南省水资源利用情本，具体公式如下：

$$WEF = WEF_{wv} + WEF_{wq} \quad (2-1)$$

$$WEF_{wv} = N \times w_{efw} = y \times (WF/W) \quad (2-2)$$

$$WEF_{wq} = \gamma \times \max[EF_{COD}, EF_{NH_3}] = \gamma \times \max\left[\frac{L_{COD}}{C_{COD}}, \frac{L_{NH_3}}{C_{NH_3}}\right] / w \quad (2-3)$$

式中^[83]， WEF 、 WEF_{wv} 、 WEF_{wq} 分别为区域水资源生态足迹总量 (hm^2)、水量生态足迹 (hm^2) 及水质生态足迹 (hm^2)； N 为人口， w_{efw} 表示人均水资源生态足迹； WF 表示区域水资源总量 (m^3)； γ 、 w 表示水资源均衡因子和水资源平均生产能力； EF_{COD} 、 EF_{NH_3} 分别表示区域 COD、 NH_3 的水生态足迹 (hm^2)。

2.2.2 水资源生态承载力模型

本文基于水资源生态承载力模型来定量分析水资源生态承载力，参照已有研究成果^[69]，为了达到生态环境的可持续发展，一个国家或地区的水资源开发利用率超过 30%~40% 将引起生态环境恶化，必须扣除 60% 来确保生态环境良性循环。其计算公式为：

$$W_{ECw} = 0.4 \times \varphi \times Y_w \times Q/P_w \quad (2-4)$$

式中， W_{ECw} 为水资源生态承载力 (hm^2)； φ 区域水资源的产量因子， Y_w 为水资源全球均衡因子； Q 为水资源总量 (m^3)； P_w 为水资源全球平均生产能力 (m^3/hm^2)^[83]。

2.2.3 三维水资源生态足迹模型

三维水资源生态足迹模型从横向和纵向角度来表征水资源生态足迹与自然环
境之间的联系^[69]，生态系统可以提供的自然资源和生态服务统称为自然资本，根据
其属性，可分为存量资本和流量资本两部分^[119,120]。人类对自然资本流量的占用水
平称为足迹广度（横向）^[121,122]，水生态足迹广度代表人类社会发展对水资源流量资
本的占用情况。结合 Hicks 经济学理论角度来看，财富总量并不会随资本流动而减
小，自然资本的流动意味着生态发展的可持续^[123]。生物圈可提供的自然资本流量
的上限为生物承载力^[124]，所以水生态承载力水平是水资源可提供的流量资本的上限，
根据生态足迹研究文献^[120]，水生态足迹广度计算公式：

$$EF_{ws} = \min[WEF, W_{ECw}] \quad (2-5)$$

式中， EF_{ws} 为区域水生态足迹广度， $0 < WEF \leq W_{ECw}$ 。

人类对自然资本存量的消耗程度用足迹的深度来表示（纵向）^[69,120]，水生态足
迹深度代表了人类社会经济发展消耗的水量对水资源存量资本的消耗程度。参照生
态足迹深度研究文献推导出水生态足迹深度测算公式：

$$EF_{wd} = 1 + \frac{\max[WEF - W_{ECw}, 0]}{W_{ECw}} \quad (2-6)$$

式中， EF_{wd} 为区域水生态足迹深度。进一步分析，水生态足迹深度分为自然深
度和附加深度两部分^[69,120]。即：

$$EF_{wd} = EF_{wd}^N + EF_{wd}^A \quad (2-7)$$

式中， EF_{wd}^N 为区域水生态足迹自然深度，参照方恺^[69,119]对生态足迹深度的研
究，本研究中取水生态足迹自然深度值恒为 1， EF_{wd}^A 为区域水生态足迹的附加深度。
由公式 (2-6)、(2-7) 可知， $EF_{wd} \geq 1$ 。其中，当 $EF_w \leq EC_w$ 时，表明该区域仅有自然
深度，该区域的水资源流量资本可以满足自身发展的需求，故 $EF_{wd}=1$ ；而当 $EF_w >$
 EC_w 时，该区域的水资源流量资本已经无法满足人类的需求，需要动用社会存量资
本，故 $EF_{wd} > 1$ 。流量资本维持着年际可再生资源流及其生态服务的供给，在其不
足时，存量资本将作为补充而被消耗^[124]，区域的 EF_{wd} 越大，表明该区域消耗的水
资源存量资本越多，发展越不可持续。

2.2.4 水资源生态足迹评价指标

(1) 水资源生态盈余/赤字

水资源生态足迹与水资源生态承载力两者相减的值,为水资源生态盈余(赤字),可以用来分析区域内水资源的可持续利用情况^[4,125],公式如下:

$$\text{水资源生态盈余/赤字} = WEF - W_{ECW} \quad (2-8)$$

式中,若 $WEF < W_{ECW}$ 时,出现了生态盈余,表明人类对水资源的利用在区域承受范围内,区域水资源发展处于生态可持续状态;若 $WEF > W_{ECW}$ 时,表示出现生态赤字,表明人类对水资源的利用超过其承载力,是生态不可持续状态;若 $WEF = W_{ECW}$ 时,为水资源临界状态^[125]。

(2) 万元 GDP 水资源生态足迹

万元 GDP 水资源足迹账户是指区域内水资源生态足迹与 GDP 的比值,可以根据这个比值的大小来比较区域内水资源的利用效率^[125]。其计算公式为:

$$W_{UEI} = \frac{WEF_{WV}}{GDP} \quad (2-9)$$

式中, W_{UEI} 为水资源利用效率指数;比值越小,水资源的利用效率越高,反之亦然^[125]。

(3) 水资源生态压力指数

水生态压力指数能够显示某区域受到的生态压力强度,并以此来衡量区域水资源生态的安全程度,反映区域水资源生态需求与供给的关系^[125]。其计算公式为:

$$W_{EPI} = \frac{WEF_{WV}}{W_{ECW}} \quad (2-10)$$

式中, W_{EPI} 为水生态压力指数。当 $0 < W_{EPI} < 1$ 时,表明区域水资源供给量能满足社会发展的需求,区域水资源生态压力小,处于生态安全状态;当 $W_{EPI} = 1$ 时,表明该区域水资源供需均衡,水资源安全处于临界状态^[83];当 $W_{EPI} > 1$ 时,水资源生态压力大,处于生态不安全状态; W_{EPI} 越大,水资源安全受到的威胁就越大^[125]。

(4) 水资源可持续指数

水资源可持续指数是用来评价区域水资源可持续发展利用程度^[125]。其计算公式为:

$$W_{ESI} = WEF / (WEF + W_{ECW}) \quad (2-11)$$

式中, W_{ESI} 为水资源可持续指数; $0 < W_{ESI} < 1$, W_{ESI} 值越大,则水资源可持续发展利用程度越高; W_{ESI} 值越小,水资源可持续发展利用程度越低,0.5 是水资源是否可持续利用的分界点。借鉴方伟成等^[126]的研究,将水资源可持续指数划分为以下 6 个等级类型,见表 2-2。

表 2-2 水资源可持续指数等级划分

等级	W_{ESI}	可持续发展程度
I	≥ 0.80	强可持续
II	0.65~0.80	中可持续
III	0.50~0.64	弱可持续
IV	0.35~0.49	弱不可持续
V	0.20~0.34	中不可持续
VI	$0 \leq 0.20$	强不可持续

2.2.5 探索性时空数据分析

Rey 等^[83,115]提出的探索性时空数据分析方法 (Exploratory Time-Space Data Analysis, ESTDA), 在传统的 ESDA 分析框架中将时间和空间进行有效地整合, 实现了时空交互分析。

(1) 空间相关分析

对某一要素的属性值在研究区的空间分布特征的描述为全局自相关^[120]。其 Moran's I 指数计算公式如下:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sigma^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (2-12)$$

式中, Moran's I 表示全局 Moran's I 指数, z_i 表示河南省第 i 个地市的值, n 为河南地市总数; $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2$, $\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$; W_{ij} 表示要素 i 和要素 j 之间的空间权重。全局空间自相关分析标准化的权重矩阵, Moran's I 指数在 $[-1,1]$ 之间, $0 < \text{Moran's } I < 1$, 表示空间正相关; Moran's I = 0 表示空间不相关; $-1 \leq \text{Moran's } I < 0$ 为负相关^[120]。

全局空间自相关不能反映各地市内生态足迹的局部空间关系格局与差异状况, 因此通过 Moran 散点图来表达局部的空间不稳定性。Moran 散点图由四个象限构成, 描述研究区自身和邻域的状况。第一象限表示研究区本身与邻域的生态足迹都较高, 即高高集聚 (HH), 第三象限与第一象限相反, 为低低集聚 (LL), 第一象限和第三象限的地市存在较强的空间正相关, 即均质性, 第二象限表示研究区自身生态足迹低, 而其相邻地市水平较高, 低高集聚 (LH), 第四象限则与第二象限相反, 表示高低集聚 (HL), 第二象限和第四象限存在较强的空间负相关, 即异质性^[83,120]。

(2) LISA 时间路径

由于全局自相关只能体现河南省水资源生态足迹整个空间分布特征，无法详细研究区各地市空间集聚分散特征，因此需要分析其局部空间相关性，即为 LISA，计算公式如下：

$$Rl_i = \frac{n \times \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})} \quad (2-13)$$

$$D_i = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{d(L_{i,t}, L_{i,T})} \quad (2-14)$$

式中^[83]， Rl_i 、 Di 分别表示相对长度和弯曲度， n 表示区域数量； T 表示研究时间序列； Li, t 、 $Li, t+1$ 分别表示 t 、 $t+1$ 年份区域 i 在 Moran's I 散点图中的位置， $d(Li, t, Li, t+1)$ 、 $d(Li, t, Li, T)$ 分别表示区域 i 从 t 年移动到 $t+1$ 年、末年的距离，如果区域 i 在研究时段内的移动长度超过平均水平，则 $Rl_i > 1$ ，反之， $Rl_i < 1$ ， Rl_i 越大，表明区域地理要素的局部空间依赖性和空间结构更具有动态性，也表明地理要素随时间推移，路径稳定性较差， Di 越大，表明区域 i 的移动路径越弯曲，反映出一个更加动态的局部空间依赖方向和更加波动的增长过程，也说明了该区域受局部结构的时空依赖影响越大，即区域 i 自身受邻域空间(溢出/极化)效应影响越大，同时自身随时间推移增幅越显著或遇特殊时段波动越剧烈，反之则受到的影响越小，波动越平稳^[83]。

(3) LISA 时空跃迁

LISA 被用于揭示地理要素的空间依赖属性，Rey 等^[115]在此基础上将 Moran's I 散点图中各空间单元在特定时间间隔内的移动距离、方向、凝聚等特征与传统马尔科夫转移矩阵相结合，提出了局部马尔科夫转移矩阵和时空跃迁，并将跃迁划分为 Type0、Type1、Type2、Type3 四种类型^[83]，Type0 为自身和邻域均不发生状态转移，Type1 是自身跃迁，邻域不变，Type2 区域自身不变，邻域发生跃迁，Type3 区域自身与邻域均发生跃迁。跃迁状态如表 2-3 所示：

表 2-3 LISA 时空跃迁类型

跃迁类型	跃迁特征
Type ₀ (自身和邻域均不发生状态转移)	高高→高高、高低→高低、低低→低低、低高→低高
Type ₁ (自身跃迁, 邻域不变)	高高→低高、高低→低低、低高→高高、低低→高低
Type ₂ (区域自身不变, 邻域发生跃迁)	高高→高低、高低→高高、低高→低低、低低→低高
Type ₃ (区域自身与邻域均发生跃迁)	自身与邻域跃迁方向一致 Type _{3A} : 高高→低低、低低→高高 其他为 Type _{3B} : 高低→低高、低高→高低

Rey 将区域系统中的时空流动和时空凝聚来表征研究对象的空间格局特征, 计算公式如下^[83]:

$$SF = \frac{Type_1 + Type_2}{m} \quad (2-15)$$

$$SC = \frac{Type_0 + Type_{3A}}{m} \quad (2-16)$$

$$p = 1 - \frac{\sum_i P_{i,i}}{K} \quad (2-17)$$

式中, SF 、 SC 表示为时空流动和时空凝聚, $Type_0$ 、 $Type_1$ 、 $Type_2$ 、 $Type_{3A}$ 表示各类型跃迁的数量, p 是相对移动率, $P_{i,i}$ 为时空跃迁矩阵对角线元素, 当 $p=1$ 时表示所有区域均发生状态跃迁, $p=0$ 时表示没有发生跃迁, p 越大表明状态转移越剧烈, $K=4$ ^[83]。

2.2.6 对数平均迪氏指数

对数平均迪氏指数模型 (Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI) 由新加坡学者 Ang 等^[127]提出, 用来分析各因素对研究目标的影响状况, 是目前国际上常用的因素分解模型, 是一种完全的、不产生残差的分解分析方法, 并且 LMDI 分解法的乘积形式、加和形式都是无差异的。LMDI 是迪氏指数法中完全的、不产生残差的分解分析方法, 应用广泛^[70]。它是将一个变量分解成若干个因素, 从而分析各个因素的贡献度。水资源生态足迹影响因素研究方面, LMDI 因素分解模型是被公认为比较准确的研究方法。LMDI 模型易于建模, 有利于分解较多驱动因素。本文采用 LMDI 分解法, 分别从结构效应、技术效应、经济效应和人口效应 4 个方面分析河

南省水生态足迹的驱动因素。本文利用 LMDI 模型构建水资源生态足迹指数分解模型如下：

$$ef_t = \sum_{i=1}^3 ef_{it} = \frac{ef_t}{r_t} \frac{r_t}{p_t} p_t \quad (2-18)$$

$$\Delta ef_t = ef_t - ef_0 = \sum_{i=1}^3 s_{it} i_t r_t p_t - \sum_{i=1}^3 s_{i0} i_0 r_0 p_0 = \Delta ef_s + \Delta ef_i + \Delta ef_r + \Delta ef_p \quad (2-19)$$

式中, s_{it} 、 i_t 、 r_t 分别对应 $\frac{ef_{it}}{ef_t}$ 、 $\frac{ef_t}{r_t}$ 、 $\frac{r_t}{p_t}$, t 为年份, ef_t 和 ef_0 分别为第 t 年和基准年 (2005 年) 的水资源总生态足迹, ef_{it} 为第 t 年第 i 类 (农业、工业、生态生活) 水资源的生态足迹, γ_t 为第 t 年河南省的 GDP, 其中, s_{it} 为第 i 类水资源占总水资源生态足迹的比重, 为结构效应, i_t 为第 t 时期单位 GDP 水资源生态足迹, 表征技术效应, r_t 为第 t 时期人均 GDP, 为经济效应, p_t 为第 t 年常住人口数, 为人口效应, s_{i0} 、 i_0 、 r_0 、 p_0 分别为基准年 (2005 年) 河南省第 i 类水资源占总水资源生态足迹的比重、基准年 (2005 年) 单位 GDP 水资源生态足迹、基准年 (2005 年) GDP 值和基准年 (2005 年) 常住人口数, Δef_t 为水资源生态足迹变化量, Δef_s 、 Δef_i 、 Δef_r 、 Δef_p 分别代表结构、技术、经济及人口因素所造成的水资源生态足迹变化量^[70]。

根据 LMDI 分解法对式子进行分解分析, 得出:

$$\Delta ef_s = \ln \frac{s_{it}}{s_{i0}} \sum_{i=1}^3 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (2-20)$$

$$\Delta ef_i = \ln \frac{i_t}{i_0} \sum_{i=1}^3 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (2-21)$$

$$\Delta ef_r = \ln \frac{r_t}{r_0} \sum_{i=1}^3 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (2-22)$$

$$\Delta ef_p = \ln \frac{p_t}{p_0} \sum_{i=1}^3 \frac{ef_{it} - ef_{i0}}{\ln ef_{it} - \ln ef_{i0}} \quad (2-23)$$

各分解因素所得效应为正值, 则表示对水资源生态足迹的影响为促进作用; 若效应值为负值, 则对水资源生态足迹为抑制效应, 绝对值越大, 表明分解因素的促进或者抑制作用越强; 如果值为 0, 那就表明基本没有影响。

2.3 数据来源

本文以河南省 18 个地级市为研究对象，整理并统计河南省 2005—2020 年的各地市水资源总量、年降水量，农业用水量、工业用水量、居民生活及生态环境用水量、总人口、化学需氧量（COD）和氨氮（NH₃）排放量、国内生产总值等数据资料，运用三维水生态足迹模型、ESTDA 模型和 LMDI 因素分解模型进行分析。其中，总水资源量，年降水量，农业用水、工业用水、居民生活及生态环境用水、产水模数来自河南省水利厅《河南省水资源公报》以及各地市水资源公报；化学需氧量（COD）和氨氮（NH₃）排放量来自河南省生态环境厅的《河南省环境统计年报》以及各地市环境统计年报；个别年份数据存在缺失，采用相邻年份插值法补齐。人均水资源量、供水模数等数据通过相应公式计算得出。

本论文在计算水质生态足迹时，污染物排放浓度标准中国《地表水环境质量标准》（GB 3838—2002）中的Ⅲ类水质规定，即 COD 排放浓度标准为 20 mg/L，氨氮达标浓度 1 mg/L。人口与 GDP 数据来自《河南省统计年鉴》。

2.4 相关参数确定

研究中的理论模型需要确定的参数主要有：水资源全球平均生产能力、区域水资源产量因子和水资源全球均衡因子。

（1）水资源全球平均生产能力

借鉴相关研究成果^[128]，水资源全球平均生产能力也称全球多年平均产水模数，通过水资源总量与区域面积的比较得出，公式如下：

$$P_w = Q_w / S \quad (2-24)$$

式中， P_w 为世界水资源平均生产能力（ m^3/hm^2 ）； Q_w 为水资源总量（ m^3 ）； S 为区域面积（ km^2 ）。由全球多年统计数据得知，全球平均生产能力为 $3140 m^3/hm^2$ 。

（2）水资源产量因子和产水模数

水资源产量因子是区域内的水资源平均生产能力与全球的水资源平均生产能力的比值^[49]。区域水资源平均生产能力，即区域单位面积产水模数。产水模数用来表达一个区域的产水能力，其计算方法是区域水资源量与总面积之比，属于正向指标。河南省产水模数较低^[14,114]，近年来基本保持在 $4.5 万 m^3/km^2$ 以下，不及全国整体水平的 1/5。通过计算，各地市产量因子可以求出，河南省水资源产量因子为 0.67，水资源产量因子为无量纲值。如表 2-4 所示。

表 2-4 河南省 2005—2020 年各地级市平均产水模数和产量因子

地区	产水模数/万 m ³ /km ²	产量因子
信阳	38.17	1.22
南阳	22.91	0.73
驻马店	28.77	0.92
济源	16.27	0.52
安阳	14.61	0.47
新乡	15.25	0.49
焦作	19.75	0.63
濮阳	13.14	0.42
鹤壁	16.45	0.52
洛阳	15.28	0.49
三门峡	14.26	0.45
开封	16.37	0.52
商丘	16.25	0.52
周口	20.52	0.65
许昌	15.98	0.51
郑州	23.79	0.40
漯河	7.98	0.25
平顶山	20.45	0.65
河南	21.28	0.67

由表 2-4 可知, 2005—2020 年河南省各市平均产水模数最大的是信阳市为 38.17 万 m³/km², 且只有信阳市产量因子大于 1, 最低的是漯河市 7.98 万 m³/km², 产量因子为 0.25, 说明水资源量较少, 生活、生活用水利用不足。产量因子大于河南省产量因子的有信阳市、南阳市和驻马店市。各市产量因子差别大, 说明各地市水资源总量差别较大。

(3) 水资源均衡因子

由于全球各生物的生产力是发展变化的, 其平均值比较难以计算, 而均衡因子是将不同土地类型的单位生态生产能力转化为一个标准的参数, 方便进行比较, 均衡因子是全球水资源生物生产的平均生产力与全球各种类生物生产的平均生产力的比值。本文依据相关参数, 在查阅相同研究领域的相关文献后, 采用黄林楠等^[14]基于世界自然基金会在 2002 年合算的水资源的全球均衡因子为 5.19。

第 3 章 河南省水资源生态足迹时空特征

本章基于水资源生态足迹模型，根据河南省人口、GDP、水资源总量、农业用水、工业用水、城乡生活用水、生态用水量、总供水量等数据计算 2005—2020 年河南省水资源生态足迹和水资源生态承载力等数据，并对其进行时空分析。

3.1 河南省水生态足迹年际变化

3.1.1 河南省水资源生态足迹分析

根据水资源生态足迹模型，计算得到河南省各类型用水生态足迹，由图 3-1 可知，2005—2020 年河南省各账户水资源生态足迹呈现波动趋势。农业用水生态足迹波动较大，呈缓慢上升趋势；工业用水生态足迹总体上呈现下降的趋势；城乡生活和生态环境用水生态足迹自 2014 年开始呈现明显的上升趋势。农业用水生态足迹均值为 $20.75 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，工业用水生态足迹均值 $8.47 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，城乡生活用水和生态环境用水生态足迹均值为 $8.35 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。农业用水生态足迹最大值为 2006 年的 $23.16 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，最小值为 2014 年 $18.63 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ；工业用水生态足迹最大值 2012 年的 $10.00 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，最小值为 2020 年的 $5.88 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ；城乡生活和生态环境用水生态足迹最大值为 2018 年的 $14.53 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，最小值为 2005 年的 $6.20 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。

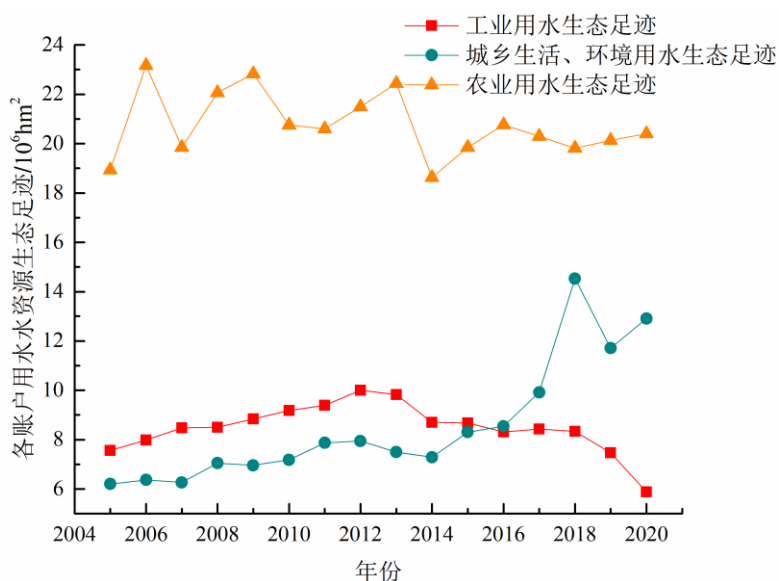


图 3-1 河南省水资源生态足迹变化趋势图

河南省农业用水、工业用水、城乡生活和生态环境用水生态足迹历年平均占比分别为 55%、22%、23%、可以看出, 农业用水生态足迹历年平均占比最大。农业生态足迹占比超过 50%, 由于河南省是全国农业大省, 是我国重要的粮食生产基地, 农业相比其他产业处于主要地位, 农业用水包括农田灌溉用水, 林业、牧业以及水产养殖用水等, 农业用水需求量大, 其次, 河南省农业用水存在利用不当情况, 用水大多都是大水漫灌及直接抽取地下水, 这些灌溉方式水资源的利用效率比较低, 浪费严重。

河南省工业用水生态足迹由 2005 年的 $7.56 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 下降到 2020 年的 $5.88 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 下降了 22%, 降幅较大。2005—2012 年, 工业用水生态足迹一直呈现上升趋势, 2013—2020 年, 开始呈现下降趋势。工业用水生态足迹下降, 一方面, 由于降水量减少, 蓄水工程供水量减少, 另一方面, 2013 年国务院下发《关于印发实行最严格水资源管理制度考核办法的通知》, 为落实通知, 河南省提出“三条红线”管理指标的总体目标, 实行了最严格水资源管理制度, 优化了工业行业结构, 淘汰耗水量大、用水效率低的工业, 提高规模以上工业企业节水意识, 同时还由于河南省加快产业结构调整, 工业所占比重下降趋势, 因此工业用水生态足迹呈现下降趋势。河南省生活和生态用水足迹呈明显上升趋势, 特别是 2016 年以来比较明显, 城乡生活和生态环境用水足迹从 2005 年到 2020 年上升率为 108%, 增长速度较快, 由于人口的快速增长, 生活用水需求量大, 此外, 还有政府重视生态环境建设, 导致生态环境用水量的增加。

计算得到 2005—2020 年河南省水资源生态足迹总量、水量生态足迹和水质生态足迹, 并绘制其变化趋势图(图 3-2)。由图 3-2 可以看出, 2005—2020 年, 河南省水生态足迹总量和水量生态足迹的变化趋势相似, 总体呈波动上升趋势, 水质生态足迹变化较小, 呈“上升—下降—上升”趋势。2010—2013 年, 水资源生态足迹总量和水量生态足迹增幅最大, 均在 2013 年达到了最大值, 水资源生态足迹总量最大值为 $42.15 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 水量生态足迹为 $39.76 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 最低值分别为 2005 年的 $33.29 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 和 $32.69 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。水质生态足迹的峰值为 2011 年 $2.54 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 谷值出现在 2019 年的 $0.34 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 下降幅度较大下达到 86%。水质生态足迹呈“上升—下降—上升”趋势, 也反映了河南省在水生态环境保护、治理方面成效明显, 此研究结果与卢艳等^[128]关于河南省水资源生态足迹的研究相符合。

研究时期内, 河南省人口从 2005 年的 9380 万人增加到 2020 年的 9941 万人, 省生产总值从 2005 年的 10243.47 亿元增加到 2020 年的 54997.07 亿元, 河南省全省总用水量从 2005 年的 $197.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加至 2020 年的 $237.14 \times 10^8 \text{ m}^3$, 增长率为

19.88%。水资源生态足迹总量由 2005 年的 $33.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2020 年的 $40.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水资源消耗量与经济、人口的发展呈现同步增长趋势，使河南省水生态足迹的变化呈增长态势。

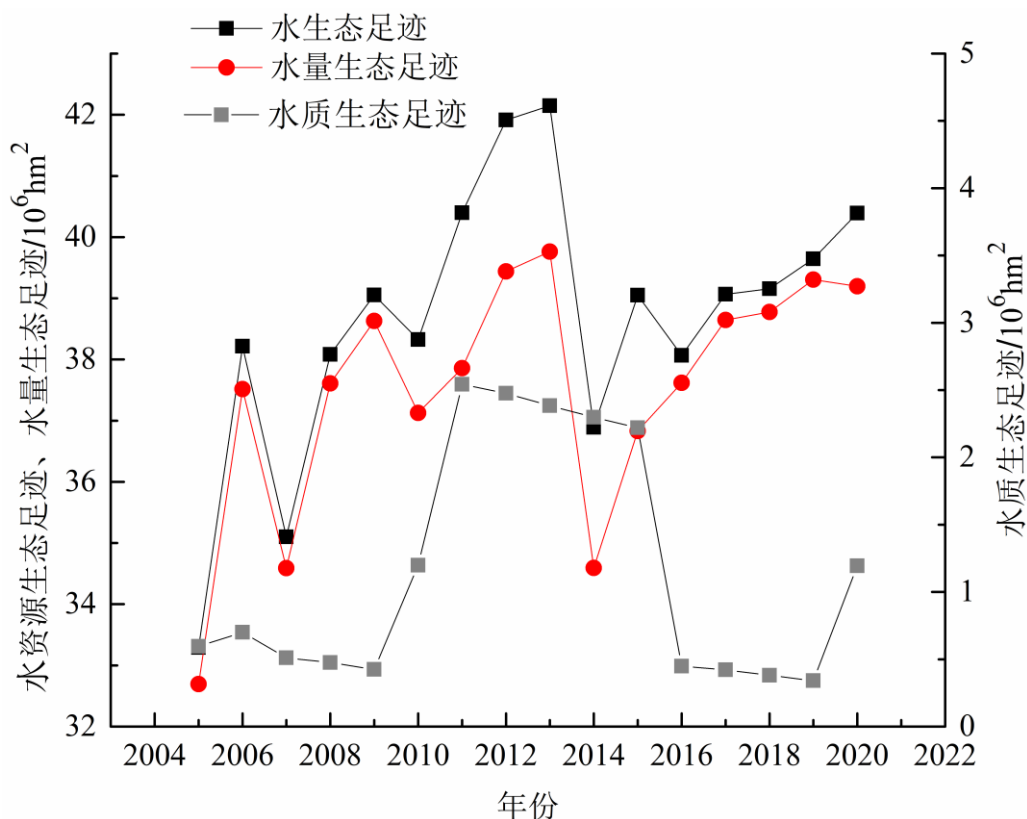


图 3-2 河南省水量生态足迹、水质生态足迹和水生态足迹变化趋势图

图 3-3 为 2005—2020 年河南省主要污染物排放变化趋势图。结合图 3-2 可知，水质生态足迹呈现波动变化的趋势，水质生态足迹 2011 年出现最大值，到 2019 年一直呈下降趋势，年均水质生态足迹为 $1.16 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。COD 和氨氮排放量呈“上升—下降—上升”趋势。COD 的排放量与氨氮数据差距较大，特别是 2011—2015 年，这几年由于河南省工业化发展迅速，污染物排放较多，因此水质生态足迹比较大，COD 排放量最大值为 2011 年的 1436682.77 t，最小值为 2019 年的 251854.07 t，下降较大，达到 82%，说明河南省关于水污染治理政策的调整对水质生态足迹产生的影响，特别是“四水同治”加大对水污染的治理力度。氨氮排放量最大值也出现在 2011 年，为 153800.36 t，最小值为 2019 年的 20591.99 t，下降率为 86%。可以看出，化学需氧量和氨氮排放量最大值均出现在 2011 年，到 2019 年，均为下降趋势，且下降趋势较大，由于 2011 年河南省实行了严厉的环境保护政策，加大环境保护执法，效果比较明显。

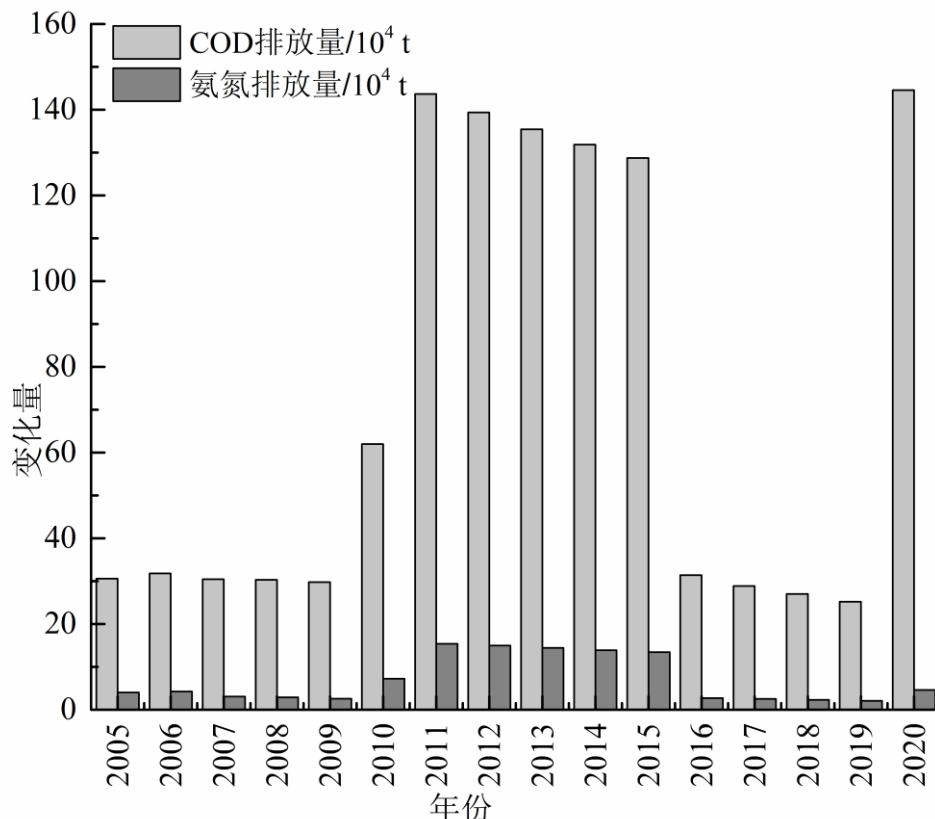


图 3-3 河南省主要污染物排放量

3.1.2 河南省水资源生态承载力分析

图 3-4 为河南省水资源生态承载力年际变化趋势图，由图 3-4 可知，在研究期内，河南省水资源生态承载力年际变化较大，呈波动下降趋势。最大值为 2005 年的 $24.74 \times 10^6 \text{hm}^2$ ，最小值为 2019 年的 $7.48 \times 10^6 \text{hm}^2$ ，下降率超过 69%。多年平均生态承载力为 $15.61 \times 10^6 \text{hm}^2$ ，超过多年平均值的年份有 6 个，分别是 2005、2007、2008、2010、2017、2020 年，其余年份水资源生态承载力均低于多年平均值。

河南省 2005—2020 年水资源生态承载力变化幅度大，呈 5 个“V”型趋势，具体来说：第一阶段为 2005—2007 年，在此时间段内，河南省水资源生态足迹先下降后上升，在此阶段水资源生态承载力出现最大值，2006 年生态承载力比 2005 年下降了 42.39%；；第二个阶段为 2007—2010 年，在此时间段内，水资源生态承载力呈先下降后上升趋势，2010 年水资源生态承载力比 2009 年上升了 62%；第三个阶段为 2010—2014 年，在此时间段内，河南省水资源生态承载力波动变化最大，2013 年水资源生态承载力比 2010 年降低了 59%；第四个阶段为 2014—2017 年，河南省水资

源生态承载力呈上升趋势；第五阶段为 2017—2020 年此阶段，2019 年出现水资源生态承载力的最小值，从 2017 到 2019 年水资源生态承载力下降率为 60%，下降幅度大。

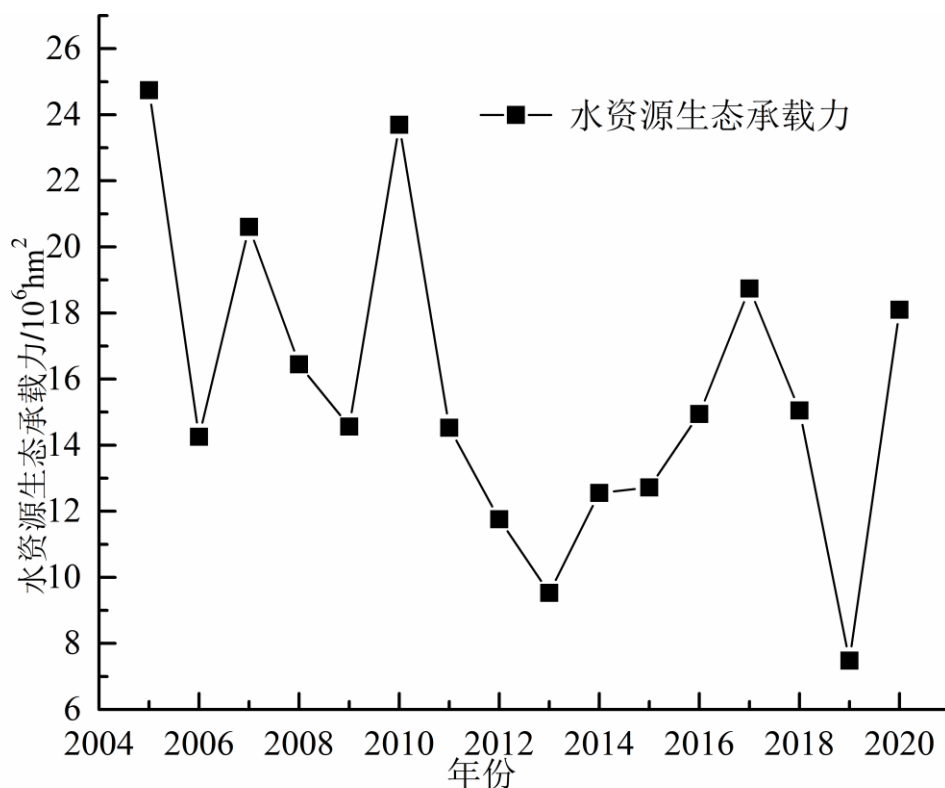


图 3-4 河南省水资源生态承载力变化趋势图

由图 3-5 可知，河南省 2005—2020 年水资源生态承载力与年降水量趋势相同，呈波动变化趋势，受到年降水量的变化影响，水资源生态承载力年际变化大。如 2010 年水资源生态承载力较 2009 年提升较大，可能是由于 2010 年河南省年降水量的增大，较 2009 年增加了 11.7%，较多年平均值增加了 9.1%，本年度属于偏丰年份；2013 年河南省水资源生态承载力较前几年下降幅度较大，因为本年度河南省年降水量较多年平均值减少 25%，属于枯水年份，且本年度河南省全省地表水资源仅为 123.8 亿 m^3 ，较多年平均值偏少 59.3%，比 2012 年偏少 17.1%，地下水资源 147.1 亿 m^3 ，比多年平均减少 24.9%，比 2012 年减少 9.1%，水资源生态承载力受区域年降水量的影响大。

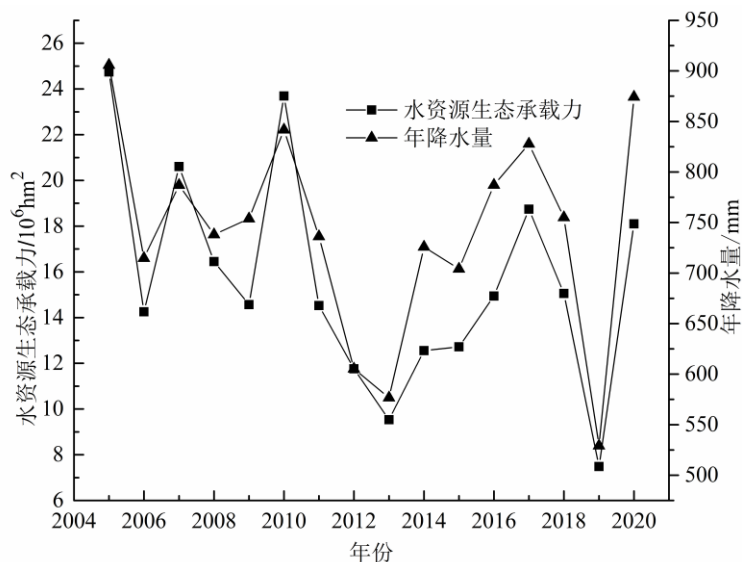


图 3-5 河南省水资源生态承载力和年降水量变化趋势图

河南省 2005—2020 年人均水资源生态承载力情况见表 3-1。由表 3-1 可以看出，河南省人均水资源生态承载力最大值为 2005 年的 $0.26 \text{ hm}^2/\text{人}$ ，最小值为 2019 年的 $0.077 \text{ hm}^2/\text{人}$ ，人均水资源生态承载力差距较大，2005 年的水资源生态承载力是 2019 年的 3.45 倍，年际变化较大。水资源生态承载力 2005—2020 年平均值为 $0.16 \text{ hm}^2/\text{人}$ ，超过多年平均值的年份有 6 个，均为降水量平水年份或者偏丰年份。其余年份水资源生态承载力均低于多年平均值。

表 3-1 河南省 2005—2020 年人均水资源生态承载力

年份	人均水资源生态承载力/ $\text{hm}^2/\text{人}$
2005	0.26378
2006	0.15178
2007	0.22016
2008	0.17443
2009	0.15352
2010	0.25193
2011	0.15474
2012	0.12503
2013	0.10127
2014	0.13302
2015	0.13418
2016	0.15675
2017	0.19604
2018	0.15671
2019	0.07761
2020	0.18206

3.1.3 水资源生态足迹广度、深度分析

表 3-2 为河南省 2005—2020 年水资源生态足迹广度、水资源生态足迹深度状况。由表 3-2 可知，河南省水资源生态足迹广度整体上呈波动下降趋势；水资源生态足迹深度呈波动上升趋势。根据公式 (2-5) 水生态足迹广度取值范围可知，16 年河南省水资源生态足迹均高于同年的水资源生态承载力，说明河南省的生产、生活、生态等对水资源消耗已达到极限，需动用存量资本。水资源生态足迹广度的变化趋势同水生态承载力一致，水资源生态广度在 2005 年达到最大值 $28.80 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ，均值为 $18.16 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。

由表 3-2 及图 3-8 可知，2005—2020 年水资源生态足迹深度与水资源生态压力指数呈现同步变化趋势，在波动中上升，水资源生态足迹深度均值为 $1.52 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。在 2019 年，水资源生态足迹深度 (1.78) 及水资源生态压力指数 (4.51) 均达到最大值，2005 年出现最小值，水资源生态足迹深度 (1.13) 及水资源生态压力指数 (1.14)，水资源生态深度与水生态足迹广度及水资源生态承载力呈现此消彼长的趋势，区域水资源需求量超过水生态承载力时，水资源生态足迹广度下降，水资源生态足迹深度增大。

表 3-2 河南省 2005—2020 年水生态足迹广度、深度

时间	水生态足迹广度/ 10^6 hm^2	水生态足迹深度/ 10^6 hm^2
2005	28.80	1.13
2006	16.60	1.57
2007	24.00	1.32
2008	19.15	1.50
2009	16.96	1.57
2010	27.58	1.28
2011	16.91	1.58
2012	13.69	1.67
2013	11.10	1.74
2014	14.61	1.60
2015	14.81	1.62
2016	17.39	1.54
2017	21.82	1.44
2018	17.52	1.55
2019	8.71	1.78
2020	21.07	1.48

3.1.4 河南省水资源生态盈余/赤字分析

根据公式(2-8)计算河南省水资源生态盈余/赤字状况,由图3-6可知,2005—2020年,河南省水资源生态足迹一直为赤字状态,说明河南省水资源为不可持续状态,赤字区间为 $4.49 \times 10^6 \text{hm}^2$ — $31.05 \times 10^6 \text{hm}^2$ 。赤字绝对值最高为2013年的 $31.04 \times 10^6 \text{hm}^2$,赤字最小值为2005年 $4.49 \times 10^6 \text{hm}^2$,多年平均赤字为 $20.50 \times 10^6 \text{hm}^2$ 。高于多年水资源生态赤字平均值的年份有6个,分别是2005、2007、2008、2010、2017、2020年。水资源处于赤字状况,说明河南省用水结构不合理,需要调节水资源利用结构,促进水资源向盈余状况转变。这种水资源处于赤字状况且变化大的情况,在我国其他地区也存在,如武汉^[129]、内蒙古^[130]等地区,2006—2020年内蒙古生态环境处在一个较为严重的生态赤字状态,最大赤字为2006年人均生态赤字为 $17.11 \text{hm}^2/\text{人}$ 。

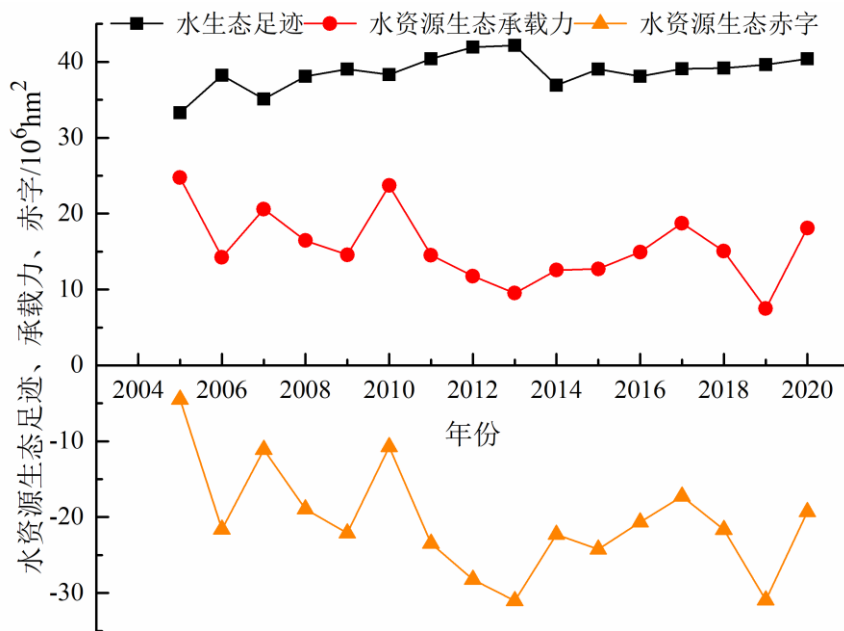


图 3-6 河南省水资源生态赤字变化趋势图

3.1.5 河南省万元 GDP 水资源生态足迹分析

图 3-7 为河南省 2005—2020 年万元 GDP 水资源生态足迹变化趋势图,由图可知,研究期内河南省万元 GDP 水资源生态足迹呈下降趋势。从 2005 年的 0.319hm^2 ,下降到 2020 年的 0.071hm^2 ,下降率为 77.68%,万元 GDP 多年平均值为 0.153hm^2 ,2010 年以后均低于多年均值。河南省水资源万元 GDP 水资源生态足迹呈下降趋势,表明河南省水资源利用效率在不断提高,这也与河南省坚持的绿色发展理念相呼应,

政府加强对水资源的管理力度，把节水意识作为水资源开发、利用与经济发展的前提，以及企业可持续发展理念的提升，城乡居民节约用水理念的提高。

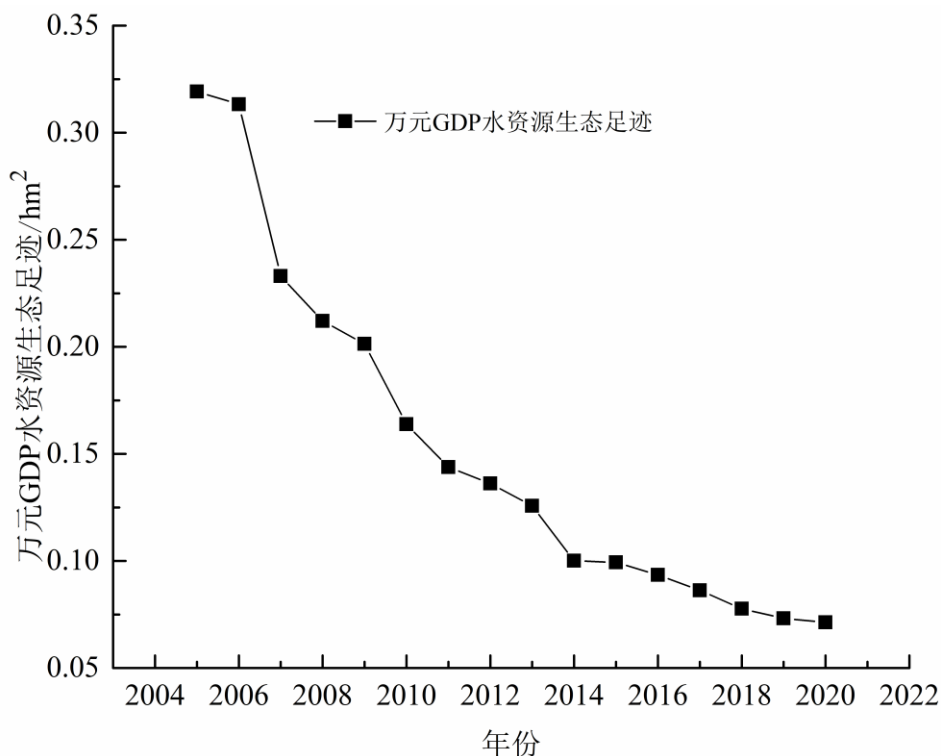


图 3-7 河南省万元 GDP 水资源生态足迹变化趋势图

3.1.6 河南省水资源生态压力指数分析

水资源生态压力指数可以显示某区域受到的生态压力强度，水资源生态压力指数小于 1 时，表明区域水资源供给量能满足社会发展的需求，水资源生态压力小，处于生态安全状态，指数等于 1 时，水资源安全处于临界状态，当水资源生态压力指数大于 1，则生态压力大，水资源处于生态不安全状态^[125]。由公式（2-10）计算水资源生态压力指数数据，由图 3-8 可知，2005—2020 年河南省水资源生态压力指数总体上为波动上升趋势，且波动较大。最大值为 2019 年的 4.51，最小为 2005 年的 1.14，两者相差 3.19 倍。水资源生态压力指数均值为 1。河南省水资源生态压力均大于 1，水资源安全威胁较大，2005 年、2007 年、2010 年、2017 年和 2020 年为水资源生态压力的几个谷值，这也是河南省降水量较丰富的年份。2006 年、2009 年、2013 年及 2019 年为研究期内河南省水资源生态压力的较大值，这 4 年生态压力除降水量较少以外，还由于人口的增加，水资源的需求量加大，社会生产、生活用水量的增加。从 2010 到 2013 年，4 年间水资源生态压力指数一直呈上升趋势，说明

这 4 年河南水资源供求矛盾严重，水资源处于不安全状态，受旱灾的影响，特别是 2010 年前期降水量少，旱情较严重；2011 年冬春连旱（2010 年 11 月-2011 年 2 月），降水量较常年同期偏少 84%，连续无雨日超过 120 天。水资源量减少导致 2010—2013 年水资源生态压力指数上升。2013—2017 年，水资源生态压力呈波动下降趋势，特别是 2013 年到 2014 年，生态压力下降幅度较大，这是因为河南省实行了严厉的水资源管理政策，2013 年 12 月 25 日，河南省政府下发《关于印发实行最严格水资源管理制度考核办法的通知》，提出了实现河南省用水总量控制、用水效率控制、水功能区限制纳污等“三条红线”管理指标的总体目标，因此，水资源生态压力下降。河南省水资源生态压力指数年际之间波动较大，主要是由于受季风气候的影响，降水量不稳定。降水量多，水资源生态压力指数有所降低；降水量少，干旱年份的出现，则水资源生态压力增大。也应看出，河南省 2005—2020 年水资源生态压力指数是不容乐观的，除了受自然原因影响，还由于河南省近年来人口的增加、社会经济的发展、对水资源需求量的增大导致。

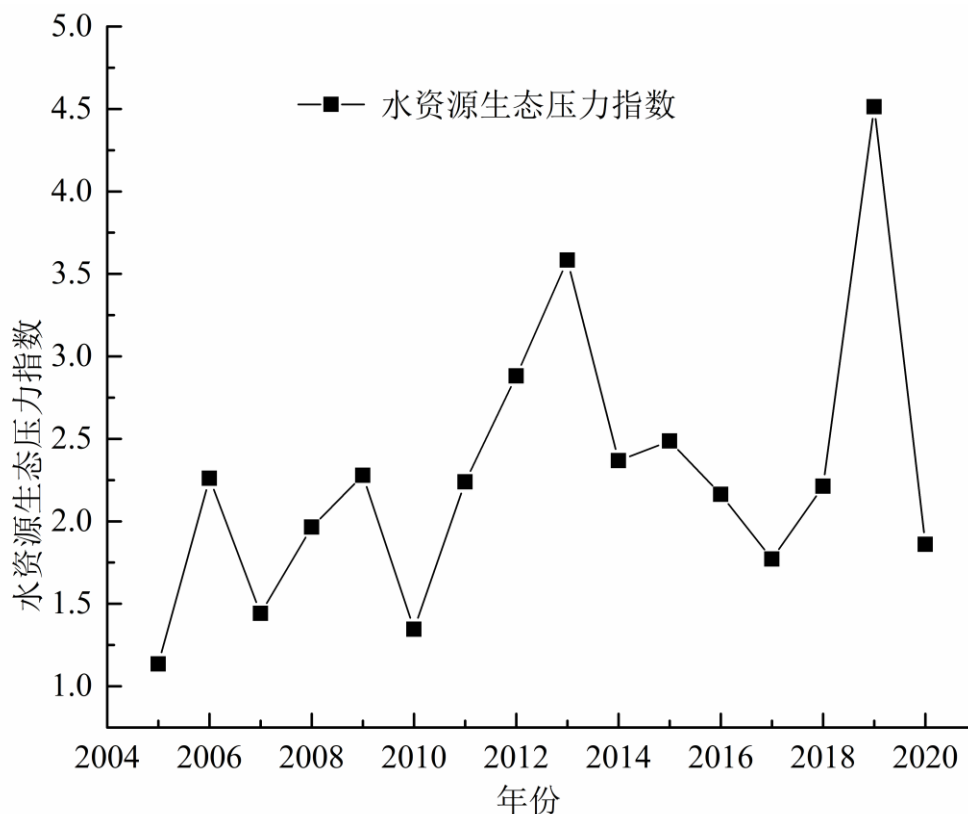


图 3-8 河南省 2005—2020 年水资源生态压力指数变化趋势图

3.1.7 水资源可持续利用指数分析

由图 3-9 可知，河南省 2005—2020 年水资源可持续指数呈现波动下降趋势，年际变化较大。从 2005 年的 0.47 下降到 2020 年的 0.35，下降率 25.53%，最高值为 2005 年的 0.47，最低值为 2019 年的 0.18，相差 2.61 倍，0.5 为水资源是否可持续利用的分界点。

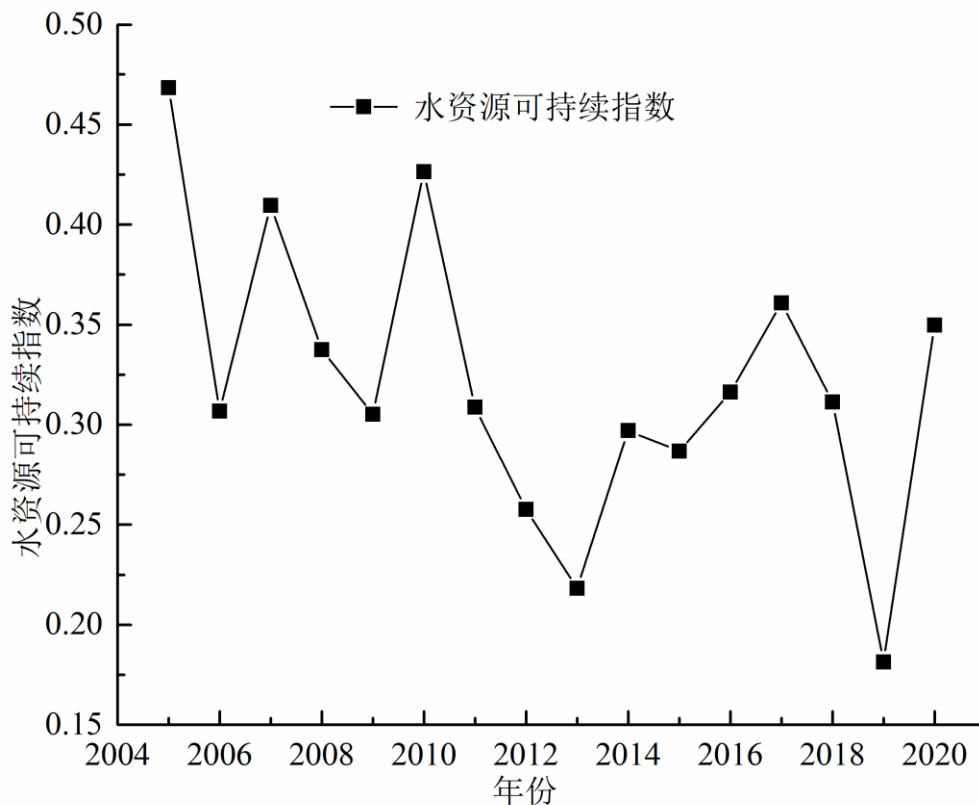


图 3-9 河南省 2005—2020 年水资源可持续指数图

由图 3-9 可以看出，2005—2020 年水资源可持续指数一直低于 0.5，水资源处于不可持续利用状态。特别是 2019 年，水资源可持续指数低于 0.2，处于强不可持续状态，由于本年度为枯水年份，年降水量少；2005 年水资源可持续指数接近分界线 0.5，但还是处于弱不可持续状态，以及 2007 年、2010 年和 2017 年，均为弱不可持续状态；其他年份水资源可持续指数均为 0.2-0.34 之间，处于中不可持续状态。由图（图 3-3、图 3-8）可知，水资源可持续指数受区域水资源生态承载力影响较大。水资源可持续指数呈现为 5 个“V”型阶段。第一阶段为 2005—2007 年，在此时间段内，河南省水资源可持续指数呈现先下降后上涨趋势，2006 年水资源可持续指数比 2005 年下降 34.52%；第二个阶段为 2007—2010 年，在此时间段内，水资源可持续指数呈先下降后上升趋势，2010 年水资源可持续指数比 2009 年上升了 39.67%；

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/587102160061006025>