

黄河流域水资源与土地资源利用效率及其驱动因素的区域差异研究

刘强^{1,2}, 梁童林¹, 王莉霞¹

(1.天水师范大学资源与环境工程学院, 甘肃天水741000; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌712100)

摘要: [目的] 探究黄河流域水资源与土地资源利用效率的时空演变特征及其驱动因素, 为制定精准和有效的水土资源管理策略提供科学依据。[方法] 应用指数分解模型(LMDI)对2010—2022年沿黄九省区水土资源利用效率及其影响因素的区域差异进行了研究。[结果] (1) 2010—2022年黄河流域用水总量净增25.76亿m³, 建设用地净增5992.70 km², 用水定额效应和产业结构效应抑制了水资源消耗, 但经济规模效应和人口效应推动用水量增长; 建设用地消耗强度抑制了土地扩张, 而经济规模效应是建设用地扩张的主导因素。(2) 水资源消耗强度呈现“中游>上游>下游”的空间分布格局, 中游地区因第一产业占比较高, 用水增量最为显著; 建设用地扩张表现为“下游>上游>中游”的空间格局, 下游经济发达区域建设用地扩张速度最快。(3) 2019—2020年因新冠肺炎疫情用水量的弹性系数为0.65; 建设用地的疫情弹性系数为0.18, 投资和建设活动几乎停滞, 但疫情结束后用水量和建设用地面积增加对经济增长的助推效应显现出来, 并逐步恢复达到历史最高点。[结论] 黄河流域水资源与土地资源消耗增长受多种驱动因素的影响, 而水资源利用效率提升和建设用地消耗强度下降对两种资源的消耗起到一定抑制作用, 研究结果为制定差异化水资源与土地资源管理政策提供了科学依据。

关键词: LMDI模型; 黄河流域; 水资源利用; 城市建设用地

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0219-10

Research on regional differences in water and land resource utilization efficiency and their driving factors in Yellow River Basin

Liu Qiang^{1,2}, Liang Tonglin¹, Wang Lixia¹

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui, Gansu 741000, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the spatiotemporal evolution characteristics of water and land resource utilization efficiency and their driving factors in the Yellow River Basin, thereby providing a scientific basis for formulating precise and effective water and land resource management strategies. [Methods] The logarithmic mean Divisia index (LMDI) model was applied to investigate the regional differences in the utilization efficiency of water and land resources and their influencing factors in the nine provinces and autonomous regions along the Yellow River from 2010 to 2022. [Results] (1) From 2010 to 2022, the total water consumption in the Yellow River Basin had a net increase of 2.576×10^9 m³, and construction land had a net increase of 5992.70 km². The water quota effect and industrial structure effect inhibited water consumption, while the economic scale effect and population effect promoted water consumption growth. The intensity of construction land consumption inhibited land expansion, and the economic scale effect was the dominant factor driving the expansion of

收稿日期: 2025-07-23

修回日期: 2025-08-26

接受日期: 2025-09-14

资助项目: 国家自然科学基金(42077075); 甘肃省自然科学基金(22JR5RE195, 21JR11RE036)

第一作者: 刘强(1983—), 男, 甘肃兰州人, 博士, 副教授, 研究方向为区域资源与环境。E-mail: guangmingliu1983@163.com

通信作者: 王莉霞(1978—), 女, 甘肃天水人, 硕士, 副教授, 研究方向为土地资源管理。E-mail: 20081573@tsnu.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

construction land. (2) The intensity of water consumption showed a spatial distribution pattern of “middle reaches > upper reaches > lower reaches”, with the middle reaches exhibiting the most significant increase in water consumption due to a higher proportion of the primary industry. The expansion of construction land presented a spatial pattern of “lower reaches > upper reaches > middle reaches”, with the fastest expansion rate of construction land observed in the economically developed regions of the lower reaches. (3) The elasticity coefficient of water consumption due to the COVID-19 pandemic from 2019 to 2020 was 0.65. The pandemic elasticity coefficient of construction land was 0.18. Investment and construction activities nearly came to a halt during the pandemic, but after the pandemic, the boosting effect of increased water consumption and construction land area on economic growth became apparent, gradually recovering and reaching historical peak levels. [Conclusion] The growth of water and land resource consumption in the Yellow River Basin is affected by multiple driving factors. Improvements in water resource utilization efficiency and reductions in the intensity of construction land consumption have played a certain inhibitory role in the consumption of both resources. The research findings provide a scientific basis for formulating differentiated management policies for water and land resources.

Keywords: LMDI model; Yellow River Basin; water resource utilization; urban construction land

水资源与土地资源不仅是生态系统的重要组成部分,更是支撑人类社会可持续发展的重要物质基础^[1]。在人口增长和经济快速发展的双重驱动下,人类社会对水资源与土地资源的需求正呈现出持续增长的趋势^[2]。黄河作为我国第二长河,流经的区域自然环境复杂多变,降水量在时间与空间上的分布呈现出不均一特征,且不同地形区水资源与土地资源的配置与利用状况存在着显著差别^[3-6]。

水资源与土地资源的利用效率研究一直是学者关注的焦点,学者基于跨学科角度,借助创建多层次分析框架,论述各要素针对水资源与土地资源利用效率的影响途径以及彼此之间的交互关系。Du等^[7]通过数字高程模型和土地评价程序来确定土地分配,研究结果为土地资源的地理空间管理提供了新的研究思路。Fang等^[8]通过开发优化模型对水资源与土地资源利用效率进行研究,研究结果为最大限度地提高农业净收益,减少灌溉引起的内涝和盐碱化问题提供了理论基础。薛建春^[9]采用莫兰指数模型与空间杜宾模型分析了水土资源利用效率协调度的时空演变特征以及空间溢出效应,研究为黄河流域水土资源差异化开发利用策略提供决策依据;顾朝军等^[10]利用2018—2020年的长江流域水土流失监测数据,对水土流失时空演变规律及驱动力进行探讨,研究为长江流域水土保持和生态文明建设等工作提供了理论参考;谭琨等^[11]根据水土资源系统时间-空间演变规律,利用耦合协调度模型对水土资源耦合协调性空间分布特征进行了研究,为喀斯特山区水土资源耦合及优化调控提供参考;朱丽娟等通过创建耦合协调模型,探究了区域耕地和水资源利用效率之间的交互作用关系,为实现经济-资源的耦

合分解提供模型参考。目前,已有研究取得了较好进展,但仍存在一些不足,一是缺乏全流域尺度的系统研究;二是水土资源多为分离研究,忽视两者内在关联;三是时效性不足,多数研究止于2018年,未能反映近年来特别是疫情影响下的新变化。基于此,研究构建水土资源双维度LMDI分解框架,对水资源与土地资源驱动机制进行对比分析;覆盖黄河全流域九省区,揭示上中下游的空间分异规律;将研究时段延伸至2022年,探究疫情影响下水资源与土地资源利用的新特征。

人类活动对黄河流域水资源与土地资源的影响日益加剧,土地退化和水资源浪费问题成为普遍现象^[12]。农业用水占比居高不下,但利用效率却相对较低;工业废水排放量大,加之水资源开发强度不断加大,导致水土环境污染严重,生态系统呈现退化特征^[13-17]。此外,城市化进程也直接破坏了土地资源的空间配置格局^[18]。目前,黄河流域并未有效建立系统化统筹协调体系和综合治理框架,这限制了水资源与土地资源的高质量开发利用,然而对水资源与土地资源的合理规划又是维持陆地生态系统健康运作的关键部分。鉴于黄河流域横跨多个省区,且不同区域的水资源与土地资源开发程度存在明显差别,利益冲突状况复杂,探究水资源与土地资源利用效率及其影响因素给黄河流域高质量发展赋予了理论上的依托。LMDI模型作为经济分析领域的重要模型,具有分解完全、无残差项的显著特点,在识别和量化目标变量的驱动因素方面展现出独特优势^[19-21]。凭借其方法上的严谨性和结果可靠性,已在能源消耗和环境影响等领域得到广泛研究^[22]。研究根据资源利用强度定义的效率指标,水资源利用效率采用用水定额的倒数表征,即

单位产值用水量($\text{m}^3/\text{万元}$)的降低反映效率提升;土地利用效率采用建设用地消耗强度的倒数表征,即单位GDP占用建设用地面积($\text{km}^2/\text{亿元}$)的降低反映效率提升,这两个指标均为反向指标,数值越小表明资源利用效率越高。综上所述,研究以黄河流域以及流经9个省区的水资源与土地资源作为研究对象,应用LMDI模型探究水资源与土地资源利用效率及其影响因素的区域差异,以期为黄河流域生态保护和高质量发展提供理论依据。

1 研究区概述及数据来源

1.1 研究区概述

黄河起源于青藏高原的巴颜喀拉山脉,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南以及山东九省区,最后汇入渤海,地势自西向东逐渐降低,高差显著,流域内由三大阶梯地形构成,山脉连绵不绝,冲积平原与山地丘陵交错分布。黄河流经我国干旱、半干旱与半湿润地区,气候类型多样,上游年均气温 $1\sim 8\text{ }^\circ\text{C}$,中游年均气温 $8\sim 14\text{ }^\circ\text{C}$,下游年均气温 $12\sim 14\text{ }^\circ\text{C}$,年降水量 $200\sim 650\text{ mm}$,降水主要集中在每年的7—9月,年际变化大,从东南向西北递减。

研究使用的土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>),空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。DEM数据来源于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn>)。矢量数据来源于自然资源部发布的2017年国家基础地理信息数据库。研究收集了黄河流域流经各省区第一产业、第二产业以及第三产业用水量数据,这些数据来自于流经各省区水资源公报,建设用地面积选取城市建设用地作为分析土地资源利用变化的指标,其数据来源于《中国城乡建设统计年鉴》。

1.2 研究方法

1.2.1 水资源影响因素分析模型 指数分解法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)是衡量各个影响因子对于目标变量影响强度的研究方法,它分解完全无残差,各因素贡献之和等于总变化,能够处理零值和负值问题,使乘法分解与加法分解结果一致,有效解决传统分解方法中普遍存在的残差项问题。LMDI模型基于对数平均权重的数学框架,保证分解结果的唯一性和可逆性,在处理多时期动态分析时表现出较好的时间一致性特征。在实际应用中,LMDI模型已成为驱动因素识别、能源强度变化、归因分析以及产业结构调整效应评估的标准化工具,计算过程相对简便且结果直观,能够清晰识别各驱动因素的贡献程度。研究选择LMDI模型建立

2010—2022年黄河流域各省区水资源和土地资源变化特征的分解模型,按驱动机制分解为若干影响因素的叠加组合^[22]。水资源计算公式如下:

$$\text{TQ} = \sum_i \sum_j Q_{ij} = \sum_i \sum_j \frac{Q_{ij}}{Z_{ij}} \times \frac{Z_{ij}}{Z_i} \frac{Z_i}{R_i} \times R_i Q_{ij} \times K_{ij} \times R_{ij} \quad (1)$$

式中:TQ代表总用水量(m^3); Q_{ij} 指第*i*个区域内第*j*类产业的用水量(m^3); Z_{ij} 指第*i*个区域的第*j*类产业生产总值(万元); Z_i 指第*i*个区域生产总值(万元); R_i 指第*i*个区域的常住人口数量(万人)。

假设时间由0变成*t*,则存在如下等式:

$$\Delta \text{TQ} = \Delta Q_P + \Delta Q_W + \Delta Q_K + \Delta Q_R \quad (2)$$

$$\Delta Q_P = \sum_i \sum_j \frac{Q_{ij}^t - Q_{ij}^0}{\ln Q_{ij}^t - Q_{ij}^0} \ln \frac{P_{ij}^t}{P_{ij}^0} \quad (3)$$

$$\Delta Q_W = \sum_i \sum_j \frac{Q_{ij}^t - Q_{ij}^0}{\ln Q_{ij}^t - Q_{ij}^0} \ln \frac{W_{ij}^t}{W_{ij}^0} \quad (4)$$

$$\Delta Q_K = \sum_i \sum_j \frac{Q_{ij}^t - Q_{ij}^0}{\ln Q_{ij}^t - Q_{ij}^0} \ln \frac{K_{ij}^t}{K_{ij}^0} \quad (5)$$

$$\Delta Q_R = \sum_i \sum_j \frac{Q_{ij}^t - Q_{ij}^0}{\ln Q_{ij}^t - Q_{ij}^0} \ln \frac{R_{ij}^t}{R_{ij}^0} \quad (6)$$

式中: ΔTQ 指总用水量较上一年的变化量(m^3); ΔQ_P 指区域用水定额效应的量化值(m^3); ΔQ_W 指区域产业结构效应的具体数值(m^3); ΔQ_K 指经济规模效应的量化结果(m^3); ΔQ_R 指人口效应的量化结果(m^3),分解效应值为正时,表示要素推动用水量增加;数值为负时,表示要素抑制用水量增加。

1.2.2 水资源影响因素模型 研究构建土地资源影响因素的分析框架,引入建设用地消耗强度变量的规模变动作为影响因素分析框架^[20]。其计算公式如下:

$$L = S/G \quad (7)$$

式中: S 指研究区域城市建设用地总面积(km^2); G 指研究区域第二、第三产业总产值(亿元); L 表示单位GDP建设用地消耗强度, L 值越高,表示单位经济产出所占用的土地面积越大; L 值越低,表示单位经济产出所占用的土地面积越小,土地利用效率越高。

将城市用地变化驱动因素划分为建设用地消耗强度、产业结构、经济规模、区域人口等关键变量,分析对这些变量的影响机理以及彼此之间的交互关系^[23]。其计算公式如下:

$$\text{TS} = \sum_i S_i = \sum_i \frac{S_i}{G_i} \times \frac{G_i}{Z_i} \times \frac{Z_i}{R_i} \quad (8)$$

式中:TS指城市建成区面积(km^2); S_i 指第*i*区的城市建设用地规模(km^2); G_i 指第*i*区第二、第三产业总产值(万元); Z_i 指第*i*区地区生产总值(万元); R_i 指第*i*

个区常住人口数(万人)。

可以将公式(8)转化为:

$$TS = \sum i S_i = \sum i L_i \times C_i \times K_i \times R_i \quad (9)$$

式中: $L_i = S_i/Z_i$ 表示区域城市建设用地消耗强度; $C_i = G_i/Z_i$, 表示二、三产业产值占区域生产总值比重; $K_i = Z_i/R_i$, 表示第 i 区域人均国内生产总值; R_i 为 i 区域常住人口总数。

假设时间由 0 变为 t , 存在等式:

$$\Delta TS_L = \sum i \sum i \frac{S_i^t - S_i^0}{\ln S_i^t - \ln S_i^0} \ln \frac{L_i^t}{L_i^0} \quad (11)$$

$$\Delta TS_C = \sum i \sum i \frac{S_i^t - S_i^0}{\ln S_i^t - \ln S_i^0} \ln \frac{C_i^t}{C_i^0} \quad (12)$$

$$\Delta TS_K = \sum i \sum i \frac{S_i^t - S_i^0}{\ln S_i^t - \ln S_i^0} \ln \frac{K_i^t}{K_i^0} \quad (13)$$

$$\Delta TS_R = \sum i \sum i \frac{S_i^t - S_i^0}{\ln S_i^t - \ln S_i^0} \ln \frac{R_i^t}{R_i^0} \quad (14)$$

式中: ΔTS 代表城市建成区面积在某段时期内的改变量(km^2), 其中 ΔS_L 、 ΔS_C 、 ΔS_K 、 ΔS_R 分别代表建设用地产出效率、产业结构规模、经济规模以及人口密度对城市扩展的影响强度。

1.2.3 模型验证 研究采用一致性方法验证 LMDI 模型精度:(1) 加和检验:验证各分解项之和是否等于总变化量。结果显示,水资源分解的相对误差为 0.008%,建设用地分解的相对误差为 0.012%,均远小于 1%的可接受阈值。(2) 时间可逆性检验:2010—2022 年的分解结果与 2022—2010 年的分解结果对称,各因素效应值的对称性误差均小于 0.1%。(3) 将研究期分为 2010—2016 年、2016—2022 年两段,分段分解结果之和与直接分解 2010—2022 年的结果比较,差异小于 0.5%。模型验证结果表明,采用 LMDI 分解模型的精度满足分解分析的精度要求,能够识别水资源利用和建设用地变化的关键驱动因素。

2 结果与分析

2.1 水资源利用量变化影响因素分解

2.1.1 空间差异

(1) 省域差异。运用 LMDI 模型评估黄河流域九省区用水量变化驱动因素,得出其主要影响因素为用水定额实际用量、产业结构升级、经济规模以及区域人口 4 个因素(表 1)。青海、甘肃、宁夏、山东 4 省区总效应为负值,用水总量呈现出下降特征,其余 5 个省区总效应为正值,用水总量呈现出上升的态势,其中四川省是用水量增加最大的省份,增加了 21.3 亿 m^3 ,而甘肃省是用水量减少最多的省份,减少了 9.1 亿 m^3 。各省区效率效应呈现负值特征,表明用水效率普遍提升,

产生了显著的节水效果。其中四川省节水效果最明显(-232.97 亿 m^3),这主要得益于该省工业用水效率年均提升 8.7%;青海省节水量相对较小(-34.04 亿 m^3),但考虑到其经济体量,单位 GDP 节水率反而最高。在产业结构效应中,青海省产业结构效应值接近于零,产业结构调整对用水量的影响很小;内蒙古自治区产业结构效应为正,产业结构调整促使用水量增加。四川省产业结构效应绝对值为第二,约为 -42.28 亿 m^3 ,而山西省产业效应最小,约为 7.76 亿 m^3 ,两省的产业结构存在较大差异。

表 1 2010—2022 年 9 个省份用水量变化的效应分解表
Table 1 Effect decomposition of water consumption changes in 9 provinces (2010—2022)

省份	用水定额	产业结构	经济规模	区域人口	总效应
青海	-34.039	0.860	25.376	-7.803	-6.30
四川	-232.968	-42.279	286.400	10.148	21.3
甘肃	-117.005	-9.524	120.677	-3.148	-9.0
宁夏	-64.661	-12.760	62.168	9.252	-6.0
内蒙古	-144.723	26.004	133.689	-5.470	9.5
山西	-58.462	-7.758	76.446	-1.926	8.3
陕西	-82.824	-11.284	100.429	5.179	11.5
河南	-181.169	-40.098	213.555	11.112	3.4
山东	-151.526	-28.418	161.895	12.649	-5.4

注:表中数值表示各因素对用水量变化的贡献。负值表示该因素抑制用水量增长(节水作用),正值表示促进用水量增长(增水作用)。用水定额为负值意味着用水效率提升带来节水效果。下表同。

九省区经济规模效应值为正,绝对数值远大于其他 3 个影响因素,表明经济规模是推动用水量变化的重要因素。其中四川省经济规模效应值最高,达到了 286.41 亿 m^3 ,青海省经济规模效应值最低,为 25.38 亿 m^3 。四川省、陕西省、河南省以及山东省等人口净流入省份的区域人口效应值为正值,表明人口迁入对当地水资源供需平衡产生压力,青海省、甘肃省、内蒙古自治区和山西省等人口净流出省份的区域人口效应值为负值,表明人口外迁有效缓解了当地水资源供需压力(图 1)。

(2) 区域差异。根据地理空间分布特征,对黄河流域系统进行分区,划分为上游(青海、四川、宁夏、甘肃)、中游(内蒙古、山西、陕西)和下游(河南、山东)3 个区域。由于各区域所包含的省份数量不同,为使结果合理可靠,通过采用加权平均法得到各区域中省区分解因素效应的均值,进行计算得出结论。

2010—2022 年黄河上游、中游和下游平均水资源消耗量分别为 0.001 亿 m^3 , 9.77 亿 m^3 , 1.12 亿 m^3 ,水资源消耗量呈上升趋势,其中黄河中游地区用水量显著增多,这是由于中游地区产业结构转变没能减少对水

资源需求,产业布局调整存在一些问题(表2)。各区域经济规模效应值(图2)和贡献度(图3)呈正向发展趋势,造成总体水资源消耗量增加趋势明显,具体来看,黄河上游与下游地区的用水定额效应为负向发展,而经济规模与区域人口为正向发展,总体效应值仍为正值,这表明黄河上游、下游地区通过提高用水定额与优化产业结构使单位区域内水资源需求强度降低,而黄河中游地区第一产业比重过大,产业结构效应为正值,导致水资源消耗量大幅增加。

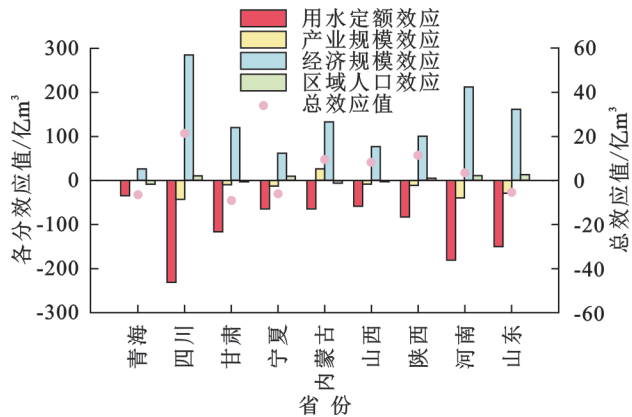


图1 2010—2022年9个省份用水量变化的效应分解
Fig. 1 Effect decomposition of water consumption changes in 9 provinces (2010—2022)

2.1.2 时间差异 通过对2010—2022年黄河流域用水总量变化的主要影响因素进行定量分析(表3),得

表2 2010—2022年黄河流域三大地区用水量的效应分解

Table 2 Effect decomposition of water consumption in three major regions of Yellow River Basin (2010—2022)

区域	用水定额		产业结构		经济规模		区域人口		总效应
	效应值	贡献度/%	效应值	贡献度/%	效应值	贡献度	效应值	贡献度/%	
黄河上游	-112.1	-1279	-15.9	-182	123.6	1410	2.112	24	0.001
黄河中游	-95.30	-1087	2.3	26	103.5	1180	-0.730	-8	9.770
黄河下游	-166.3	-1897	-34.2	-391	187.7	2141	11.881	135	-1.020
合计	-373.8	-4263	-47.8	-546	414.9	4731	13.254	151	8.770

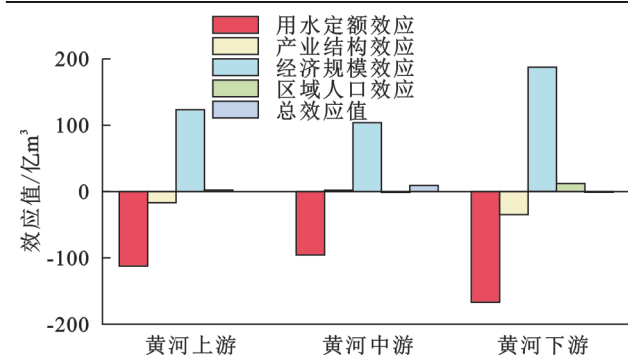


图2 2010—2022年黄河流域上游、中游和下游用水量效应值

Fig. 2 Effect values of water consumption in upper, middle, and lower reaches of Yellow River Basin (2010—2022)

出黄河流域总用水量累积上升25.76亿 m^3 ,用水定额累积效应以及产业结构累积效应分别为-1 067.38亿 m^3 , -125.26亿 m^3 ,用水定额累积效应和产业结构累积效应对水资源消耗具有显著抑制作用,其中用水定额累积效应的抑制作用更为显著。经济规模效应以及区域人口效应为正向增长趋势,其累积效应分别为1 180.64亿 m^3 ,37.76亿 m^3 ,经济规模效应与区域人口效应促使水资源需求量增加。2014—2015年用水定额效应转为正值,短时间内促进了水资源消耗量增加,其他时间里用水定额效应为负值,抑制水资源过度使用。产业结构效应在2019—2020年达到顶峰,但新冠疫情发生使得工业企业大面积陷入停滞状况,致使水资源消耗强度大幅度缩减。2010—2015年经济效应一直处于递减状态,经济增长动力匮乏,直至2019—2020年降到最低点,但在2020—2021年又逐步回升到较高数值。人口效应在2010—2016年慢慢增长,从2016年起开始持续下滑,这是由于人口迁移趋势减缓以及城市化进程逐渐稳定所致,但在2020—2021年由于新冠疫情得到有效控制,经济活动逐步恢复,人口效应也随之出现小幅反弹。通过提高水资源利用效率、优化产业结构等措施,有效遏制了水资源过度消耗的趋势。同时,针对新冠疫情等突发事件可能对水资源管理带来的冲击,应建立和健全应急响应机制,确保水资源安全供给(图4)。

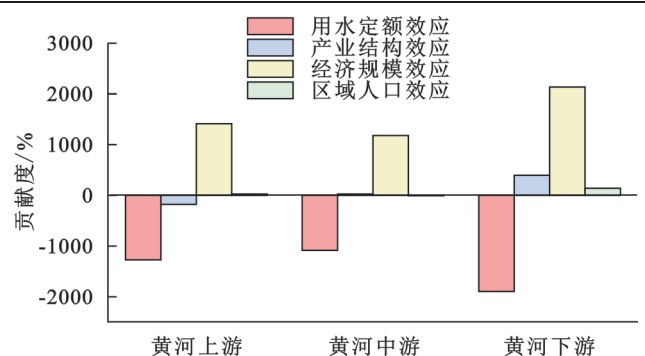


图3 2010—2022年黄河流域上游、中游和下游用水量各效应的贡献度

Fig. 3 Contribution of water consumption effects in upper, middle, and lower reaches of Yellow River Basin (2010—2022)

表 3 2010—2022 年黄河流域用水量变化效应分解表
Table 3 Effect decomposition of water consumption changes in Yellow River Basin (2010—2022)

时间	用水定额	产业结构	经济规模	区域人口	总效应
2010—2011	-165.41	-35.93	225.38	5.14	29.18
2011—2012	-118.27	-7.62	132.49	5.15	11.75
2012—2013	-116.94	6.90	105.49	2.36	-2.19
2013—2014	-100.71	-41.86	88.99	5.42	-48.16
2014—2015	4.71	-2.64	40.51	4.12	46.71
2015—2016	-47.92	-31.31	79.12	6.68	6.58
2016—2017	-33.41	-45.19	73.60	5.23	0.23
2017—2018	-77.69	-24.26	95.48	2.08	-4.39
2018—2019	-75.62	25.26	57.84	2.87	10.36
2019—2020	-126.29	71.36	30.48	1.81	-22.65
2020—2021	-141.36	-37.03	157.66	-3.22	-23.95
2021—2022	-68.47	-2.95	93.60	0.11	22.30
合计	-1067.38	-125.20	1180.64	37.76	25.76

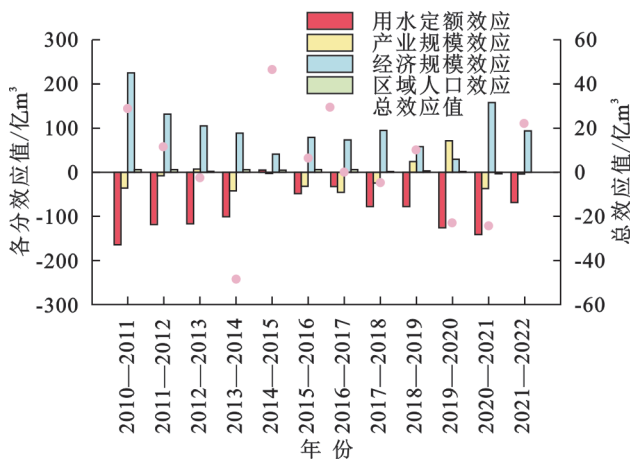


图 4 2010—2022 年黄河流域用水量变化的效应分解

Fig. 4 Effect decomposition of water consumption changes in Yellow River Basin (2010—2022)

2.2 城市建设用地变化的影响因素分解

2.2.1 空间差异 (1) 省域差异。9 省区建设用地驱动因素可以分解为建设用地消耗强度、产业规模、经济规模和区域人口,各效应具体数值如表 4 所示,其中建设用地消耗强度效应值呈负向特征,表明建设用地消耗强度效应值在各省区都呈上升趋势,土地利用效率不断提高,遏制了建设用地无序扩张,其中四川省建设用地消耗强度效应值为 1 047.94 km²,青海省建设用地消耗强度效应值仅为 15.43 km²。从产业规模效应看,除了青海、内蒙古以外,其他省区呈现正效应,产业结构优化对建设用地规模具有一定促进作用,而青海省、内蒙古自治区为负效应,较低的产业支撑能力阻碍了建设用地规模扩张。

从黄河流域各省区建设用地规模效应来看,经济规模效应值为正值,远高于其他效应,是推动土地开发的主要力量,其中山东省作为经济发达省份,其经济规模效应值达到 2 319.07 km²,发展势头强劲;而作为经济较为落后的青海省,经济规模效应值仅为 79.19 km²,差距悬殊,直观地体现了经济发展水平与建设用地消耗之间的密切关系。从建设用地规模效应来看,山东省区域人口效应值高达 184.41 km²,相比之下,青海省仅为 5.05 km²,是青海省的 36.51 倍。各省区区域人口效应存在明显差异,经济发达省区对人口迁入有强大吸引力,导致居住用地、公共管理与服务设施用地以及商业服务业设施用地等建设用地扩张,甘肃省、内蒙古自治区和山西省的区域人口效应值为负,表明这些地区人口迁出大于迁入,限制了城市建设用地的扩张(图 5)。

表 4 2010—2022 年 9 个省份建设用地变化的效应分解
Table 4 Effect decomposition of construction land changes in 9 provinces (2010—2022)

省份	建设用地消耗强度	产业规模	经济规模	区域人口	总效应
青海	-15.429	-0.959	79.194	5.075	67.880
四川	-1047.93	85.958	2263.188	78.188	1379.400
甘肃	-335.427	5.900	718.835	-19.128	370.180
宁夏	-217.373	4.196	319.218	45.558	151.600
内蒙古	-482.915	-21.046	653.870	-26.889	123.020
山西	-596.616	7.087	949.350	-22.431	337.390
陕西	-414.061	20.505	1057.449	53.247	717.140
河南	-877.591	89.029	1716.033	82.099	1009.570
山东	-730.349	63.390	2319.069	184.409	1836.519

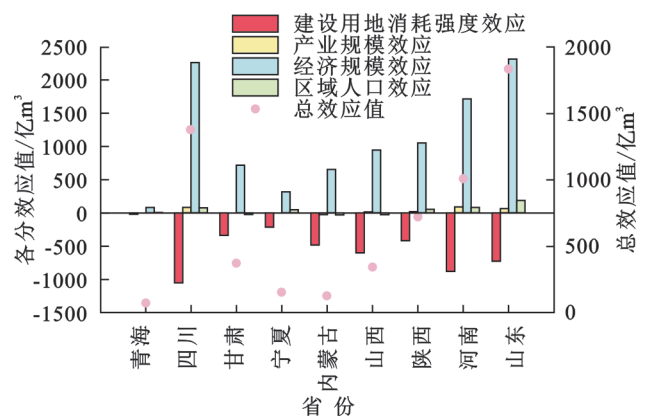


图 5 2010—2022 年 9 个省份建设用地变化的效应分解

Fig. 5 Effect decomposition of construction land changes in 9 provinces (2010—2022)

(2) 区域差异。计算不同地区各效应平均值,对影响黄河流域上游、中游和下游建设用地面积变化

的影响因素进行对比(表5)。建设用地消耗强度效应为负向效应,其余各因素为正向效应。其中,产业规模效应的促进作用较弱,在总效应中的比重较小,

对建设用地的扩张作用较弱,而区域人口效应和产业规模效应为正向促进作用,较产业规模效应强,对建设用地的扩张作用强(图7和图8)。

表5 2010—2022年黄河流域上游、中游和下游建设用地变化影响效应分解表
Table 5 Effect decomposition of construction land change impacts in upper, middle, and lower reaches of Yellow River Basin (2010—2022)

区域	建设用地消耗强度		产业规模		经济规模		区域人口		总效应
	效应值	贡献度/%	效应值	贡献度/%	效应值	贡献度/%	效应值	贡献度/%	
黄河上游	-404.12	-18	23.774	1	845.109	37	27.423	1	492.265
黄河中游	-497.74	-22	2.182	0	886.890	38	1.309	0	392.517
黄河下游	-803.93	-35	76.209	3	2017.550	87	133.250	6	1423.045
合计	-1705.8	-75	102.165	4	3749.50	162	161.980	7	2307.826

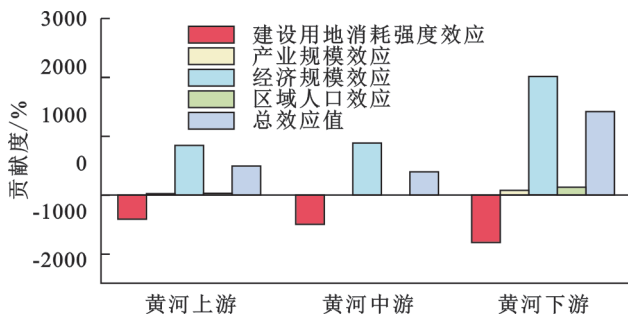


图6 2010—2022年黄河流域上游、中游和下游建设用地变化的效应分解

Fig. 6 Effect decomposition of construction land changes in upper, middle, and lower reaches of Yellow River Basin (2010—2022)

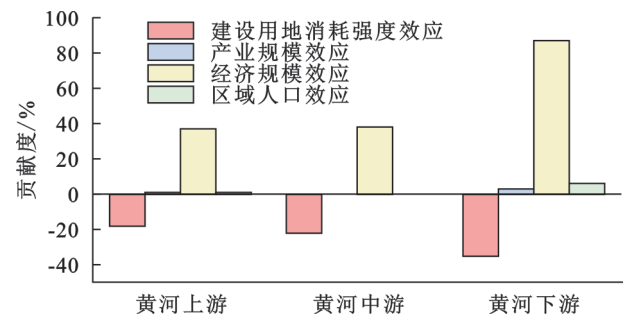


图7 2010—2022年黄河流域上游、中游和下游建设用地变化各效应贡献度

Fig. 7 Contribution of construction land change effects in upper, middle, and lower reaches of Yellow River Basin (2010—2022)

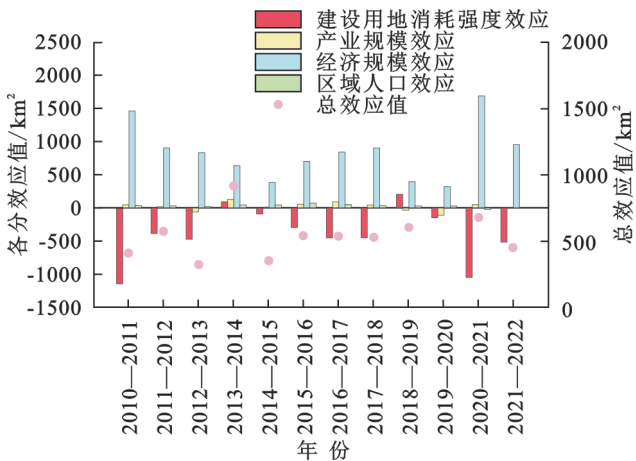


图8 2010—2022年黄河流域建设用地变化的各效应分解

Fig. 8 Effect decomposition of construction land changes in Yellow River Basin (2010—2022)

2.2.2 时间差异 计算得出2010—2022年黄河流域建设用地数量变化的驱动因素分解累积效应值(表6),其中在2013—2014年和2018—2019年建设用地消耗强度的效应值为正值,表明建设用地消耗强度对城市用地扩展起到促进作用,而其他年份为负值,使得建设用地规模缩减,2010—2022年建设用地消耗强度累积效应值为-4 717.69 km²(图8)。

表6 2010—2022年黄河流域建设用地变化各效应分解表
Table 6 Effect decomposition of construction land changes in Yellow River Basin (2010—2022)

时间	建设用地消耗强度	产业规模	经济规模	区域人口	总效应
2010—2011	-1149.82	47.80	1470.92	39.14	408.04
2011—2012	-382.97	17.99	906.41	30.42	571.86
2012—2013	-472.81	-57.98	833.51	19.68	322.40
2013—2014	92.70	130.95	648.10	43.59	915.34
2014—2015	-84.38	13.09	380.19	41.51	350.41
2015—2016	-300.15	55.10	711.99	73.51	540.44
2016—2017	-454.62	89.43	846.88	52.84	534.53
2017—2018	-452.29	42.35	903.17	33.71	526.94
2018—2019	202.69	-28.99	398.75	29.59	602.04
2019—2020	-145.60	-110.24	320.34	34.37	98.87
2020—2021	-1054.14	50.47	1696.12	-17.20	675.25
2021—2022	-516.30	4.09	959.82	-1.02	446.58
累计	-4717.69	254.06	10076.21	380.13	5992.70

区域人口效应值呈现先升后降特征,但从整体上看,区域人口促进了区域建设用地面积扩大,但在2020年后由正值变为负值,这是由于新冠疫情带来的外出人口减少和生育意愿降低等因素影响的结果。2010—

2022年黄河流域各省区经济规模效应值都为正值且数值较大,表明黄河流域经济规模对建设用地扩张的驱动力较强,但2019—2020年经济规模效应和产业规模效应分别降低到 320.34 km^2 和 -110.24 km^2 ,这是由于新冠肺炎疫情防控措施造成人口流动受阻,企业停工,经济增速减缓所致,但疫情结束后的2020—2021年随着企业复工复产,数字经济、在线消费等新兴产业的蓬勃发展,企业加快数字化转型、智能化升级以及需求集中爆发等因素,共同推动经济规模效应达到了峰值。

3 讨论

黄河上、中、下游产业结构调整在水资源节约利用上呈现出显著的地域差异,其中上、下游地区对节水产业转型具有积极响应,而中游地区则面临挑战,这主要源于3个区域在产业结构转型路径上的不同选择,沿黄大部分省份仍处于工业化中后期,经济增长依赖资源程度较高,黄河上游较注重清洁电力、特色农牧业的发展,中游处于农林牧渔比重较高阶段,下游产业注重重化工业和服务业发展,上、下游区的产业结构有利于减轻单位产值的水资源消耗,而中游区产业结构中第一产业仍占较大比重,传统产业的高耗水特点使其产业结构转型不能有效发挥节水作用^[23]。此外,山西省、陕西省长期形成以煤、重化工为特色的产业类型,这种高用水产业在产业结构中仍占有较大比重,无法进行产业结构调整,这种工农结合的格局导致中游用水量增加^[24]。黄河下游地区单位面积水资源消耗降幅显著,但建设用地消耗量增幅最大,这与下游地区经济增长方式改善有密切关系^[25]。山东、河南等省份积极加快推进经济转型升级,发展高新技术产业与现代服务业,虽然需要占用相当比例的建设用地来承载,但单位产值的水资源消耗并不高。2019—2020年新冠疫情显著影响了黄河流域水资源与土地资源开发利用,新冠疫情使得经济活动短期内大幅减少,导致水资源利用和建设用地扩张都大幅度降低^[26]。山东、河南等工业大省,疫情造成工业需水量降幅显著高于农业用水为主的省份。相比之下,农业用水因灌溉时间与水量的刚性需求,即使在疫情期间也没有大的变化^[27]。疫情结束后,在复工复产的影响下,经济规模加速增长使得经济增长逐渐恢复到疫情之前的水平,被抑制的需求加速释放,尤其是建设用地在疫情后出现了比疫情前更快的增长^[28]。

水资源与土地资源之间也存在着耦合关系,黄河流域经济发达省区建设用地扩张快、水资源利用高,经济不发达省区建设用地扩张慢、水资源利用效

率低^[29]。经济发展水平决定了资源利用效率,经济发展越好的地区可能投入更多资金对节水技术进行升级改造,对土地资源进行开发使用。经济发展落后的地区因财力有限,延续粗放型资源利用方式^[30]。此外,城市化进程也导致水资源与土地资源空间错配,人口、产业向城市集聚致使城市土地资源稀缺,随之带来水资源利用效率的提高,水资源与土地资源的这种耦合关系也会引起政策实施的难度,片面追求资源节约会产生意想不到的负面效应,如片面强调建设用地集约利用,可能会导致工业过分集中而加重局部区域的水资源短缺,因而需要从系统的角度来统筹考虑水资源与土地资源综合管控^[29-30]。

研究证实LMD模型在黄河流域水资源与土地资源分解中具有良好适用性,主要体现在LMDI模型分析的精确性,避免了传统Laspeyres指数20%~30%的残差问题,有效处理了黄河流域各省区经济体量差异巨大带来的极值问题,能够同时处理增长型和下降型的变化。采用LMDI模型也存在一定误差,主要是由于统计数据的不确定性以及变异系数处于2%~5%,导致分解结果误差约3.2%;忽略了要素之间的交互作用可能低估协同效应5%~8%,特别是产业结构与技术进步的协同;年度数据掩盖了季节性变化,用水量分解可能偏差 $\pm 4\%$,但主要结论的置信度都在90%以上,研究所得结论稳健。

研究采用的LMDI模型存在以下局限:第一,LMDI的线性分解假设不适用于突变期,需要引入非线性模型;第二,三次产业分类过粗,掩盖了高耗水行业,高耗能行业的异质性;第三,模型未纳入空间维度的相互作用,忽视了上中下游地区间的水资源溢出效应以及对区域用水格局的潜在影响,这些研究的局限性为后续研究指明了拓展方向,引入空间计量模型分析跨区域影响,细化到地级市和行业层面来提高模型精度,也可以结合系统动力学模型进行情景模拟。

4 结论

(1) 2010—2022年黄河流域用水总量净增25.76亿 m^3 ,建设用地面积净增5992.70 km^2 ,水资源消耗强度呈现“中游>上游>下游”的空间分布格局,中游地区因第一产业占比较高,用水增量最为显著,呈现“高耗水、低扩张”特征;建设用地扩张表现为“下游>上游>中游”的空间格局,下游地区建设用地扩张速度最快,呈现“低耗水、高扩张”特征。

(2) 2019—2020年因新冠肺炎疫情用水量的疫情弹性系数为0.65,下降温和;建设用地的疫情弹性系数为0.18,下降剧烈,投资和建设活动几乎停滞。

疫情结束后用水量、建设用地面积增加对经济增长的助推效应显现出来,并逐步恢复达到历史最高点,其中建设用地增速远超用水量增速,反映了部分地方政府“以地谋发展”的路径强化。

(3) 未来黄河中游地区应重点推进农业节水,下游地区新增建设用地应通过挖潜存量来解决。可以以2022年为基准,中游地区节水获得生态补偿,资金来源于基准水资源费基础上的增收部分;建立建设用地指标跨省交易,下游富余指标可售予其他地区;建立覆盖省—市—县三级的水土资源月度更新的动态监测网络,制定突发事件资源保障预案,明确极端情况下的资源调配优先序。

参考文献(References):

- [1] 杨军,徐敬华,曾晨军,等.宁夏清水河流域水土保持作用下的水沙效应研究[J].长江科学院院报,2025,42(6):94-101.
Yang J, Xu J H, Zeng C J, et al. Water and sediment effects of soil and water conservation in Qingshui River Basin, Ningxia[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025,42(6):94-101.
- [2] 李豪,张蕾,梁晓磊,等.基于GeoSOM网络的生态修复分区:以黄河流域山西段为例[J].干旱区研究,2025,42(2):321-332.
Li H, Zhang L, Liang X L, et al. Ecological restoration zoning based on the GeoSOM network: a case study of the Shanxi section of the Yellow River Basin[J]. Arid Zone Research, 2025,42(2):321-332.
- [3] 郜国明,喻权刚,徐佳.黄土高原水土保持碳汇研究及其价值实现路径[J].中国水利,2024(23):12-19.
Gao G M, Yu Q G, Xu J. Studies on carbon sink for soil and water conservation in the Loess Plateau and its value realization paths[J]. China Water Resources, 2024(23):12-19.
- [4] 郜国明.黄河流域水土保持新质生产力发展路径思考[J].人民黄河,2024,46(12):11-16.
Gao G M. Considerations on the development path of new quality productivity for soil and water conservation in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2024,46(12):11-16.
- [5] 王慧,刘荣军,包乌兰托亚.黄河流域数字农业发展水平区域差异及驱动因素研究[J].人民黄河,2025,47(3):18-23.
Wang H, Liu R J, Bao W. Study on regional differences and driving factors of digital agriculture development level in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2025,47(3):18-23.
- [6] 祖雷鸣.黄河流域生态保护和高质量发展水安全保障的实践探索和展望[J].水利发展研究,2025,25(2):1-5,20.
Zu L M. Practical exploration and prospect of water security guarantee for ecological protection and high quality development of the Yellow River Basin [J]. Water Resources Development Research, 2025,25(2):1-5,20.
- [7] Du J, Yang Z H, Yang G Y, et al. Driving force analysis of agricultural economic growth related to water utilization effects based on LMDI method in Ningxia, northwest China[J]. Water, 2021,13(24):3639.
- [8] Fang L, Wu F P, Yu Y T, et al. Irrigation technology and water rebound in China's agricultural sector[J]. Journal of Industrial Ecology, 2020,24(5):1088-1100.
- [9] 薛建春.黄河流域城市水土资源利用效率的耦合协调时空特征研究[J].生态经济,2024,40(3):160-169.
Xue J C. Study on spatio-temporal characteristics of coupling and coordination of water and land resources utilization efficiency in the urban of Yellow River Basin [J]. Ecological Economy, 2024,40(3):160-169.
- [10] 顾朝军,朱永清,黄立文,等.长江流域水土流失变化及影响因素分析[J].中国防汛抗旱,2022,32(S1):24-29.
Gu C J, Zhu Y Q, Huang L W, et al. Analysis of soil erosion change and its influencing factors in the Yangtze River basin [J]. China Flood & Drought Management, 2022,32(S1):24-29.
- [11] 谭琨,赵祖军,赵筱青,等.喀斯特山区文山市水土资源利用变化特征及耦合研究[J].水土保持研究,2021,28(4):324-332.
Tan K, Zhao Z J, Zhao X Q, et al. Utilization variation characteristics and coupling of water and land resources in Wenshan City of karst mountain area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(4):324-332.
- [12] 李彦旻,沈育生,王世航.基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J].水土保持学报,2022,36(1):182-188.
Li Y M, Shen Y S, Wang S H. Spatio-temporal characteristics and effects of terrestrial carbon emissions based on land use change in Anhui Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):182-188.
- [13] 黄明,王宇露.黄河流域水土保持碳汇质量评价指标体系构建[J].人民黄河,2024,46(10):109-115.
Huang M, Wang Y L. Building of an evaluation index system for the quality of soil and water conservation carbon sink in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2024,46(10):109-115.
- [14] 靳峰,周颖,郭璐,等.基于熵权TOPSIS模型的黄河流域甘肃段水土保持治理综合效益评价[J].中国农村水利水电,2024(12):80-89.
Jin F, Zhou Y, Guo L, et al. Evaluation of comprehensive benefits of soil and water conservation management in the Gansu section of the Yellow River Basin based on entropy weighted TOPSIS model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(12):80-89.
- [15] 韩宇,刘焱序,王晨旭.基于水生态系统服务的黄河流域生态修复投资优先区识别[J].生态学报,2024,44

- (18):8126-8137.
- Han Y, Liu Y X, Wang C X. Identification of priority areas for ecological restoration supported by investment based on water ecosystem services in the Yellow River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(18):8126-8137.
- [16] 王菲,陈敏,曹永强,等.黄河流域九省区水-土-能-碳关联系统网络特征[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(4):31-37.
- Wang F, Chen M, Cao Y Q, et al. Network characteristics of water-land-energy-carbon correlation system of nine provinces along the Yellow River Basin [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(4):31-37.
- [17] Kumar N, Tischbein B, Kusche J, et al. Impact of land-use change on the water resources of the Upper Kharun Catchment, Chhattisgarh, India[J]. *Regional Environmental Change*, 2017, 17(8):2373-2385.
- [18] Xie Z H, Zeng Y J, Xia J, et al. Coupled modeling of land hydrology-regional climate including human carbon emission and water exploitation[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2017, 8(2):68-79.
- [19] Su X, Shao W W, Liu J H, et al. How does sponge city construction affect carbon emission from integrated urban drainage system?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 363:132595.
- [20] 唐小洁,郝玉龙,陈琳,等.基于LMDI模型的吐哈地区碳排放驱动因素分析[J]. *环境生态学*, 2025, 7(6):101-108.
- Tang X J, Hao Y L, Chen L, et al. Analysis of carbon emission driving factors in Turpan Hami Region based on LMDI method[J]. *Environmental Ecology*, 2025, 7(6):101-108.
- [21] 施帆帆,王海东,寇玉德.基于LMDI分解模型的上海市公共建筑运行碳排放研究[J]. *能源研究与信息*, 2025, 41(2):82-89.
- Shi F F, Wang H D, Kou Y D. Research on carbon emissions from the operation of public buildings in Shanghai based on LMDI decomposition model [J]. *Energy Research and Information*, 2025, 41(2):82-89.
- [22] 王媛,葛会美,刘香娥,等.生态保护在黄河流域高质量发展的策略研究[J]. *农业灾害研究*, 2024, 14(4):284-286.
- Wang Y, Ge H M, Liu X E, et al. Study on the strategy of ecological protection in high-quality development of the Yellow River Basin [J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2024, 14(4):284-286.
- [23] 鲁仕宝,王少华,裴亮,等.基于LMDI模型的黄河中游城市群水资源利用影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1):140-148.
- Lu S B, Wang S H, Pei L, et al. Analysis of influencing factors of water and land resources utilization in urban agglomeration in the middle reaches of the Yellow River based on LMDI model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1):140-148.
- [24] 薄立明,赵浪,尹力,等.国土空间规划背景下黄河流域水生态空间格局演变特征及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(2):178-190.
- Bo L M, Zhao L, Yin L, et al. Evolution of hydroecological spatiotemporal pattern and its influencing factors in the Yellow River Basin in the context of the territorial spatial planning [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2):178-190.
- [25] 赵阳,辛艳,王友胜,等.黄河上游宁夏段水土保持与水沙变化研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(5):1075-1083.
- Zhao Y, Xin Y, Wang Y S, et al. Study on water and sediment change and soil and water conservation effect in Ningxia section of the upper reaches of the Yellow River [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(5):1075-1083.
- [26] 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(4):37-43, 50.
- Zhang Y K, Sun X M. Measurement and evaluation of water resources utilization efficiency in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4):37-43, 50.
- [27] 鲁仕宝,廉志端,尚毅梓,等.黄河流域经济带生态环境绩效评估及其提升路径[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4):235-242, 249.
- Lu S B, Lian Z D, Shang Y Z, et al. Ecological environment performance assessment and improvement path of the Yellow River Basin economic belt [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4):235-242, 249.
- [28] 迟文峰,王月甜,党晓宏,等.黄河流域土壤侵蚀时空演变与格局特征[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(3):305-317.
- Chi W F, Wang Y T, Dang X H, et al. Temporal variation and spatial pattern of soil erosion in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(3):305-317.
- [29] 马涛,王昊,谭乃榕,等.流域主体功能优化与黄河水资源再分配[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1):240-255.
- Ma T, Wang H, Tan N R, et al. Optimization of main functions of river basin and redistribution of water resources in the Yellow River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1):240-255.
- [30] 杨大文,杨雨亭,高光耀,等.黄河流域水循环规律与水土过程耦合效应[J]. *中国科学基金*, 2021, 35(4):544-551.
- Yang D W, Yang Y T, Gao G Y, et al. Water cycle and soil-water coupling processes in the Yellow River Basin [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(4):544-551.