

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.021

鲁仕宝,王少华,裴亮,等.基于 LMDI 模型的黄河中游城市群水土资源利用影响因素分析[J].水土保持学报,2024,38(1):140-148.

LU Shibao, WANG Shaohua, PEI Liang, 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.

# 基于 LMDI 模型的黄河中游城市群水土资源利用影响因素分析

鲁仕宝<sup>1</sup>, 王少华<sup>2</sup>, 裴亮<sup>3</sup>, 邓伟升<sup>1</sup>, 唐鸿磊<sup>4</sup>

(1.云南大学生态资源保护与利用国家重点实验室,昆明 650000;2.郑州大学管理学院,郑州 450000;

3.中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐 830011;4.昆明理工大学电力学院,昆明 650000)

**摘要:** [目的] 水土资源是城市发展的重要生产要素,是探索黄河中游城市群水土资源利用过程中的关键因素,对科学促进黄河中游城市群经济快速发展具有重要意义。[方法] 以黄河中游三大城市群为例,通过运用 LMDI 加法模型对 2010—2019 年黄河中游三大城市群分别构建影响水资源消耗量变化及城市建设用地数量变化的因素分解模型,计算并比较不同驱动因素的效应值。[结果] (1) 水资源利用效率提高和产业结构的优化能够抑制水资源消耗量的增加,而经济规模和人口规模扩大则促进其增加。(2) 产业规模、经济规模及人口规模扩大对建设用地扩张存在推动作用,而城市建设用地消耗强度对建设用地扩张具有抑制作用。(3) 对于水资源利用量变化,黄河中游不同城市之间产业结构优化水平存在较大差距;对于城市建设用地变化,三大城市群总效应值比较结果为关中平原城市群>中原城市群>晋中城市群。[结论] 基于区域差异和时间差异角度探讨黄河中游城市群水土资源利用的影响因素,有助于丰富水土资源可持续利用的相关研究,为黄河中游城市群的可持续发展提供理论指导。

**关键词:** LMDI 模型;黄河中游城市群;水资源;土地资源

中图分类号:TV213.4;X24

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)01-0140-09

## 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

LU Shibao<sup>1</sup>, WANG Shaohua<sup>2</sup>, PEI Liang<sup>3</sup>, DENG Weisheng<sup>1</sup>, TANG Honglei<sup>4</sup>

(1.State Key Laboratory of Ecological Resources Conservation and Utilization, Yunnan University, Kunming 650000, China;

2. School of Management, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China;

3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

4. School of Electric Power, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China)

**Abstract:** [Objective] Water and land resources are important factors of production for urban development. It is of great significance to explore the key factors in the utilization of water and soil resources in urban agglomerations in the middle reaches of the Yellow River to scientifically promote the rapid economic development of urban agglomerations in the middle reaches of the Yellow River. [Methods] Taking the three major urban agglomerations in the middle reaches of the Yellow River as an example, by using LMDI addition model, the decomposition models of factors affecting the change of water resources consumption and the change of urban construction land quantity were constructed respectively for the three major urban agglomerations in the middle reaches of the Yellow River from 2010 to 2019, and the effect values of different driving factors were calculated and compared. [Results] (1) Water use quota and industrial structure can inhibit the increase of water resource consumption, while economic scale and population scale will promote its increase. (2) The industrial scale, economic scale and population scale have a driving effect on the expansion of construction land, while the consumption intensity of urban construction land has a restraining

收稿日期:2023-05-06

修回日期:2023-08-21

录用日期:2023-11-08

网络首发日期(www.cnki.net):2023-11-24

资助项目:教育部人文社科规划项目(23YJA630068);四川省重点研发项目(22ZDYF2490);四川省哲学社会科学重点项目(SCJJ23ND46);国家自然科学基金项目(42177450)

第一作者:鲁仕宝(1975—),男,博士,教授,博导,主要从事水资源与水环境研究。E-mail:346402642@qq.com

通信作者:裴亮(1982—),男,博士,研究员,博导,主要从事水资源与水环境研究。E-mail:peiliang@igsr.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

effect on the expansion of construction land. (3) For the change of water resources utilization, there is a large gap in the optimization level of industrial structure among different cities in the middle reaches of the Yellow River; for the change of urban construction land, the comparison result of the total effect value of the three major urban agglomerations is Guanzhong Plain urban agglomeration > Central Plains urban agglomeration > Jinzhong urban agglomeration. [Conclusion] Discussing the factors affecting the utilization of water and land resources in urban agglomerations in the middle reaches of the Yellow River from the perspective of regional differences and time differences will help to enrich relevant research on the sustainable use of water and land resources, and provide theoretical guidance for the sustainable development of urban agglomerations in the middle reaches of the Yellow River.

**Keywords:** LMDI model; urban agglomeration in the middle reaches of the Yellow River; water resources; land resources

Received:2023-05-06

Revised:2023-08-21

Accepted:2023-11-08

Online(www.cnki.net):2023-11-24

水土资源是人类赖以生存的基础,对区域经济发展起着决定性作用。随着城镇化、工业化的快速推进,水土资源压力与日俱增,如何提高水土资源的利用效率已成为当下需要重点关注的现实问题。考虑到黄河中游地区的功能定位,其水土资源利用效率应更加重视区域的经济效益和环境效益<sup>[1-2]</sup>。因此,深入剖析影响水土资源利用的关键因素,深刻认识提高水土资源利用效率的有效方式,正是推动黄河中游城市群可持续发展的重要基础。

水土资源利用研究一直是学者关注的焦点。第一,水土资源利用影响因素的分解测度。目前能源消耗及资源变化因素分解的测度方法多种多样,其中指数分解法应用最为广泛<sup>[3-4]</sup>。国内外部分学者利用 LMDI(logarithmic mean divisia index)模型探究了农作物水足迹<sup>[5]</sup>、水资源利用强度<sup>[6-7]</sup>、省域耕地流转变<sup>[8-9]</sup>等的影响因素。第二,水土资源利用与经济增长的关系。一是水资源利用,不同学者通过构建面板 VAR 模型、Romer 阻尼分析模型等考察不同区域的水资源利用与经济增长间的因果关系及动态依存关系<sup>[10-14]</sup>。近年来,脱钩理论在水资源与经济增长的研究中应用较广,部分学者运用 Tapio 脱钩模型与 LMDI 模型研究不同地区水资源利用与经济增长间的脱钩关系及驱动因素<sup>[15-16]</sup>。二是土资源利用,国内外学者主要从土地利用碳排放<sup>[16-17]</sup>、土地城镇化<sup>[15-16,18]</sup>、建设用地扩张<sup>[19-20]</sup>、耕地资源利用<sup>[21]</sup>等角度,在不同时间序列下对土地资源利用与经济增长之间的脱钩状态展开研究。

现有研究取得了较好进展,但仍存在一些不足。例如,当前文献较少运用指数分解法对建设用地等土地资源数量变化进行影响因素的分解研究;相关研究多聚焦于省域、市域,或长三角、珠三角等经济发达的城市群,忽略了黄河中游城市群的水资源量变化的驱

动因素;多数研究重在阐明“脱钩与否”这一问题,较少分析脱钩背后的原因。因此,本文试图利用 LMDI 模型分解影响黄河中游城市群水资源利用量变化及城市建设用地数量变化的驱动因素,探究不同因素的影响程度,阐明城市水资源、建设用地扩张与经济增长间的脱钩状态,以期为城市可持续发展的管控策略提供参考借鉴。

1 研究区域

根据黄河中游三大城市群发展规划文本,黄河中游形成了以郑州为核心的中原城市群,以西安为核心的关中平原城市群和以太原为核心的晋中城市群,共涵盖 24 座城市(图 1)。由于三大城市群均采用重点发展核心城市辐射周边城市的发展模式,同时为保证研究区域的完整性、连续性 & 研究结果的准确性与科学性,本文将不属于黄河流域的安徽亳州市及数据不完整的县区别除,重点研究黄河中游三大城市群核心发展城市。

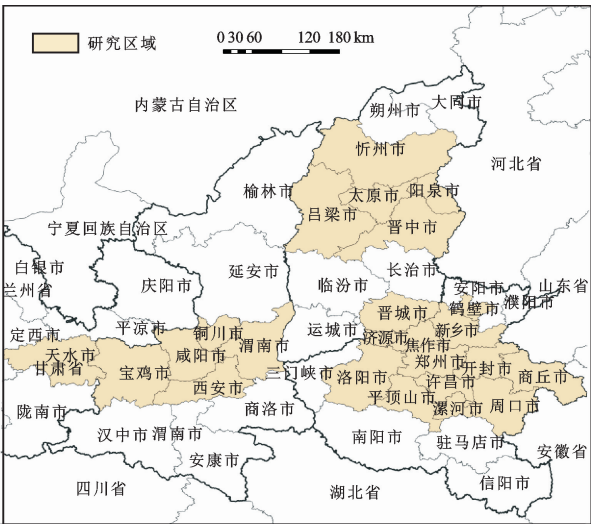


图 1 研究区域  
Fig. 1 Survey region

## 2 研究方法

### 2.1 LMDI 模型构建

2.1.1 水资源利用量变化的影响因素模型 指数分解法主要用以分析不同影响因子对研究对象的作用程度。在指数分解法中,ANG 等<sup>[22]</sup>通过研究验证表明,LMDI 是最优的方法。因此,本文基于 LMDI 加法模型,构建用水量变化的影响因素分解模型,对黄河中游城市群 2010—2019 年水土资源利用的变动情况进行分析。本文黄河中游城市群总用水量可表示为:

$$TW = \sum_i \sum_j W_{ij} = \sum_i \sum_j \frac{W_{ij}}{G_{ij}} \times \frac{G_{ij}}{G_i} \times \frac{G_i}{P_i} \times P_i W_{ij} \times Y_{ij} \times P_i \quad (1)$$

式中:  $TW$  为总用水量( $m^3$ );  $W_{ij}$  为第  $i$  个区域第  $j$  次产业的用水量( $m^3$ );  $G_{ij}$  为第  $i$  个区域第  $j$  次产业生产总值(万元);  $G_i$  为第  $i$  个区域生产总值(万元);  $P_i$  为第  $i$  个区域常住人口总数(万人)。

将公式(1)写成公式(2)

$$TW = \sum_i \sum_j W_{ij} = \sum_i \sum_j I_{ij} \times S_{ij} \times Y_{ij} \times P_i \quad (2)$$

式中:  $I_{ij} = W_{ij} / G_{ij}$ ;  $Y_{ij} = G_i / P_i$ 。

假定时间由 0 变成  $t$ ,则存在以下等式:

$$\Delta TW = \Delta W_I + \Delta W_S + \Delta W_Y + \Delta W_P \quad (3)$$

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

$$\Delta W_S = \sum_i \sum_j \frac{W_{ij}^t - W_{ij}^0}{\ln W_{ij}^t - \ln W_{ij}^0} \ln \frac{S_{ij}^t}{S_{ij}^0} \quad (5)$$

$$\Delta W_Y = \sum_i \sum_j \frac{W_{ij}^t - W_{ij}^0}{\ln W_{ij}^t - \ln W_{ij}^0} \ln \frac{Y_{ij}^t}{Y_{ij}^0} \quad (6)$$

$$\Delta W_P = \sum_i \sum_j \frac{W_{ij}^t - W_{ij}^0}{\ln W_{ij}^t - \ln W_{ij}^0} \ln \frac{P_{ij}^t}{P_{ij}^0} \quad (7)$$

式中:  $\Delta TW$  为总用水量同上一时期相比的变化量( $m^3$ );  $\Delta W_I$  为区域用水定额效应( $m^3$ ),能够反映水资源利用效率对总用水量变化的影响;  $\Delta W_S$  为区域产业结构效应( $m^3$ ),能够反映出产业结构对总用水量变化的影响;  $\Delta W_Y$  为区域经济规模效应( $m^3$ ),能够反映出经济增长对总用水量的影响;  $\Delta W_P$  为区域人口效应( $m^3$ ),能够反映出人口数量对总用水量的影响。若因素分解效应值大于 0,表明该效应推动用水总量的增加,加剧水资源消耗;若因素分解效应值小于 0,表明该效应抑制用水总量的增加,实现水资源节约;若因素分解效应值等于 0,表明该效应对水资源利用的影响不明显。因素分解效应值绝对值越大,表明该效应对水资源利用起到的推动或抑制作用更明显。

2.1.2 城市建设用地面积变化的影响因素模型 同样基于 LMDI 加法模型构建城市建设用地面积变化影响因素模型,引入城市建设用地消耗强度指标的概念<sup>[23]</sup>,计算公式为:

$$U = \frac{L}{E} \quad (8)$$

式中:  $L$  为区域城市建设用地面积( $km^2$ );  $E$  为区域二三产业产值之和( $km^2$ );  $U$  为单位 GDP 产出需要消耗的建设用地面积( $km^2$ ),可以用城市建设用地消耗强度来表示,该指标能够反映出城市建设用地利用效率的高低,  $U$  值越高,表示城市建设用地消耗强度越高,土地资源的利用效率越低,反之土地资源的利用效率越高。同用水量变化的分解效应相同,将影响城市建设用地变化的驱动因素分解为城市建设用地消耗强度、产业结构、经济规模及人口规模,公式为:

$$TL = \sum_i L_i = \sum_i \frac{L_i}{E_i} \times \frac{E_i}{G_i} \times \frac{G_i}{P_i} \quad (9)$$

式中:  $TL$  为城市建设用地总面积( $km^2$ );  $L_i$  为  $i$  区域的建设用地面积( $km^2$ );  $E_i$  为第  $i$  区域二三产业产值总和(万元);  $G_i$  为第  $i$  个区域生产总值(万元);  $P_i$  为第  $i$  个区域常住人口总数(万人)。

可以将公式(9)转化为

$$TL = \sum_i L_i = \sum_i U_i \times S_i \times Y_i \times P_i \quad (10)$$

式中:  $U_i = L_i / G_i$ ,表示区域城市建设用地消耗强度;  $S_i = \frac{E_i}{G_i}$ ,表示二三产业产值占区域生产总值的比重;  $Y_i = G_i / P_i$ ,表示第  $i$  区域人均国内生产总值;  $P_i$  为  $i$  区域常住人口数。

假定时间由 0 变成  $t$ ,则存在等式:

$$\Delta TL = \Delta L_U + \Delta L_S + \Delta L_Y + \Delta L_P \quad (11)$$

$$\Delta TL = \sum_i \sum_i \frac{L_i^t - L_i^0}{\ln L_i^t - \ln L_i^0} \ln \frac{U_i^t}{U_i^0} \quad (12)$$

$$\Delta TL = \sum_i \sum_i \frac{L_i^t - L_i^0}{\ln L_i^t - \ln L_i^0} \ln \frac{S_i^t}{S_i^0} \quad (13)$$

$$\Delta TL = \sum_i \sum_i \frac{L_i^t - L_i^0}{\ln L_i^t - \ln L_i^0} \ln \frac{Y_i^t}{Y_i^0} \quad (14)$$

$$\Delta TL = \sum_i \sum_i \frac{L_i^t - L_i^0}{\ln L_i^t - \ln L_i^0} \ln \frac{P_i^t}{P_i^0} \quad (15)$$

式中:  $\Delta TL$  为城市建设用地总面积同上一时期相比的变化量( $km^2$ );  $\Delta L_U$  表示区域城市建设用地消耗强度效应( $km^2$ ),能够反映出城市建设用地利用效率对城市建设用地总量变化的影响程度;  $\Delta L_S$  为区域产业规模效应( $km^2$ ),能够反映出区域二三产业规模对城市建设用地总量变化的影响程度;  $\Delta L_Y$  为区域经济规模效应( $km^2$ ),能够反映出二三产业经济规模对城



市建设用地总量变化的影响程度; $\Delta L_P$  为区域人口效应( $\text{km}^2$ ),能够反映出区域人口数量对城市建设用地总量变化的影响程度。城市建设用地变化量的分解效应值代表含义同用水量变化分解效应值相同。

## 2.2 指标选取与数据准备

本文选取数据的时间跨度为 2010—2019 年,指标主要为用水量、土地资源利用量、经济增长与人口。

(1)人口指标。为避免因“潮汐式人口流动”现象对人口数量统计的干扰,选取各地市常住人口作为当地人口数量统计指标。各地市常住人口数据来源于各省份历年统计年鉴。

(2) 经济增长指标。本文采用国内生产总值(GDP)作为衡量经济增长变化的指标,数据来源于历年来各省份统计年鉴<sup>[24-26]</sup>。为了消除价格影响,各区域 3 次产业产值数据均按照 2010 年不变价格(2010=100)进行调整,调整后的生产产值数据为各地市实际产值数据,将 3 次产业产值相加可以得到地区生产总值,地区生产总值与地区常住人口数的比值为人均地区生产总值。

(3)用水量指标。本文用水量数据来源于各省份历年的水资源公报<sup>[27-29]</sup>,为了使得用水量分解指标与3次产业相对应,需要重新划分用水类别,即农业生产所消耗的水资源量为第一产业用水量,工业生产所消耗的水资源量为第二产业用水量,本文借鉴贾绍凤等<sup>[30]</sup>对用水量的划分方式,将生活用水量与生态用水量相结合作为第三产业用水量,总用水量即调整后的第一、二、三产业用水量总和。

(4)土地资源利用变化指标。《中国环境统计年鉴》<sup>[31]</sup>将土地利用类型总体划分为农用地、建设用地。笔者在数据收集过程中发现,本文部分研究区域历年来农用地中耕地、园地、草地等统计数据不完备,故仅选取城市建设用地作为土地资源利用变化指标,数据来源于历年住房和城乡建设部发布的《中国城乡建设统计年鉴》<sup>[32]</sup>,并借鉴卢新海等<sup>[33]</sup>的测算方式,综合二三产业经济数据与城市建设用地数据相匹配,研究经济增长与城市建设用地之间的变动关系。

### 3 水资源利用量变化影响因素分解

### 3.1 基于区域差异的影响因素效应分解

(1) 地市差异。通过 LMDI 加法模型将黄河中游城市群 24 个核心发展城市用水量变化的驱动因素分解为用水定额效应、产业结构效应、经济规模效应及人口规模效应, 效应值见图 2。除焦作、鹤壁、商丘、周口、咸阳、天水、晋中 7 市总效应值为负, 其余 17 个地市总效应值均为正, 表明黄河中游城市群除

小部分地市用水总量有所减少,其余大部分地市在研究期间用水量都呈现出上升的态势,其中郑州市与西安市作为中部地区与西北地区的中心城市用水增加量最大的城市,分别增加 4.07 亿  $\text{m}^3$  与 4.22 亿  $\text{m}^3$ 。

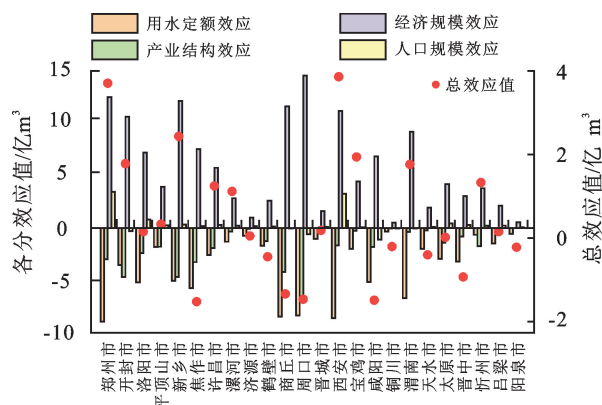


图 2 2010—2019 年 24 个地市用水量变化的分解因素总效应

**Fig. 2** Decomposition factors total effect of water consumption changes in 24 cities from 2010 to 2019

由图 2 可知,所有地市的用水定额效应都为负值,表明各地市水资源利用效率都有不同程度的提高,主要归因于节水技术的应用。郑州市用水定额效应值最高(8.92 亿  $\text{m}^3$ ),是最小值铜川市(0.33 亿  $\text{m}^3$ )的 27 倍,说明黄河中游城市群中不同城市间用水定额效应对降低水资源消耗量的作用程度存在较大差异,也表明区域各地市节水技术的发展水平还存在较大差异。

产业结构效应中,阳泉市产业结构效应值趋近于0,说明其产业结构效应对用水量的变化影响并不显著。其他地市效应值均为负,说明产业结构效应能够降低水资源消耗量,同时也表明黄河中游城市群整体产业结构在不断优化,产业发展逐步由高耗水的第一产业转向低耗水的二、三产业。在研究区域除阳泉市外的所有地市中,周口市产业效应值最大(6.81 亿  $\text{m}^3$ ),是效应最小值铜川市(0.038 亿  $\text{m}^3$ )的 179 倍,说明两市产业结构高级化水平存在明显差异。铜川市产业结构效应与用水定额效应对降低用水量的影响程度最低,从一定程度上说明产业结构优化与技术进步之间存在联系,而高新技术产业的发展有助于技术进步及产业结构优化。

24 个地市中,经济规模效应值全部为正值且远大于其他 3 个影响因素效应绝对值,说明经济规模是影响用水量变化最主要的因素。各地市经济规模效应值的标准差最大(4.22 亿  $\text{m}^3$ ),表明黄河中游城市群不同地市区间经济发展水平存在较大差异。大部分地市人口规模效应值为正,说明它们为人口流入地,

人口规模推动了水资源消耗;少部分地市人口规模效应值为负,说明它们为人口流出地,水资源消耗量有所减少。人口规模效应与经济规模效应一同促进区域水资源消耗,而绝大多数地市总效应值为正,说明正效应对促进水资源消耗的作用强于负效应对水资源消耗的抑制作用,最终导致地市水资源消耗量的增加。

(2)城市群差异。由于不同城市群核心发展城市的个体数有所不同,为了使得 3 个城市群形成可比关系,本节计算得出 3 个城市群内省份分解因素效应平均值,通过对比各分解效应绝对值与总效应的差值,能够直观地反映出不同城市群各分解因素效应对总效应作用强度的差异(图 3)。3 个城市群用水定额效应值与产业结构效应值均为负,经济规模效应值与人口规模效应值均为正,且总效应值均为正,说明三大城市群水资源利用效率和产业结构提升优化,有效降低区域用水量,但经济规模与人口扩张对水资源消耗量更大,最终导致三大城市群水资源消耗总量上升。

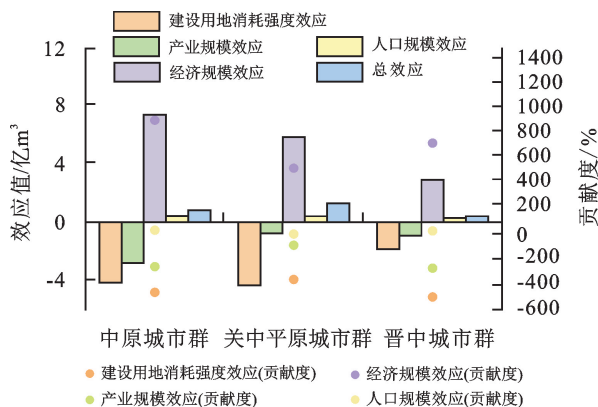


图 3 2010—2019 年三大城市群用水量变化的分解因素总效应

Fig. 3 Decomposition factors total effect of water consumption changes in three major urban agglomerations from 2010 to 2019

2010—2019 年,中原城市群、关中平原城市群、晋中城市群省平均水资源消耗量分别增加 0.79 亿, 1.23 亿, 0.37 亿  $\text{m}^3$ , 关中平原城市群水资源消耗量最大, 主要因为产业结构效应对抑制水资源消耗的作用较小, 从一定程度上反映出西北地区产业结构合理化、高级化水平较低。晋中城市群平均水资源消耗量最低, 主要因为用水定额效应值价低, 水资源利用效率未得到显著提高。

### 3.2 基于时间差异的影响因素效应分解

将上述指标数据代入公式(3)~公式(7), 计算可以得出 2010—2019 年黄河中游城市群用水总量变化的分解因素效应。由图 4 可知, 在研究期间我国黄河中游城市群总用水量累计上升 19.51 亿  $\text{m}^3$ , 其中用

水定额累积效应与产业结构累积效应值分别为 -87.81 亿, -43.34 亿  $\text{m}^3$ , 累积效应值均为负值且绝对值在总效应中占比分别为 450.08% 和 222.14%, 表明用水定额累积效应与产业结构累积效应对水资源消耗起到抑制作用, 并且用水定额效应更显著。经济规模效应与人口规模效应累积效应值分别为 141.96 亿, 8.71 亿  $\text{m}^3$ , 累积效应值为正且在总效应中占比分别为 727.63% 和 44.64%, 表明经济规模与人口规模均对水资源消耗起到推动作用, 其中经济规模的扩张是加剧水资源消耗的主要因素。由于经济规模效应对水资源消耗的作用程度较强, 对水资源的消耗量抵消了水资源利用效率提高以及产业结构优化所节约下来的用水量, 最终使得黄河中游城市群在研究区间的水资源消耗量增加 19.51 亿  $\text{m}^3$ 。

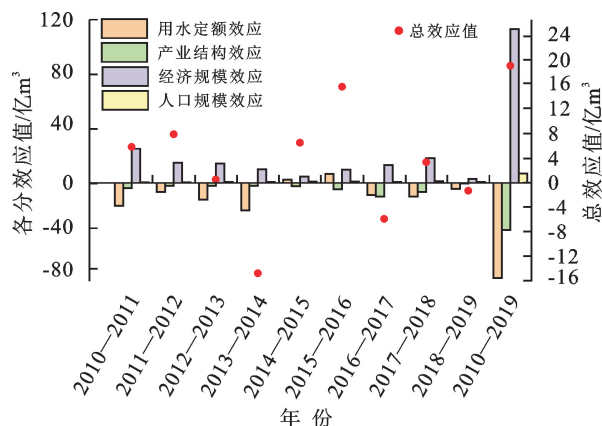


图 4 2010—2019 年黄河中游城市群用水量变化的效应分解

Fig. 4 Effect decomposition unit of water consumption change of urban agglomeration in the middle reaches of the Yellow River from 2010 to 2019

用水定额效应值在 2014—2016 年出现正值, 意味着该驱动因素在此期间对用水量起到推动作用, 通过分析不同区域分解效应值可知, 主要原因在于中原城市群在此期间农业用水的大幅度增加, 第一产业 GDP 却呈现出略微下降的趋势; 其他两大城市群用水量变化不大, 但第二产业 GDP 都呈现出不同程度的降低, 说明在 2014—2016 年黄河中游城市群整体水资源利用较为粗放导致利用效率降低。在其他年间, 用水定额效应都能够有效降低水资源的消耗量, 整体累积效应也呈现出抑制水资源消耗量的作用。产业结构效应在研究区间同样对水资源消耗起到抑制作用, 也表明黄河中游城市群的产业结构合理化、高级化水平在不断提高。

从图 3 可以直观地看出, 经济规模效应值始终为正值, 且远大于其他 3 个驱动因素的效应绝对值, 说明经济规模是影响黄河中游城市群水资源消耗量变化

的最主要的因素,与人口规模效应一同推动区域用水量的增加。2010—2013年经济规模效应值最大而其余年间效应值相对较小,从一定程度上也表明黄河中游城市群的经济的发展逐步放缓,逐步由数量型经济增长转向质量型经济增长。人口规模效应值较小但在研究区整体呈现出增长态势,表明人口规模在不断增大,随着“二胎三胎”政策的放开,预计未来人口还会有有一定规模的增长,对用水量的需求也会不断增大。

#### 4 城市建设用地变化的影响因素分解

#### 4.1 基于区域差异的影响因素效应分解

(1) 地市差异。将 24 个地市建设用地变化的驱动因素分解为建设用地消耗强度效应、产业规模效应、经济规模效应及人口规模效应,各效应值见图 5。建设用地消耗强度效应反映了建设用地集约利用程度,除西安市、晋中市、吕梁市建设用地消耗强度效应值为正外,其余地市定额效应值均为负,说明各地市土地利用效率普遍提高,抑制了区域建设用地的扩张,建设用地消耗强度效应为建设用地面积减少的主要因素。郑州市建设用地消耗强度效应绝对值最大( $83.59 \text{ km}^2$ ),晋中市建设用地消耗强度效应绝对值最小( $2.36 \text{ km}^2$ ),标准差为  $25.66 \text{ km}^2$ ,说明黄河中游城市群不同地市建设用地集约利用水平差异较大。

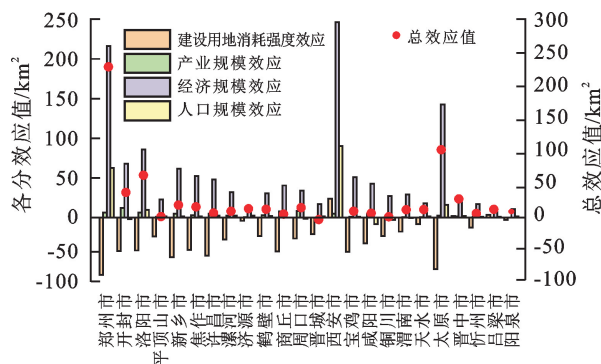


图5 2010—2019年黄河中游各地市群建设用地变化的效应分解

**Fig. 5** Effect decomposition unit of urban construction land change in of the Middle Yellow River from 2010 to 2019

城市建设用地产业规模效应值全部为正值,说明产业结构的升级对建设用地的需求与日俱增。开封市产业规模效应值最大( $13.93 \text{ km}^{23}$ ),阳泉市效应值最小( $0.057 \text{ km}^2$ ),产业规模效应最大值是最小值的244倍,说明不同地市间产业规模差异较大,因此对不同地市产业规模对当地城市建设用地扩张的影响程度也具有较大差异。产业规模与其他影响因素效应值相比较小,说明产业规模的扩张虽然会推动建设用地的扩张,但影响效果相对较小。

研究区域所有地市城市建设用地经济规模效应值都为正且远大于其他 3 个效应值的绝对值,表明扩大经济规模同样是推动建设用地扩张的最主要因素。郑州市、西安市、太原市作为作为三大城市群的中心城市,经济发展水平和经济规模效应值位居前列,说明城市建设用地随着经济规模的扩大而扩张,区域经济的快速发展离不开建设用地的大量供给作为支撑。黄河中游城市群 24 个地市中,西安市经济规模效应值最大( $285.64 \text{ km}^2$ ),吕梁市效应值最小( $8.72 \text{ km}^2$ ),两市经济发展水平差距较大,对城市建设用地扩张的影响程度也有较大差距。但各地市经济规模效应值的平均值( $64.52 \text{ km}^2$ )与标准差( $69.84 \text{ km}^2$ )差距较小,可以一定程度上反映黄河中游城市群中核心发展城市与其他地市经济发展水平差距较大,而非核心发展城市的地市之间差距较小。因此,在其他条件一定的前提下,非核心发展城市未来要实现经济的高速、高质量发展,还需要进一步扩张城市建设用地。

绝大多数城市人口规模效应值为正,说明人口规模效应同样是推动建设用地扩张的主要因素。与经济规模效应相同,3个核心发展城市人口规模效应值远大于其他地市的效应绝对值。在仅考虑正效应作用的前提下,西安市人口规模效应值( $104.68 \text{ km}^2$ )是效应绝对值最小值焦作市( $1.08 \text{ km}^2$ )的97倍,既说明地市间人口规模的差距,也反映了中心城市对人口的虹吸作用远大于其他地市,人口的增加带来的是居住用地、商服用地等建设用地的扩张。开封、咸阳、铜川等地市人口规模效应值为负,说明地市人口呈现出小部分人口外流的现象,因而抑制了当地城市建设用地的扩张。

(2)城市群差异。通过计算不同分解效应值在各城市群内部分地市平均值,以对比影响3个城市群建设用地面积变化的驱动因素。由图5和图6可知,除建设用地消耗强度效应为负效应,即土地利用效率的提高促使城市建设用地面积的缩小,其他效应均为正效应,推动了城市建设用地面积的扩大。

产业规模效应对城市建设用地面积扩张总效应的贡献度最低,说明产业规模的扩张对城市建设用地扩张的推动作用最小。人口规模效应同样对城市建设用地扩张起到推动作用,且作用强度大于产业规模效应。3个城市群的经济规模效应均对总效应的贡献度最大,同人口规模效应与产业规模效应一起推动城市建设用地的扩张,并且抵消了建设用地消耗强度效应对城市建设用地面积扩张的负效应。从3个城市群内部地市平均水平来看,城市建设用地面积平均分别增加 36.12, 78.6, 34.97 km<sup>2</sup>, 3个城市群城市建



设用地面积总体呈现出扩张的态势(图 6)。

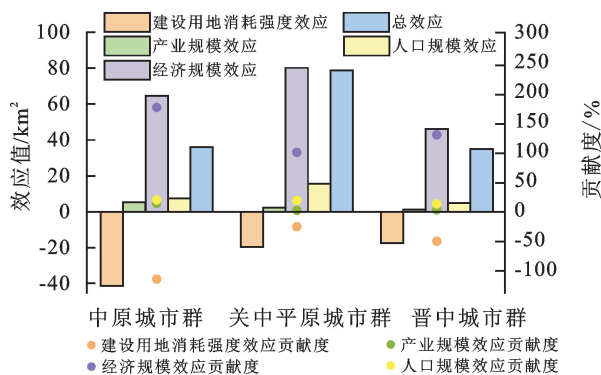


图 6 2010—2019 年黄河中游城市群城市建设用地变化的效应分解

Fig. 6 Effect decomposition unit of urban construction land change in urban agglomeration of the Middle Yellow River from 2010 to 2019

#### 4.2 基于时间差异的影响因素效应分解

计算黄河中游城市群 2010—2019 年历年来影响城市建设用地数量变化的驱动因素分解累积效应值(图 7)。建设用地消耗强度效应值在 2014—2015 年和 2018—2019 年为正值,说明在此年间建设用地消耗强度效应对城市建设用地扩张起到正向推动作用,主要原因在于土地资源利用效率低下,建设用地扩张速度大于经济增长的速度。其他年间,该效应均促使建设用地面积缩减。2010—2019 年建设用地消耗强度累积效应值为  $-739.68 \text{ km}^2$ ,总体来看,黄河中游城市群土地资源利用效率的提高实现了区域土地资源集约利用,在其他条件一定的前提下,可以节省大规模的区域城市建设用地面积。但是产业规模效应、经济规模效应、人口规模效应作为正效应,都推动了区域城市建设用地面积的扩张。

在用水量变化效应分解当中,产业结构的优化使得高耗水的第一产业向低耗水的二、三产业发展,降低了用水量。然而二、三产业的高速发展需要大量的建设用地供给。因此,黄河中游城市群 2010—2019 年区域产业结构向高级化、合理化的方向发展,在技术水平一定的前提下,区域产业规模的扩大会小幅度提高对建设用地的需求。通过各地市历年来人口规模效应值变化规律可知,郑州市、西安市、太原市 3 个区域中心城市人口规模效应值变化浮动较大,其他地市变化均较为平稳。因此黄河中游城市群人口规模效应值呈现出先上升后下降的变化趋势,主要原因在于 3 个中心城市人口规模变化,总体上对区域建设用地面积的扩张起到推动作用,并且在研究区间内,人口规模效应累积值大于产业规模效应累积值,因此人口规模效应对建设用地面积扩张的作用强度高于产业规模效应。

由图 6 可知,2010—2019 年黄河中游城市群经济规模效应值均为正值且远大于其他 3 个效应值,表明经济规模效应对建设用地面积扩张的驱动作用最强。同样由于经济规模效应的影响,抵消了在建设用地消耗强度效应影响下所减少的城市建设用地面积,并最终使得区域城市建设用地面积的扩张。

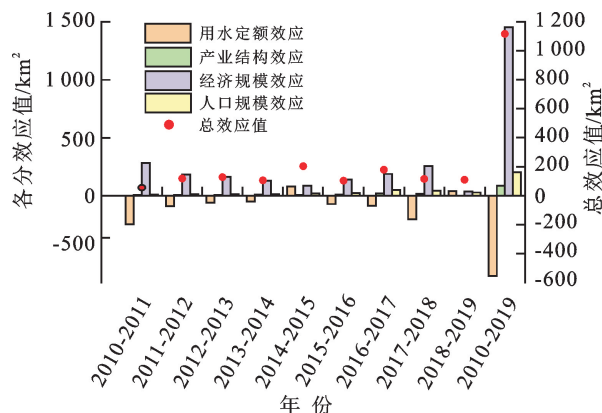


图 7 2010—2019 年黄河中游城市群城市建设用地基于时间差异的变化效应分解

Fig. 7 Decomposition unit of urban construction land change effect of urban agglomeration in the middle reaches of the Yellow River on temporal differences from 2010 to 2019

## 5 结论

(1)水资源利用效率的提高和产业结构的优化都能够抑制水资源消耗量的增加,而相较于产业结构调整,水资源利用效率的提高对降低用水量的影响程度更大。经济规模是水资源消耗量变化最主要的驱动因素,同人口规模因素一起推动水资源消耗量的增加。

(2)黄河中游城市群各地市产业结构效应值较大,反映了不同城市之间产业结构优化水平具有较大差距。对比不同城市群内各效应值省份平均值可知,关中原城市群水资源消耗增加量最多,主要原因在于该城市群产业结构优化水平较低,高耗水的第一产业仍占据较大比重。因此,产业结构的优化一定程度上取决于非农产业的比重,用水效率低的第一产业向用水效率高的二、三产业发展是减少水资源消耗量的关键。

(3)城市建设用地消耗强度,即城市建设用地利用效率对建设用地的扩张起到抑制作用,而产业规模效应、经济规模效应及人口规模效应均对建设用地扩张起到推动作用。其中产业规模效应影响作用最小,经济规模效应影响程度最大,在所有因素的作用下,黄河中游城市群城市建设用地面积呈现出扩张态势。

(4)通过对比三大城市群各效应值地市平均值可知,关中原城市群地市建设用地扩张面积均值最

大,主要原因在于区域建设用地利用效率相对较低,对抑制城市建设用地面积扩张的作用较小。以西安市及部分年份为例,当城市建设用地面积扩张速度大于二三产业产值增长速度时,建设用地消耗强度效应值为正,说明该效应也会对城市建设用地面积的扩张产生推动作用。

#### 参考文献:

- [1] 巩灿灿,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.  
GONG C J, XU C L, ZHANG X Q. Spatio-temporal evolution and influencing factors of water resources utilization efficiency of cities along the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(11): 1930-1939.
- [2] 孙才志,谢巍.中国产业用水变化驱动效应测度及空间分异[J].经济地理,2011,31(4):666-672.  
SUN C Z, XIE W. Measurement of the driving effects on industrial water utilization change and its spatial difference analysis in China[J]. Economic Geography, 2011, 31(4): 666-672.
- [3] WANG W W, LIU X, ZHANG M, et al. Using a new generalized LMDI (logarithmic mean division index) method to analyze China's energy consumption[J]. Energy, 2014, 67: 617-622.
- [4] LIN B Q, XU M M. Regional differences on CO<sub>2</sub> emission efficiency in metallurgical industry of China[J]. Energy Policy, 2018, 120: 302-311.
- [5] XU Y J, HUANG K, YU Y J, et al. Changes in water footprint of crop production in Beijing from 1978 to 2012: A logarithmic mean division index decomposition analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87(1): 180-187.
- [6] 陈东景.中国工业水资源消耗强度变化的结构份额和效率份额研究[J].中国人口·资源与环境,2008,18(3): 211-214.  
CHEN D J. Structure share and efficiency share of industrial water consumption intensity change in China [J]. China Population Resources and Environment, 2008, 18(3): 211-214.
- [7] 吴厚纯,王成军,费喜敏.浙江省耕地数量变化的因素分解分析[J].浙江农林大学学报,2015,32(6):933-939.  
WU H C, WANG C J, FEI X M. Factor decomposition study of farmland change in Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2015, 32(6): 933-939.
- [8] 王桂民,陈聪,曹光乔,等.中国耕地流转时空特征及影响因素分解[J].农业工程学报,2017,33(1):1-7.  
WANG G M, CHEN C, CAO G Q, et al. Spatial-temporal characteristics and influential factors decomposition of farmland transfer in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 1-7.
- [9] 潘丹,应瑞瑶.中国水资源与农业经济增长关系研究:基于面板 VAR 模型[J].中国人口·资源与环境,2012,22(1):161-166.  
PAN D, YING R Y. Relationship between water resource and agricultural economic growth in China: Research based on panel VAR [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(1): 161-166.
- [10] 华坚,张瑶瑶,王丹,等.西北五省水资源消耗对经济增长的影响[J].水利经济,2018,36(4):1-6,75.  
HUA J, ZHANG Y Y, WANG D, et al. Effect of consumption of water resources on economic growth of five provinces in Northwest China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(4): 1-6, 75.
- [11] 魏玮.基于 VAR 模型的湖北省水资源利用与经济增长的动态关系研究[J].特区经济,2022(9):65-68.  
WEI W. Dynamic interaction between water resources utilization and economic growth in Hubei Province based on VAR model [J]. Special Zone Economy, 2022(9): 65-68.
- [12] 孙付华,杨一帆,沈菊琴,等.基于水足迹-LMDI 模型的江苏省水资源利用与经济发展的脱钩关系研究[J].江苏社会科学,2020(6):233-240.  
SUN F H, YANG Y F, SHEN J Q, et al. Study on the decoupling relationship between water resources utilization and economic development in Jiangsu Province based on water footprint-LMDI model [J]. Jiangsu Social Sciences, 2020(6): 233-240.
- [13] 章恒全,徐甜甜,张陈俊.长江三角洲地区工业用水量与经济增长的脱钩研究[J].资源与产业,2022,24(1):115-125.  
ZHANG H Q, XU T T, ZHANG C J. Decoupling study on industrial water use and economic development in Yangtze River Delta region [J]. Resources and Industries, 2022, 24(1): 115-125.
- [14] 侯爱冰,李长春,聂龑,等.甘肃省水资源利用与经济增长的脱钩效应及驱动因素分析[J].水利水电技术(中英文),2022,53(5):55-64.  
HOU Y B, LI C C, NIE Y, et al. Analysis on decoupling effect and driving factors between water resources utilization and economic growth in Gansu Province [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(5): 55-64.
- [15] KUMAR P, AGGARWAL S C. Does an environmental Kuznets curve exist for changing land use? Empirical evidence from major states of India [J]. International Journal of Sustainable Development, 2003, 6(2): e231.
- [16] 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.
- [17] 朱纪广,许家伟,李小建,等.中国土地城镇化和人口城



- 镇化对经济增长影响效应分析[J].地理科学, 2020, 40(10):1654-1662.
- ZHU J G, XU J W, LI X J, et al. Impact of land urbanization and population urbanization on economic growth in China[J].Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(10):1654-1662.
- [18] 陈伊多, 杨庆媛. 西藏自治区土地利用/覆被变化时空演变特征及驱动因素[J].水土保持学报, 2022, 36(5): 173-180.
- CHEN Y D, YANG Q Y. Temporal and spatial characteristics and driving factors of land use/cover change in Tibet Autonomous Region[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5):173-180.
- [19] 田文佳, 程宇丹, 龚六堂. 基于土地视角的中国城乡结构转型与经济增长[J].经济学, 2021, 21(3):909-930.
- TIAN W J, CHENG Y D, GONG L T. China's urban-rural structural change and economic growth from land perspective[J].China Economic, 2021, 21(3):909-930.
- [20] 江晓波, 马泽忠, 曾文蓉, 等. 三峡地区土地利用/土地覆被变化及其驱动力分析[J].水土保持学报, 2004, 18(4):108-112.
- JIANG X B, MA Z Z, ZENG W R, et al. Land-use/cover change process and driving force analysis in Three Gorges Area[J].Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(4):108-112.
- [21] 王翔宇, 高培超, 宋长青, 等. 不同尺度下城市用地扩张与经济增长的脱钩关系: 以山东省为例[J].经济地理, 2021, 41(3):97-104, 125.
- WANG X Y, GAO P C, SONG C Q, et al. Decoupling analysis between urban land expansion and economic growth at the different scale: A case study of Shandong Province in China[J].Economic Geography, 2021, 41(3):97-104, 125.
- [22] ANG B, ZHANG F, CHOI K. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition[J].Energy, 1998, 23(6):489-495.
- [23] 李永乐, 吴群. 经济增长与耕地非农化的 Kuznets 曲线验证: 来自中国省际面板数据的证据[J].资源科学, 2008, 30(5):667-672.
- LI Y L, WU Q. Validation of kuznets curve for economic growth and cultivated land conversion: Evidence from provincial panel data in China[J].Resources Science, 2008, 30(5):667-672.
- [24] 河南省统计局. 河南省统计年鉴(2010—2019)[EB/OL]. [2020-01-21] <https://tjj.henan.gov.cn/tjfw/tjcbw/tjnj/>.
- Henan Provincial Bureau of Statistics. Henan Statistical Yearbook (2010—2019) [EB/OL]. [2020-01-21] <https://tjj.henan.gov.cn/tjfw/tjcbw/tjnj/>.
- [25] 山西省统计局. 山西省统计年鉴(2010—2019)[EB/OL]. [2020-01-07] <http://tjj.shanxi.gov.cn/sxsj-show/yearData>.
- Shanxi Provincial Bureau of Statistics. Shanxi Statistical Yearbook (2010—2019) [EB/OL]. [2020-01-07] <http://tjj.shanxi.gov.cn/sxsj-show/yearData>.
- [26] 陕西省统计局. 陕西省统计年鉴(2010—2019)[EB/OL]. [2019-12-09] <http://tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/ndsj/tjnj/>.
- Shaanxi Provincial Bureau of Statistics. Shaanxi Statistical Yearbook(2010—2019)[EB/OL]. [2019-12-09] <http://tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/ndsj/tjnj/>.
- [27] 河南省水利厅. 河南省水资源公报(2010—2019)[EB/OL]. [2023-08-01] <https://slt.henan.gov.cn/bmzl/szygl/szygb/>.
- Henan Provincial Department of Water Resources. Henan Water Resources Bulletin (2010—2019) [EB/OL]. [2020-08-01] <https://slt.henan.gov.cn/bmzl/szygl/szygb/>.
- [28] 山西省水利厅. 山西省水资源公报(2010—2019)[EB/OL]. [2021-06-09] <http://slt.shanxi.gov.cn/zncs/szyc/szygb/>.
- Shanxi Provincial Department of Water Resources. Shanxi Water Resources Bulletin (2010—2019) [EB/OL]. [2021-06-09] <http://slt.shanxi.gov.cn/zncs/szyc/szygb/>.
- [29] 陕西省水利厅. 陕西省水资源公报(2010—2019)[EB/OL]. [2020-09-14] <http://slt.shaanxi.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/zd gz/szygb/>.
- Shaanxi Provincial Department of Water Resources. Shaanxi Provincial Water Resources Bulletin (2010—2019) [EB/OL]. [2020-09-14] <http://slt.shaanxi.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/zd gz/szygb/>.
- [30] 贾绍凤, 张士锋, 夏军, 等. 经济结构调整的节水效应[J].水利学报, 2004(3):111-116.
- JIA S F, ZHANG S F, XIA J, et al. Water-saving effect of economic restructuring [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3):111-116.
- [31] 国家统计局, 生态环境部. 中国环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010-2019.
- National Bureau of Statistics, Ministry of Ecology and Environment. China Environmental Statistics Yearbook [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2010-2019.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴(2010年)[M]. 北京: 中国计划出版社, 2010—2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China's Urban Construction Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2010—2019.
- [33] 卢新海, 李佳, 刘超, 等. 中国城市土地绿色利用效率驱动因素及空间分异[J].地理科学, 2022, 42(4):611-621.
- LU X H, LI J, LIU C, et al. Driving factors and spatial differentiation of urban land green utilization efficiency in China[J].Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(4):611-621.