

基于三维水足迹模型的河南省水资源 可持续利用水平评价

甘容^{1,2}, 李旖旎^{1,2}, 杨峰³, 翟勇³

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省地下水污染防治与修复重点实验室,
河南 郑州 450001; 3. 河南省出山店水库建设管理局, 河南 信阳 464043)

摘要: 基于三维水足迹模型, 以水生态赤字与盈余、水压力指数、水资源集约利用指数和水资源可持续指数4个指标构建水资源可持续利用水平指标评价体系, 从时间上和空间上分析河南省的水资源可持续利用水平, 并且利用对数平均迪氏指数分解法分析水足迹变化的驱动因素。结果表明: 河南省水足迹由大到小为生产用水足迹、生活用水足迹和生态用水足迹, 其中豫北和豫中各市的水足迹深度较大; 河南省整体水资源可持续利用水平较差, 其中豫北和豫中地区的水资源可持续利用水平最差; 经济规模效应、人口规模效应对水足迹的变化具有正向驱动作用, 而水足迹强度效率效应和水资源承载力效应具有负向驱动作用。

关键词: 水资源承载力; 三维水足迹模型; 水资源可持续利用水平; 对数平均迪氏指数分解法; 河南省

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)01-0030-10

Assessment of sustainable utilization level of water resources in Henan Province based on a three-dimensional water footprint model

GAN Rong^{1,2}, LI Yini^{1,2}, YANG Feng³, ZHAI Yong³

(1. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Key Laboratory of
Groundwater Pollution Prevention and Rehabilitation, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Administration of
Chushandian Reservoir Construction, Xinyang 464043, China)

Abstract: Based on a three-dimensional water ecological footprint model, an index evaluation system of sustainable utilization of water resources was constructed with four indexes, including water ecological deficits and surplus, water pressure index, water resources intensive use index and water resources sustainable index. Then, the sustainable utilization level of water resources in Henan Province was analyzed from spatial and temporal perspectives, and the driving factors of water footprint change was also discussed using logarithmic mean Divisia index analysis. The results show that the water footprint of Henan Province from largest to smallest is production water ecological footprint, domestic water ecological footprint and ecological water ecological footprint, and the water footprint depth of the cities in eastern Henan and central Henan is larger. Moreover, the overall sustainable utilization of water resources in Henan Province is poor, among which the cities in north Henan and central Henan have the worst performance. Economic scale effect and population scale effect have a positive driving influence on the changes of water footprint, whereas intensity efficiency effect of water footprint and water resources carrying capacity effect have a negative driving influence.

Key words: water resources carrying capacity; three-dimensional water footprint model; sustainable utilization of water resources; logarithmic mean Divisia index (LMDI); Henan Province

收稿日期: 2022-08-24; 修回日期: 2022-11-14

基金项目: 河南省水利科技攻关计划项目 (GG202026); 清华大学水沙科学水利水电工程国家重点实验室及宁夏银川水联网数字治水联合研究院联合开放研究基金课题 (sklhse-2020-low11)

作者简介: 甘容 (1983-), 女, 湖北随州人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为水文学及水资源。

通讯作者: 李旖旎 (2000-), 女, 河南永城人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。

1 研究背景

水资源对人类生活、生产以及生态环境的维持和发展具有不可替代的作用。随着我国经济社会的高速发展以及人口的增长,水资源短缺和水环境问题日益凸显。河南省是我国水资源短缺和水环境问题最为严重的省份之一,2020 年全省年平均水资源量为 $408.59 \times 10^8 \text{ m}^3$,人均水资源占有量仅为 354.5 m^3 ,不足全国平均水平的 $1/6$,不足世界水平的 $1/20$ 。水资源的可持续利用已成为促进经济社会与生态环境协调发展、缓解水资源供需矛盾以及改善生态环境问题的关键环节^[1-4]。

目前水资源可持续利用水平评价已成为热门研究方向,国内外学者围绕水资源可持续利用评价开创了许多研究方法^[5-7],例如 DPSIR (driving forces – pressure – state – impact – responses)^[8]、AHP (analytic hierarchy process) – 模糊综合评价法^[9]、SE – DEA – IAHP 法 (super-efficiency data envelopment analysis, SE – DEA; interval analysis hierarchy process, IAHP)^[10] 和生态足迹法^[11-12] 等。生态足迹理论是 20 世纪 90 年代初由 Rees 等提出, Niccolucci 等^[13-14] 在此基础上又引入足迹大小和足迹深度,分别反映自然资本存量和自然资本流量,形成了三维生态足迹模型。水足迹模型即为生态足迹理论在水资源领域的应用,是将水资源的消耗量折算成水资源的用地面积,三维水足迹模型现已被多次运用于水资源可持续利用水平的计算中^[15-16]。

以往对河南省的水资源可持续利用评价大多是将河南省作为一个整体进行评价^[17-18],主要研究河南省水资源可持续利用水平在时间上的变化。然而河南省面积广阔、经纬度跨度较大,水资源和降水分布极不均匀,各市的经济发展状况也不尽相同,对河南省水资源可持续利用水平进行空间上的分析至关重要。空间上的分析可以具体确定河南省各市的水资源可持续利用水平,并且针对水资源可持续利用水平较差的地区制定合理的发展政策。其次,以往的研究普遍使用水资源可持续利用评价指标的评价结果来确定影响地区水足迹的因素,但这种评价是不够深入的。因此本研究以河南省及其 18 个地级市为研究对象,在构建水资源可持续利用评价指标体系的同时,使用了对数平均迪氏指数分解法 (logarithmic mean Divisia index, LMDI)^[19-22] 来具体分析影响河南省水足迹的驱动因素,为河南省水资源可持续利用及高质量发展提供了依据及建议。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域概况

河南省位于中国的中部地区,界于北纬 $31^{\circ}23'$ ~ $36^{\circ}22'$,东经 $110^{\circ}21'$ ~ $116^{\circ}39'$ 之间,总面积为 $16.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,平原地貌较多,丘陵及复杂地貌较少。河南省共包括 18 个地级市,分别为郑州市、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、驻马店市和济源市。

图 1 为 2020 年河南省各地级市人口、GDP 及水资源量分布,由图 1 可知,河南省水资源量在空间上分布不均匀,西部和南部区域的水资源量较多,而北部、东部和中部区域水资源量较少。随着工业的发展,河南省的废污水排放量在持续增加,而且作为农业大省,农业施肥带来的污染也不容小觑。总体而言,河南省目前面临着严重的水资源供需平衡问题,水资源可持续利用水平受到威胁。

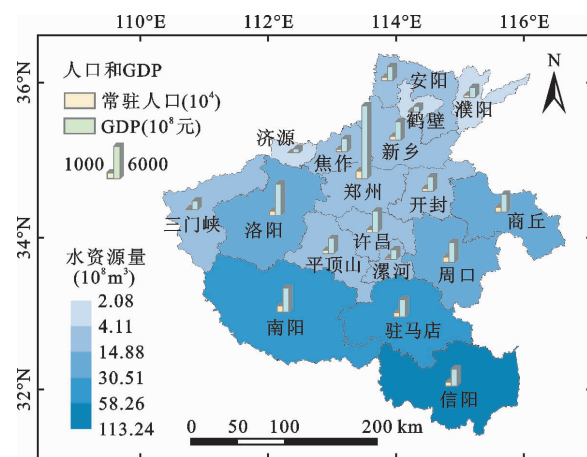


图 1 2020 年河南省各地级市人口、GDP 及水资源量分布

2.2 数据来源

本研究的数据来源于 2005 – 2020 年的《河南省统计年鉴》和《河南省水资源公报》。由统计年鉴可查得河南省及其各市的人口数量及 GDP 总值等数据;由水资源公报可查得河南省及各市的水资源总量、总用水量、生产用水量、生活用水量、生态用水量和产水模数等数据。

2.3 研究方法

2.3.1 三维水足迹模型的构建 三维水足迹模型的公式为:

$$WEF = WEF_{size} \cdot WEF_{depth} \quad (1)$$

式中: WEF_{size} 为区域水足迹广度, hm^2 ; WEF_{depth} 为区域水足迹深度。

水足迹广度是指该区域在水资源承载力的范围内为满足当地用水需求所占用自然资本流量的大小。其值越大时,表示该地区可持续状况越强。

$$WEF_{size} = \min(WEF, WECC) \quad (2)$$

式中: WEF (water ecological footprint) 为区域水足迹, hm^2 ; $WECC$ (water ecological carrying capacity) 为区域的水资源承载力, hm^2 。

水足迹深度是通过分析自然资本流量能否满足区域用水需求以及是否需要动用自然资本存量来反映水资源的可持续性。水足迹深度取值在 $[1, +\infty)$ 之间,其值越大表示消耗的自然资本存量越大,区域的水资源可持续状况越差。

$$WEF_{depth} = 1 + \max(WEF - WECC)/WECC \quad (3)$$

(1) 水足迹的计算。根据河南省水资源特征,将水足迹分为 3 种类型:生产用水足迹(production water ecological footprint, $PWEF$)、生活用水足迹(domestic water ecological footprint, $DWEF$) 和生态用水足迹(ecological water ecological footprint, $EWEF$),具体计算如下:

$$WEF = PWEF + DWEF + EWEF = N \cdot wef \quad (4)$$

$$PWEF = N \cdot pwef = a \cdot Q_p/P \quad (5)$$

$$DWEF = N \cdot dwef = a \cdot Q_d/P \quad (6)$$

$$EWEF = N \cdot ewef = a \cdot Q_e/P \quad (7)$$

式中: a 为全球水资源平衡因子,根据世界自然基金会 2002 核算的结果取 5.19^[23]; $PWEF$ 、 $DWEF$ 、 $EWEF$ 分别为生产、生活和生态用水足迹, hm^2 ; N 为地区总人口数, 10^4 ; $pwef$ 、 $dwef$ 、 $ewef$ 分别为区域人均生产、生活和生态用水足迹, hm^2 ; Q_p 、 Q_d 、 Q_e 分别为区域生产、生活和生态用水量, m^3 ; P 为全球水资源平均生产力,根据参考文献取 $3\ 140\ m^3/hm^2$ ^[23]。

(2) 水资源承载力的计算。水资源承载力($WECC$)是指区域在特定的发展阶段下,可持续支持人类生活、生态系统和社会发展等的水资源供给能力^[24-25],其计算方法如下:

$$WECC = N \cdot wecc = \alpha \cdot \varphi \cdot a \cdot Q/P \quad (8)$$

式中: $wecc$ 为人均水资源承载力, hm^2 ; φ 为水资源产量因子,是指区域与世界水资源生产能力的比值; α 为生物多样性补偿系数,是指扣除用于维持生态环境质量和生物多样性的水资源后剩余资源占水资源总量的比例,取 $\alpha = 40\%$ ^[23]; Q 为区域水资源总量, m^3 。

2.3.2 水资源可持续利用水平评价体系

(1) 水生态赤字与盈余。水生态赤字(water ecological deficit, WED)是指水资源的消耗量大于自然资本流量的情景。水生态盈余(water ecological

surplus, WES)是指水资源的消耗量小于自然资本流量的情景。 WED (WES)是用 $WECC$ 与 WEF 的差值来表示的,当差值为负时,为 WED ;差值为正时,为 WES 。

$$WED(WES) = WECC - WEF \quad (9)$$

式中: WED 为水生态赤字, hm^2 ; WES 为水生态盈余, hm^2 。

(2) 水压力指数。水压力指数(water resources pressure index, WPI)表示区域水资源消耗量对水资源状态的影响程度,其值为区域水足迹与区域水资源承载力之比,可以用来描述区域水资源的安全状态^[26],水压力指数对应的等级表见表 1。

$$WPI = WEF/WECC \quad (10)$$

表 1 水压力指数等级划分

等级	WPI	表征状态
1	< 0.5	很安全
2	$0.51 \sim 0.8$	较安全
3	$0.81 \sim 1.0$	稍不安全
4	$1.01 \sim 1.50$	较不安全
5	$1.51 \sim 2.0$	很不安全
6	> 2.0	极不安全

(3) 水资源集约利用度。水资源集约利用度(J_t)是指区域的万元生产总值(GDP)与水足迹的比值,是一个综合考虑经济发展状况与水资源利用效率的指标。其值越大,说明该地区的用水效率越高。

$$J_t = \frac{G_t}{WEF_t} \quad (11)$$

式中: G_t 为 t 年的区域生产总值, 10^4 元; WEF_t 为 t 年的区域水足迹, hm^2 。

(4) 水资源可持续指数。水资源可持续指数(EF_{si})是指区域在特定时间内可持续供给的水资源总量满足该区域用水需求的程度。表 2 为水资源可持续指数等级表,其值越大,说明该地区的可持续利用程度越高。

$$EF_{si} = \frac{WECC}{WEF + WECC} \quad (12)$$

表 2 水资源可持续指数等级划分

EF_{si}	水资源可持续利用状态
≥ 0.80	强可持续
$0.65 \sim 0.80$	中可持续
$0.50 \sim 0.64$	弱可持续
$0.35 \sim 0.49$	强不可持续
$0.20 \sim 0.34$	中不可持续
≤ 0.2	弱不可持续

2.3.3 水足迹变化驱动因素分析 采用对数平均迪氏指数分解法(LMDI)的加法模型对河南省水足迹的驱动因素进行了分析,根据河南省发展现状选择4个水足迹驱动因素:水足迹强度效应、经济规模效应、人口压力效应和水资源承载力效应。

水足迹总量的公式可表达为:

$$WEF = \frac{WEF}{GDP} \cdot \frac{GDP}{P} \cdot \frac{P}{WECC} \cdot WECC \quad (13)$$

式中: WEF 为水足迹, hm^2 ; GDP 为地区生产总值, 10^4 元; P 为地区总人口数, 10^4 ; $WECC$ 为水资源承载力, hm^2 。

将公式(13)改写为:

$$WEF = WEF_I \cdot WEF_G \cdot WEF_P \cdot WEF_W \quad (14)$$

式中: $WEF_I = WEF/GDP$ 为水足迹与生产总值的比值,代表水足迹强度效应; $WEF_G = GDP/P$ 为区域人均生产总值,代表经济规模效应; $WEF_P = P/WECC$ 为人口与水资源承载力的比值,代表人口压力效应; WEF_W 为水资源承载力效应; hm^2 。

$$\Delta WEF = WEF^t - WEF^0$$

$$= \Delta WEF_I + \Delta WEF_G + \Delta WEF_P + \Delta WEF_W \quad (15)$$

$$\Delta WEF_I = \sum_i^n \left(\frac{WEF_i^t - WEF_i^0}{\ln WEF_i^t - \ln WEF_i^0} \right) \cdot \ln \frac{WEF_i^t}{WEF_i^0} \quad (16)$$

$$\Delta WEF_G = \sum_i^n \left(\frac{WEF_i^t - WEF_i^0}{\ln WEF_i^t - \ln WEF_i^0} \right) \cdot \ln \frac{WEF_G^t}{WEF_G^0} \quad (17)$$

$$\Delta WEF_P = \sum_i^n \left(\frac{WEF_i^t - WEF_i^0}{\ln WEF_i^t - \ln WEF_i^0} \right) \cdot \ln \frac{WEF_P^t}{WEF_P^0} \quad (18)$$

$$\Delta WEF_W = \sum_i^n \left(\frac{WEF_i^t - WEF_i^0}{\ln WEF_i^t - \ln WEF_i^0} \right) \cdot \ln \frac{WEF_W^t}{WEF_W^0} \quad (19)$$

式中: ΔWEF 为区域某阶段水足迹变化量, hm^2 ; ΔWEF_I 为水足迹强度效应的变化量, hm^2 ; ΔWEF_G 为经济规模效应的变化量, hm^2 ; ΔWEF_P 为人口压力效应的变化量, hm^2 ; ΔWEF_W 为水资源承载力效应的变化量, hm^2 。

3 结果与分析

3.1 水资源承载力分析

图2为2005-2020年河南省水资源承载力变化趋势。由图2可知,河南省的水资源承载力呈现波动减小的趋势,水资源承载力的变化主要依附于水资源总量的变化。其中,2005-2013年河南省的水资源承载力呈整体大幅度下降、局部波动的变化趋势;2013年后一直处于较大的波动状态,主要与水资源总量和产业用水量的变化相关。

图3可反映出2005-2020年河南省各市水资源承载力的变化情况,由图3可知,豫南地区的水资源承载力较高,而豫中和豫北地区的水资源承载力较差,区域水资源总量和降水量是造成地区差异的主要原因。2005-2020年除豫南和豫东水资源承载力出现了增大的趋势外,其他各市呈现稳定或者下降的趋势,这主要与降雨量和产业用水量的变化相关。决策者在制定水资源发展政策时,要以水资源承载力为限,重点关注水资源承载力较低的地区。

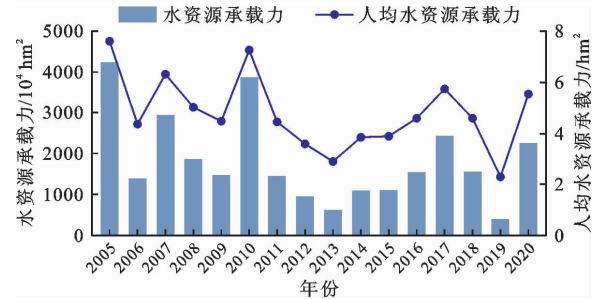


图2 2005-2020年河南省水资源承载力变化趋势

3.2 水足迹分析

3.2.1 水足迹变化趋势 图4为2005-2020年河南省水足迹变化趋势。由图4(a)可知河南省水足迹呈现缓慢增加的趋势,在2017年达到了峰值,其变化主要源于生态用水足迹的增加。2017年河南省实行了最严格水资源管理制度,坚决打赢水污染防治攻坚战,在水生态环境的治理方面投入了更多的水资源。2005-2020年中历年水足迹最大变化值为 $690 \times 10^4 \text{ hm}^2$,变化值相对于总体水足迹较小,说明河南省的用水量及用水结构较为稳定。

图4(b)反映了河南省生产、生活、生态用水足迹的变化趋势。由图4(b)可看出,河南省3种用水足迹由大到小依次为生产用水足迹、生活用水足迹和生态用水足迹。生产用水足迹在2005-2017年一直处于波动状态,但在2017年后出现了减小趋势,主要与工业用水效率的提升和第一产业占比的减少有关;生活用水足迹呈现缓慢上升的趋势,主要与人口的增长相关;生态用水足迹呈现增加的趋势,2017年生态用水足迹值最大,达到了 $749.93 \times 10^4 \text{ hm}^2$,主要因为随着经济社会的发展,人们对水环境的重视程度得到了提升,河南省在水生态环境治理方面投入了更多水资源。水足迹具有流通性,会在3个用水部门之间相互流通。例如:生产部门在运行时会带来生产用水足迹,生产出的产品在供人们使用时会带来生活用水足迹,人们在生活用水中产生生活用水足迹的同时可能会带来环境的污染,又

导致生态用水足迹的升高。因此 3 种用水足迹相互关联,互相影响。

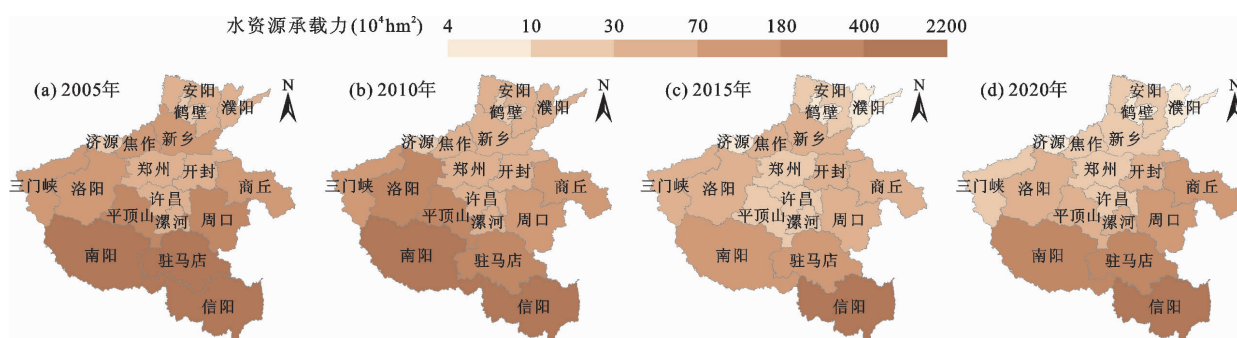


图 3 2005 - 2020 年河南省各市水资源承载力的变化

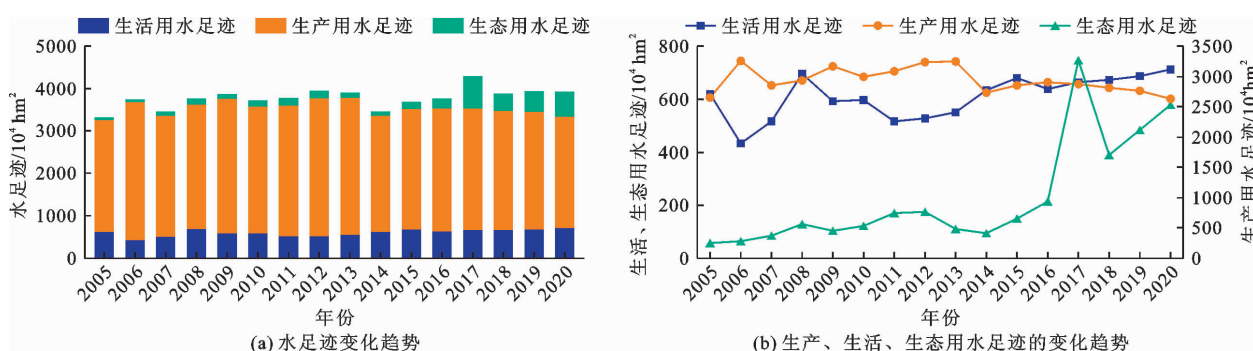


图 4 2005 - 2020 年河南省水足迹变化趋势

图 5 反映了 2005 - 2020 年河南省各市水足迹的变化。由图 5 可知,豫南、豫中和豫东地区的水足迹较大,豫西和豫北地区的水足迹较小。原因是豫南、豫中和豫东地区的人口较密集、工业生产活动较多,因此生产和生活用水量较大。2005 - 2010 年安阳市的水足迹减少了 $43.54 \times 10^4 \text{ hm}^2$,因为该期间安阳市重点发展高效农业,提高了农业灌溉效率,而同期濮阳市、周口市、平顶山市和驻马店市等的水足迹有不同程度的增加,主要是因为用水量需求随着经济和各个产业的发展而有所增大;2010 - 2015 年各市水足迹变化较小,安阳市、平顶山市和鹤壁市等出现了水足迹增加的情况,而周口市、信阳市等出现了水足迹减小的情况,这些情况主要与工业用水量

和用水效率的变化相关;2015 - 2020 年大多地区的水足迹出现增大情况,其中增幅较大的为南阳市,南阳市在生产方面的用水量增加了 $15.02 \times 10^8 \text{ m}^3$,主要与其产业经济的发展相关。

图 6 为河南省各市水足迹的构成情况。由图 6 可以看出,各市水足迹的构成情况基本相似。其中郑州市的生活和生态用水占比最大,郑州市是河南省的经济中心,其人口数量最多,工业占比较少,而且郑州市注重生态环境的保护,投入改善生态环境的水资源量较多。周口市生态用水足迹在 18 个市中占比最少,可能是因为周口市的人口较为密集且经济发展水平较低,投入到生态环境保护中的水资源较少。

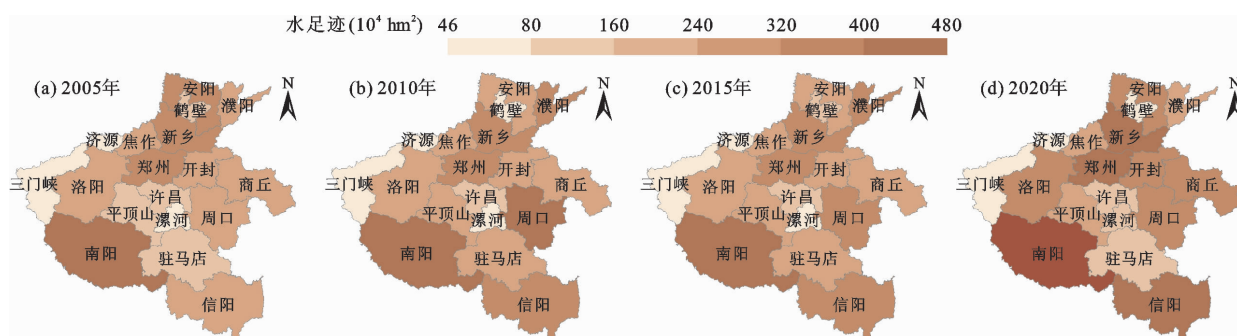


图 5 2005 - 2020 年河南省各市水足迹的变化

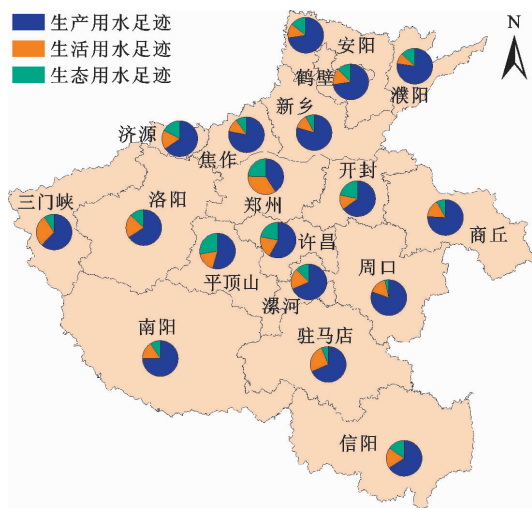


图 6 河南省各市水足迹的构成

3.2.2 水足迹深度和广度 图 7 为 2005 – 2020 年河南省水足迹深度与广度变化趋势。由图 7 可见，河南省水足迹深度的变化趋势与水资源承载力的变化趋势相似，大多数年份出现了消耗自然资本存量的情况，说明河南省的水资源可持续利用状态处于较差水平，亟待制定相应的政策来改变这一现状。河南省的水足迹广度波动较大，与水足迹深度呈相反的变化趋势，2019 年的水足迹深度最大，而该年份水足迹广度最小，其次 2013 年的水足迹深度较大，该年份水足迹广度也较小，主要原因是这两年的水资源承载力较低。

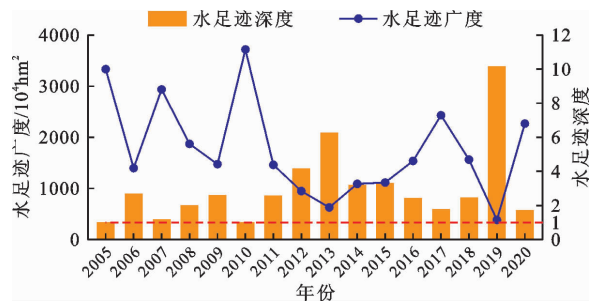


图 7 2005 – 2020 年河南省水足迹深度与广度变化趋势

图 8、9 分别反映了 2005 – 2020 年河南省各市水足迹深度和广度的变化。由图 8 可以看出，豫南地区水资源消耗基本不需要占用自然资本存量，而豫东和豫中各市的水足迹深度较大，出现了占用自然资本存量的情况。其中濮阳市和郑州市的水足迹深度值最大，主要原因是这些地区的水资源自然资本流量较小，不能满足当地水资源的消耗，造成了自然资本存量的大量消耗。因此在未来制定发展规划时，应重点关注这些地区，要在地区水资源承载力的范围内发展工业，并且以水资源承载力为基础来确定工业和城市的发展规模，尽量减少对水资源自然资本存量的占用。由图 9 可以看出，豫南地区的水足迹广度较大，而豫中地区的水足迹广度较小。其中南阳市、驻马店市和信阳市的水足迹广度最大，水资源可持续利用水平处于较高的状态。鹤壁市、三门峡市和漯河市的的水足迹广度最小，说明其水资源可持续状态较差。

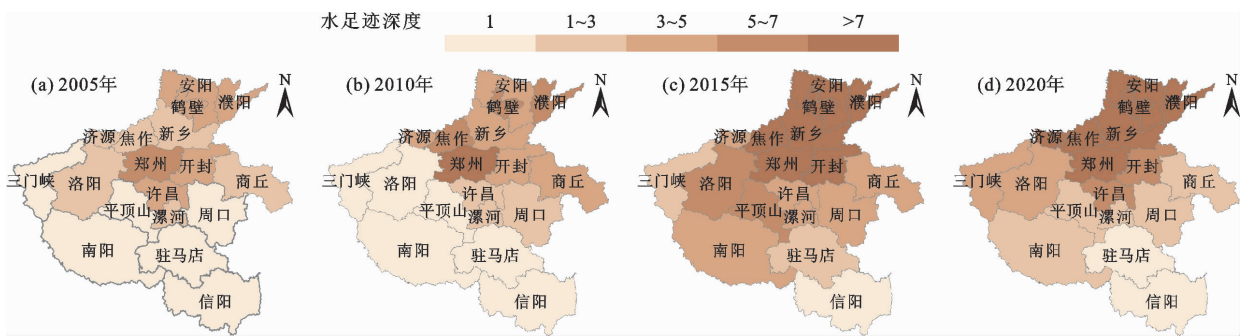


图 8 2005 – 2020 年河南省各市水足迹深度的变化

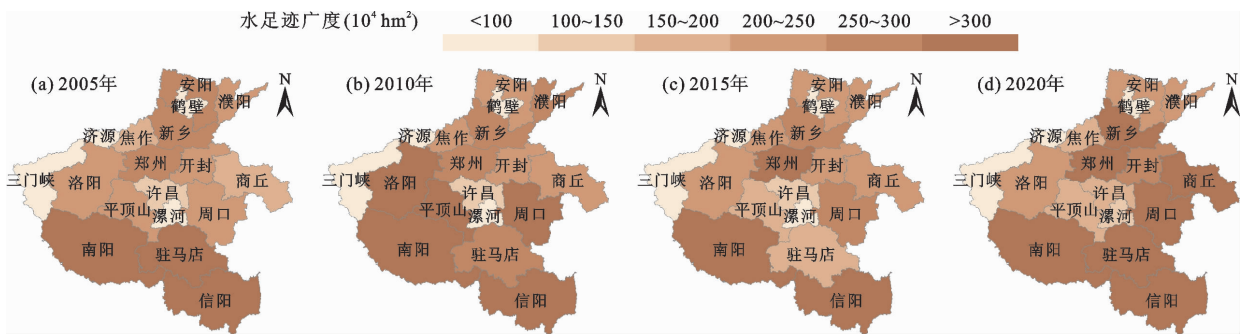


图 9 2005 – 2020 年河南省各市水足迹广度的变化

3.3 水资源可持续利用水平分析

3.3.1 水生态赤字与盈余 河南省的水生态赤字与盈余一直处于波动变化状态,大多年份处于赤字状态,并且有向赤字更大方向发展的趋势。河南省现有的水资源承载力不足以满足水资源的消耗量,水资源利用水平亟需提高。

图 10 反映了 2005–2020 年河南省各市水生态赤字与盈余的变化情况。由图 10 可知,豫南地区大多处于水生态盈余状态,而豫北与豫中地区的水生态赤字情况最为严重。其中信阳市水生态一直处于生态盈余状态,说明其水资源可持续利用水平较高,这与其具有丰富的水资源量相关;而郑州市一直处于水生态赤字状态,说明其水资源承载力无法满足其需水量,需从其他地区调水来满足其用水需求。在未来发展中,这些赤字地区的用水量应以当地的

水资源承载力为限,以期实现水资源的可持续利用。

3.3.2 水压力指数 2005–2020 年河南省的水压力指数波动较大,整体呈现增长的趋势,水资源可持续利用状态较差。如不对河南省水资源状态加以改善,其水压力指数将会更大,其水资源可持续利用水平会更差。

图 11 反映了 2005–2020 年河南省各市水压力指数的变化。由图 11 可知,河南省豫南地区的水压力指数较小,而豫中和豫北地区的水压力指数较大。其中驻马店市、南阳市和信阳市的大多数年份处于“较安全”的状态,而郑州市和濮阳市等的水压力指数值较大,水资源一直处于“极不安全”的状态,未来发展中应重点关注这些区域的水资源现状,制定更合理的水资源利用方案来维持和改善区域的水资源安全状况。

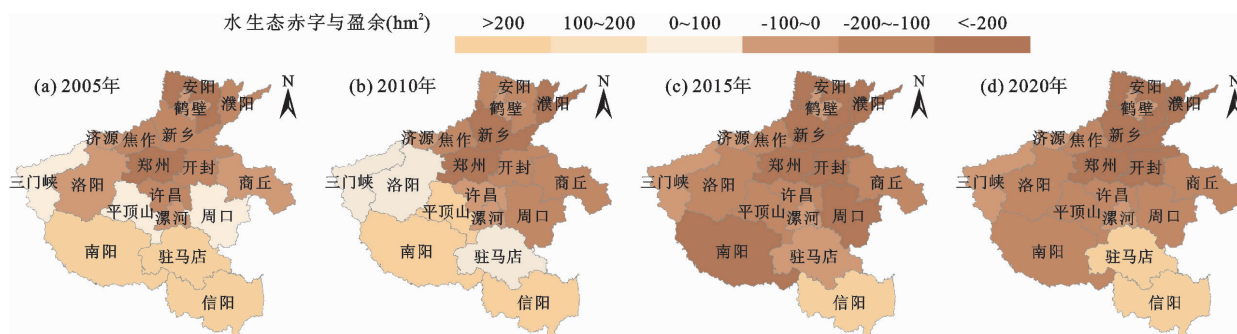


图 10 2005–2020 年河南省各市水生态赤字与盈余的变化

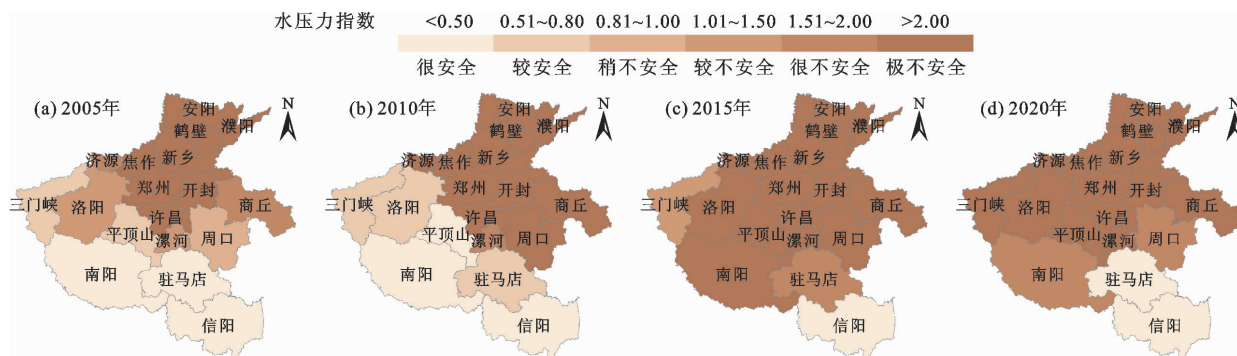


图 11 2005–2020 年河南省各市水压力指数的变化

3.3.3 水资源集约利用度 2005–2020 年河南省的水资源集约利用度一直处于增大的趋势,表明河南省单位水足迹创造的生产总值在逐步提升,将会对水资源可持续利用水平变化带来正向的作用。

图 12 反映了 2005–2020 年河南省各市水资源集约利用度的变化。由图 12 可知,豫中和豫西地区的水资源集约利用度较高,其他地区的水资源集约利用度较低。其中郑州市的水资源集约利用度最高,而濮阳市水资源集约利用度最低。水资源集约利用度

的高低主要与当地经济发展水平和产业技术水平等相关,水资源集约利用度的提升代表着用水效率的提升,有助于水资源可持续利用效率的提高。因此在改善河南省水资源可持续利用水平时可以从提升地区的水资源集约利用度入手,例如改善地区的产业结构、提升产业技术水平、提高工业用水效率等。

3.3.4 水资源可持续指数 2005–2020 年河南省的水资源可持续指数呈减小的变化趋势,总体上从“弱可持续”变为了“弱不可持续”。

图 13 反映了 2005 - 2020 年河南省各市水资源可持续指数的变化。由图 13 可知,豫南地区的水资源可持续状态较好,如南阳市、信阳市和驻马店市一直处于“强可持续”和“中可持续”状态;豫中和豫北地区水资源可持续状态普遍较差,基本处于“强不

可持续”和“中不可持续”状态。在制定未来发展策略时应重点参考水资源承载力,在可持续状态较差的区域应严格控制用水强度,以水资源承载力为标准限制产业用水量,大力推进工业节水减排,提倡利用再生水进行工业生产。

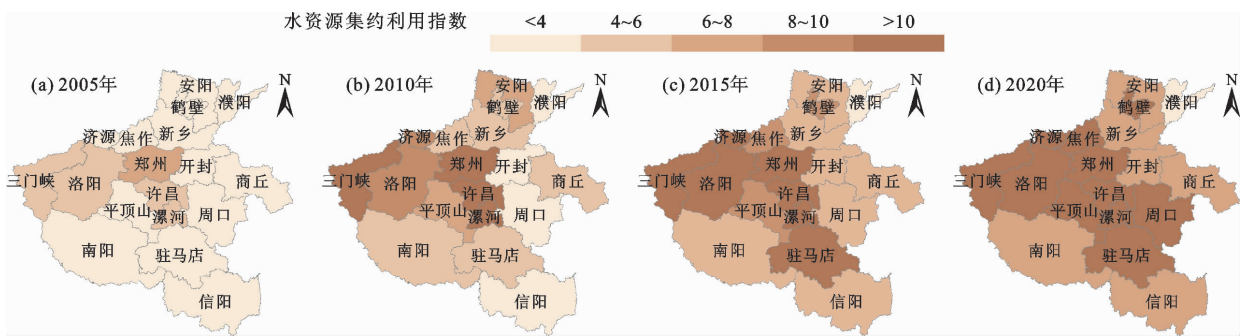


图 12 2005 - 2020 年河南省各市水资源集约利用指数的变化

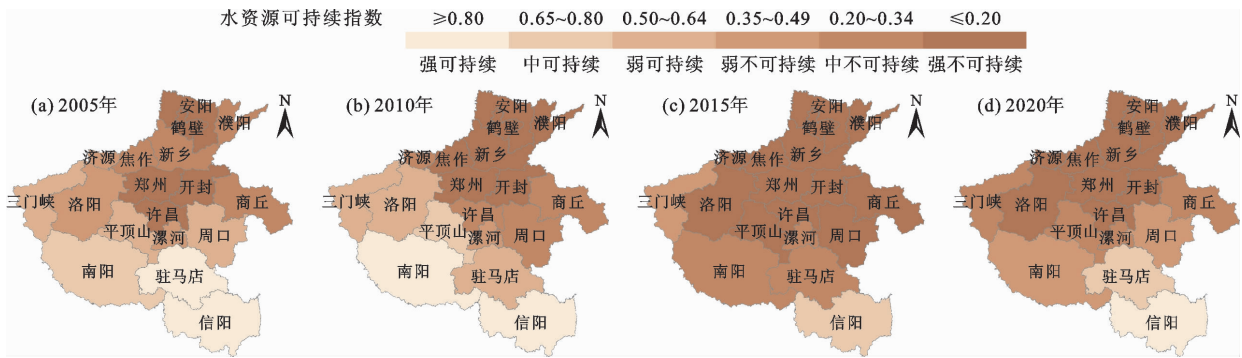


图 13 2005 - 2020 年河南省各市水资源可持续指数的变化

4 讨 论

本研究使用对数平均迪氏指数分解法(LMDI)对水足迹驱动因素进行分析,图 14 为河南省及各市水足迹驱动因素分解图。

图 14 表明,经济规模效应是促进水足迹增长的主要效应,其次人口压力效应也是促进水足迹增长的正效应,水足迹强度效率效应和水资源承载力效应是促进水足迹减少的正效应。经济的发展需要投入更多的水资源来促进生产总值的增加,从而导致水足迹的增加;人口数量的增加会导致生活用水的大量增加从而促使水足迹的增加,而且人口的增长需要城市的扩张,从而占用自然资源,减少水资源承载力,还会扩大产业规模带来水足迹的增加;水足迹强度效率是指单位水足迹可以创造的价值,它的提高代表该区域会在满足经济需求的情况下减少水资源的投入量;水资源承载力效应导致了水足迹增长的负效应,因为水资源承载力的减少会迫使耗水行业提高其水资源的利用效率。

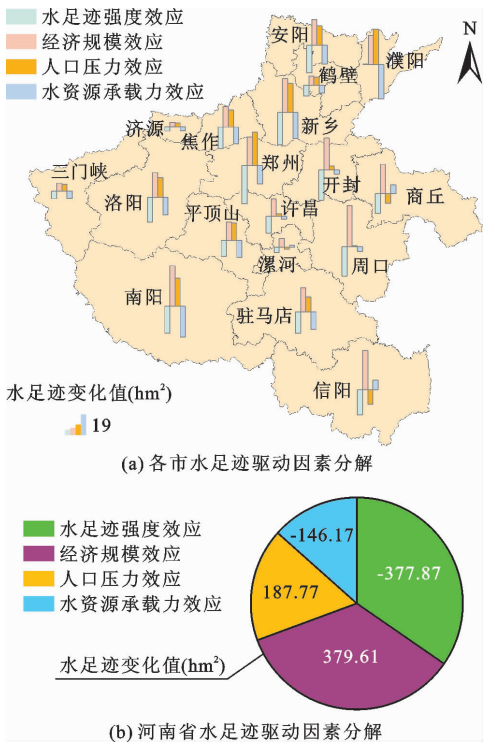


图 14 河南省及各市水足迹驱动因素分解图

河南省水资源可持续利用水平较差,且水足迹一直呈上升的趋势,这与已有研究结果一致^[27-28]。研究证明了三维水足迹模型在河南省的适用性,该模型也可对其他地区水资源可持续利用水平的研究提供帮助。未来河南省应采取更有效的水资源管理政策以促进水资源可持续利用状态的改善,例如:加强对水资源消耗量的控制,以该地区的年均水资源承载力作为该地区用水量的上限,重点限制其工业用水量;提高河南省水资源利用效率,增加水源保护措施。另外,需要增加用于改善水生态环境的资金投入,依靠科技进步提高水资源利用效率、改善水环境质量。

三维水足迹模型在河南省水足迹研究中的应用较少,且大多都是以河南省整体为研究对象,很少有研究关注到河南省水资源状态的空间差异^[29-30]。事实上对河南省水资源状态的空间分布进行分析至关重要,可以使研究结果更加具体可靠,在未来发展中,可以根据研究结果因地制宜地制定水资源利用政策,推行差异化的区域发展模式。在水资源可持续利用水平较差的城市(如郑州市等)可采取水生态补偿等方式抑制水资源的消耗。

本研究虽然对河南省水资源可持续利用水平进行了评价,但还存在不足之处。研究仅考虑了水量方面的指标,在未来研究中应该加入水质方面的指标,以更加全面地分析河南省的水资源状况。

5 结 论

本研究基于三维水足迹模型对 2005—2020 年河南省及其各市的水资源可持续利用水平进行了评价,并且利用对数平均迪氏指数分解法(LMDI)对水足迹的驱动因素进行了具体的分析,得到以下结论:

(1)河南省水足迹逐年变化值较小,3 种用水足迹由大到小为:生产用水足迹、生活用水足迹和生态用水足迹。河南省整体水资源可持续利用水平较差,水足迹深度与广度呈相反的变化趋势,其中豫南地区的水资源广度较大,而豫北和豫中各市的水足迹深度最大。

(2)河南省水资源可持续利用总体水平较差,其中豫南地区水资源可持续利用水平较高,而豫北和豫中地区水资源可持续利用水平较差;河南省水资源基本处于赤字状态,其中郑州市水资源赤字情况最为严重,水资源可持续利用水平亟需提高;河南省水资源大多处于不安全的状态,其中郑州市和濮阳市等水资源一直处于极不安全的状态;河南省的

水资源集约利用度处于升高的趋势,其中郑州市的水资源集约利用度在全省各地级市中最高,而濮阳市的水资源集约利用度最低;河南省的水资源可持续指数呈现下降趋势,豫中和豫北地区水资源可持续状态普遍较差,基本处“强不可持续”和“中不可持续”状态。

(3)经济规模效应和人口压力效应对水足迹的变化具有正向驱动作用,而水足迹强度效率和水资源承载力效应具有负向驱动作用。

参考文献:

- [1] GLEESON T, WADA Y, BIERKENS M F P, et al. Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint [J]. *Nature*, 2012, 488: 197–200.
- [2] LI Jiao. Water shortages loom as northern China's aquifers are sucked dry [J]. *Science*, 2010, 328(5985): 1462–1463.
- [3] 彭大为,周秋文,韦小茶,等. 中国西南岩溶区水分利用效率变化及其对气象要素的响应 [J]. *生态学报*, 2021, 41(23): 9470–9480.
- [4] FENG Wei, LU Hongwei, YAO Tianci, et al. Water environmental pressure assessment in agricultural systems in Central Asia based on an Integrated Excess Nitrogen Load Model [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 803: 149912.
- [5] 童纪新,梁斐然. 我国水资源可持续利用能力评价 [J]. *水利经济*, 2015, 33(6): 55–60+82.
- [6] 王 浩,王建华. 中国水资源与可持续发展 [J]. *中国科学院院刊*, 2012, 27(3): 352–358+331.
- [7] 李 坦,王 静,张庆国,等. 合肥市生态足迹时空特征与脱钩效应变化及灰色预测分析 [J]. *生态学报*, 2019, 39(5): 1735–1747.
- [8] 贾守东,郑从奇,庄会波,等. 基于 DPSIR 模型的沂河水资源可持续利用评价 [J]. *水文*, 2022, 42(3): 61–66.
- [9] 李俊晓,李朝奎,罗淑华,等. 基于 AHP—模糊综合评价方法的泉州市水资源可持续利用评价 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 210–214+286.
- [10] 李 腾,李 博,屈 伟,等. 基于 SE—DEA—IAHP 方法的贵州省岩溶地区水资源可持续利用效率评价 [J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(2): 101–107.
- [11] 程增辉,陆宝宏,熊 丝,等. 基于水足迹模型的新疆水资源承载力分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(6): 54–59.
- [12] 左其亨,姜 龙,冯亚坤,等. 黄河沿线省区水资源生态足迹时空特征分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(10): 1–8+34.
- [13] NICCOLUCCI V, BASTIANONI S, TIEZZI E, et al. How deep is the footprint? A 3D representation [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220(20): 2819–2823.

- [14] NICCOLUCCI V, GALLI A, REED A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(16): 2939–2944.
- [15] 刘超,许月卿,孙丕苓,等. 基于改进三维生态足迹模型的张家口市生态可持续性评价[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(6): 169–176.
- [16] LI Penghui, ZHANG Ruqian, XU Liping. Three-dimensional ecological footprint based on ecosystem service value and their drivers: A case study of Urumqi[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 131: 108117.
- [17] 焦士兴,郭力菲,王安周,等. 基于水足迹理论的河南省水资源利用评价[J]. *人民黄河*, 2021, 43(11): 87–91+96.
- [18] 石蒙蒙,薛兴燕,赵勇,等. 基于GIS的河南省水足迹时空差异研究[J]. *人民黄河*, 2016, 38(2): 75–79+83.
- [19] LIU Lingna, LEI Yalin, GE Jianping, et al. Sector screening and driving factor analysis of Beijing's ecological footprint using a multi-model method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 191: 330–338.
- [20] ZHAO Chunfu, CHEN Bin. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(21): 12723–12731.
- [21] XU Shichun, HE Zhengxia, Long Ruyin. Factors that influence carbon emissions due to energy consumption in China: Decomposition analysis using LMDI[J]. *Applied Energy*, 2014, 127: 182–193.
- [22] 孙才志,张灿灿. 中国人均水足迹驱动效应分解与空间聚类分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(2): 1–11.
- [23] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等. 水资源生态足迹计算方法[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1279–1286.
- [24] 李菲,张小平. 甘肃省水资源生态足迹和生态承载力时空特征[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(6): 1486–1495.
- [25] LIANG Dongzhe, LU Hongwei, FENG Liyang, et al. Assessment of the sustainable utilization level of water resources in the Wuhan metropolitan area based on a three-dimensional water ecological footprint model[J]. *Water*, 2021, 13(24): 3505.
- [26] 赵先贵,马彩虹,高峰,等. 基于生态压力指数的不同尺度区域生态安全评价[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(6): 135–138.
- [27] 李友光,袁榆梁,李卓成,等. 基于能值水生态足迹的河南省水资源可持续利用评价[J]. *人民黄河*, 2022, 44(6): 100–104+162.
- [28] 沈玉洁. 基于生态足迹法的河南省水资源可持续利用分析[J]. *水资源开发与管理*, 2020(6): 47–52+3.
- [29] 武晗. 基于三维足迹家族模型的资源环境压力分析[D]. 郑州:河南财经政法大学, 2021.
- [30] 焦士兴,郭力菲,王安周,等. 基于水足迹理论的河南省水资源利用评价[J]. *人民黄河*, 2021, 43(11): 87–91+96.
- ~~~~~
- (上接第29页)
- [32] 万炳彤,鲍学英,李爱春. 隧道施工引起的地下水环境负效应评价体系研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5): 58–63+71.
- [33] 赵克勤,宣爱理. 集对论——一种新的不确定性理论方法与应用[J]. *系统工程*, 1996(1): 18–23+72.
- [34] 金菊良,李蔓,周戎星,等. 减法集对势法在河流生态健康评价与诊断中的应用[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 198–204.
- [35] 陈舞,孙海清,王浩,等. 山岭隧道坍塌风险评价的熵权-集对分析模型及工程应用[J/OL]. *工程科学与技术*, (2022-09-14) [2022-10-10]. DOI: 10.15961/j.jsuese.202200247.
- [36] 苏印,官冬杰,苏维词. 基于SPA的喀斯特地区水安全评价——以贵州省为例[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(6): 560–569.
- [37] 河北省水利厅节约用水处. 建立健全节水法规制度 全面提升水资源集约节约安全利用水平[J]. *河北水利*, 2021(12): 8–9.
- [38] 刘秀丽,郭丕斌,王昕. 煤炭资源型地区产业能-水足迹效率及影响因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(24): 8999–9010.
- [39] 李乐乐. 河南:“四水同治”助力中原更出彩[J]. *河南水利与南水北调*, 2018, 47(12): 5–6.
- [40] 李浩,黄薇,梁佩瑾. 基于博弈论的省际水事纠纷预防机制研究[J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(12): 72–76.