

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2025.04.017

# 河南沿黄核心区城市生态地质环境承载力变化分析

吴冰洁<sup>1</sup>,文广超<sup>2</sup>,陈俊<sup>1</sup>,冯雅杰<sup>2</sup>,邓晓颖<sup>1</sup>

(1. 河南省地质局生态环境地质服务中心,河南 郑州 450053; 2. 河南理工大学资源环境学院,河南 焦作 454003)

**摘要:**选取 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年遥感影像,融合区域气象、地质和社会经济等相关数据,结合已有的研究成果和野外实地调研情况,综合运用图像分类、遥感反演、地统计分析等方法,选取 18 个指标构建了 ED-GRA-TOPSIS 模型,分析了河南沿黄核心区城市生态地质环境承载力的时空特征。结果表明:2005—2020 年研究区生态地质环境承载力除郑州市外,其他各市均有所提升,但总体水平不高,介于 0.302 1~0.593 1 之间,生态地质环境所能承受人类活动阈值有所增长;生态地质环境承载力变化的区域主要为开封、濮阳和洛阳市,能源、工业发展和沿黄生态建设对该区域承载力影响深远;生态环境子目标层和社会经济环境子目标层的变化对生态地质环境承载力影响较大,生态地质环境承载力变化对人类活动较为敏感。

**关键词:**河南沿黄核心区;城市发展;生态地质环境承载力;ED-GRA-TOPSIS 模型

中图分类号:X87 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2025)04-0144-07

**Analysis of variations in urban eco-geological environment carrying capacity in core areas along the Yellow River in Henan Province**//WU Bingjie<sup>1</sup>, WEN Guangchao<sup>2</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>, FENG Yajie<sup>2</sup>, DENG Xiaoying<sup>1</sup> (1. *Ecological Environment Geo-Service Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450053, China*; 2. *Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China*)

**Abstract:** Remote sensing images from 2005, 2010, 2015, and 2020 were selected, and regional meteorological, geological and socio-economic data were integrated in this study. Based on existing research results and field investigations, image classification, remote sensing inversion, geostatistical analysis were comprehensively applied to developing an ED-GRA-TOPSIS (Euclidean distance-grey relational analysis-technique for order preference by similarity to an ideal solution) model, with 18 indexes selected, to analyze the spatiotemporal characteristics of the urban eco-geological environment carrying capacity in the core area along the Yellow River in Henan Province. The results indicate that during 2005-2020, the eco-geological environment carrying capacity in the study area maintained a moderate level (0.302 1-0.593 1), showing consistent growth across all cities except Zhengzhou and reflecting an enhanced threshold for human activity impacts. Notably, the most significant capacity variations occurred in Kaifeng, Puyang, and Luoyang, where energy and industrial development, as well as Yellow River ecological construction profoundly influenced the regional carrying capacity. It is also revealed that changes in both the ecological environment and socio-economic environment sub-objective layers substantially affected the eco-geological environment carrying capacity, demonstrating a high sensitivity of its variation to human activities.

**Key words:** core areas along the Yellow River in Henan Province; urban development; eco-geological environment carrying capacity; ED-GRA-TOPSIS model

城市发展与城市生态地质环境承载力相互关联,两者和谐发展关系到城市自身的命运,也关系到周边地区高质量、可持续发展目标的实现。河南省作为黄河流域重要的转折地,在《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》国家战略的引领下,以沿黄核心区城市为抓手,促进地质环境的高质量发

展,已成为河南省亟待解决的关键问题。在此背景下,研究河南沿黄核心区城市发展演化过程中生态地质环境承载力的变化规律具有重要意义。

李树文等<sup>[1]</sup>最早对生态地质环境承载力的内涵进行了分析。目前,在生态地质环境承载力研究中,更多关注的是对承载力理论和方法的探讨<sup>[1-2]</sup>,

**基金项目:**河南省科技攻关项目(232102320274,212102310389);河南省自然资源科研项目(2022-3);河南理工大学博士基金项目(B2020-54)

**作者简介:**吴冰洁(1998—),女,助理工程师,硕士,主要从事生态环境地质研究。E-mail:yanwmin98@163.com

**通信作者:**文广超(1979—),男,教授,博士,主要从事水文与生态环境保护研究。E-mail:wengc366@163.com

对城市承载力的评价多基于 GIS<sup>[3-4]</sup>、层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP)<sup>[5-6]</sup> 和加权综合分析法<sup>[7]</sup> 等。针对黄河流域的生态地质环境,学者们也开展了大量的研究,取得了丰硕的成果<sup>[8-9]</sup>。虽然这些研究在城市建设 and 区域可持续发展研究中发挥了积极作用,但也存在一些不足。现有的评价对象主要集中在沿海城市或西部地区,而对河南省生态地质环境承载力的研究相对较少。此外,评价指标与子目标层之间的相关性和协同性是影响生态地质环境承载力的重要因素,也需要进一步研究。现有的承载力评价研究中,尚未形成统一、普适的评价指标体系和可量化的评价模型,而深入理解经济发展、地质环境和环境质量之间的关系是河南沿黄核心区域城市可持续发展规划和管理的基础。

本文以河南沿黄核心区域城市为研究对象,采用 GIS、RS、GPS 等“3S”技术,结合前人的研究成果和野外实地调研情况,在对研究区生态地质环境现状调查的基础上,梳理地质、生态、社会经济环境不同子目标层间承载力的动态联系,构建生态地质环境承载力评价指标体系,分析河南沿黄核心区域城市生态地质环境承载力演化的时空特征,以期为黄河流域高质量发展提供技术支撑,促进流域经济与环境的可持续发展。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

河南沿黄核心区域城市群位于河南省中北部,地理范围为 33°33'N~36°21'N、110°20'E~116°06'E,是黄河冲积平原的重要组成部分<sup>[10]</sup>。研究区包括三门峡、洛阳、济源、焦作、郑州、开封、新乡、鹤壁、安阳和濮阳共 10 市 84 县(市、区),流域全长 711km,流域面积约 6.75 万 km<sup>2</sup>。研究区概况如图 1 所示。

### 1.2 数据来源

研究所用数据来源见表 1。根据已有研究成

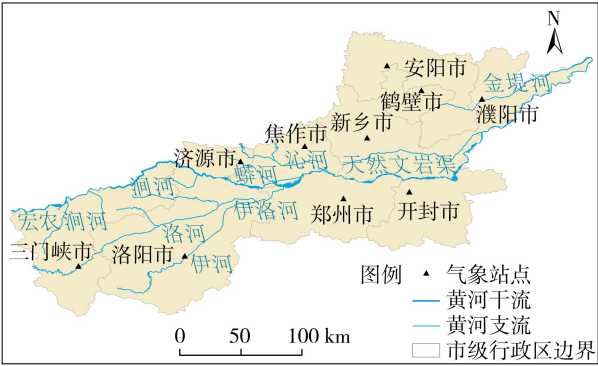


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

果<sup>[11-13]</sup> 和实际调查情况,将研究区分为中游和下游两个区域,中游包括三门峡、洛阳、济源、焦作、郑州 5 市,生态地质环境问题主要为土壤侵蚀严重、水源涵养功能退化、地质灾害易发;下游包括新乡、开封、鹤壁、安阳、濮阳 5 市,生态地质环境问题主要为水土保持功能较差、水源涵养功能退化、生物多样性维护功能退化。

## 2 研究方法

### 2.1 评价指标体系构建

生态地质环境承载力由地质环境、生态环境、社会经济环境等要素之间的相互作用决定<sup>[14]</sup>。结合研究区当前存在的问题,本文基于人类活动影响,参考前人对相似地区的评价研究<sup>[15-17]</sup>,分 3 个子目标层构建研究区生态地质环境承载力评价指标体系<sup>[18-19]</sup>。以坡度等 4 个指标反映地质环境承载力;以空气质量等 8 个指标反映生态环境承载力;以人口数量等 6 个指标反映社会经济环境承载力,如图 2 所示(括号中为指标的权重)。

利用 DEM 数据计算坡度和地层起伏度;根据卫星影像解译及区域地物的实际标志提取植被归一化指数,计算植被覆盖度<sup>[20-21]</sup>;参考 GBT 21010—2017

表 1 数据来源

Table 1 Data sources

| 数据名称            | 数据来源                                                                                                        | 空间分辨率/m | 数据说明                                           |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------|
| Landsat 数据      | 美国陆地资源卫星 ( <a href="https://glovis.usgs.gov/">https://glovis.usgs.gov/</a> )                                | 30      | 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 7—9 月共 28 景卫星影像数据 |
| DEM 数据          | 地理空间数据云 ( <a href="http://www.gscloud.cn/">www.gscloud.cn/</a> )                                            | 90      | 若干幅 DEM 数据                                     |
| 气象数据            | 中国气象数据分享平台 ( <a href="https://www.cma.gov.cn">https://www.cma.gov.cn</a> )                                  |         | 2005—2020 年逐月气象数据                              |
| 土壤类型数据          | 中国科学院资源环境科学与环境中心 ( <a href="https://www.resdc.cn/">https://www.resdc.cn/</a> )                              |         | 2020 年研究区土壤类型数据                                |
| 土壤质地数据          | 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 ( <a href="https://www.crensdc.ac.cn/">https://www.crensdc.ac.cn/</a> )                      |         | 土壤砂土、黏土、粉砂和有机碳含量百分比的土壤质地图                      |
| 植被净初级生产力        | 美国地质勘探局 ( <a href="https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/">https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/</a> ) | 500     | 2005—2020 年植被净初级生产力数据                          |
| 人口、经济、空气质量等统计数据 | 《河南省统计年鉴》、各地市统计年鉴、《中国环境统计年鉴》《河南省环境状况公报》                                                                     |         | 2005—2020 年各地市数据                               |



图2 生态地质环境承载力评价指标体系及指标权重

Fig.2 Evaluation index system and index weights for eco-geological environment carrying capacity

《土地利用现状分类》，对研究区土地利用类型进行重分类<sup>[22]</sup>，划分为耕地、林地、草地、灌木、水域、建设用地和未利用地；利用修正的通用土壤流失方程<sup>[23]</sup>和水量平衡方程<sup>[24]</sup>分别计算土壤侵蚀量和水源涵养量；以植被净初级生产力为基础，评估生物多样性指数<sup>[25-26]</sup>；综合前人的研究和研究区实际情况<sup>[8]</sup>，选定距黄河干流远近、植被覆盖度、降水量、坡度、土壤类型和距离矿区远近等因子评价研究区的地质灾害易发性。

## 2.2 评价指标权重确定

在多指标综合评价中，各指标的数据类型和维度差异会对评价结果产生一定的影响，因此首先对原始指标数据进行归一化和标准化处理<sup>[27-28]</sup>。本文采用熵权法对经过归一化和标准化处理后的指标权重进行赋值。熵权法<sup>[29-31]</sup>是一种客观赋予评价指标权重的方法，用来反映评价体系的混乱程度，信息熵值越小，信息效用值越大。分析各指标权重（图2）结果发现，权重排在前3位的评价指标分别是土壤侵蚀量、生物多样性指数和人均能源消耗量，说明当前研究区生态环境问题和人类活动所导致的能源消耗对承载力的影响程度较大；而地质环境子目标层指标的权重较小，说明该类指标的影响程度较小。

## 2.3 评价模型构建

根据获得的评价指标标准化值和权重系数，采用欧氏距离-灰色关联分析-TOPSIS（ED-GRA-TOPSIS）模型对研究区生态地质环境承载力进行评价<sup>[32-33]</sup>。TOPSIS法能够有效反映评价对象的整体

特征，对样本资料无严格要求，具有普遍适用性。但其基于距离测度的评价机制存在明显不足：①该方法仅能通过位置关系刻画数据曲线的空间分布特征，而无法捕捉序列的动态趋势变化；②当评价对象与正、负理想解的距离相等时，该方法难以进行有效的优劣判别<sup>[34]</sup>。灰色关联分析方法在处理多变量、多因素构成的复杂非线性系统时表现出显著优势，其通过综合考量曲线形态相似度与空间位置距离的双重特征，能够更为全面地反映评价目标与理想值之间的接近程度。基于此，本文将加权欧氏距离与灰色关联分析有机结合，构建了具有双重基准的ED-GRA-TOPSIS模型。这一改进不仅保留了传统TOPSIS法的优势特性，还通过引入趋势分析维度，显著提升了生态地质环境承载力评价的精确性与可靠性。采用ED-GRA-TOPSIS模型评价生态地质环境承载力的具体步骤为：

- 建立加权规范矩阵。将评价指标的权重与归一化评价矩阵相乘得到加权规范矩阵。
- 用TOPSIS模型确定各指标的正、负理想解。正理想解为各评价指标在所有观测年份的最优值，负理想解为各指标在所有观测年份的最劣值。
- 计算各评价指标与正、负理想解的欧氏距离。通过比较欧氏距离得出备选方案的偏好顺序，反映各评价指标与正、负理想解之间的位置关系。
- 计算各评价指标与正、负理想解的灰色关联度。根据加权规范矩阵，计算第 $j$ 个备选方案与第 $k$ 年理想方案的灰色关联度，其中，识别系数取值为0.5。
- 对欧式距离和灰色关联度结果进行无因次处理。
- 采用欧氏距离与灰色关联度进行综合评价。分别计算子目标层承载力和生态地质环境承载力与最优承载力的相对贴进度，取值范围为0~1，越接近1，说明计算结果越接近最优水平<sup>[35]</sup>。其中，灰色关联度和欧氏距离对综合评价值的贡献权重均取值为0.5。

## 3 结果与分析

### 3.1 子目标层承载力的时空演化

采用构建的ED-GRA-TOPSIS模型，对研究区2005—2020年地质环境、生态环境、社会经济环境子目标层承载力进行测算，结果如表2所示。

由表2可知，地质环境子目标层中，洛阳、开封和新乡市的地质环境承载力相对较高，而济源市最低。2005年仅洛阳市地质环境承载力在0.4以上，济源市仅为0.0873，其他市在0.2~0.4之间。

表 2 2005—2020 年各子目标层承载力评价结果

Table 2 Evaluation results of carrying capacity for different sub-objective layers from 2005 to 2020

| 年份   | 城市  | 子目标层承载力 |        |        | 年份   | 城市  | 子目标层承载力 |        |        |
|------|-----|---------|--------|--------|------|-----|---------|--------|--------|
|      |     | 地质环境    | 生态环境   | 社会经济环境 |      |     | 地质环境    | 生态环境   | 社会经济环境 |
| 2005 | 三门峡 | 0.2168  | 0.6367 | 0.2456 | 2015 | 三门峡 | 0.2599  | 0.6071 | 0.3464 |
|      | 洛阳  | 0.4291  | 0.4996 | 0.3087 |      | 洛阳  | 0.3931  | 0.5073 | 0.4863 |
|      | 济源  | 0.0873  | 0.5227 | 0.1949 |      | 济源  | 0.1357  | 0.4998 | 0.1929 |
|      | 焦作  | 0.3133  | 0.6357 | 0.3010 |      | 焦作  | 0.3193  | 0.5092 | 0.3632 |
|      | 郑州  | 0.3317  | 0.6963 | 0.4464 |      | 郑州  | 0.3233  | 0.4991 | 0.2967 |
|      | 新乡  | 0.3702  | 0.5928 | 0.2763 |      | 新乡  | 0.3730  | 0.5989 | 0.3122 |
|      | 开封  | 0.2878  | 0.5470 | 0.1088 |      | 开封  | 0.4265  | 0.7269 | 0.3194 |
|      | 鹤壁  | 0.2271  | 0.5505 | 0.2345 |      | 鹤壁  | 0.1967  | 0.5633 | 0.2326 |
|      | 安阳  | 0.3158  | 0.6226 | 0.2526 |      | 安阳  | 0.3321  | 0.4702 | 0.5454 |
|      | 濮阳  | 0.2564  | 0.4909 | 0.1630 |      | 濮阳  | 0.2887  | 0.6456 | 0.3523 |
| 2010 | 三门峡 | 0.2925  | 0.6731 | 0.3069 | 2020 | 三门峡 | 0.2988  | 0.6854 | 0.3121 |
|      | 洛阳  | 0.4916  | 0.7550 | 0.4560 |      | 洛阳  | 0.3728  | 0.7034 | 0.4143 |
|      | 济源  | 0.1040  | 0.4311 | 0.2517 |      | 济源  | 0.1557  | 0.5398 | 0.3029 |
|      | 焦作  | 0.2985  | 0.6945 | 0.3866 |      | 焦作  | 0.3328  | 0.5602 | 0.4654 |
|      | 郑州  | 0.3213  | 0.6488 | 0.5233 |      | 郑州  | 0.3987  | 0.6598 | 0.3673 |
|      | 新乡  | 0.3286  | 0.7154 | 0.4009 |      | 新乡  | 0.3821  | 0.6002 | 0.3414 |
|      | 开封  | 0.3682  | 0.6947 | 0.2723 |      | 开封  | 0.4298  | 0.7669 | 0.3674 |
|      | 鹤壁  | 0.2279  | 0.5539 | 0.2038 |      | 鹤壁  | 0.2981  | 0.5902 | 0.3823 |
|      | 安阳  | 0.3296  | 0.5979 | 0.3514 |      | 安阳  | 0.3981  | 0.5502 | 0.4576 |
|      | 濮阳  | 0.2995  | 0.5693 | 0.2368 |      | 濮阳  | 0.2984  | 0.6598 | 0.3643 |

2010 年洛阳市地质环境承载力上升,达 0.496;郑州、新乡、开封和安阳 4 市承载力均在 0.32 以上;其他市低于 0.3;济源市仍最低,为 0.104。2015 年开封市地质环境承载力最高,洛阳、焦作、郑州、新乡、安阳市承载力在 0.3~0.4 之间,其他市均低于 0.3。2020 年洛阳、郑州、新乡、安阳市地质环境承载力均超过 0.37,其他市则均有所提高。总体上,2005—2020 年济源、安阳、开封市地质环境承载力呈上升状态,其余各市波动变化。

2005—2020 年,生态环境子目标层中除安阳和焦作市外,各市生态环境承载力均呈现上升趋势,但是演变的态势却不尽相同。其中,开封、鹤壁和濮阳 3 市的资源储备较为丰富,生态环境良好,其承载力在 2005—2020 年稳步提升;洛阳、郑州、新乡、安阳等市经济状况良好,社会经济等各项指标居全省前列,但在其发展过程中长期受产业结构偏重、能源结构不合理的限制,生态环境约束日益显现出来,导致其承载力波动变化增加。

社会经济环境子目标层中,2005 年济源、开封、濮阳 3 市社会经济环境承载力低于 0.2,到 2020 年逐步上升到 0.3 以上。郑州市社会经济环境承载力在 2010 年达到最高,2010 年后承载力有所下降,到 2020 年保持在 0.3 以上。焦作市社会经济环境承载力持续上升,随着煤矿资源枯竭,焦作市着力打造宜居城市,大力发展旅游业,到 2020 年承载力最高。其余各市社会经济环境承载力在 2005—2020 年均

有所提升,到 2020 年均超过 0.3。研究区 10 市的社会经济环境承载力均值为 0.3775。

3.2 生态地质环境承载力的时空演化

图 3 给出 2005—2020 年研究区各市生态地质环境承载力变化。从图 3 可以看出,2005—2020 年研究区生态地质环境承载力总体水平不高,各市生态地质环境承载力介于 0.3021~0.5931 之间,呈波动变化趋势;除郑州市外,其他各市生态地质环境承载力均有所提升,开封市生态地质环境承载力上升最为显著,为 27.36%,说明生态地质环境所能承受人类活动的阈限有所增长,承载力主要随生态环境的趋势发展。2010—2020 年研究区生态地质环境承载力整体先下降后上升,均值先下降 2.9%后,又上升 5.1%,其中,济源、鹤壁和濮阳市承载力持续提升。到 2020 年,研究区生态地质环境承载力均值为 0.497。2005—2020 年郑州市生态地质环境承

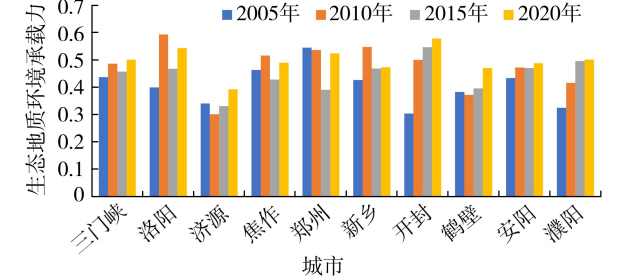


图 3 2005—2020 年各市生态地质环境承载力变化  
Fig. 3 Changes in eco-geological environment carrying capacity of different cities from 2005 to 2020

承载力略有下降,一方面由于郑州市人口总量快速增加,人们对于耐用消费品需求量不断增大,城市化进程加速,私有汽车大量增加,直接导致环境的负担较重;另一方面由于近年来城市建设用地侵占了大量生态用地,减弱了生态系统的供给功能。双重因素作用下,郑州市生态环境承载力和社会经济环境承载力都有所下降,导致其生态地质环境承载力较2005年下降了2.13%。

2005—2010年研究区各市生态地质环境承载力的空间分布变化明显,改善区域占比较大,研究区内除济源市外,其他各市承载力均在0.36以上。与2005年相比,2010年研究区生态地质环境承载力均值提升了6.8%,退化区域分布相对分散,中游地区济源市和郑州市生态地质环境承载力有所下降,下游地区鹤壁市略有下降。2005—2010年济源市经济高速腾飞,社会经济环境承载力大幅上升,但各种重工企业和污染型企业导致大气污染严重,土壤和地表水遭到破坏,过度的采矿活动导致区内地质灾害频发,本就脆弱的承载力因过度透支而逐渐恶化。鹤壁市是河南省重要的能源工业区,区内资源丰富,2005—2010年经济高速发展,而能源结构的不合理产生了水土流失等一系列问题,导致其生态地质环境承载力有所下降。

2010—2015年研究区主要体现为生态地质环境承载力下降。研究区内仅济源、鹤壁和濮阳市生态地质环境承载力有所上升,其他各市均下降。经济持续发展导致各种环境问题依旧存在,但随着政策推进和人们环境保护意识的增强,生态环境有所改善;科技进步也减少了企业在生产过程中造成的污染,减轻了对生态、地质环境的危害。2015年研究区生态地质环境承载力均值虽较2010年有所下降,但较2005年提升了4.56%。

2015—2020年研究区各市生态地质环境承载力均有不同程度的提升,区内经济发展和环境保护得到了双提升。“十三五”规划期间,研究区人均GDP稳步增加,产业结构由“二三一”转变为“三二一”;截至2020年底,研究区贫困人口全部脱贫,社会经济环境承载力随之提高;三门峡市矿山复绿效果显著,各类自然保护区形成严格规范,在推动旅游业发展的同时注重环境保护,形成良性循环,促进了经济发展;黄河干流区沿黄生态廊道,沿黄大堤、沿黄防护林、沿黄湿地公园等项目持续推进,充分发挥了沿黄生态、文化资源优势,使黄河两岸的生态环境得到有效保护。区域发展良好,使研究区生态地质环境承载力得到有效提升。

## 4 结 论

a. 2005—2020年研究区生态地质环境承载力总体水平不高,介于0.3021~0.5931之间,但有所改善,整体上向好的方向发展。生态环境子目标层和社会经济环境子目标层的变化对生态地质环境承载力影响较大,生态地质环境承载力的变化对人类活动较为敏感。

b. 2005—2020年除郑州市生态地质环境承载力略有下降外,其他各市承载力均有所提升。开封市生态地质环境承载力上升最为显著,为27.36%。2020年研究区各市生态地质环境承载力均值为0.497,相较2005年区内经济发展水平和环境保护质量得到了双提升。研究区生态地质环境承载力发生变化的区域主要为开封、濮阳和洛阳市,能源、工业发展和沿黄生态建设对该区域的承载力影响深远。

## 参考文献:

- [1] 李树文,康敏娟.生态-地质环境承载力评价指标体系的探讨[J].地球与环境,2010,38(1):85-90. (LI Shuwen, KANG Minjuan. A discussion on the evaluation index system of eco-geological environmental carrying capacity[J]. Earth and Environment, 2010, 38(1): 85-90. (in Chinese))
- [2] 何政伟,刘峻杉,赵银兵,等.西部矿产资源开发的地质生态环境承载力理论与方法探讨[J].地球与环境,2011,39(2):237-241. (HE Zhengwei, LIU Junshan, ZHAO Yinbing, et al. Discussion on the geo-ecological environmental carrying capacity of mineral resource exploitation in western regions [J]. Earth and Environment, 2011, 39(2): 237-241. (in Chinese))
- [3] 倪忠云.西藏曲水—桑日地区生态地质环境承载力研究[D].成都:成都理工大学,2011.
- [4] 何伟军,孟旭,孔阳,等.时空异质性视角下长江经济带水环境承载力评估及其驱动因子探究[J].水资源保护,2023,39(2):215-223. (HE Weijun, MENG Xu, KONG Yang, et al. Evaluation of water environmental carrying capacity of Yangtze River Economic Belt and its driving factors exploration from perspective of spatial-temporal heterogeneity [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 215-223. (in Chinese))
- [5] 王奎峰,李娜,于学峰,等.基于P-S-R概念模型的生态环境承载力评价指标体系研究:以山东半岛为例[J].环境科学学报,2014,34(8):2133-2139. (WANG Kuifeng, LI Na, YU Xuefeng, et al. Eco-environmental carrying capacity evaluation index system based on the concept of P-S-R model: a case study in Shandong Peninsula [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34

- (8):2133-2139. (in Chinese))
- [ 6 ] 李少朋,赵衡,王富强,等.基于 AHP-TOPSIS 模型的江苏省水资源承载力评价[J].水资源保护,2021,37(3):20-25. (LI Shaopeng,ZHAO Heng,WANG Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):20-25. (in Chinese))
- [ 7 ] 郑娇玉,邹明亮,杨超,等.兰州市城区生态地质环境承载力空间格局[J].兰州大学学报(自然科学版),2017,53(3):355-361. (ZHENG Jiaoyu,ZOU Mingliang, YANG Chao, et al. Spatial pattern of the carrying capacity of eco-geological environment in urban area of Lanzhou City [J]. Journal of Lanzhou University ( Natural Sciences ),2017,53(3):355-361. (in Chinese))
- [ 8 ] 赵子萌,曹永强,常志冬,等.黄河沿线9省区水土资源生态承载力耦合协调分析[J].水资源保护,2023,39(6):121-129. (ZHAO Zimeng,CAO Yongqiang,CHANG Zhidong, et al. Coupling coordination analysis of ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces along the Yellow River [J]. Water Resources Protection,2023,39(6):121-129. (in Chinese))
- [ 9 ] 薛联青,肖颖,刘远洪,等.黄河流域植被水分利用效率对干旱的时空累积响应[J].水资源保护,2023,39(4):32-41. (XUE Lianqing,XIAO Ying,LIU Yuanhong, et al. Spatiotemporal accumulation response of vegetation water use efficiency to drought in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection,2023,39(4):32-41. (in Chinese))
- [10] 刘昊,李琪颖,狄巍榕,等.河南省沿黄地区“三生”空间生态环境效应及驱动因素[J].环境科学与技术,2024,47(8):186-196. (LIU Hao,LI Qiyang,DI Weirong, et al. Land-use transformation of production-living-ecology space along Yellow River in Henan Province: eco-environment effect and driving factors[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47 ( 8 ): 186-196. (in Chinese))
- [11] 李海生.黄河流域生态环境问题系统识别与展望[J].环境科学研究,2024,37(1):1-10. (LI Haisheng. Systematic identification and prospect of eco-environmental problems in the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences,2024,37(1):1-10. (in Chinese))
- [12] WEN Guangchao,WU Bingjie,WANG Lin, et al. Analysis of eco-environmental geological problems and their driving forces in the Henan section of the Yellow River Basin, China[J]. Sustainability,2023,15(8):6818.
- [13] 王琳.黄河流域河南段生态环境地质问题及驱动力分析[D].焦作:河南理工大学,2021.
- [14] 高青.基于地质环境的天府新区土地利用及生态承载力研究[D].成都:成都理工大学,2020.
- [15] 张家熊,柳笑,汪成成,等.基于空间异质性的秦岭水源涵养能力评价指标体系构建[J].水土保持学报,2022,36(6):290-297. (ZHANG Jiaxiong, LIU Xiao, WANG Chengcheng, et al. Construction of water conservation capacity evaluation index system based on spatial heterogeneity in Qinling Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36 ( 6 ): 290-297. (in Chinese))
- [16] 夏军,王中根,左其亨.生态环境承载力的一种量化方法研究:以海河流域为例[J].自然资源学报,2004,19(6):786-794. (XIA Jun,WANG Zhonggen,ZUO Qiting. Study on eco-environment carrying capacity:a quantifying method and case study in the Haihe Basin, China [J]. Journal of Natural Resources,2004,19(6):786-794. (in Chinese))
- [17] 张嘉玉.黄河流域经济高质量发展与环境承载力关系研究[D].南昌:江西财经大学,2022.
- [18] 贾三满,杜丽娜,冯辉,等.北京大清河流域生态涵养区生态地质环境质量综合评价[J].城市地质,2020,15(2):125-136. (JIA Sanman,DU Lina,FENG Hui, et al. Eco-geo-environment evaluation of ecological conservation area near the Daqing River of Beijing[J]. Urban Geology, 2020,15(2):125-136. (in Chinese))
- [19] 赵银兵,倪忠云,欧阳渊,等.生态地质环境承载力研究进展[J].沉积与特提斯地质,2022,42(4):529-541. (ZHAO Yinbing, NI Zhongyun, OUYANG Yuan, et al. Research progress of eco-geological environment carrying capacity[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022,42(4):529-541. (in Chinese))
- [20] 陈玉兰,焦菊英,田红卫,等.黄土高原归一化植被指数与自然环境因子的空间关联性:基于地理探测器[J].生态学报,2022,42(9):3569-3580. (CHEN Yulan,JIAO Juying,TIAN Hongwei, et al. Spatial correlation analysis between vegetation NDVI and natural environmental factors based on geographical detector on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 ( 9 ): 3569-3580. (in Chinese))
- [21] 高宇婷,于洋,孙凌霄,等.塔里木盆地南缘绿洲土地覆盖变化及驱动力[J].干旱区研究,2021,38(4):1172-1183. (GAO Yuting,YU Yang,SUN Lingxiao, et al. Land coverage change and driving forces of an oasis in the southern margin of Tarim Basin[J]. Arid Zone Research, 2021,38(4):1172-1183. (in Chinese))
- [22] 李硕,沈占锋,柯映明,等.1974—2019年大清河流域土地利用景观时空变化[J].水土保持研究,2021,28(1):195-203. (LI Shuo,SHEN Zhanfeng,KE Yingming, et al. Spatial-temporal variation and driving forces of land use types in the Daqing River Basin from 1974 to 2019 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28 ( 1 ): 195-203. (in Chinese))
- [23] 程馨璐,胡月明,刘振华,等.基于遥感数据改进修正通用土壤流失方程的广州市土壤侵蚀定量研究[J].土壤

- 通报, 2023, 54 ( 3 ): 559-568. ( CHENG Xinrong, HU Yueming, LIU Zhenhua, et al. Quantitative study on soil erosion in Guangzhou based on RUSLE model improved by remote sensing data[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(3): 559-568. ( in Chinese ))
- [24] 付梦娣,唐文家,刘伟玮,等. 基于生态系统服务视角的生态风险评估及生态修复空间辨识:以长江源区为例[J]. 生态学报, 2021, 41( 10 ): 3846-3855. ( FU Mengdi, TANG Wenjia, LIU Weiwei, et al. Ecological risk assessment and spatial identification of ecological restoration from the ecosystem service perspective; a case study in source region of Yangtze River [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 ( 10 ): 3846-3855. ( in Chinese ))
- [25] 裴文明,葛峰,张慧,等. 基于净初级生产力的黑龙江生物多样性维护功能重要性评价[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2024, 56( 2 ): 140-149. ( PEI Wenming, GE Feng, ZHANG Hui, et al. Evaluation on the importance of biodiversity maintenance function in the Heilongjiang Province based on net primary productivity[J]. Journal of Northeast Normal University( Natural Science Edition ) , 2024, 56(2): 140-149. ( in Chinese ))
- [26] 郭庆华,胡天宇,姜媛茜,等. 遥感在生物多样性研究中的应用进展[J]. 生物多样性, 2018, 26( 8 ): 789-806. ( GUO Qinghua, HU Tianyu, JIANG Yuanxi, et al. Advances in remote sensing application for biodiversity research[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(8): 789-806. ( in Chinese ))
- [27] 江婉舒,周立志,周小春. 基于熵权法的安徽省湿地重要性评估[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30( 5 ): 1164-1174. ( JIANG Wanshu, ZHOU Lizhi, ZHOU Xiaochun. Assessment of wetlands importance in Anhui Province based on entropy weight method[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30( 5 ): 1164-1174. ( in Chinese ))
- [28] 王文举,田永杰. 河南省新型城镇化质量与生态环境承载力耦合分析[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41( 4 ): 21-26. ( WANG Wenju, TIAN Yongjie. Analysis of coupling degree between the quality of new urbanization and ecological environment carrying capacity in Henan Province [ J ]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41 ( 4 ): 21-26. ( in Chinese ))
- [29] SAATY T L. Principia mathematica decernendi: mathematical principles of decision making [ M ]. Pittsburgh:RWS Publications, 2010.
- [30] 陈桃,包安明,郭浩,等. 中亚跨境流域生态脆弱性评价及其时空特征分析:以阿姆河流域为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34 ( 12 ): 2643-2657. ( CHEN Tao, BAO Anming, GUO Hao, et al. Ecological vulnerability assessment for a transboundary basin in Central Asia and its spatiotemporal characteristics analysis; taking Amu Darya River Basin as an example [ J ]. Journal of Natural Resources, 2019, 34( 12 ): 2643-2657. ( in Chinese ))
- [31] 张晓峰,石永杰,刘俊,等. 基于 AHP-熵权法的望虞河西岸圩区活水调度方案多目标优选[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 ( 3 ): 80-87. ( ZHANG Xiaofeng, SHI Yongjie, LIU Jun, et al. Multi-objective optimization of flowing water dispatch schemes in western polder area of Wangyu River based on AHP-entropy weight method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 80-87. ( in Chinese ))
- [32] 雷勋平, QIU R, 刘勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2016, 32 ( 13 ): 243-253. ( LEI Xunping, QIU R, LIU Yong. Evaluation of regional land use performance based on entropy TOPSIS model and diagnosis of its obstacle factors [ J ]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 ( 13 ): 243-253. ( in Chinese ))
- [33] 李婷. 京津冀城市群生态环境可持续发展的政策评价: 基于 DPSIR-TOPSIS 模型[J]. 生态经济, 2022, 38( 5 ): 107-113. ( LI Ting. Policy evaluation of sustainable development of eco-environment in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration; based on DPSIR-TOPSIS model [ J ]. Ecological Economy, 2022, 38 ( 5 ): 107-113. ( in Chinese ))
- [34] 熊鸿斌,韩尚信. 基于 PSR-改进 TOPSIS 模型的安徽省资源环境承载力评价[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45 ( 2 ): 274-281. ( XIONG Hongbin, HAN Shangxin. Evaluation of resources and environmental carrying capacity in Anhui Province based on a PSR-improved TOPSIS model [ J ]. Journal of Anhui Agricultural University, 2018, 45(2): 274-281. ( in Chinese ))
- [35] ZHAO Yanqi, DAI Rongkun, YANG Ying, et al. Integrated evaluation of resource and environmental carrying capacity during the transformation of resource-exhausted cities based on Euclidean distance and a Gray-TOPSIS model; a case study of Jiaozuo City, China [ J ]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109282.

( 收稿日期: 2024 - 01 - 22 编辑: 施业 )