

# 基于“贡献力—活力—组织力—恢复力”的 武汉市自然资源生态安全评价

朱锦维, 柯新利, 周婷, 何利杰

(华中农业大学 公共管理学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** [目的] 构建生态系统健康与生态系统服务关联的自然资源生态安全评估框架, 分析城市化过程中自然资源生态安全的演变规律, 为区域国土空间优化和生态文明建设提供理论依据。[方法] 基于生态系统健康与生态系统服务关联的视角, 构建“贡献力—活力—组织力—恢复力”的自然资源生态安全评估框架, 综合运用 InVEST 模型、景观指数和德尔菲法评估武汉市 2000 和 2021 年的自然资源生态安全, 并分析其时空演变规律。[结果] ① 2000 和 2021 年武汉市自然资源生态安全指数分别为 0.394 4 和 0.374 5, 生态安全等级在空间上呈现中部低、四周高的分布格局, 且黄陂区生态安全水平最高; ② 2000—2021 年武汉市自然资源生态安全整体呈下降趋势, 下降的地区主要沿中心城区边缘呈环状分布, “低安全”范围有从中部核心区逐步向外扩张的趋势, 且“中等安全”降为“较低安全”, “较高安全”降为“中等安全”的分布范围较广。[结论] 城市扩张过程中面对自然资源生态安全不断下降的压力, 应进一步加强国土空间规划的引领作用, 严惩非法侵占生态用地, 加强生态空间的保护。

**关键词:** 生态安全; 贡献力; 活力; 组织力; 恢复力; 武汉市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0248-08

中图分类号: X826

**文献参数:** 朱锦维, 柯新利, 周婷, 等. 基于“贡献力—活力—组织力—恢复力”的武汉市自然资源生态安全评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 248-255, 306. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.030; Zhu Jinwei, Ke Xinli, Zhou Ting, et al. Ecological security evaluation of natural resources in Wuhan City based on a framework of contribution, vigor, organization and resilience [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 248-255, 306.

## Ecological Security Evaluation of Natural Resources in Wuhan City Based on a Framework of Contribution, Vigor, Organization and Resilience

Zhu Jinwei, Ke Xinli, Zhou Ting, He Lijie

(College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China)

**Abstract:** [Objective] An assessment framework for ecological security evaluation of natural resources was constructed to further analyze its evolution law in response to urbanization, in order to provide references for regional territorial space optimization and ecological civilization construction. [Methods] Based on the correlation between ecosystem health and ecosystem services, an ecological security framework based on “contribution, vigor, organization and resilience” was constructed. By using the InVEST model, landscape indices, and the Delphi method to evaluate the ecological security of Wuhan City in 2000 and 2021, the temporal and spatial evolution of ecological security was also analyzed. [Results] ① The ecological security index of Wuhan City was 0.394 4 in 2000 and 0.374 5 in 2021. Ecological security level showed a spatial distribution pattern of “low in the middle and high in the surrounding area”. The ecological security level of

收稿日期: 2022-10-14

修回日期: 2022-12-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“城市生态用地破碎化与土地功能演变的互馈机理研究”(41971240); 国家自然科学基金青年项目(42101265); 湖北省自然资源厅科研计划项目(ZRZY2020KJ02)

第一作者: 朱锦维(1993—), 男(土家族), 湖北省巴东县人, 博士研究生, 研究方向为土地利用变化与生态系统服务。Email: zhujw118@163.com.

通讯作者: 柯新利(1977—), 男(汉族), 湖北省天门市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境经济与自然资源管理研究。Email: kexl@mail.hzau.edu.cn.

the Huangpi District was the highest. ② From 2000 to 2021, the overall ecological security of Wuhan City showed a downward trend. The declining areas were mainly located in a ring along the edge of the central urban area. The distribution of the “low security” area tended to gradually expand from the central core area. The transition of areas from “medium ecological safety” to “low ecological safety” and from “high ecological security” to “medium ecological safety” was widespread. [Conclusion] Urban expansion has resulted in declining ecological security of natural resources. Therefore, territorial space planning should be further strengthened, including punishments for illegal occupation of ecological land and strengthening the protection of ecological space.

**Keywords:** ecological security; contribution; vigor; organization; resilience; Wuhan City

自然资源生态安全指人类生产、生活的基本保障以及适应环境变化的能力少受或不受自然资源与生态环境威胁的状态<sup>[1-2]</sup>。随着工业化、城市化的快速发展,人类活动对生态系统的干扰不断加剧、生态资源耗损严重、生态环境问题频发<sup>[3]</sup>,生态系统安全和经济社会可持续发展面临严峻挑战。在此背景下,自然资源生态安全问题受到社会各界广泛关注,党的十九大更是明确指出“加大生态系统保护力度,优化生态安全屏障体系”。因此,科学评价自然资源生态安全,分析城镇扩张过程中自然资源生态安全的时空演变规律,有利于协调人类活动与自然资源生态安全的关系,优化国土空间格局,促进中国生态文明建设。关于自然资源生态安全的研究源于20世纪中后期国际上对“环境安全”和“生态风险”的研究<sup>[4-5]</sup>。1989年,国际应用系统分析研究所(IIASA)正式提出“生态安全”这一术语<sup>[6]</sup>,自此,生态安全成为学术界关注的重点问题。自然资源生态安全评价是摸清区域生态现状和生态环境压力,进行生态安全预警和生态安全管理决策的基础。目前,对生态安全的评价主要基于生态系统本身的健康状况、可持续发展水平<sup>[7-9]</sup>或基于人类活动与自然资源生态系统的关系构建多维指标体系进行综合评价,其中考虑与人类活动关系时多利用压力—状态—响应(PSR)模型<sup>[10-11]</sup>、驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)模型等<sup>[12-13]</sup>。值得注意的是,生态安全评价不仅要考虑生态系统本身结构和功能的稳定性,还要关注生态系统服务的重要性,反映生态系统为人类提供产品和服务的能力,考虑生态系统本身与生态系统服务的关联性,体现生态系统对人类需求的满足程度和对人类的贡献<sup>[14]</sup>。活力—组织力—恢复力评估框架自Costanza提出以来在生态系统健康评价方面得到广泛应用<sup>[15]</sup>。近年来,有学者将生态系统服务纳入评价体系<sup>[16]</sup>,拓展了生态系统健康的概念范畴,为生态系统健康评价提供了新思路。自然资源生态安全的目标是保障生态系统在持续健康的状态下提供生态系统服务<sup>[17]</sup>,将生

态系统服务纳入活力—组织力—恢复力评估框架为生态安全评价提供了新思路。但如何考虑生态系统本身和生态系统为人类提供产品和服务需求的贡献程度,构建生态系统健康与生态系统服务关联的自然资源生态安全评估框架,并探究城市化过程中自然资源生态安全的演变规律仍鲜有研究涉及,不利于城市化过程中协调人类活动与自然资源生态安全的关系,制定针对性的国土空间优化策略。因此,本文考虑生态系统健康与生态系统服务的关联特征,构建“贡献力—活力—组织力—恢复力”的自然资源生态安全评估框架,综合运用InVEST模型、景观指数和德尔菲法评估武汉市2000和2021年的自然资源生态安全,并分析其时空演变规律,旨在协调城镇扩张过程中人类活动与自然资源生态安全的关系,为区域国土空间优化和环境管理提供政策参考。

## 1 研究区域

武汉市地处长江中下游平原、江汉平原东部,总面积8569.15 km<sup>2</sup>,2021年常住人口1364.89万,城镇化率84.56%,是中国中部地区快速城市化的典型城市。全市下辖13个行政区(图1),包括7个中心城区(江岸区、江汉区、硚口区、汉阳区、武昌区、青山区和洪山区)和6个远城区(东西湖区、汉南区、蔡甸区、江夏区、黄陂区和新洲区)。武汉市境内河网纵横、水系发达、湖泊广布,享有“百湖之市”的美誉,是长江经济带重要的生态节点,其生态环境保护对长江中下游生态安全和中国生态文明建设具有重要意义。随着工业化、城市化快速发展,以湖泊湿地为代表的生态用地不断萎缩,生态空间被大量占用,其中20世纪80年代末期以来,武汉主城区湖泊面积缩减近56.9%<sup>[18-19]</sup>。城市扩张对生态用地的占用导致水土流失程度不断加剧<sup>[20]</sup>、城市内涝<sup>[21]</sup>现象频发,区域生态系统服务功能遭到破坏,自然资源生态安全面临严峻挑战。因此,以武汉市为研究区域,探讨其自然资源生态安全时空演变特征,对快速城市化地区国土空间优化和环境管理政策的制定具有重要意义。

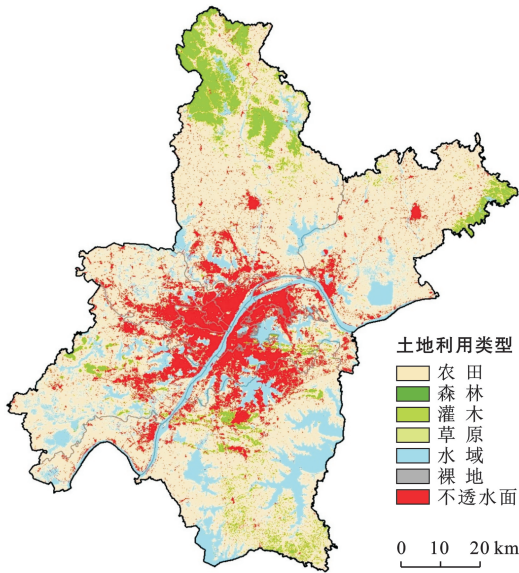


图 1 武汉市 2021 年土地利用类型

Fig.1 Land use types in Wuhan City in 2021

## 2 研究方法

### 2.1 自然资源生态安全评价体系

自然资源生态安全以生态系统服务与健康为前提,自然资源生态安全问题不仅要关注生态系统服务的重要性,而且要关注生态系统健康状况以及生态系统给人类提供的惠益<sup>[17]</sup>。贡献力—活力—组织力—

恢复力(CVOR)框架将生态系统健康与生态系统服务关联,基于 CVOR 框架开展自然资源生态安全评估,可揭示生态系统维持自身结构和功能稳定性以及生态系统为人类提供惠益的能力<sup>[16,22]</sup>。在 CVOR 评估框架中,贡献力(C)由生态系统服务功能体现,具体包括碳储存和固持、水质净化、产水量以及生境质量;活力(V)由净初级生产力(NPP)表征;组织力(O)由景观异质性和景观连通性两方面构成,各自包括平均斑块面积、香农多样性指数以及最大斑块指数和景观蔓延度指数;恢复力(R)由恢复力系数表征。C,V,O,R 具体指标依据相关文献和研究区域特点综合确定<sup>[17,22-23]</sup>,在经过多位专家咨询和反复讨论后,最终确定各级指标(图 2)。

### 2.2 自然资源生态安全评价模型与方法

2.2.1 贡献力评价 贡献力是反映自然生态系统与人类福祉关系的一种体现,一般采用生态系统服务定量表征,根据武汉市生态系统提供的主要产品和服务,选取碳储存和固持、水质净化、产水量以及生境质量 4 项服务并基于 InVEST 模型进行贡献力评价。InVEST 模型是一种生态系统服务和权衡的综合评估模型,涵盖众多生态系统服务评估模块,具有很强的空间化、动态化、可视化等特点,在生态系统服务评估中应用广泛<sup>[24]</sup>,具体核算原理与方法如下。

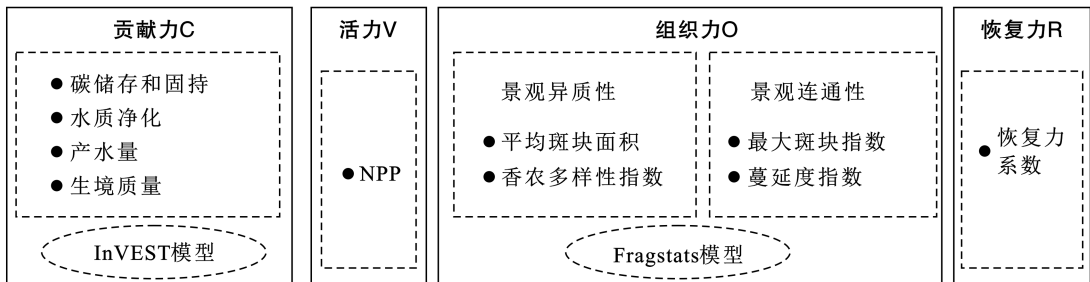


图 2 基于 CVOR 的自然资源生态安全评估框架

Fig.2 Assessment framework of natural resource ecological security based on CVOR

(1) 碳储存和固持。生态系统碳储存和固持量包括地上部分碳储量、地下部分碳储量、土壤碳储量和死亡有机物碳储量 4 个部分,利用碳密度和生态系统面积计算碳储量,其中碳密度数据依据相关文献确定<sup>[25]</sup>,具体计算公式为:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{total}}$ ,  $C_{\text{above}}$ ,  $C_{\text{below}}$ ,  $C_{\text{soil}}$ ,  $C_{\text{dead}}$  分别表示碳储存和固持总量、地上部分碳储存和固持量、地下部分碳储存和固持量、土壤碳储存和固持量、死亡有机物碳储存和固持量。

(2) 水质净化。水质净化主要评估生态系统对

氮、磷营养物质的净化功能,InVEST 模型以径流中养分污染物的清除能力来估算土壤和植被对水质净化的贡献<sup>[26]</sup>,计算公式为:

$$ALV_x = HSS_x \times pol_x \quad (2)$$

$$HSS_x = \lambda_x / \overline{\lambda_w} \quad (3)$$

$$\lambda_x = \lg(\sum_u Y_u) \quad (4)$$

式中: $ALV_x$  是像素  $x$  的调整负荷值;  $pol_x$  是像素  $x$  的输出系数;  $HSS_x$  是像素  $x$  计算方法的水文敏感度评分;  $\lambda_x$  是像素  $x$  流量指标;  $\overline{\lambda_w}$  是流域平均径流指数;  $\sum_u Y_u$  是像素  $x$  流量路径上像素水产量的总和。



(3) 产水量。产水量即研究区每个栅格降雨量与实际蒸发量之差,基于 Budyko 曲线和年降水量,通过降水量减去蒸散发的水量得到栅格单元的产水量<sup>[26]</sup>,计算公式为:

$$Y(x) = \left[ 1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right] \times P(x) \quad (5)$$

式中:  $AET(x)$  表示栅格单元  $x$  的年实际蒸散量;  $P(x)$  表示栅格单元  $x$  的年降水量。

(4) 生境质量。生境质量指生态系统为生物个体和种群提供生存条件的能力,可利用土地覆被和生物多样性威胁因子计算生境质量<sup>[27]</sup>,计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right] \quad (6)$$

式中:  $Q_{xj}$  表示生境类型  $j$  中  $x$  栅格的生境质量指数;  $H_j$  是生境类型  $j$  的生境适宜度,范围  $[0, 1]$ ;  $D_{xj}$  为表示生境类型  $j$  中  $x$  栅格的生境退化度;  $k$  为半饱和和常数即最大退化度的  $1/2$ ;  $z$  为归一化常量,值为 2.5。依据 InVEST 参数设置原则,将受人类活动干扰大的农田、不透水面定为威胁因子,其中威胁因子属性和生境类型对威胁因子的敏感度依据相关文献确定<sup>[27]</sup>。

2.2.2 活力评价 活力表征生态系统功能,描述生态系统的新陈代谢或初级生产力,一般采用净初级生产力(NPP)表征生态系统活力。本文利用美国国家航天局(NASA)发布的 MOD17A3 全球 NPP 数据,该数据利用 BIOME-BGC 模型与光能利用率模型估算地区年 NPP,已在全球得到广泛应用。

2.2.3 组织力评价 组织力是生态系统的结构,描述生态系统各组成部分之间的相互作用,由景观异质性和景观连通性决定,本文利用 Fragstats 软件计算组织力,具体计算原理与方法<sup>[23,28]</sup>如下:

(1) 景观异质性。景观异质性由景观多样性维持,可利用平均斑块面积和香农多样性指数对其进行量化。平均斑块面积(AREA\_MN)指整体景观中所有土地类型中所有斑块的平均面积,该指数值越高,景观破碎度越高;同样,香农多样性指数(SHDI)对景观中各斑块类型非均衡分布状况较为敏感,该指数越高,景观异质性也越高。具体计算公式为:

$$AREA\_MN = A/n \quad (7)$$

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m p_i \ln p_i \quad (8)$$

式中:  $AREA\_MN$  表示平均斑块面积;  $A$  为指整体区域的斑块总面积;  $n$  为区域内的斑块总个数;  $p_i$  表示景观斑块类型所占据的比率。

(2) 景观连通性。景观连通性由整体景观和重要生态斑块的连通性决定,可利用最大斑块指数(LPI)和蔓延度指数(CONTAG)对其进行量化。LPI

反映最大斑块对整个景观或者该类型景观的影响程度,该数值越大,连通性越好;CONTAG 可描述景观里斑块类型的团聚程度或延展趋势,该指数越高,表明连通性越好。具体计算公式为:

$$LPI = \frac{a_{ij} \times 100}{A} \quad (9)$$

CONTAG =

$$\left\{ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m [P_i(g_{ik} / \sum_{k=1}^m g_{ik})] [\ln P_i(g_{ik} / \sum_{k=1}^m g_{ik})]}{2 \ln m} \right\} \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $P_i$  为  $i$  类型斑块所占的面积百分比;  $g_{ik}$  为  $i$  类型斑块和  $k$  类型斑块毗邻的数目;  $m$  为景观中的斑块类型总数目。

2.2.4 恢复力评价 恢复力指区域生态系统在受到自然、人文因素干扰后恢复其原有结构和功能的能力,反映区域在生态系统过程中抵御与适应外来干扰的能力。本文基于不同土地利用类型恢复力系数<sup>[29]</sup>和 NDVI 数据计算栅格单元的恢复力系数,具体计算公式<sup>[22]</sup>为:

$$RC_i = \frac{NDVI_i}{NDVI\_mean_j} \times RC_j \quad (11)$$

式中:  $RC_i$  为第  $i$  个栅格的恢复力系数;  $NDVI_i$  表示第  $i$  个栅格的 NDVI 值;  $NDVI\_mean_j$  为第  $i$  个栅格所在土地利用类型  $j$  的 NDVI 平均值;  $RC_j$  为地类  $j$  的恢复力系数。

2.2.5 自然资源生态安全评价 基于 CVOR 评价指标,为减轻数据背景的不确定性、自然的时空不均匀性或时间波动性造成的结果误差<sup>[30]</sup>,利用 CVOR 综合指数构建自然资源生态安全模型,计算公式为:

$$ESI = W_c \times C + W_v \times V + W_o \times O + W_r \times R \quad (12)$$

式中:  $ESI$  表示自然资源生态安全指数;  $C, V, O, R$  分别表示生态系统贡献力、活力、组织力、恢复力;  $W_c, W_v, W_o, W_r$  分别表示  $C, V, O, R$  的权重系数,反映了  $C, V, O, R$  各因素的重要性,可利用德尔菲法进行分层权重赋值,通过确定专家组成、向专家发放问卷、专家依据经验初步打分、整理统计再反馈给专家、确立各层指标重要性等一系列步骤实现对权重的赋值(表 1)。由于自然资源生态安全是一个相对概念,武汉市 2000—2021 年自然资源生态安全评价结果近似于正态分布,可将其平均值设为“一般”水平<sup>[31]</sup>,即中等安全。另外,值得注意的是,武汉市在研究时段内自然资源生态安全少有低于 0.25 或高于 0.55 的分值,因此,将自然资源生态安全状态用固定阈值划分为 5 个等级:低安全(0~0.25)、较低安全(0.25~0.35)、中等安全(0.35~0.45)、较高安全(0.45~0.55)和高安全(0.55~1)。



表 1 自然资源生态安全评估因子权重  
Table 1 Weights of natural resource ecological security assessment factors

目标层	准则层	权重	因子层	代号	权重
区域生态系统安全评价	贡献力	0.31	碳储存和固持	$C_{11}$	0.24
			水质净化	$C_{12}$	0.24
			产水量	$C_{13}$	0.23
			生境质量	$C_{14}$	0.29
	活力	0.19	净初级生产力	$C_{21}$	1.00
			平均斑块面积	$C_{31}$	0.23
	组织力	0.28	香农多样性指数	$C_{32}$	0.30
			最大斑块指数	$C_{33}$	0.25
			蔓延度指数	$C_{34}$	0.22
	恢复力	0.22	恢复力系数	$C_{41}$	1.00

### 2.3 数据来源

本文使用的基础数据包括：①2000 和 2021 年土地利用数据来源于武汉大学中国土地覆被数据集，分辨率为 30 m；②DEM 数据来源于地理空间数据云，分辨率为 30 m；③土壤数据采用基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集，来源于寒区旱区科学数据中心；④NDVI 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心，分辨率为 1 000 m；⑤NPP 数据来源于美国 NTSG 提供的 MOD17A3 遥感数据产品，分辨率为 30 弧秒；⑥蒸散发数据来源于国际农业研究

磋商组织(CGIAR)，分辨率为 30 弧秒，降水量数据来源于国家气象科学数据共享服务平台，并利用克里金插值法得到分辨率为 1 000 m 的栅格数据。由于不同类型的数据来源不同、分辨率不统一，在数据处理过程中首先对所有数据源统一投影，并通过重采样统一分辨率(30 m)，提取研究区数据，形成自然资源生态安全评价的数据库。

## 3 研究结果

### 3.1 武汉市生态系统贡献力、活力、组织力、恢复力评价

基于 InVEST 模型、Fragstats 和 ArcGIS 软件，对武汉市 2000 和 2021 年的生态系统贡献力、活力、组织力、恢复力进行评价，并分析其具体表征指标的变化，结果详见表 2。

(1) 生态系统贡献力。2000—2021 年，武汉市碳储存和固持服务、水质净化能力、生境质量指数呈下降态势，产水量呈增加态势，其中水质净化能力下降较为显著。碳储存和固持服务由 8 756.80 t/km<sup>2</sup> 下降到 8 465.64 t/km<sup>2</sup>，下降幅度达到 3.32%；水质净化能力由 50.71 kg/km<sup>2</sup> 减少到 44.16 kg/km<sup>2</sup>，减少幅度达到 12.92%；生境质量由 0.52 下降到 0.49，下降幅度达到 6.12%；产水量由 411.28 mm 增加到 456.28 mm，增加幅度达到 10.94%。

表 2 武汉市 2000 和 2021 年生态系统贡献力、活力、组织力、恢复力评价结果

Table 2 Assessment results of contribution, vigor, organization, resilience of Wuhan City in 2000 and 2021

准则层	指标层	2000 年	2021 年	变化率/%
贡献力	碳储存和固持/(t·km <sup>-2</sup> )	8 756.80	8 465.64	-3.32
	水质净化(kg·km <sup>-2</sup> )	50.71	44.16	-12.92
	产水量/mm	411.28	456.28	10.94
	生境质量指数	0.52	0.49	-6.12
活力	净初级生产力(g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	324.45	383.99	18.35
	平均斑块面积/hm <sup>2</sup>	15.63	13.62	-12.86
组织力	香农多样性指数	0.53	0.64	20.75
	最大斑块指数/%	74.55	69.42	-6.88
	蔓延度指数/%	71.52	65.87	-7.90
恢复力	恢复力系数	0.46	0.45	-2.17

(2) 生态系统活力。2000—2021 年，武汉市植被净初级生产力呈增加趋势，由 324.45 g/(m<sup>2</sup>·a) 增加到 383.99 g/(m<sup>2</sup>·a)，增长幅度达到 18.35%。植被净初级生产力可表征植被通过光合作用累计的有机物数量，武汉市植被净初级生产力呈增长态势说明该区域 2000 年以来植被覆盖度有增加态势，生态系统活力有所提升。

(3) 生态系统组织力。2000—2021 年，武汉市平

均斑块面积(AREA-MN)、最大斑块指数(LPI)和蔓延度指数(CONTAG)都呈减小趋势，香农多样性指数(SHDI)呈增加趋势。平均斑块面积从 15.63 hm<sup>2</sup> 下降到 13.62 hm<sup>2</sup>，减少幅度达 12.86%，这说明武汉市大斑块不断被分割，景观破碎度增加；香农多样性指数(SHDI)由 0.53 增加到 0.64 增长幅度达到 20.75%，说明武汉市景观异质性增加；最大斑块指数(LPI)由 74.55% 减小到 69.42%，减小幅度达到

6.88%,蔓延度指数由 71.52%减小到 65.87%,减小幅度达到 7.90%,这说明武汉市景观连通性降低,人类活动对景观格局的扰动量增加。

(4) 生态系统恢复力。2000—2021 年,武汉市恢复力系数呈略微减小趋势,由 0.46 减小到 0.45,减小幅度达 2.17%。恢复力表征生态系统抵御与适应外来干扰的能力,武汉市 2000 年以来恢复力系数呈减小趋势说明生态系统抵御外来干扰的恢复潜力有所降低。

### 3.2 武汉市自然资源生态安全时序变化特征

2000 和 2021 年武汉市自然资源生态安全指数分别为 0.394 4 和 0.374 5,属于“中等安全”水平,总体上生态安全状况呈下降趋势。从生态安全等级面积比例来看(图 3),2000 和 2021 年武汉市“中等安全”比例最大,分别占 60.99%和 53.41%,而“高安全”比例最小,分别占 1.18%和 0.44%。可见,武汉市超过 1/2 的区域自然资源生态安全指数处在 0.35~0.45 之间,自然资源生态安全指数超过 0.55 的区域较少。从生态安全等级面积比例的变化来看,“低安全”“较低安全”面积比例呈增长趋势,分别增长 3.27%,6.02%;而“中等安全”“较高安全”“高安全”面积比例呈减少趋势,分别减少 7.58%,0.98%,0.94%。可见,“较低安全”“中等安全”比例变化较为显著,“较高安全”“高安全”面积比例变化不明显。

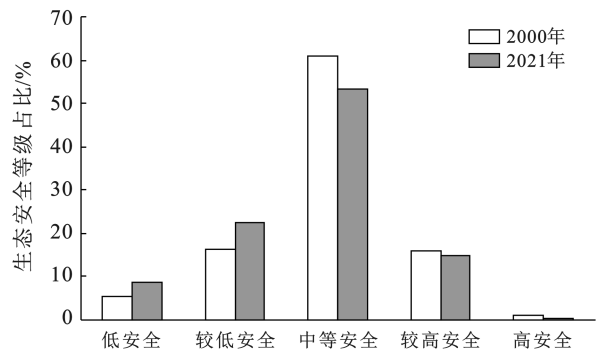


图 3 武汉市 2000 和 2021 年自然资源生态安全等级面积比例  
Fig.3 Proportion of areas with different levels of natural resource ecological security in Wuhan City in 2000 and 2021

从武汉市各区自然资源生态安全状况来看(表 3),远城区生态安全指数整体上高于中心城区,其中黄陂区生态安全指数最高(2000 和 2021 年分别为 0.416 1,0.398 1),江汉区生态安全指数最低(2000 和 2021 年分别为 0.232 9,0.227 7)。从自然资源生态安全指数变化来看,2000—2021 年江岸区生态安全指数变化最为显著,下降了 10.89%,硚口区、洪山区、东西湖区、蔡甸区、汉南区生态安全指数的下降率都超过 5%,是生态安全指数变化较为显著的地区,而武昌区生态安全指数有上升趋势,说明近年来武昌区生态有改善态势。

表 3 武汉市 2000 和 2021 年各区自然资源生态安全指数变化

Table 3 Changes in ecological security index of natural resources in Wuhan City in 2000 and 2021

地区	2000 年	2021 年	变化率/%	地区	2000 年	2021 年	变化率/%
武昌区	0.232 1	0.235 5	1.46	东西湖区	0.374 4	0.348 1	-7.02
江汉区	0.232 9	0.227 7	-2.23	蔡甸区	0.409 7	0.377 0	-7.98
汉阳区	0.277 6	0.266 1	-4.14	汉南区	0.403 4	0.378 7	-6.12
硚口区	0.258 3	0.239 9	-7.12	江夏区	0.405 2	0.388 3	-4.17
江岸区	0.280 2	0.249 7	-10.89	新洲区	0.396 4	0.383 8	-3.18
青山区	0.252 8	0.246 3	-2.57	黄陂区	0.416 1	0.398 1	-4.33
洪山区	0.337 5	0.308 5	-8.59				

2000—2021 年武汉市自然资源生态安全等级发生变化的面积为 2 284.75 km<sup>2</sup>,占区域总面积的 26.66%,其中 20.07%的区域生态安全等级下降,仅 6.59%的区域生态安全等级提升。从具体变化情况来看,“中等安全”转为“较低安全”的面积最大(881.04 km<sup>2</sup>),占区域总面积的 10.28%,其次为“较高安全”转为“中等安全”(330.09 km<sup>2</sup>),占区域总面积的 3.85%(表 4)。可见,武汉市自然资源生态安全等级下降形势较为严峻,亟需采取针对性举措提升其生态安全状况。

表 4 武汉市 2000—2021 年自然资源生态安全面积转移矩阵

Table 4 Area transfer matrix of natural resources ecological security in Wuhan City from 2000 to 2021 km<sup>2</sup>

生态安全等级	2021 年				
	低安全	较低安全	中等安全	较高安全	高安全
2000 年 低安全	389.36	72.24	8.87	0.35	0.00
较低安全	287.33	920.22	198.85	21.39	0.29
中等安全	71.40	881.04	4 011.16	244.10	8.23
较高安全	2.58	65.88	330.09	944.64	10.47
高安全	0.03	3.47	18.68	59.46	19.03

### 3.3 武汉市自然资源生态安全空间变化特征

从自然资源生态安全等级空间分布来看,2000年、2021年武汉市中部地区为“低安全”,向四周扩展依次为“较低安全”“中等安全”,“较高安全”和“高安全”在

局部区域也呈块状分布,总体上呈现中部低,四周高的分布格局。从自然资源生态安全等级整体变化来看,2021年相对于2000年中部地区“低安全”面积明显增大,“低安全”范围逐渐由中部核心区向外扩展(图4)。

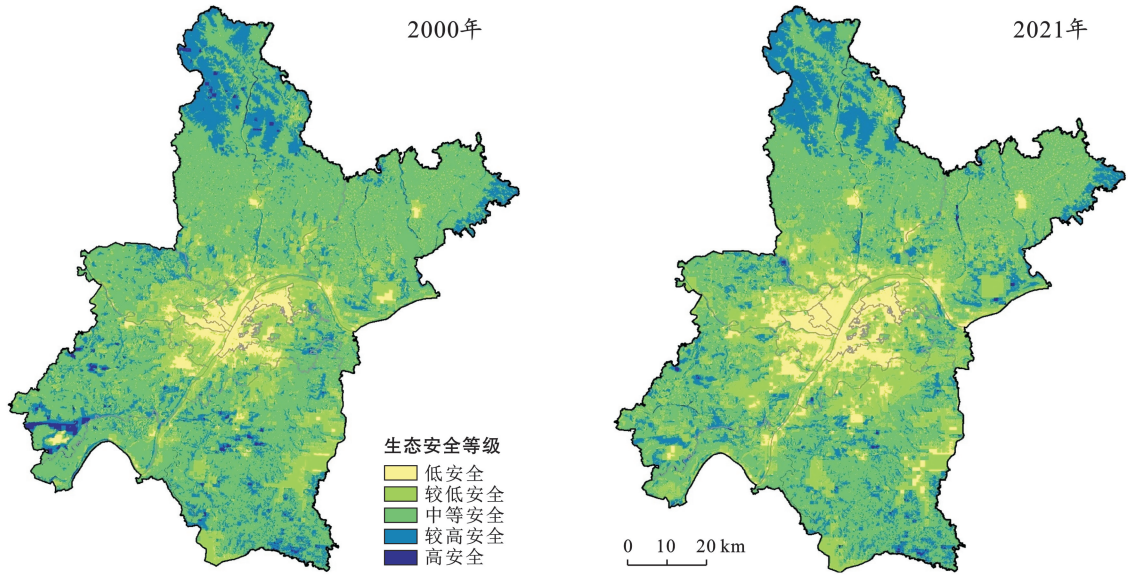


图 4 武汉市 2000 和 2021 年自然资源生态安全等级空间分布

Fig.4 Spatial distribution of natural resources ecological security at different levels in Wuhan City in 2000 and 2021

从自然资源生态安全等级空间变化来看(图5),2000—2021年武汉市生态安全等级下降的区域沿中心城区边缘呈环状分布,而生态安全等级上升的区域呈点状零散分布。具体来看,中心城区边缘(洪山区南部、汉阳区西南部、硚口区西部、江岸区西北部)和远城区靠近中心城区地带(江夏区北部、蔡甸区东北部、东西湖区东部、黄陂区南部、新洲区西南部)形成的环状区域是生态安全下降较为集中的地区,其中“中等安全”转为“较低安全”的区域分布最广,江岸区西侧、东西湖区东部“中等安全”转为“低安全”也呈现小聚集的态势(图5)。

逐渐由中部核心区向外扩展。

(4) 2000—2021年武汉市自然资源生态安全水平下降的区域主要沿中心城区边缘呈环状分布,而生态安全水平上升的区域主要呈点状零散分布于各地。

## 4 讨论与结论

### 4.1 结论

(1) 2000 和 2021 年武汉市自然资源生态安全指数分别为 0.394 4 和 0.374 5, 总体属于“中等安全”水平, 其中黄陂区生态安全状况最好, 江汉区相对较差。

(2) 2000—2021 年武汉市自然资源生态安全整体呈下降趋势, 硚口区、洪山区、东西湖区、蔡甸区、汉南区下降较为显著, 且“中等安全”降为“较低安全”和“较高安全”降为“中等安全”的分布范围较广。

(3) 2000 和 2021 年武汉市自然资源生态安全整体呈现中部低、四周高的分布格局, 且“低安全”范围

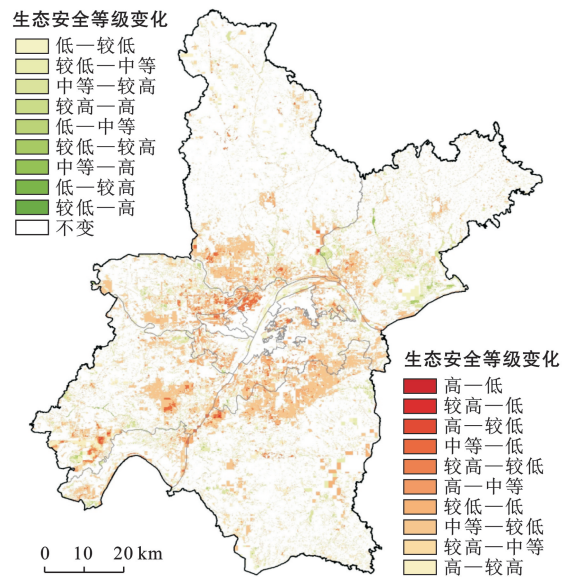


图 5 武汉市 2000—2021 年自然资源生态安全等级变化空间分布

Fig.5 Spatial distribution changes in natural resources ecological security at different levels in Wuhan City from 2000 to 2021



## 4.2 讨论

本文基于生态系统健康与生态系统服务关联的视角,从自然生态系统对人类需求满足程度构建“贡献力—活力—组织力—恢复力”评估框架,较好表征了自然生态系统的生态安全特征;以快速城市化地区的武汉市为研究区域,分析其2000—2021年自然资源生态安全时空演变规律,有利于协调人类活动与自然资源生态安全的关系,对国土空间优化具有一定参考意义。在城市扩张过程中生态用地不断被建设用地占用、城市景观不断分割破碎对自然资源生态安全造成较大威胁,应进一步加强国土空间规划的引领作用,严惩非法侵占生态用地,加强生态空间的保护。

但本研究仍存在以下局限:①对生态系统服务功能的量化不全面,本文根据实际情况对武汉市4类主要生态系统服务功能利用InVEST模型进行了评估,但实际生态系统服务却有更多种类,可进一步考虑更多类型的产品和服务;②利用德尔菲法确定主要参数的权重值,虽然最终权重经过众多专家研讨,但是不可避免地仍存在一定的主观性,这也是可以进一步深入研究的问题;③本文仅利用2000和2021年两个年份的数据分析武汉市生态安全时空演变,未来可考虑更长时间连续年份生态安全的时空变化规律,或考虑具有季节性动态变化特征的生态安全评价因子。

### [参 考 文 献]

[1] Pirages D. Demographic change and ecological security [J]. Environmental Change and Security Project Report, 1997, 3: 37-46.

[2] 徐智超, 刘华民, 韩鹏, 等. 内蒙古生态安全时空演变特征及驱动力[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4354-4366.

[3] 崔馨月, 方雷, 王祥荣, 等. 基于DPSIR模型的长三角城市群生态安全评价研究[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 302-319.

[4] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.

[5] 吴艳霞, 罗恒, 梁志康. 长江经济带生态安全测度研究[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6761-6775.

[6] Shi Xiaoqing, Zhao Jingzhu, Ouyang Zhiyun. Assessment of eco-security in the Knowledge Grid e-science environment [J]. Journal of Systems and Software, 2006, 79(2): 246-252.

[7] Zeng Chen, Deng Xiangzheng, Xu Shan, et al. An integrated approach for assessing the urban ecosystem health of megacities in China [J]. Cities, 2016, 53: 110-119.

[8] Caniani D, Labella A, Lioi D, et al. Habitat ecological integrity and environmental impact assessment of an-

thropic activities; a GIS-based fuzzy logic model for sites of high biodiversity conservation interest [J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 238-249.

[9] Dizdaroglu D. Developing micro-level urban ecosystem indicators for sustainability assessment [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2015, 54: 119-124.

[10] 王争磊, 刘海龙, 丁娅楠, 等. 山西省生态安全时空演变特征及影响因素[J]. 生态学报, 2022, 42(18): 7470-7483.

[11] 赵鹏宇, 薛慧敏. 基于PSR模型的能源—生态复合区生态安全预警研究: 以山西省忻州市为例[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 285-290, 298.

[12] 石丹, 关婧文. 基于DPSIR-物元的吉林省旅游生态安全时空格局测度及障碍诊断[J]. 生态学杂志, 2022, 41(8): 1653-1664.

[13] 邵月花, 杨调调, 谈存峰. 基于DPSIR模型的渭河干流甘肃段生态安全评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 166-170.

[14] 彭建, 王仰麟, 吴健生, 等. 区域生态系统健康评价: 研究方法进展[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4877-4885.

[15] 俞鸿千, 蒋齐, 王占军, 等. VOR, CVOR指数在宁夏干旱风沙区荒漠草原健康评价中的应用: 以盐池县为例[J]. 草地学报, 2018, 26(3): 584-590.

[16] Peng Jian, Liu Yanxu, Li Tianyi, et al. Regional ecosystem health response to rural land use change: a case study in Lijiang City, China [J]. Ecological Indicators, 2017, 72: 399-410.

[17] 潘竟虎, 王云. 基于CVOR和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2582-2595.

[18] Yang Bohan, Ke Xinli. Analysis on urban lake change during rapid urbanization using a synergistic approach: a case study of Wuhan, China [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2015, 89: 127-135.

[19] 谢启姣, 刘进华. 1987—2016年武汉城市湖泊时空演变及其生态服务价值响应[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7840-7850.

[20] 朱晓南, 刘艳中, 陈勇, 等. 武汉市城市用地扩张对生态系统服务的时空影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 288-294.

[21] 曾忠平, 彭浩轩. 城市湿地损失和内涝灾害响应的遥感分析: 以武汉市南湖为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 929-938.

[22] 袁毛宁, 刘焱序, 王曼, 等. 基于“活力—组织力—恢复力—贡献力”框架的广州市生态系统健康评估[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1249-1257.

[23] 董玉红, 刘世梁, 安南南, 等. 基于景观指数和空间自相关的吉林大安市景观格局动态研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(11): 1860-1871.

- [14] 曹祺文,张曦文,马洪坤,等.景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架:ESRISK[J].地理学报,2018,73(5):843-855.
- [15] 国家发展改革委.汉江生态经济带发展规划[R].北京:国家发展改革委,2018.
- [16] 张玉,张用川,陈林.陕西省汉江流域 2000—2015 年土壤侵蚀时空分异特征研究[J].中国农村水利水电,2021(10):78-85,91.
- [17] 张怡雅,袁飞,张利敏,等.南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J].水利水电科技进展,2022,42(3):14-19.
- [18] 张志苗,刘孝富,邱文婷,等.基于植被指数开展汉江流域生态恢复力评估研究[J].环境工程技术学报,2022,12(2):436-442.
- [19] 张静,任志远.汉江流域植被净初级生产力时空格局及成因[J].生态学报,2016,36(23):7667-7677.
- [20] 陈泽怡,余珮珩,陈奕云,等.汉江流域水源涵养和水质净化服务时空分析[J].生态经济,2022,38(4):193-200.
- [21] 王冰,田永中,高志勇,等.重庆市土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].测绘科学,2010,35(2):150-152.
- [22] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [23] 周常萍.基于生态系统服务价值的土地利用和生态环境评价:以广东省为例[J].安徽农业科学,2010,38(18):9722-9724.
- [24] Costanza R, Darge R, Degroot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.
- [25] 尉芳,刘京,夏利恒,等.基于 LUCC 的陕西渭北旱塬区景观生态风险评价[J].中国环境科学,2022,42(4):1963-1974.
- [26] 杨荔阳,易志辉,林斌,等.福建省耕地质量空间自相关分析与耕地保护分区[J].中国农业资源与区划,2018,39(11):52-58.
- [27] 朱增云,阿里木江·卡斯木.干旱区绿洲城市生态系统服务价值空间自相关格局分析与模拟[J].生态与农村环境学报,2019,35(12):1531-1540.
- [28] 朱磊,杨爱民,夏鑫鑫,等.基于空间自相关的 1975—2015 年玛纳斯河流域耕地时空特征变化分析[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(6):887-899.
- [29] 谢花林,李秀彬,张燕婷,等.基于 ESDA 的京津冀地区草地变化空间分异[J].自然资源学报,2012,27(7):1224-1232.
- [30] 叶云,赵小娟,胡月明,等.珠三角耕地质量局部空间自相关分析[J].江苏农业科学,2019,47(6):197-203.
- [31] 俞明轩,谷雨佳,李睿哲.党的以人民为中心的土地政策:百年沿革与发展[J].管理世界,2021(4):23-34.
- [32] 王金南,董战峰,蒋洪强,等.中国环境保护战略政策 70 年历史变迁与改革方向[J].环境科学研究,2019,32(10):1636-1644.

(上接第 255 页)

- [24] 王良杰,马帅,许稼昌,等.基于生态系统服务权衡的优先保护区选取研究:以南方丘陵山地带为例[J].生态学报,2021,41(5):1716-1727.
- [25] Tang Lanping, Ke Xinli, Zhou Ting, et al. Impacts of cropland expansion on carbon storage: a case study in Hubei, China [J]. Journal of Environmental Management, 2020,265:110515.
- [26] 陈泽怡,余珮珩,陈奕云,等.汉江流域水源涵养和水质净化服务时空分析[J].生态经济,2022,38(4):193-200.
- [27] 朱杰,龚健,李靖业.青藏高原东部生态敏感区生境质量时空演变特征:以青海省河湟谷地为例[J].资源科学,2020,42(5):991-1003.
- [28] 张学雷,屈永慧,任圆圆,等.土壤、土地利用多样性及其与相关景观指数的关联分析[J].生态环境学报,2014,23(6):923-931.
- [29] Peng Jian, Liu Yanxu, Wu Jiansheng, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: a case study in Shenzhen City, China [J]. Landscape and Urban Planning, 2015,143:56-68.
- [30] 尹燕亭,运向军,郭明英,等.基于牧户感知和野外调查相结合的内蒙古东部草甸草原健康评价[J].生态学报,2019,39(2):709-716.
- [31] 欧维新,张伦嘉,陶宇,等.基于土地利用变化的长三角生态系统健康时空动态研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(5):84-92.