

长沙市土地利用变化及生态系统健康评价分析

熊吉璇 陈彩虹 余济云

中南林业科技大学, 中国·湖南 长沙 410004

摘要: 在快速城市化背景下, 探究土地利用变化与生态系统健康之间的耦合关系对于实现区域可持续发展至关重要。本研究旨在揭示 2005 年至 2023 年间长沙市土地利用格局演变与生态系统健康的分析。基于 2005、2010、2015、2020 及 2023 年五期土地利用数据和 NDVI 数据, 利用单一土地利用动态度和转移矩阵分析长沙市土地利用时空变化特征; 并结合 VOR (活力-组织力-弹性) 模型, 对长沙市生态系统健康状况进行定量评价与时空分异分析。结果表明 2005—2023 年, 长沙市土地利用以耕地和林地为主, 但建设用地面积持续显著增加, 主要由耕地转化而来。生态系统健康评价显示, 研究期内生态系统活力呈现波动下降趋势, 尤其在 2020 年后下降明显; 生态系统组织力保持相对稳定; 生态系统弹性在 2015 年降至最低后略有回升。综合生态系统健康指数 (EHI) 从 2005 年的 0.652 波动下降至 2023 年的 0.567, 总体降幅达 13.04%, 健康等级由“较优”降至“良好”, 且健康状况较差的区域由中心城区向近郊蔓延。因此未来需进一步优化土地利用结构, 协调城市开发与生态保护的关系, 以提升区域生态系统健康水平。

关键词: 土地利用变化; 生态系统健康; VOR 模型; 长沙市

Analysis of Land Use Change and Ecosystem Health Evaluation in Changsha City

Xiong Jixuan, Chen Caihong, She Jiyun

Central South University of Forestry and Technology, China Hunan Changsha 410004

Abstract: Against the background of rapid urbanization, exploring the coupling relationship between land use change and ecosystem health is crucial for achieving regional sustainable development. This study aims to reveal the evolution of land use pattern and ecosystem health in Changsha City from 2005 to 2023. Based on five phases of land use data and NDVI data from 2005, 2010, 2015, 2020 and 2023, the spatial-temporal characteristics of land use change in Changsha were analyzed using single land use dynamic degree and transfer matrix. Combined with the VOR (Vigor-Organization-Resilience) model, a quantitative evaluation and spatial-temporal differentiation analysis of the ecosystem health status in Changsha were conducted. The results show that from 2005 to 2023, land use in Changsha was dominated by cultivated land and forest land, while the area of construction land increased continuously and significantly, mainly converted from cultivated land. The ecosystem health evaluation indicates that the ecosystem vigor showed a fluctuating downward trend during the study period, especially after 2020; the ecosystem organization remained relatively stable; the ecosystem resilience decreased to the lowest in 2015 and then slightly recovered. The Comprehensive Ecosystem Health Index (EHI) fluctuated from 0.652 in 2005 to 0.567 in 2023, with an overall decrease of 13.04%, and the health grade dropped from "Relatively Excellent" to "Good". Moreover, areas with poor health status spread from the central urban area to the suburban areas. Therefore, it is necessary to further optimize the land use structure and coordinate the relationship between urban development and ecological protection in the future to improve the regional ecosystem health level.

Keywords: Land use change; Ecosystem health; VOR model; Changsha city

0 引言

生态系统健康这一概念, 是在生态可持续发展的大背景下被提出的, 核心目标在于阐明生态系统服务的承载能力、恢复效能、可持续供给水平与自身健康状态之间的关联, 尤其是在人类活动施加压力的前提下。近年来高强度的经济活动导致景观破碎化、河湖湿地萎缩与生物多样性锐减等生态问题频发, 威胁生态系统长期健康稳定, 影响

生态系统结构和供给能力与可持续发展^[1]。土地利用/覆被变化 (LUCC) 是导致全球环境变化的重要影响因素之一^[2], 也是引发生态系统健康变化的重要组成部分。随着人类改变土地利用和自然环境的行为日益增强, 导致生态系统所承受的压力及其遭受的负面影响变得愈发显著且持久, 因此深入探究土地利用格局演变与生态系统健康协调发展具有重要意义。

现有研究认为,生态系统健康应具备三个核心特征:活力水平、自组织能力与自我调控效能。为评估这些特征,学者们常用物种指示法和指标体系法,构建了多种评价模型。物种指示法通过特定生物群落的结构与功能变化来判断生态系统状态,具有生态意义明确的优点。但该方法依赖大量实地调查数据,适用范围多限于单一生态系统类型,在面对多要素、多结构或受强烈人类活动干扰的复合生态系统时,应用受到限制。相比之下,指标体系法能更全面地反映生态与社会经济之间的复杂互动关系。它可整合遥感数据、统计资料和实地观测,构建多层次指标,适用于城市、流域等大尺度区域,更具灵活性和普适性,因此在当前研究中被广泛采用。Rapport^[3]等人率先构建了活力—组织力—弹性力(Vigor—Organization—Resilience, VOR)评价框架^[4]。VOR模型在生态系统健康评价中应用广泛,其评估框架融合了生态系统内部结构功能与外部抵御干扰、维持稳定的双重维度,为城市生态系统健康状况的评价提供了有效分析方法。

1 研究区概况

长沙市位于湖南省中部,坐落于湘江流域的核心地带,位于东经 111° 53′ ~ 114° 15′ 与北纬 27° 51′ ~ 28° 40′ 之间。东邻江西省,南接株洲市、湘潭市,西连益阳市,北部与岳阳市相邻,形成了良好的区域合作与资源共享格局。是湖南省的省会城市,也是“长株潭城市群”的核心区域。长沙地处长江中游,享有“鱼米之乡”的美誉,水域丰沛,资源丰富,既有利于经济发展,也为生态环境提供了重要支撑。长沙市下辖 6 区 1 县 2 市:芙蓉区、天心区、岳麓区、开福区、雨花区、望城区、长沙县、浏阳市、宁乡市。总面积 1.18 万 km²。地势起伏显著,呈“马鞍形”分布,东北、西北群山环绕,中部低缓,湘江自南向北斜贯而过。属亚热带季风气候,四季分明,雨热同期,水资源丰沛,湘江及其支流构成完整水系。土壤以红壤和水稻土为主,植被以亚热带常绿阔叶林为特色,森林覆盖率达 55%。矿产资源丰富,尤以菊花石、铜、高岭土等为特色。2024 年,全市常住人口约 1051.31 万人,城镇化率超 83%,GDP 达 15268.78 亿元,形成以工程机械、文化创意、生物医药等为支柱的现代产业体系。作为历史文化名城,长沙城名、城址三千年未变,融合深厚底蕴与现代活力,是长江中游重要中心城市。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究系统构建了长沙市 2005、2010、2015、2020、

2023 年五期生态系统健康,主要采用土地利用数据和 NDVI 数据,其中土地利用数据来源于武汉大学 CLCD (<http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809>) 分辨率 30m,植被覆盖数据(NDVI)来源于美国太空总署(<https://modis.gsfc.nasa.gov>)。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用动态度

单一土地利用动态度是指某研究区域在一定的时间范围内,某种土地类型的数量变化情况。公式如下:

$$K = \frac{U_j - U_i}{U_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:K 为单一土地利用动态度;U_i、U_j 分别为研究时段内期初、期末土地利用面积;T 为研究时段。

2.2.2 土地利用转移矩阵

该方法用于反映研究时段内土地利用类型在期初和期末的面积变化、转移面积和方向,计算公式如下:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:S 为面积;n 为土地利用类型数量。

2.2.3 生态系统健康

本研究采用 VOR 模型对长沙市生态系统的健康状况进行评估,主要依赖于生态系统活力(EV)、生态系统组织力(EO)、生态系统弹性(ER)3 个指标。具体来说,生态系统结构和功能的完整性是通过这 3 个指标来衡量的。研究认为,当生态系统的结构、功能和过程相对稳定时,区域生态系统处于健康水平。计算生态系统健康状况的具体公式如下:

$$EHI = \sqrt[3]{EV \times EO \times ER} \quad (3)$$

式(3)中,EHI 表示区域生态系统健康指数。EV、EO、ER 分别是指生态系统活力、生态系统组织力、生态系统弹性。

(1) 生态系统活力。生态系统活力(EV)表示生态系统的代谢能力或净初级生产力。因 NDVI 能显示植被生产力的时空变化,且已被广泛证实适合评估 EV^[5]。因此本研究用 NDVI 数据作为长沙市 2005—2023 五期的生态活力指标。

(2) 生态系统组织力。生态系统组织力(EO)是指

由景观格局决定的生态系统结构稳定性和多样性^[6]，主要受景观异质性（Landscape heterogeneity, LH）、景观连通性（Landscape connectivity, LC）、景观形状指数（Landscape shape index, LS）的共同影响。本研究采用景观分割度（DIVISION）和蔓延度（CONTAG）来反映景观连通性，这两个指数越高，说明景观斑块之间的连接越紧密，越有利于物种交流与迁徙。使用香农多样性指数（SHDI）和香农均匀性指数（SHEI）衡量景观异质性，数值越高，表明景观类型多样且分布均匀，系统稳定性越强。采用周长面积分维数（PAFRAC）表示景观形状复杂程度，该指数越高，说明景观斑块形状越不规则，破碎化程度越高，人为干扰可能越明显。这些指标共同刻画了生态系统结构的组织水平，为评估生态稳定提供量化依据。计算公式如下（公式 4）：

$$\begin{aligned} EO &= 0.3 \times LC + 0.5 \times LH + 0.2 \times LS \\ &= 0.15 \times DIVISION + 0.15 \times CONTAG + 0.25 \times SHDI + \\ &\quad 0.25 \times SHEI + 0.2 \times PAFRAC \end{aligned}$$

(4)

式中，EO 为生态系统组织力，LC 为景观连通性指数，LH 为景观异质性指数，LS 为景观形态指数，DIVISION 为景观分割度指数，CONTAG 为蔓延度指数，SHDI 为香农多样性指数，SHEI 为香农均匀性指数，PAFRAC 为周长面积分形维数。

（3）生态系统弹力。生态系统弹力（ER）指的是生态系统对外部干扰或变化的弹性。生态系统弹力主要表现为两个方面，一方面是生态系统在面对干扰时，能够保持其稳定性和功能的抵抗力和适应能力，另一方面是生态系统在遭受干扰后的复原能力。生态系统弹力通常涉及多个层面，包括生物多样性、物种互动、生态过程和生态系统

结构^[6]。生态系统具有较高的弹力时，它能够适应环境的变化，并在遭受干扰后恢复其结构和功能。相反，当生态系统的弹力较低时，它可能无法应对干扰，导致生态系统破坏和崩溃。因此，生态系统弹力对于生态系统健康和可持续性至关重要，其计算公式如下：

$$ER = \sum_{i=1}^n A_i \times RC$$

(5)

式中，ER 是生态系统弹力，Ai 表示第 i 类土地利用类型占总面积的比例；指第 i 类土地利用类型的弹性系数；n 表示土地利用类型的类型数量。根据前人研究，各土地利用类型的弹性系数由抵抗力和恢复力两个方面进行赋值加权平均得到，其中抵抗力和恢复力的权重分别为 0.6 和 0.4。

（4）生态系统等级划分。基于 2005—2023 年长沙市生态系统活力、组织力和弹性计算结果，得出生态系统健康指数（EHI）。采用自然断点法将健康水平划分为五个等级：差（EHI<0.232）、较差（0.232 ≤ EHI<0.444）、良好（0.444 ≤ EHI<0.611）、较优（0.611 ≤ EHI<0.764）和优（EHI ≥ 0.764）。该分级方法能有效反映区域健康状况的空间差异，为动态评估和比较提供统一标准，适用于长沙市生态系统健康演变分析。

3 结果分析

3.1 长沙市土地利用变化分析

根据 2005—2023 年土地利用结构结构（表 1）可知，2005—2023 年长沙市土地利用结构以耕地、林地为主，二者合计占比长期保持在 91% 以上；建设用地占比持续攀升，与水域、草地、未利用地共同构成占比不足 9%

表1 2005—2023长沙市土地利用结构

土地利用类型	2005年		2010年		2015年		2020年		2023	
	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)	面积 (km ²)	比例 (%)
耕地	4556.62	38.65%	4843.36	41.08%	4950.09	41.99%	4794.11	40.67%	4719.06	40.03%
林地	6712.16	56.94%	6273.66	53.22%	6028.55	51.14%	6075.32	51.53%	6113.83	51.86%
草地	0.82	0.01%	1.65	0.01%	2.21	0.02%	1.38	0.01%	1.13	0.01%
水域	194.87	1.65%	188.42	1.60%	197.16	1.67%	186.80	1.58%	172.23	1.46%
未利用地	0.01	0.00%	0.03	0.00%	0.04	0.00%	0.16	0.00%	0.17	0.00%
建设用地	324.53	2.75%	481.90	4.09%	610.97	5.18%	731.26	6.20%	782.60	6.64%

表2 2005—2023长沙市土地利用转移矩阵

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地	总计
耕地	3879.28	273.26	0.63	17.52	0.11	385.82	4556.62
林地	805.60	5839.37	0.42	0.60	0.02	66.16	6712.16
草地	0.21	0.08	0.07	0.06	0.00	0.41	0.82
水域	33.25	1.11	0.01	151.41	0.04	9.06	194.87
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
建设用地	0.74	0.01	0.00	2.64	0.00	321.15	324.53
总计	4719.06	6113.83	1.13	172.23	0.17	782.60	11789.02

的次要地类。其中耕地、林地、建设用地是长沙土地利用的核心组成,草地、水域、未利用地占比始终低于 2%,空间分布零散且规模极小,对整体结构影响有限。运用 GIS 计算出土地利用转移矩阵(表 2),得出 2005~2023 年,耕地主要向林地和建设用地转变,其中向建设用地转变最多,面积为 385.82km²。林地主要向耕地转变,面积为 805.60km²,向其他类型转变不明显。草地仅在小范围向耕地、林地等类型少量转变。这一变化与长沙城市化进程深度绑定,城市经济发展与人口集聚推动建设用地需求激增,阶段性占用耕地、林地空间;而后期生态保护举措的落地,又使林地面积逐步回稳,既体现了城市扩张的客观需求,也反映了开发与保护的动态平衡探索。

3.2 生态系统健康

对生态系统活力、组织力、弹性的指标进行综合生态系统健康分析,结果如图 1 所示。

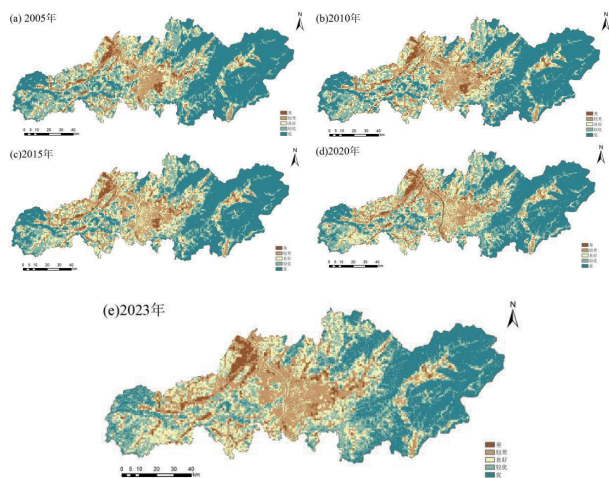


图1 2005—2023长沙市生态系统健康时空变化

长沙市生态系统活力从 2005、2010、2015、2020 到 2023 年指数分别是: 0.752、0.758、0.789、0.733、0.682, 2020 年较 2015 年,生态活力值显著降低,变化较明显的区域主要分布于雨花区高铁新城、望城区南部工业园区,以及浏阳市中部城乡交错带,呈现明显的下降趋势。长沙市生态系统组织力变化不明显,均保持为 0.782 左右浮动。而生态系统弹力 2005—2015 年长沙弹性均值下降至 0.535, 2015 年后回升, 2023 年的平均弹力为 0.544。综合健康的 2005—2023 年指数从 0.652 波动降至 0.567, 总体降幅 13.04%,健康较差等级仅在中心城区局部分布,并开始向长沙县、望城区近郊蔓延。未来城市规划需更加注重生态空间保护,强化国土空间用途管控,推动生态修复工程向城乡结合部延伸,以实现高质量发展与高水平保护协同并进。

4 结语

基于 2005—2023 年的多源数据,本研究对长沙市土地利用变化及生态系统健康进行了系统分析,主要结论如下:

(1) 2005—2023 年长沙市土地利用变化显著,耕地与建设用地的扩张是生态系统健康退化的关键因素。在生态脆弱区,无序的城市扩张会加剧景观破碎化。因此,划定开发边界、严控耕地非农化、推动未利用地生态化转型是提升健康水平的核心举措。

(2) 耕地与林地仍构成长沙市土地利用的主体,但建设用地的快速扩张的占比上升导致了景观结构的显著改变,成为驱动生态系统健康指数(EHI)从 0.652 下降至 0.567 的核心驱动力。生态系统活力的波动下降与组织力的结构性压力,表明了快速城市化对区域生态系统的胁迫。

(3) 未来建议在城市规划中优先考虑生态安全,科学控制建设用地规模,严禁耕地非农化,推动未利用地生态化改造。应将生态系统健康指数纳入管理,加强动态监测。未来研究可结合更多驱动因素,在更小尺度上深入分析,为实现发展与保护的平衡提供科学支持。

参考文献:

- [1] 曾晨,程轶皎,吕天宇.基于生态系统健康的国土空间生态修复分区:以长江中游城市群为例[J].自然资源学报, 2022,37(12):3118-3135.
 - [2] Gao Jie, Tang Xuguang, Lin Shiqiu, et al. The influence of land use change on key ecosystem services and their relationships in a mountain region from past to future (1995—2050) [J]. Forests, 2021, 12(5):616.
 - [3] RAPPORT D J, COSTANZA R, MCMICHAEL A J. Assessing ecosystem health. Trends in Ecology & Evolution, 1998, 13(10): 397-402.
 - [4] 马小宾,章锦河,马天驰等.国家公园生态系统健康测度模型构建及黄山实证研究.生态学报, 2024, 44(13): 5746 5760.
 - [5] 中国首批国家公园生态系统健康的时空动态及其对人类活动的响应 [J]. 自然资源学报, 2025, 40 (08): 2134-2151.
 - [6] 山地城市生态系统健康诊断及生态安全格局构建[D]. 西南林业大学, 2023. DOI:10.27416/d.cnki.gxnlc.2023.000008.
- 作者简介:熊吉璇(1999.05-),女,土家族,湖北省罗田县人,中南林业科技大学、资源利用与植物保护专业,硕士研究生,研究方向:农业资源利用。