

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2023.03.013

## 城市生态系统健康与耦合协调度评价——以长沙市为例

凌宁远<sup>1</sup>, 齐增湘<sup>1,2,3</sup>, 李涛<sup>1,2</sup>, 蒋娜<sup>1</sup>

(1. 南华大学 霖霖建筑与设计艺术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 生态型区域—城市规划与管理衡阳市重点实验室, 湖南 衡阳 421001; 3. 湖南省健康城市营造工程技术研究中心, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:**城市生态系统健康是城市综合发展过程中对生态环境所产生影响的反馈。目前对于此类型的评价模型和方法较成熟,但是缺乏一套相对完善的评价指标体系。本文根据自然—社会—经济复合生态系统理论构建长沙市生态系统健康评价指标体系。结合大数据和传统数据,用基于熵权的模糊综合法对2010—2020年期间长沙生态系统健康和整体协调度进行评价。研究表明:1)2010年芙蓉区城市生态系统健康隶属等级最高,为0.55。望城区耦合协调度水平最高,为0.721。2)2020年芙蓉区城市生态系统健康隶属等级最高,达到0.564且协调水平最高,为“良好协调”。3)2010—2020年期间,长沙市各区的生态系统健康均得到改善提高,但是耦合协调度等级变化较大。

**关键词:**长沙市;自然—社会—经济复合生态系统;城市生态系统健康;耦合协调度

**中图分类号:**X171 **文献标志码:**A

**文章编号:**1673-0062(2023)03-0091-08

## Evaluation of Urban Ecosystem Health and Coupling Coordination Degree: A Case Study of Changsha City

LING Ningyuan<sup>1</sup>, QI Zengxiang<sup>1,2,3</sup>, LI Tao<sup>1,2</sup>, JIANG Na<sup>1</sup>

(1. Solux College of Architecture and Design, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Hengyang Key Laboratory of Ecological Region-Urban Planning, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. Hunan Healthy City Construction Engineering Technology Research Center, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract:** The health of urban ecosystem is the feedback of the influence of ecological environment in the process of urban comprehensive development. At present, the evaluation

收稿日期:2023-01-06

基金项目:湖南省科技厅科技计划重点项目(2015SK2003);湖南省哲学社会科学基金项目(18YBQ106);衡阳市科技厅重点实验室项目(2018KJ113)

作者简介:凌宁远(1997—),女,硕士研究生,主要从事城乡生态规划与设计等方面的研究。E-mail:347044611@qq.com。\*通信作者:齐增湘(1972—),男,副教授,博士,主要从事景观生态规划等方面的研究。E-mail:610975289@qq.com

models and methods of urban ecosystem health are mature, but there is a lack of a set of relatively perfect evaluation index system. Based on the theory of natural-social-economic complex ecosystem, this paper constructs the index system of urban ecosystem health evaluation in Changsha City. Combining big data and traditional data, the fuzzy comprehensive evaluation method based on entropy weight was used to evaluate the health and overall coordination degree of urban ecosystem in Changsha City during 2010—2020. The results showed that: (1) Furong District had the highest level of urban ecosystem health in 2010, which was 0.55. Wangcheng District has the highest level of coupling coordination, which is 0.721. (2) In 2020, Furong District had the highest level of urban ecosystem health, reaching 0.564 and the highest coordination level, which was considered as “good coordination”. (3) During 2010—2020, the ecosystem health of all districts in Changsha City was improved, but the coupling coordination degree changed greatly.

**key words:** Changsha city; natural-social-economic complex ecosystem; urban ecosystem health; degree of coupling coordination

## 0 引言

城市生态系统是一种特殊的人工生态系统,由社会经济、自然环境和科学技术共同组成。伴随着城市化水平的提高,一系列生态问题使城市生态系统面临新的挑战。《“健康中国 2030”规划纲要》中提出要协调城市与人民发展,将健康城市作为本纲要建设的重点。城市是生态系统健康评价的一个重要方面,即如何良好运行该系统<sup>[1]</sup>。20 世纪 50、60 年代,全球的环境问题日益凸显,人类活动与环境健康的矛盾凸显,因此生态系统健康开始受到关注。最早由 D. J. Rapport<sup>[2]</sup>提出生态系统健康的概念,是指某种类型的生态系统具有稳定和可持续发展以及满足人类需求,同时拥有对外界压迫的自我调节的潜能。社会和城市居民的健康是城市生态系统健康更重要的表现,因此迫切需要运用适当的评价方法和有效的评价指标来促进城市健康运行和整体协调发展。

近年来,相关组织成立并开始对生态系统健康进行研究,专家学者将城市纳入到生态系统健康中并开展相关研究。在评价方法方面,以模糊综合评价<sup>[3]</sup>、物元模型<sup>[4]</sup>、能值分析<sup>[5]</sup>、正态云模型<sup>[6]</sup>、集对分析<sup>[7]</sup>和综合指数评价<sup>[8]</sup>等数学模型对生态系统健康评价研究。在评价指标上,W. J. Li<sup>[9]</sup>沿用了活力—组织结构—恢复力(vigor-organization-resilience, VOR)综合化的模型,利用活力—组织结构—恢复力—维护生态系统的服务功能(vigor-organization-resilience-services, VORS)模型构建生态系统健康相关指标。J. M. Spiegel<sup>[10]</sup>

在生态系统健康评价体系研究中采用驱动力—压力—状态—暴露—影响—响应模型(diving force-pressure-state-exposure-effects-action, DPSEEA)。在空间尺度上,Z. Y. Wang<sup>[11]</sup>将闽南金三角地区的县作为研究区,从空间上分析该尺度的生态系统健康。李嘉琪<sup>[1]</sup>以市为单位,对长株潭城市群范围的城市进行生态系统健康评价。当前多数文献是基于压力—状态—响应(pressure state response, PSR)<sup>[12]</sup>和驱动力—压力—状态—影响—响应模型(diving force-pressure-state-influence-response, DPSIR)<sup>[13]</sup>构建相关指标。但是以上所提出的模型较多的是通过自然特征构建指标,缺乏考虑引入社会、经济方面因素最终导致结果跟实际情况存在出入。城市是由自然、社会、经济系统三个子系统共同组成的复杂人工系统,城市的发展也与三者密切相关。本文结合城市特点以长沙市为例,综合考虑对城市生态系统健康影响因素,融入当前多源地理空间数据和传统数据,构建以马世骏和王如松<sup>[14]</sup>学者提出的自然—社会—经济复合生态系统作为本文的评价模型指标。基于定性与定量相结合的熵权模糊综合评价法和耦合协调模型,对长沙市六区 2010—2020 年的生态系统健康状况和协调度评价,评估城市生态系统健康及协调度状况,为长沙市健康综合发展提供科学依据,促进人与自然协调发展。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

长沙市位于湖南省东北部,其属于亚热带季风气候,全年气候温和,地势平坦、降水充足,市区

年均降雨量达 1 361.6 mm,雨热同期。依靠丰富的地形地貌、肥沃的土壤、充足的水源和良好的气候,拥有富裕的生物、矿产和植物资源。研究区范围内的土地利用类型主要以耕地、林地、草地和建设用地为主。在社会经济方面,根据统计年鉴数据,到 2020 年长沙市包括 6 个市辖区、1 个县、代管 2 个县级市。本文研究范围主要为 6 个市辖区,面积为 2 150.9 km<sup>2</sup>,建成区面积为 483.8 km<sup>2</sup>,人口为 373 万人。长沙市拥有较为完善的交通基础,在研究区域内形成铁路、公路、水运等交通运输体系。作为湖南省的省会城市,当前以服务业为主形成八大产业作为长沙市经济发展的重点,在城市发展中拥有较大的潜力。对长沙市的生态系统健康进行研究和探讨并提出相应的建议措施是促进长沙人口资源环境协调发展的重要途径。

## 1.2 数据来源及数据处理

研究范围内的人口、社会经济及环境数据来源于长沙市统计年鉴和各区统计公报。行政区划图及空间分辨率为 30 m 的长沙市 2010、2020 年遥感影像 Landsat TM 数据来源地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>),将遥感数据解译处理后在 Fragstats4.0 进行景观格局指数数据的处理、计算。兴趣点(point of interest, POI)数据联合高德地图开放平台 web 服务的应用程序编程接口(application programming interface, API),通过 Python 编程爬取数据后将其处理、分类,在 ArcGis 中对 POI 数据进行空间分析、统计、可视化处理。结合公开地图(open street map, OSM)数据平台提取道路数据,对不同等级和不同区域的道路数据进行编辑处理,得到长沙市各区的道路等级数据。

## 2 研究方法

### 2.1 指标体系的构建

根据自然—社会—经济复合生态系统模型选取城镇最大用地斑块指数、景观多样性指数、空气质量优良天数、人口自然增长率、城市干道路网密度、居住环境便利性、人均 GDP 收入、第三产业产值占 GDP 比重、环境保护支出占 GDP 比重等 20 项指标构建长沙市城市生态系统健康评价指标体系,如表 1 所示,并根据熵权法确定最终指标的权重。

### 2.2 评价方法

#### 2.2.1 计算长沙市生态系统健康评价模型

本研究以自然—社会—经济系统模型构建了

20 个关于城市生态系统健康的评价指标。生态系统健康是一个模糊的体系和相对的概念,从而采用模糊综合法对城市健康状况评价。通过运用熵权法得到较为客观、科学的指标权重,有效的反应信息熵的价值<sup>[15]</sup>。本文的城市生态系统健康评价模型为:

$$H = W \times R \quad (1)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \cdots & R_{1j} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & \cdots & R_{2j} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & \cdots & R_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_{i1} & R_{i2} & R_{i3} & \cdots & R_{ij} \end{bmatrix}$$

$$R_{ij} = (w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_n) \times \begin{bmatrix} r_{1i} \\ r_{2i} \\ \cdots \\ r_{ij} \end{bmatrix}$$

式中: $H$ 为生态系统健康综合评价; $W$ 为自然、社会、经济子系统对城市生态系统健康的权重矩阵  $W=(W_1, W_2, W_3)$ ;  $R_{ij}$ 表示第  $i$  个评价要素在第  $j$  等级的隶属度; $w_n$ 是基于熵权法计算出的各个指标的权重; $r_{ij}$ 表示第  $i$  个指标在第  $j$  个等级的隶属度。

模糊综合评价法主要是计算隶属度,对于指标隶属度的计算分别为正向指标和负向指标计算:

#### ①正向指标

a. 当  $X_i < S_{i,1}$  时,

$$r_1 = 1, r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = 0 \quad (2)$$

b. 当  $S_{i,j} \leq X_i \leq S_{i,j+1}$  时,

$$r_{i,j+1} = \frac{(X_{i,j} - S_{i,j})}{(S_{i,j+1} - S_{i,j})}, r_{i,j} = 1 - r_{i,j+1} \quad (3)$$

其他隶属度为 0

c. 当  $X_i > S_{i,5}$  时,

$$r_5 = 1, r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = 0 \quad (4)$$

#### ②负向指标

a. 当  $X_i > S_{i,1}$  时,

$$r_1 = 1, r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = 0 \quad (5)$$

b. 当  $S_{i,j+1} \leq X_i \leq S_{i,j}$  时,

$$r_{i,j+1} = \frac{(X_{i,j} - S_{i,j})}{(S_{i,j+1} - S_{i,j})}, r_{i,j} = 1 - r_{i,j+1} \quad (6)$$

其他隶属度为 0

c. 当  $X_i < S_{i,5}$  时,

$$r_5 = 1, r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = 0 \quad (7)$$

式中: $X_i$ 为第  $i$  个指标对应的现状值, $S_{i,j}$ 为现状

值  $X_i$  对应的第  $i$  个指标的第  $j$  个等级的标准健康值,  $S_{i,j+1}$  为第  $i$  个指标的第  $j+1$  个等级的标准健康值。

表 1 长沙市生态系统健康评价指标分级标准及权重

Table 1 Classification criteria and weights of urban ecosystem health evaluation indicators

项目层	序号	指标层	很不健康	不健康	亚健康	较健康	健康	权重
自然系统	1	城镇用地最大斑块指数 (Largest patch index, LPI)	30	25	20	15	10	0.062
	2	森林覆盖率/%	30	35	40	45	50	0.033
	3	景观斑块密度 (patch density, PD)	1.65	1.4	1.15	0.95	0.8	0.060
	4	景观多样性指数 (Shannon's Diversity Index, SHDI)	1.2	1	0.8	0.65	0.5	0.095
	5	景观蔓延度指数 (Contag)	25	35	45	55	70	0.034
	6	空气质量优良率/%	20	40	60	80	100	0.129
社会系统	7	人口自然增长率/%	13	11	9	7	5	0.037
	8	人口密度 $\rho$	8 000	7 000	5 000	4 000	3 000	0.026
	9	城市化水平/%	10	30	40	55	80	0.026
	10	工业聚集密度 $\rho$	0.77	0.62	0.52	0.36	0.3	0.029
	11	城市干道路网密度 $\rho$	1	1.2	2	2.4	3	0.071
	12	恩格尔系数/%	50	40	35	30	25	0.025
经济系统	13	居住环境便利性/%	8	10	13	16	20	0.063
	14	人均 GDP 收入/万元	0.7	3	5	10	20	0.044
	15	GDP 增长率/%	2	4	6	8	10	0.038
	16	GDP 能耗/%	2	1.5	1	0.7	0.5	0.029
	17	城市声环境健康性/%	35	45	55	70	85	0.030
	18	第三产业产值占 GDP 比重/%	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	0.036
	19	环境保护支出占 GDP 比重/%	0.5	1	1.5	2	3	0.093
	20	社会固定资产投资占 GDP 比重/%	0.1	0.45	0.6	0.8	1	0.040

2.2.2 城市生态系统健康耦合协调度评价模型

在城市生态系统健康中,不仅要求各个子系统及整体系统的健康状态同时要考虑各个子系统之间的和谐度。耦合协调是用于分析事物的协调发展水平,城市生态系统健康是追求子系统的协同发展,促进整体向更高层次进步<sup>[16]</sup>。评价城市生态系统健康的自然、社会、经济系统三者之间的耦合协调度,在城市生态系统健康的基础上进一步研究城市整体和子系统间和谐性,通过协调度水平体现协调程度的好坏。具体公式为:

$$C = 3 \times \{U_1 \times U_2 \times U_3 / (U_1 + U_2 + U_3)^3\}^{1/3} \quad (8)$$

发展水平:

$$T = W_1 \times U_1 + W_2 \times U_2 + W_3 \times U_3 \quad (9)$$

协调度:

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (10)$$

式中: $C$  为三个子系统之间的耦合度; $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  分别为自然、社会、经济系统的综合评价价值; $W$  为系统的权重系数; $T$  为三个子系统综合得分; $D$  为协调度。

2.3 城市生态系统健康评价指标分级标准

本文根据参考文献以及综合考虑长沙市区的现实情况,将城市生态系统健康指标划分为 5 个等级,分别为很不健康、不健康、亚健康、较健康和健康<sup>[1,17]</sup>。本文存在部分无法确定划分等级的指

标,根据收集、计算和比较六区数据确定健康和很不健康的标准,基于此标准上下浮动 20% 得到较健康、亚健康和不健康三个等级,最终确定本文的城市生态系统健康等级表(表 1)。根据相关文献将耦合协调度参考文献[18]划以下分成七个等级分别为失调(0,0.3)、严重失调[0.3,0.4)、中度失调[0.4,0.5)、勉强失调[0.5,0.6)、中等协调[0.6,0.7)、良好协调[0.7,0.8)、优质协调[0.8,1.0]<sup>[19]</sup>。

### 3 结果及分析

#### 3.1 评价结果

根据上述计算得到 2010—2020 年长沙市六区自然、社会、经济子系统和综合的城市生态系统健康指数以及六个区子系统三者之间的耦合协调度指数。整体的长沙市区城市生态系统健康以及各市各系统健康程度与耦合协调度结果见表 2、表 3、图 1、图 2。

表 2 长沙市 2010 年城市生态系统健康及耦合协调度整体评价

Table 2 Overall evaluation value of urban ecosystem health and coupling coordination degree in Changsha in 2010

区域	各健康级别隶属度					健康所属等级	耦合协调度	协调度所属等级
	很不健康	不健康	亚健康	较健康	健康			
芙蓉区	0.273	0.079	0.098	0.180	0.370	健康	0.682	中等协调
开福区	0.329	0.041	0.180	0.132	0.318	很不健康	0.688	中等协调
天心区	0.400	0.096	0.112	0.203	0.189	很不健康	0.551	勉强失调
望城区	0.378	0.068	0.110	0.128	0.316	很不健康	0.721	良好协调
雨花区	0.298	0.151	0.092	0.184	0.275	很不健康	0.686	中等协调
岳麓区	0.367	0.087	0.088	0.213	0.245	很不健康	0.629	中等协调

表 3 长沙市 2020 年城市生态系统健康及耦合协调度整体评价

Table 3 Overall evaluation value of urban ecosystem health and coupling coordination degree in Changsha in 2020

区域	各健康级别隶属度					健康所属等级	耦合协调度	协调度所属等级
	很不健康	不健康	亚健康	较健康	健康			
芙蓉区	0.208	0.030	0.198	0.164	0.400	健康	0.701	良好协调
开福区	0.204	0.092	0.158	0.240	0.306	健康	0.566	勉强失调
天心区	0.253	0.021	0.236	0.251	0.239	很不健康	0.560	勉强失调
望城区	0.191	0.134	0.128	0.302	0.245	较健康	0.678	中等协调
雨花区	0.223	0.121	0.154	0.230	0.272	健康	0.614	中等协调
岳麓区	0.253	0.034	0.133	0.335	0.245	较健康	0.651	中等协调

#### 3.1.1 2010 年城市生态系统健康及耦合协调度评价

长沙市城市生态系统健康从高到低分别为:芙蓉区>雨花区>岳麓区>开福区>望城区>天心区。如表 2 所示,长沙市六区中仅芙蓉区健康隶属等级为健康。属于很不健康评价等级的区域有 5 个,其中对于健康与较健康隶属度之和最大的区域是雨花区(0.459),最小的是天心区(0.392)。很不健康、不健康和亚健康评价等级中最高值是天心区(0.608),最低值是雨花区(0.541)。说明雨花区是属于这 5 区中城市生态

系统健康状况最好的区域。芙蓉区的子系统健康状况较好,区域基础设施的建设为经济的发展提供了良好的基础,GDP 的增长加大对自然环境改善的投资,提高其健康水平。天心区社会系统健康发展缓慢,造成天心区是六区中健康等级最低的区域。

结合耦合协调度计算(见图 1),自然、社会和经济子系统协同发展水平得出耦合协调度排序为:望城区>开福区>雨花区>芙蓉区>岳麓区>天心区。从各系统健康程度与耦合协调度结果可知,芙蓉区、开福区和雨花区的经济发展水平高,

人均 GDP 收入位于六区的前列,经济的快速发展促进区域基础设施的建设,提高了人类的精神生活水平,进而提升对自然环境的保护意识。经济振兴必然促进社会发展,增加积累,促进社会对自然环境的保育和改善<sup>[15]</sup>。望城区在环境保护方面的投入高,自然生态环境是人类赖以生存的空间,在创造健康空间和减少物质能量消耗方面起着重要的作用。因此,望城区、开福区和雨花区耦合协调水平高。天心区自然和社会发展水平处于六区最弱,区域基础设施建设发展缓慢,缺乏组织管理和自然环境的建设,进而影响区域整体耦合协调度水平。

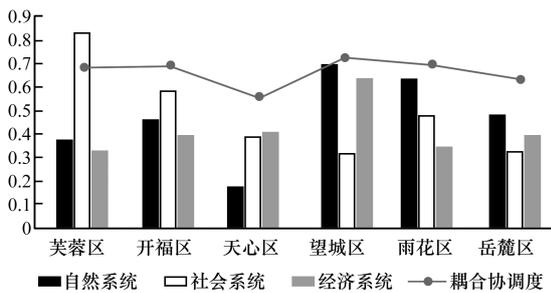


图 1 2010 年各区子系统健康耦合协调度关系图  
Fig. 1 Graph of health coupling coordination degree of subsystems in different districts in 2010

### 3.1.2 2020 年城市生态系统健康及耦合协调度评价

长沙市 2020 年城市生态系统健康水平排序为:芙蓉区>开福区>雨花区>岳麓区>望城区>天心区。如表 3 所示,长沙市六区中有 3 个区是健康等级,2 个区是较健康水平。对于健康评价等级中芙蓉区(0.564)的健康与较健康的隶属度之和最大,雨花区(0.502)隶属度之和最小;很不健康、不健康和亚健康评价等级最高的是雨花区,最低的是芙蓉区。在较健康评价等级中,岳麓区(0.58)的健康和较健康隶属度之和高于望城区(0.547)。芙蓉区、开福区和雨花区的社会系统健康呈现明显优势,较高的社会系统推动自然和经济系统的发展。天心区子系统三者健康状态不显著,自然和社会系统健康位于六区末尾,整体的区域健康隶属度最低。

2020 年长沙市耦合协调度为:芙蓉区>望城区>岳麓区>雨花区>开福区>天心区。由图 2 可知,芙蓉区的社会系统位于长沙市区的首位,社会发展水平提升了居民的科技与教育水平,提高居

民精神素质,进而促进经济与自然水平协调发展。望城区的自然系统与经济系统发展水平较其他五区更强,经济的发展加大自然环境环保方面的投入和改善,促进城市综合生态系统健康耦合协调度更具优势。天心区和开福区自然和经济系统水平呈现较弱的现象,经济发展和生态环境建设缓慢,结合耦合协调度计算,致使该两区的耦合协调水平和等级处于末位。

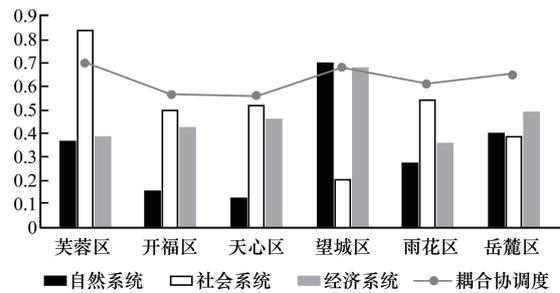


图 2 2020 年各区子系统健康耦合协调度关系图  
Fig. 2 Graph of health coupling coordination degree of subsystems in different districts in 2020

### 3.2 城市生态系统健康及耦合协调度时空变化特征

#### 3.2.1 2010—2020 年长沙市各区城市生态系统健康评价

2010—2020 十年期间长沙各区的城市生态系统健康呈现向好发展的趋势。开福区和雨花区从很不健康向健康方向发展,望城区和岳麓区因区域自然、经济系统健康进步促进整体向较健康发展。天心区在十年的发展期间,自然系统健康降低,社会和经济系统健康进步不显著,现区域的生态系统健康状况不容乐观,依旧处于很不健康的模式。但是在此期间健康隶属度占比提高,反映天心区对于区域生态系统健康状况有察觉并引起重视。

#### 3.2.2 2010—2020 年长沙市各区城市生态系统健康耦合协调度评价

根据耦合协调度结果可知,在此期间芙蓉区、岳麓区和天心区自然、社会和经济系统协调度水平提升促进综合的耦合协调度增加。天心区虽处于勉强失调的等级,但是协调度呈现上升。其他三个区整体的耦合协调度呈现减少的趋势,造成此现象的原因主要是自然和社会系统发展水平的下降。开福区表现最为显著,在 2010—2020 年间该区域由中等协调下降成勉强失调。因此提高区域自然和社会子系统的发展水平是提高区域城市

生态系统健康的关键。

## 4 讨论与结论

本文在总结国内外学者对于城市生态系统健康的基础上提出了运用当前 POI 大数据,利用自然—社会—经济系统模型构建一套具有空间属性的评价指标体系,在此基础上,以长沙市为例,以区为单位从空间上体现 2010—2020 年期间的城市生态系统健康和耦合协调度等级,其研究结论如下:

1) 在城市生态系统健康方面,长沙市各区的健康隶属度的指数相差较大,芙蓉区、开福区、雨花区发展优势较明显,城市生态系统处于健康状态。望城区和岳麓区发展居中,城市生态系统隶属较健康。天心区城市生态系统健康处于末位,很不健康的程度,但是隶属度等级分布得比较均匀,说明后期通过措施的改进,政策积极引导,天心区的城市生态系统健康将逐渐朝着正方向发展,接近较健康或健康的程度。

2) 在城市生态系统健康的基础上再次对长沙六区整体耦合协调度评价也体现了时空差异性,在 2010—2020 年发展期间,芙蓉区是良好协调,说明芙蓉区在发展期间追求健康的前提下也关注子系统之间的结构的稳定性。开福区、望城区、雨花区和岳麓区协调度等级和水平是降低的,子系统结构还存在较大不合理的情况,需要积极地完善。天心区虽然协调度水平是提高,但是协调度等级依旧是勉强失调,反映该区域在生态系统健康及协调度方面还存在较大的改善空间,后期需要特别关注。

总体而言,长沙市各区的生态系统健康还有很大的提升空间。之后在保证当前的长沙各区维持好现状成果的基础上,加大各区出现问题的指标建设的力度,进一步提高各区的城市生态系统健康和各区三个子系统结构的协调。针对长沙市各区城市生态系统健康和协调度提出以下建议:

针对影响长沙市区生态系统健康和耦合协调度的主要不利影响因素是自然和经济系统的情况,其中芙蓉区在发展过程中要注意土地的存量发展,避免出现城市过度扩张造成城市人口、交通拥挤,缓解工业产业过于密集,引导工业转移。开福区和雨花区在今后的发展中考虑满足本区整体环境相结合,合理布局、理性开发、保护原有的自然斑块,协调景观多样性格局发展。提高望城区与岳麓区社会基础设施的建设,构建更加便利、舒

适的居住环境,促进区域居民出行环境的便利性。天心区在城市发展过程中要避免区域的无序扩张带来的景观破碎化严重的现象,还要注意提高对社会固定投资的比重,拉动经济系统的发展,积极推进第三产业和循环经济的发展。同时长沙市各级政府要加大对该区城市环境保护的投资,提高保护环境意识,实现可持续发展。长沙作为湖南省的省会城市,城市化水平高,经济实力雄厚,各区基础设施的建设处于湖南省的领先地位。继续加强对研究区的社会系统建设,合理地制定发展策略,以便促进社会系统健康及其发展水平更加优化。基于以上所出现的城市发展的短板和提出的措施,统筹规划好各区子系统,促进各区之间整体协调发展。

本文以自然—社会—经济复合生态系统为基础构建指标体系并基于熵权的模糊综合评价相结合方法对长沙市生态系统健康和耦合协调度进行评价,研究结果在一定程度上体现了长沙市各区城市生态系统健康的空间差异性,与仅考虑自然因素指标相比,加入社会和经济因素更加反映城市发展的客观、实际情况,能够快速地对城市的景观结构、人类干扰及城市社会经济发展进行判断。在评价指标体系上加入当前 POI 大数据,并运用 GIS 对 POI 数据进行空间分析,最后将各区健康和协调度的评价结构通过 GIS 可视化展示。其指标体系的构建使城市生态系统健康评价更为科学、可信。然而,在评价指标的选取上由于研究区是长沙市六区的范围,无法对各个区生态系统健康状况具体定位,对更多的具有空间属性的指标和基础数据获取不够全面,不够客观地反映现象,造成评价的结果相对是比较粗糙。未来将提高数据的精细度并融入更多大数据到指标的选取中建立一套具有代表性和空间性的城市生态系统健康更具有指导意义。

### 参考文献:

- [1] 李嘉琪,王大娟,刘挺,等. 环长株潭城市生态系统健康评价[J]. 湖南生态科学学报, 2019, 6(1): 9-15.
- [2] RAPPORT D J. What constitutes ecosystem health? [J]. Perspectives in biology & medicine, 1989, 33(1): 120-132.
- [3] 刘玘玘,汪妮,解建仓,等. 基于熵权法的城市生态系统健康模糊评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(6): 755-759.
- [4] 刘娜,艾南山,方艳,等. 基于熵权的模糊物元模型在城市生态系统健康评价中的应用[J]. 成都理工大学

- 学报(自然科学版),2007,34(5):589-595.
- [5] 王智宇,马俊杰,陈新新,等.基于能值分析的西安市3个发展核心区生态健康评价[J].水土保持研究,2018,25(4):317-323.
- [6] 曹鑫,官冬杰,贺光秀,等.长江经济带生态系统健康正态云模型构建及其诊断[J].水土保持通报,2021,41(5):206-217.
- [7] 王坤晓.基于集对分析的成渝城市群生态系统健康评价[C]//中国城市规划学会.面向高质量发展的空间治理:2020中国城市规划年会论文集:2021年卷.北京:中国建筑工业出版社,2021:400-411.
- [8] 宁立新,梁晓瑶,程昌秀.京津冀地区生态系统健康评估及时空变化[J].生态科学,2021,40(6):1-12.
- [9] LI W J, WANG Y, XIE S Y, et al. Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between urbanization and ecosystem health in Chongqing municipality, China[J]. Science of the total environment, 2021, 791: 148311.
- [10] SPIEGEL J M, BONET M, YASSI A, et al. Developing ecosystem health indicators in Centro-Habana: A community-based approach[J]. Ecosystem health, 2001, 7(1):15-26.
- [11] WANG Z Y, TANG L, QIU Q Y, et al. Assessment of regional ecosystem health: A case study of the Golden Triangle of Southern Fujian province, China[J]. International journal of environmental research & public health, 2018, 15(4):802.
- [12] 霍子文,王佳.基于PSR模型的北京市西北生态涵养区生态健康评价研究[J].中国土地科学,2020,34(9):105-112.
- [13] 刘扬.基于DPSIR模型的昆明市域城市生态系统健康评价[D].昆明:云南大学,2018:33-40.
- [14] 马世骏,王如松.社会—经济—自然复合生态系统[J].生态学报,1984,4(1):1-9.
- [15] 曹欢,苏维词.基于模糊数学综合评价法的喀斯特生态系统健康评价[J].水土保持研究,2009,16(3):148-154.
- [16] 宋豫秦,袁庆涛,彭继平.城市复合生态系统健康评价方法在生态城市研究中的应用[J].中国水土保持,2007(6):29-32;60.
- [17] 邹君,吴顺山.基于DPSIR模型的城市生态系统健康评价:以衡阳市为例[J].衡阳师范学院学报,2011,32(6):113-117.
- [18] 杨士弘.城市生态环境学[M].北京:科学出版社,2003:252-256.

(上接第70页)

- [20] LUO J, DU K J, YUAN H, et al. Rational design of an artificial nuclease by engineering a hetero-dinuclear center of Mg-heme in myoglobin[J]. ACS catalysis, 2020, 10(24):14359-14365.
- [21] TEALE F W J. Cleavage of the haem-protein link by acid methylethylketone[J]. Biochimica et biophysica acta, 1959, 35:543.
- [22] LEONARD J J, YONETANI T, CALLIS J B. A fluorescence study of hybrid hemoglobins containing free base and zinc protoporphyrin IX[J]. Biochemistry, 1974, 13(7):1460-1464.
- [23] FERNÁNDEZ-PÉREZ A, VALDÉS-SOLÍS T, MARBÁN G. Visible light spectroscopic analysis of Methylene Blue in water; the resonance virtual equilibrium hypothesis[J]. Dyes and pigments, 2019, 161:448-456.
- [24] LUO L Y, CHANG C H, CHEN Y C, et al. Ultrafast relaxation of zinc protoporphyrin encapsulated within apomyoglobin in buffer solutions[J]. The journal of physical chemistry B, 2007, 111(26):7656-7664.