
城市化系统与生态系统交互耦合 时空特征及协调发展预警研究

——以湖南省为例

李静芝^{1, 2} 代宇涵¹ 赵雯¹ 樊晨曦¹ 罗文婧¹ 熊鹰^{1, 2} 张永志³ 汤礼莎⁴¹

- (1. 长沙理工大学 建筑学院, 湖南 长沙 410076;
2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
3. 湖南省自然资源厅, 湖南 长沙 410004;
4. 湖南第一师范学院商学院, 湖南 长沙 410048)

【摘要】基于“系统演进特征分析-动态耦合规律验证-协调状态诊断及预警”框架,对湖南省2001年以来的城市化系统与生态系统交互耦合时空特征进行实证分析。研究发现:(1)湖南省城市化进程加速推进,综合发展指数由2001年的0.537逐年提升至2015年的0.785,达到中高水平,市州发展悬殊仅长沙市达到高水平。(2)生态系统健康指数呈U型走势,2015年达到0.764,处亚健康状态,系统压力较大是关键性限制因素。(3)城市化系统与生态系统耦合协调度先降后升,2015年提高到0.622,处基本协调的较低水平,各市州大多处于轻度失调-基本协调临界水平,分属生态建设滞后型、城市化滞后型和结构性污染型等3种类型。(4)从系统演进看,城市化系统与生态系统由轻度失调-逆向演替逐步转为轻度失调-正向演替、进一步转为基本协调-正向演替,预计2020年耦合协调度将提高到0.633,未来较长时期仍将处绿灯区,应采取适当的区域发展政策,推动城市化系统与生态系统内部要素调整磨合,向良性发展。

【关键词】城市化 生态系统健康 耦合协调度 时空特征

【中图分类号】:F291.1;X826 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2019)07-1590-12

人地协调共生是人类社会发展始终探求的核心目标^[1~3],城市化系统与生态系统是人地巨系统中的两个高度关联的子系统,一方面城市化通过人口集聚、经济发展、空间扩张、污染排放对生态系统产生胁迫作用,改变生态系统的结构和功能;另一方面

¹**作者简介:**李静芝(1984-),女,博士,讲师,研究方向为城市与区域规划. E-mail:lijingzhi2210862@163.com。

基金项目:国家社会科学基金项目(15BJY051);国家自然科学基金项目(51609023);湖南省自然科学基金项目(2018JJ3526);湖南省教育厅科学研究项目(17C0037)。

生态环境又通过资源枯竭、环境恶化对城市发展产生约束作用,制约城市化发展的速度和规模^[4]。我国改革开放以来伴随工业化进程加速,城市化快速发展,但却根植于城市空间无序开发、资源能源过度消耗和侵占,背负着生态环境破坏、服务功能受损的沉重代价。把握城市化系统与生态系统交互作用规律、协调二者之间的发展对加快我国经济转型和深入推进新型城镇化至关重要。

国内外学者基于地理学、生态学、环境经济学、空间经济学等不同的学科视角对城市化与生态环境交互作用开展相关研究,空间尺度涵盖全球、国家、区域、省域、城市及城市群,尤以城市为研究重点^[5~8]。内容涉及两者互动互馈机制^[9~11]、交互耦合基本定律^[4,12,13]、耦合关系验证及协调度测度^[14~17],取得了丰富的理论与实践成果。总体而言,目前针对城市化与生态环境交互作用关系的研究逐步由胁迫约束机制定性分析转化为交互耦合过程定量评价,研究思路大多是在构建评价指标体系求取城市化与生态环境综合评价指数基础上,借助数学计量模型测度耦合协调度、判别协调发展类型,但对城市化和生态环境两个子系统的演变特征缺乏系统分析,且鲜有对耦合协调演变趋势进行预测预警研究。本研究以湖南省为实证研究对象,首先构建模糊综合评价模型,从时空两个维度对区域城市化系统与生态系统的演变特征进行分析,然后运用耦合协调理论和BP神经网络对城市化系统与生态系统协调度进行测算和预测,在上述研究结论基础上建立城市化系统与生态系统协调发展预警系统,以实现对其协调发展的动态监测,从而为制定下一步发展战略提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况及数据来源

湖南省位于我国东南腹地、长江中游南部,下辖 13 个地级市、1 个自治州,行政区域面积为 21.18 万 km²,是我国内陆开发开放的重要支点。2017 年末全省常住人口 6860.2 万人,城镇化率 54.62%,地区生产总值 34590.6 亿元,经济总量处于全国上游,伴随社会经济的快速发展,省域资源环境问题也日益突出。随着“一带一路”、“长江经济带”等国家发展战略的深入,湖南省将进一步发挥“一带一部”的区位优势,具备较大发展潜力。在快速推进的城市化和工业化进程中,如何实现生态环境的协调发展是当前湖南省可持续发展研究中亟待解决的关键性问题。因此,以湖南省为例开展本研究具有典型的代表性和现实意义。本文所涉数据均源自或基于历年《中国统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《湖南统计年鉴》、《湖南省水资源公报》、《湖南省环境质量状况公报》、及各市州的统计年鉴和水资源公报、环境质量状况公报计算获得。

1.2 研究方法

1.2.1 基于模糊数学的城市化发展水平与生态系统健康评价

(1) 构建评价指标体系

构建城市化系统与生态系统评价指标体系是建立两个系统之间交互耦合模型的基础。通过对以往相关研究成果的比较和借鉴^[17],按照科学性原则、系统整体性原则、层次性原则及数据的可获取、可比、可量化原则,基于湖南省发展实际,综合有关专家建议,并借助 SPSS 统计分析软件、运用相关系数法和因子分析法对初选指标进行筛选,将相关系数较大的指标合并或删除(结合定性分析,保留部分相关系数较大但对评价目标同样重要的指标),最终形成城市化水平综合测度指标体系(表 1)和生态系统健康状态综合评价指标体系(表 2)。分区研究中,14 个市州的评价指标体系与省域的评价指标体系基本相同,仅“燃气普及率”指标因数据可获取性受限,用“人均汽车拥有量”指标代替。指标权重的确定采用主观赋权和客观赋权相结合的方法,首先用层次分析法求得指标权重初始值,然后再用熵值法确定的权重予以修正,以实现主观判断与待评对象的固有信息有机结合,修正后的指标权重信息量增大,可信度提高^[17],处理结果见表 1、表 2。

表 1 城市化水平评价指标体系及权重

评价目标	评价要素(熵化权重)	具体指标(单位)	层次分析法 确权	熵值法 确权	熵化 权重	指标 属性
A ₁ 城市化水平 综合指数	B ₁ 人口指标 (0.2129)	C ₁ 城镇人口占总人口的比重 (%)	0.130	0.042	0.101	正
		C ₂ 第三产业从业人员比重 (%)	0.070	0.028	0.036	正
		C ₃ 城镇人口密度 (10 ⁴ 人/km ²)	0.070	0.028	0.036	正
		C ₄ 人口总量 (10 ⁴ 人)	0.037	0.058	0.040	正
	B ₂ 空间指标 (0.2368)	C ₅ 工业用地面积 (km ²)	0.030	0.057	0.032	正
		C ₆ 交通路网密度 (km/km ²)	0.080	0.064	0.095	正
		C ₇ 每万人拥有建成区面积 (km ²)	0.089	0.046	0.076	正
		C ₈ 人均居住面积 (m ²)	0.048	0.039	0.035	正
	B ₃ 经济指标 (0.2472)	C ₉ 人均 GDP (元)	0.073	0.076	0.103	正
		C ₁₀ 二、三产业占 GDP 的比重 (%)	0.041	0.058	0.044	正
		C ₁₁ 高新技术产业增加值 占 GDP 的比重 (%)	0.022	0.058	0.023	正
		C ₁₂ 科研经费 R&D 占 固定投资比例 (%)	0.022	0.035	0.014	正
		C ₁₃ 出口总额 (10 ⁸ 美元)	0.041	0.083	0.063	正
	B ₄ 社会指标 (0.3031)	C ₁₄ 每万人在校大学生人数 (人)	0.039	0.039	0.028	正
		C ₁₅ 燃气普及率 (%)	0.025	0.051	0.024	正
		C ₁₆ 每万人拥有卫生机构床位数 (张)	0.034	0.102	0.064	正
		C ₁₇ 城镇居民人均可支配收入 (元)	0.074	0.075	0.103	正
		C ₁₈ 恩格尔系数 (%)	0.074	0.061	0.084	负

表 2 生态系统健康评价指标体系及权重

评价目标	评价要素(熵化权重)	具体指标(单位)	层次分析法 确权	熵值法 确权	熵化 权重	指标 属性
A ₂ 生态系统健康 状态综合指数	B ₁ 生态环境压力 (0.3204)	C ₁ 废污水排放量 (10 ⁸ m ³)	0.030	0.175	0.094	负
		C ₂ 工业二氧化硫排放量 (10 ⁴ t)	0.057	0.048	0.049	负

B ₂ 生态环境状态 (0.3599)	C ₃ 用电总量 (10 ⁸ kW·h)	0.044	0.073	0.057	负
	C ₄ 总用水量 (10 ⁸ m ³)	0.054	0.070	0.067	负
	C ₅ 化肥施用强度 (kg/hm ²)	0.035	0.085	0.053	负
	C ₆ 人均水资源量 (m ³ /人)	0.105	0.030	0.056	正
	C ₇ 人均耕地面积 (亩)	0.065	0.034	0.040	正
	C ₈ 酸雨频率 (%)	0.120	0.053	0.113	负
	C ₉ 三类及三类以上水质河长占比 (%)	0.121	0.049	0.106	正
	C ₁₀ 森林覆盖率 (%)	0.054	0.047	0.046	正
B ₃ 生态环境响应 (0.3197)	C ₁₁ 工业固体废弃物综合利用率 (%)	0.069	0.040	0.049	正
	C ₁₂ 生活垃圾无害化处理率 (%)	0.042	0.066	0.050	正
	C ₁₃ 环保等投资与GDP的比例 (%)	0.047	0.082	0.069	正
	C ₁₄ 人均公共绿地面积 (m ²)	0.033	0.049	0.029	正
	C ₁₅ 自然保护区面积占辖区面积比重 (%)	0.044	0.030	0.024	正
	C ₁₆ 单位GDP能耗 (吨标准煤/10 ⁴ 元)	0.080	0.070	0.099	负

(2) 制定评价指标分级标准

城市化发展水平及生态系统健康均是相对概念^[18, 19], 本文针对两套指标体系中共 34 个指标制定对应的评价标准, 将城市化发展水平划分为低水平、中低水平、中等水平、中高水平和高水平 5 级; 将生态系统健康状况划分为病态、亚病态、一般健康、亚健康、健康 5 级。标准值的确定参考联合国公认标准、国家权威标准及相关行业标准、国家及地方发展规划目标值、国内城市建设最佳值或较好值作为“高水平”和“健康”的标准值, 以国际警戒值、全国最低值为“低水平”和“病态”的限定值, 在前者基础上上浮 20%作为“中高水平”和“中等水平”、“亚健康”和“一般健康”的标准值, 在后者基础上上浮 20%作为“中低水平”和“中等水平”、“亚病态”和“一般健康”的标准值, 前后两次确定的“中等水平”和“一般健康”标准值相互调整得到最终值(表 3, 鉴于文章篇幅城市化综合发展评价指标分级标准略)。

(3) 模糊评价及计算综合指数值

根据不同指标自身性质, 本文针对正程和逆程两种指标分别建立升半梯形和降半梯形隶属函数, 设第 i 项指标的样本值为 x_i, 通过上述隶属函数求得的结果就构成了 i 个评价指标相对于各评价级别隶属度的模糊关系判断矩阵^[20]。由于指标体系为多层次,

从指标层开始,采用 $M(\cdot, +)$ 算法模型逐级向上进行各层权重与隶属矩阵的复合计算,最终得到评价对象的模糊综合评判隶属向量。由于评价等级的模糊属性,即处于同一等级的样本间难以判别其优劣,因此还需要计算综合指数进行比较。根据指标层和要素层的隶属情况,对不同的评价等级赋予一定的分值,计算评价对象各要素层指数及综合评价指数,并基于此划定最终评价等级(表 4),力求与上述以隶属指数为依据划定的初步评价等级相吻合。经过多次测算,确定城市化水平综合评价指标体系的 5 个发展等级的赋分分别为:低水平 0.3、中低水平 0.5、中等水平 0.7、中高水平 0.8、高水平 0.9;生态系统健康综合评价指标体系的 5 个健康等级的赋分分别为:病态 0.2、亚病态 0.5、一般健康 0.75、亚健康 0.85、健康 0.9。

1.2.2 耦合协调性测度及预警系统建立

(1) 构建城市化系统与生态系统动态耦合模型

借鉴容量耦合系数模型,进一步构建城市化系统与生态系统动态耦合模型^[21],来判别两系统的耦合协调程度,即:

表 3 生态系统健康评价指标评判标准

指标	等级					依据
	病态	亚病态	一般健康	亚健康	健康	
C ₁ 废污水排放量	>43	38~43	33~38	27.5~27.5	<27.5	⑦
C ₂ 工业二氧化硫排放量	>70	65~70	45~65	40~45	<40	⑤
C ₃ 总用电量	>1600	1050~1600	600~1050	400~600	<400	⑦
C ₄ 总用水量	>450	340~450	250~340	100~250	<100	②
C ₅ 化肥施用强度	>100	80~100	64~80	50~64	<50	③
C ₆ 人均水资源量	<500	500~1000	1000~2300	2300~3100	>3100	①
C ₇ 人均耕地面积	<0.15	0.15~0.72	0.72~1.2	1.2~2.5	>2.5	①
C ₈ 酸雨频率	>70	67~70	30~67	10~30	<10	④
C ₉ 三类及以上水质河长占比	<55	55~65	65~80	80~95.2	>95.2	⑤
C ₁₀ 森林覆盖率	<30	30~38	38~55	55~65	>65	③
C ₁₁ 工业固体废弃物综合利用率	<50	50~60	60~80	80~100	100	⑥
C ₁₂ 生活垃圾无害化处理率	<50	50~80	80~100	100~100	100	③
C ₁₃ 环保等投资与 GDP 的比例	<3	3~8	8~12	12~15	>15	③
C ₁₄ 人均公共绿地面积	<3	3~5	5~8	8~10	>10	⑥
C ₁₅ 自然保护区面积占辖区面积比重	<5	5~8	8~15	15~20	>20	⑥
C ₁₆ 单位 GDP 能耗	>1.2	0.75~1.2	0.65~0.75	0.65~0.75	>0.75	③

表 4 城市化发展等级和生态系统健康状态及其值域

城市化发展水平	低水平	中低水平	中等水平	中高水平	高水平
值域	(0, 0.4)	(0.4, 0.65)	(0.65, 0.75)	(0.75, 0.85)	(0.85, 1.0)
生态系统健康状态	病态	亚病态	一般健康	亚健康	健康
值域	(0, 0.45)	(0.45, 0.6)	(0.6, 0.75)	(0.75, 0.9)	(0.9, 1.0)

$$C = \{ [M(U) \times M(E)] / [M(U) + M(E)]^2 \}^{\frac{1}{2}}; \quad (1)$$

$$T = \alpha M(U) + \beta M(E); \quad D = \sqrt{C \times T}$$

式中: $M(U)$ 和 $M(E)$ 分别是城市化—生态环境复合系统中的城市化和生态环境两个子系统。 C 代表两者的耦合度, T 代表调和指数, α 与 β 为待定系数, 分别代表城市化系统与生态系统调和指数中所占比重, 本文取 $\alpha = \beta = 0.5$ 。 D 即城市化系统与生态系统的耦合协调度, 根据其大小划分耦合协调等级(表 5)。

(2) 运用 BP 神经网络法预测评价指数值及耦合协调度

BP 神经网络(Back-Propagation Network)的基本原理是运用 BP 算法通过样本数据的训练, 不断修正网络权值和阈值使误差函数沿负梯度方向下降, 逼近期望输出, 多用于函数逼近、模型识别分类、数据压缩和时间序列预测等^[22]。基于模糊评价模型得到的 2001~2015 年城市化系统要素层的人口、空间、经济和社会 4 项指数及生态系统要素层的生态环境压力、状况和响应 3 项指数的指数值, 采用 BP 神经网络对 2016~2020 年的指数值进行预测, 具体操作过程如下: ① 样本分类。将 2001~2012 年 12 年的数据作为样本进行网络训练, 2013~2015 年 3 年的数据作为检验样本, 比较预测值与真实值以检验网络性能。② 网络结构设计。输入层神经元个数设定为 3, 输出层神经元个数为 1, 隐含层神经元个数为 6。设定网络隐含层和输出层激励函数分别为“tansig”和“logsig”函数, 使用 Levenberg Marquardt 方向传播算法“trainlm”函数训练网络, 网络性能函数为 mse, 网络迭代次数 epochs 为 1000 次, 学习速率 lr 为 0.1, 期望误差 goal 为 1e-07。③ 模型的实现。预测模型基于 MATLAB. R2014b 中的神经网络工具箱进行实现。以人口指数为例, 将训练样本数据输入模型, 该网络经过 13 次迭代训练, 达到预先设置的精度完成学习。将 2001~2012 年的人口指数值预测结果对比实际评价值, 相对误差均小于 5%, 符合要求, 说明网络性能很好, 预测结果具有较高的可信度。按照上述操作步骤, 依次对两个子系统涉及的其他 6 项评价要素的指数值进行预测及检验, 求取预测值, 然后结合评价模型中各评价要素的熵化权重, 分别计算 2016~2020 年城市化综合发展指数及生态系统健康指数的预测值。

表 5 城市化系统与生态系统耦合协调度及等级划分

类型 等级	非协调性耦合			协调性耦合		
	严重失调	重度失调	轻度失调	基本协调	良好协调	优质协调
耦合协调度	$0 < D \leq 0.3$	$0.3 < D \leq 0.5$	$0.5 < D \leq 0.6$	$0.6 < D \leq 0.7$	$0.7 < D \leq 0.8$	$0.8 < D \leq 1.0$

(3) 测度城市化系统与生态系统两子系统演化状态

把城市化与生态环境及其关系作为一个系统来考虑,假定这个系统只有 $M(U)$ 与 $M(E)$ 两个元素,按照贝塔兰菲的一般系统理论^[23],若 $M(U)$ 与 $M(E)$ 为整个系统的主导部分,则系统演化方程的形式为:

$$\begin{cases} U = \frac{dM(U)}{dt} = \alpha_1 M(U) + \alpha_2 M(E) \\ E = \frac{dM(E)}{dt} = \beta_1 M(U) + \beta_2 M(E) \end{cases} \quad (2)$$

U 、 E 为受内在与外来影响下城市化—生态环境复合系统两子系统的演化状态。 U 与 E 相互影响,任何一子系统的变化都会导致整个系统的变化,两子系统演化速度为:

$$V_U = \frac{dU}{dt}, \quad V_E = \frac{dE}{dt} \quad (3)$$

应用 MATLAB. R2014b 对区域城市化系统与生态系统两个子系统的评价值进行非线性拟合,分别得到其各自的拟合曲线方程 U 、 E ,采用公式(3)对曲线方程进一步处理求得 V_U 、 V_E ,据此研究城市化系统与生态系统两个子系统的演化趋势。

(4) 建立协调发展预警系统

城市化系统与生态系统协调发展预警系统是能够指示城市化与生态环境协调发展动向,当区域城市化发展进程与生态系统健康状况不相协调到来时,预测并发出警示信号,为国家或地方政府的宏观调控提供依据而建立的警示器。本研究选择耦合协调度 D 、城市化子系统和生态环境子系统的系统变化速率 V_U 、 V_E 作为反映城市化系统与生态系统协调发展状况的敏感性指标,诊断区域城市化与生态环境的警情,预判未来城市化系统与生态系统协调发展的趋势。警情及诊断标准的设计参考前人研究成果,结合敏感性指标值,考察城市化与生态环境两个子系统的协调状态、演替方向,将城市化系统与生态系统协调发展预警警报程度分为无警、轻警、中警、重警、危重警等 5 个等级。

表 6 城市化系统与生态系统协调发展警情及诊断标准

系统状态预警		演替方向预警		警情	
耦合协调度	耦合协调状况	系统变化速率	系统演替方向	警度	警灯
0. 8 < $D \leq 1. 0$	优质协调	$V_U > 0$ 且 $VE > 0$	正向演替	无警	蓝灯
		$VU < 0$ 或 $VE < 0$	逆向演替	轻警	绿灯
0. 7 < $D \leq 0. 8$	良好协调	$VU > 0$ 且 $VE > 0$	正向演替	无警	蓝灯
		$VU < 0$ 或 $VE < 0$	逆向演替	轻警	绿灯
0. 6 < $D \leq 0. 7$	基本协调	$VU > 0$ 且 $VE > 0$	正向演替	轻警	绿灯
		$VU < 0$ 或 $VE < 0$	逆向演替	中警	黄灯
0. 5 < $D \leq 0. 6$	轻度失调	$VU > 0$ 且 $VE > 0$	正向演替	中警	黄灯
		$VU < 0$ 或 $VE < 0$	逆向演替	重警	红灯
0. 3 < $D \leq 0. 5$	重度失调	$VU > 0$ 且 $VE > 0$	正向演替	重警	红灯
		$VU < 0$ 或 $VE < 0$	逆向演替	危重警	双红灯
0 < $D \leq 0. 3$	严重失调	$VU > 0$ 且 $VE > 0$	正向演替	危重警	双红灯
		$VU < 0$ 或 $VE < 0$	逆向演替		

2 结果与分析

2.1 湖南省城市化发展态势

(1) 城市化发展水平稳步提升, 由粗放扩张转向内涵提升

模糊评价的结果显示, 湖南省城市化综合发展指数由 2001 年的 0.537 稳步提升至 2015 年的 0.785, 城市化进程快速推进。从隶属度来看(图 1), 2001~2005 年隶属于中低水平, 2006~2011 年隶属于中等水平, 2012 年迈进中高水平。到 2015 年, 湖南省城市化综合发展水平为中高水平, 4 项评价要素中, 空间指数尚处于中等水平, 社会指数、经济指数和人口指数均达到中高水平。考察四项评价要素发展态势(图 2), 发现评价期内各要素发展水平平均逐年上升, 但表现出不同特征: 人口城市化和空间城市化进程在 2006 年之前发展较快, 之后增速趋缓; 社会城市化和经济城市化进程则保持高速增长态势, 先后于 2008 和 2011 年超越空间城市化水平, 社会城市化水平于 2014 年再超人口城市化水平。因此, 可将湖南省近 15 年的城市化发展进程划分为 3 个阶段: 2004 年之前是城市化粗放扩张阶段, 2005~2013 年为优化调整阶段, 2014 年之后步入内涵提升阶段, 城市化发展质量显著提高。

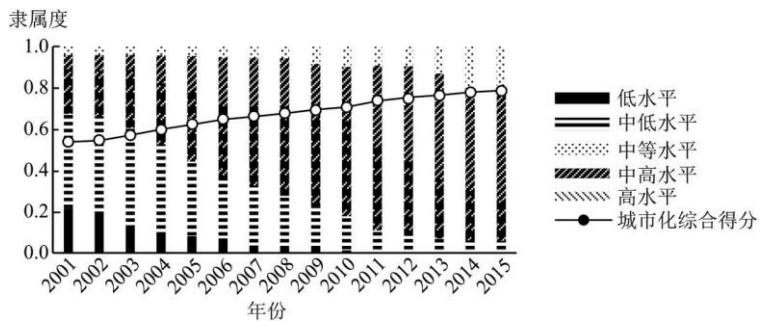


图 1 2001~2015 年湖南省城市化综合水平发展趋势

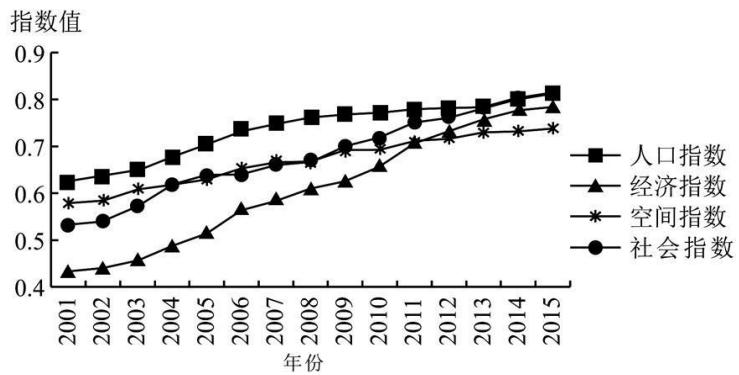


图 2 湖南省城市化各要素发展水平变化趋势

(2) 各市州城市化发展水平存在较大差距, 表现出不同特征

2015 年湖南省 14 个市州中, 仅长沙市城市化综合发展水平刚达到高水平, 指数值为 0.855; 湘西自治州城市化综合发展指数值最低, 为 0.625, 尚处于中低水平; 其他市州普遍处于中等水平—中高水平(图 3)。考察四项评价要素, 结合各市州发展实际将其

划分为 3 种类型:①长沙、株洲、湘潭三市城镇人口占比在 60%以上,城市化综合发展水平及四项评价要素均达到较高水平,且四项要素中经济指数、社会指数高于人口指数和空间指数,城市化发展注重内涵提升;②岳阳、衡阳、常德、郴州四个地级市城镇人口占比在 50%左右,城市化综合发展水平处于中高水平,四项评价要素发展相对均衡,其中人口指数较高、空间指数较低,表现出城市化进程推进一定程度上受到空间的限制;③娄底、益阳、永州、怀化、张家界、邵阳、湘西自治州等七个地级市城镇人口占比在 40%~45%之间,城市化综合发展水平较低,四项评价要素差距悬殊,普遍存在人口指数较高、经济指数较低,表现出经济发展相对滞后。

2.2 湖南省生态系统健康状况

(1) 生态系统健康水平呈 U 型走势,生态环境压力是关键性制约因素

2001~2015 年湖南省生态系统健康指数值先降后升,生态系统经历一般健康—亚病态—一般健康—亚健康演变过程(图 4)。2001~2006 年湖南省生态系统健康指数由 0.676 波动下降至 0.571,健康状态在一般健康和亚病态间徘徊;2007 年开始健康指数稳步提升,至 2015 年达到 0.764,步入亚健康状态。总体来看,2015 年湖南省生态系统尚处在亚健康状态的较低水平,生态系统负荷较重,环境状况有待改善,污染防治、生态建设、资源能源集约利用等响应能力亦有待提高。进一步考察各评价要素的发展态势(图 5),发现生态环境压力指数值持续走低,由 2001 年的 0.807 下降到 2015 年的 0.707,反映湖南省生态环境面临的压力日益增大。结合表征生态环境压力的具体指标分析发现,除工业 SO_2

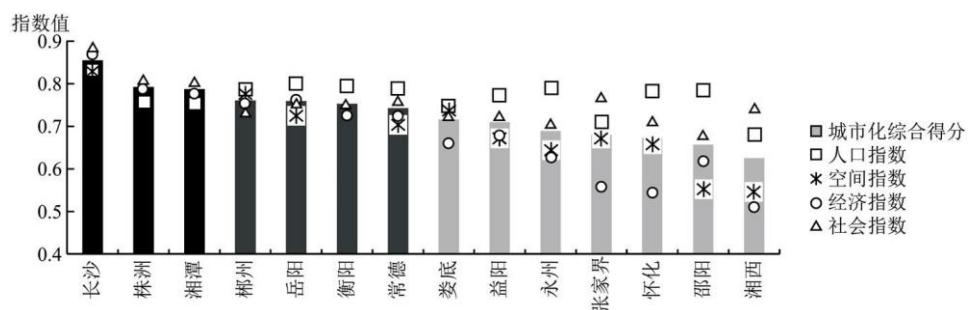


图 3 2015 年湖南省各市州城市化发展水平

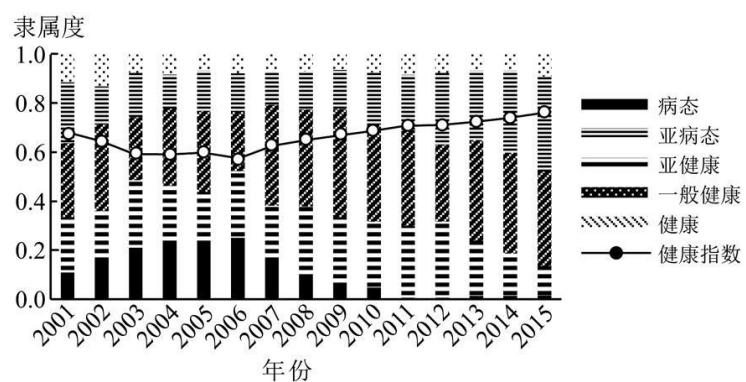


图 4 2001~2015 年湖南省生态系统健康变化趋势

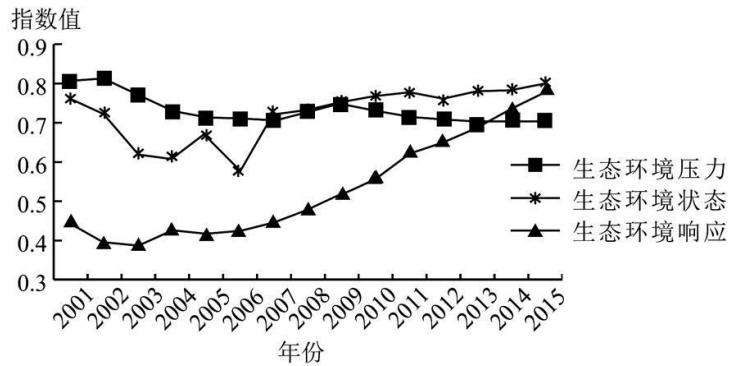


图 5 湖南省生态系统各要素健康水平发展趋势

排放量小幅削减以外,其余污染排放指标和资源能源消耗指标均呈增加态势。15 年间,湖南省农用化肥施用量每公顷增加了 5.9kg, 废污水排放量增加了 50%, 全社会用电量增加了 2 倍多。因此,社会经济发展给生态系统带来的沉重压力,将成为制约生态系统健康发展的关键性因素。

(2) 各市州生态系统健康状况差异显著,且与经济社会发展水平负向关联

2015 年湖南省 14 个市州中,生态系统健康状况最佳的是张家界市,健康指数为 0.795,隶属于亚健康状态;最差的是湘潭市,健康指数为 0.598,隶属于亚病态—一般健康临界水平;省会长沙生态系统健康状况不容乐观,健康指数为 0.630,省内排名倒数第二,隶属一般健康状态;其余市州均处于一般健康—亚健康状态(图 6)。结合各市州发展实际,发现生态系统健康状况与经济社会发展负相关特征显著,即经济欠发达地区生态系统健康状态较好,而经济社会发展水平较高的地区生态系统健康状态较差。根据评价要素得分情况,将 14 个市州区分为 4 种情况:①张家界、湘西、郴州 3 地生态系统健康指数高于 0.75,状态指数 > 压力指数 > 响应指数,且状态指数高于 0.8,表现出这些地区生态环境受经济社会发展影响较小,生态环境质量较好;②永州、怀化、邵阳、娄底 4 市生态系统健康指数在 0.65~0.75 之间,压力指数 > 状态指数 > 响应指数,这些地区由于社会经济发展相对滞后,尚未对生态环境施加较大压力,生态环境质量尚可,但存在环保设施缺乏、投入不足、生态意识薄弱等问题;③常德、岳阳、衡阳 3 市生态系统健康指数在 0.7 左右,状态指数 > 压力指数,且压力指数低于 0.65,显示这些地区经济社会发展中资源消耗和污染排放水平较高,环境负荷较大,同时亦重视污染防治和生态建设,因此生态环境质量尚可;④长沙、株洲、湘潭、益阳 4 市生态系统健康指数均低于 0.7,响应指数 > 压力指数 > 状态指数,且基本上响应指数隶属于亚健康、状态指数隶属于亚病态,表现出这些地区虽环境意识较强、环保投入较大、污染防治能力较强,但社会经济发展对生态环境造成的影响较大,生态环境质量较差。

2.3 城市化与生态系统耦合协调特征

根据模糊评价获得的城市化系统与生态系统两个子系统的综合得分,运用动态耦合模型,测算耦合协调度,结果显示:

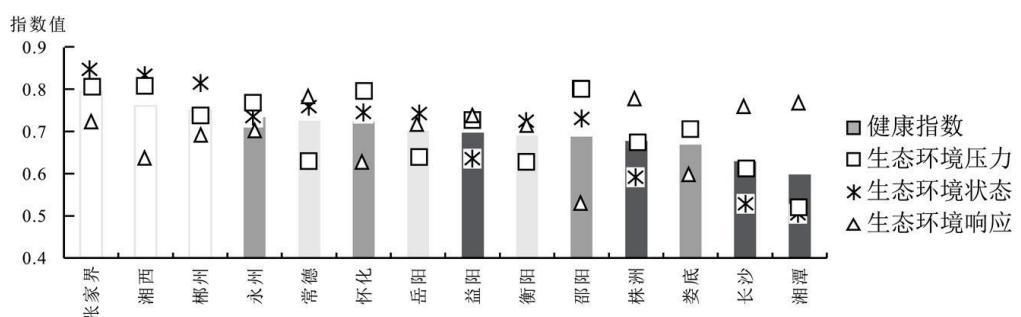


图 6 2015 年湖南省各市州生态系统健康状况

(1) 从时序上看, 评价期内湖南省城市化系统与生态系统耦合协调度呈 U 型曲线(图 7a), 其演化过程可以分为两个阶段: ①2001~2006 年湖南省城市化综合发展水平稳步提升, 而生态系统健康指数持续下降, 城市化系统与生态系统耦合协调度在 0.55 以下波动。结合湖南省城市化发展的阶段性特征, 分析表明本世纪初期, 湖南省城市用地规模迅速扩张、城市经济发展迅速、城市人口逐渐增加, 但发展方式粗放, 给生态环境带来严重影响, 使得生态系统健康状况不断恶化, 两子系统处轻度失调状态。②2007~2015 年湖南省生态系统健康指数与城市化综合发展水平同步提升, 城市化系统与生态系统耦合协调度迅速提高, 于 2011 年首次超过 0.6, 步入基本协调耦合状态, 到 2015 年耦合协调度达到 0.622。这一变化与湖南省发展政策调整密切相关, “十一五”以来湖南省坚持以主要污染物总量减排为主线, 加大重点流域区域和重污染行业的环境综合整治力度, 加快环保基础设施建设步伐, 严格建设项目环境准入, 积极促进环保产业发展。2007 年长株潭城市群获批全国资源节约型和环境友好型社会建设综合配套改革试验区, 引领全省绿色转型。因此, 从 2007 年开始湖南省环境质量得到显著改善, 城市化系统与生态系统逐步由非协调性耦合的轻度失调状态向基本协调耦合状态演变。

(2) 从空间上看, 14 个市州城市化系统与生态系统耦合协调度在 0.58~0.62 之间, 整体上处于轻度失调—基本协调临界水平(图 7b), 但影响其协调性的限制因素存在显著差异, 具体划分 3 种类型: I 生态建设滞后型, 处于基本协调耦合状态的 7 个市州中, 除了张家界以外, 长沙、株洲、衡阳、岳阳、常德、郴州等 6 市均是经济社会发展较快的市州, 这些地区城市化综合发展指数高于生态系统健康指数, 城市建设、经济发展过程中资源过度消耗、污染大量排放, 生态环境建设滞后于城市化建设, 导致城市化系统与生态系统耦合协调度低; II 城市化滞后型, 张家界是地处武陵山区腹地的旅游城市, 生态本底条件居各市州首位, 湘西、永州、怀化、邵阳、益阳等 5 个处于轻度失调状态的市州与其类似, 较低的耦合协调度源于经济社会发展相对落后、工业经济发育不足、城市化进程明显滞后; III 结构性污染型, 娄底和湘潭均是湖南重要的工业基地, 经济发展长期依赖钢铁、能源、化工、建材等传统产业, 资源利用效率低、三废排放量大、结构性污染问题突出。近年来两市采取强力措施推动产业发展绿色转型、开展环境污染综合治理, 环境质量有所改善, 但由于滞后效应当前耦合协调度仍处于较低水平。

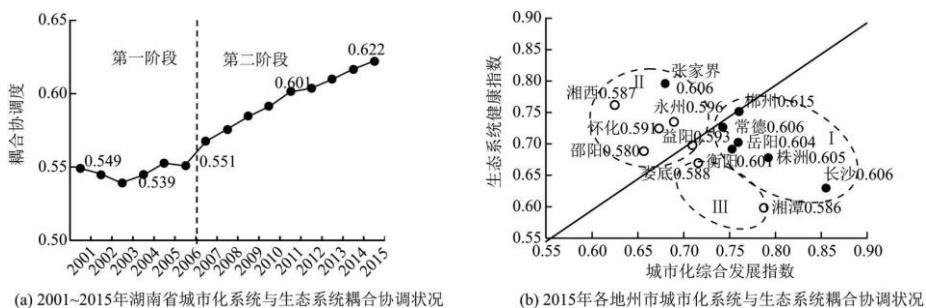


图 7 湖南省城市化系统与生态系统耦合演化态势及空间差异

2.4 城市化系统与生态系统协调发展预警

按照前文所述步骤, 运用 BP 神经网络法分别预测 2016~2020 年湖南省城市化系统、生态系统所涉及的 7 项评价指数值, 计算城市化综合发展指数、生态系统健康指数及耦合协调度。为把握湖南省城市化和生态环境的演化趋势, 应用 MATLAB 软件对其进行综合评价值进行非线性拟合, 分别得到两者的系统演化方程 U、E, 拟合精度较高, $Adj. R^2$ 分别为 0.9977 和 0.9829, 对 U、E 求导, 有:

$$V_U = \frac{dU}{dt} = (-0.002t + 3.744) \times e^{-(0.034t - 68.401)^2} \quad (9)$$

$$V_E = \frac{dE}{dt} = (-0.002t + 4.019) \times e^{-(0.035t - 71.360)^2} + (-0.057t + 114.590) \times e^{-(0.367t - 734.297)^2} \quad (10)$$

这样得到 2016~2020 年的城市化综合发展指数值 $M(U)$, 生态系统健康指数值 $M(E)$, 城市化系统与生态系统耦合协调度 D , 城市化系统与生态系统两个子系统的演化速度 V_U 、 V_E 。将各指标数值与预警系统警情诊断标准进行对比, 发布警情信息(表 7)。

2001~2004 年为红灯区, 警报程度为重警, 这一时期生态系统健康水平基本上高于城市化综合发展水平, 但城市发展、生态环境退化, 城市化系统与生态系统为轻度失调-逆向演替阶段; 2005~2010 年为黄灯区, 警报程度为中警, 这一时期城市化综合发展水平与生态系统健康水平同步提升, 且城市化水平略高, 城市化系统与生态系统为轻度失调-正向演替阶段; 2010~2015 年为绿灯区, 警报程度为轻警, 这一时期城市发展和生态环境改善同步, 且城市化综合发展水平明显高于生态系统健康水平, 城市化系统与生态系统为基本协调-正向演替阶段。

表 7 城市化与生态环境系统演化敏感性指标值及警情

年份/(年)	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
$M(U)$	0.537	0.545	0.569	0.598	0.620	0.645	0.662	0.675	0.693	0.708
$M(E)$	0.676	0.647	0.595	0.590	0.601	0.571	0.629	0.651	0.674	0.689
D	0.549	0.545	0.539	0.545	0.552	0.551	0.568	0.576	0.584	0.591
V_U	0.023	0.023	0.023	0.022	0.022	0.021	0.020	0.019	0.018	0.017
V_E	-0.018	-0.043	-0.032	-0.007	0.011	0.019	0.021	0.021	0.020	0.019
警度	重警	重警	重警	重警	中警	中警	中警	中警	中警	中警
警灯	红灯	红灯	红灯	红灯	黄灯	黄灯	黄灯	黄灯	黄灯	黄灯
年份/(年)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
$M(U)$	0.736	0.749	0.763	0.778	0.785	0.793	0.799	0.802	0.805	0.807
$M(E)$	0.709	0.710	0.725	0.743	0.764	0.777	0.786	0.788	0.792	0.795
D	0.601	0.604	0.610	0.616	0.622	0.626	0.629	0.630	0.632	0.633
V_U	0.016	0.014	0.013	0.011	0.009	0.008	0.006	0.004	0.002	0.001
V_E	0.018	0.016	0.015	0.013	0.012	0.010	0.008	0.006	0.004	0.002
警度	轻警	轻警	轻警	轻警	轻警	轻警	轻警	轻警	轻警	轻警
警灯	绿灯	绿灯	绿灯	绿灯	绿灯	绿灯	绿灯	绿灯	绿灯	绿灯

预测结果显示,2016~2020年依然为绿灯区,警报程度为轻警,城市化综合发展水平与生态系统健康水平将继续同步提升,两者差距逐渐缩小,城市化系统与生态系统为基本协调-正向演替阶段。预测期内,两子系统耦合协调度持续提高趋势明显,但系统变化速率趋缓,进一步发展 V_u 、 V_e 可能出现停滞或负值。因此,预计湖南省未来很长一段时期都将处于绿灯区,随着城市化水平的持续推进,生态系统将承受更大负荷,同时经济总量的增加将使得污染治理及生态建设能力进一步增强,在一定程度上缓解生态压力,城市化系统与生态系统内部要素将不断优化调整,两者关系不断磨合,经历良好协调-逆向演替阶段后再进一步提升至良好协调-正向演替阶段可能性较大。

3 结论与讨论

综上所述,实证研究结果显示2001~2015年间,湖南省城市化发展水平稳步提升,生态系统健康状态先退化后改善,城市化系统与生态系统耦合协调度先降后升提高到2015年的0.622,但仍处较低水平;系统演进过程由轻度失调-逆向演替逐步转为轻度失调-正向演替、进一步转为基本协调正向演替。总体而言,湖南省城市化的快速发展在一定程度上以环境污染和生态破坏为代价,城市化系统与生态系统尚未形成良性互动,14个市州大多处于轻度失调-基本协调临界水平,究其原因有生态建设滞后、城市化滞后和结构性污染等3种情形。预计湖南省2020年城市化系统与生态系统耦合协调度将提高到0.633,未来很长一段时期协调发展预警信号都将处于绿灯区。

本文基于“系统演进特征分析—动态耦合规律验证—协调状态诊断及预警”框架,在对城市化综合发展水平和生态系统健康状态进行模糊综合评价的基础上构建区域城市化系统与生态系统动态耦合模型及协调发展预警系统,分析过程中强调城市化系统与生态系统演进时空特征,实证研究结果能较好的切合湖南省及市州发展实际,研究结论能为湖南省及各市州区域发展政策的制定提供依据,该研究框架还可以为其他区域相关研究提供新的方法思路。需要指出的是由于评价指标体系覆盖广、涉及指标较多,因此对研究区域的资料积累提出了较高要求,由于缺乏各市州较长时期全面系统的城市化与生态环境相关数据,未能对14个市州进行耦合协调性时序变化研究及协调发展预测预警。今后除了从方法上对模型、指标体系进行完善,还应进一步开展更深入的空间分异研究,通过对不同类型的市州开展研究,以求更准确、深刻、全面地揭示城市化系统与生态系统之间的关系。

参考文献:

- [1] 方创琳. 中国人地关系研究的新进展与展望[J]. 地理学报, 2004, 61 (S1) : 21~32.
- [2] HENDERSON V. The urbanization process and economic growth: the so-what question[J]. Eco- nomic Growth, 2003, 8 (1) : 47~71.
- [3] GUNDERSON L H, HOLLING C S. Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems [M]. Washington DC: Island Press, 2002.
- [4] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. 地理研究, 2003, 22 (2) : 211~220.
- [5] 赵安周, 李英俊, 卫海燕, 等. 西安市城市化与城市生态环境耦合协调发展研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19 (6) : 152~156.
- [6] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度[J]. 生态学报, 2015, 35 (7) : 1~14.
- [7] WANG Y X. Empirical study of the coupling coordination relationship of urbanization and ecological environment in Nanchang and Jiujiang urban belts[J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2014, 17 (5/6) : 511~526.

-
- [8] CHEN M X, HUANG Y B, TANG Z P. The provincial pattern of the relationship between urbanization and economic development in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(1):33–45.
- [9] 陈晓红, 万鲁河. 城市化与生态环境耦合的脆弱性与协调性作用机制研究[J]. *地理科学*, 2013, 33(12):1450–1457.
- [10] KIM D S, MIZUNO K, KOBAYASHI S. Analysis of urbanization characteristics causing farmland loss in a rapid growth area using GIS and RS [J]. *Paddy Water Environment*, 2003(1):189–199.
- [11] SULTAN M, FISKE M, STEIN T, et al. Monitoring the urbanization of the Nile Delta, Egypt[J]. *Ambio*, 1999, 28(7):627–631.
- [12] 方创琳, 杨玉梅. 城市化与生态环境交互耦合系统的基本定律[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(1):1–8.
- [13] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析[J]. *地理学报*, 2005, 60(2):237–247.
- [14] 王长建, 张小雷, 杜宏茹, 等. 城市化与生态环境的动态计量分析——以新疆乌鲁木齐市为例[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(3):609–619.
- [15] 孙平军. 1994~2011 年江苏省城市化与生态环境非协调性耦合关系的判别[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(8):1051–1056.
- [16] 乔标, 方创琳. 城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用[J]. *生态学报*, 2005, 25(11):3003–3009.
- [17] 李静芝, 朱翔, 李景保, 等. 洞庭湖区城镇化进程与水资源利用的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(6):1677–1685.
- [18] 刘众序, 彭建, 汪安, 等. 生态系统健康研究进展[J]. *生态学报*, 2015(18):5920–5930.
- [19] 石惠春, 刘伟, 何剑, 等. 一种城市生态系统现状评价方法及其应用[J]. *生态学报*, 2012, 32(17):5542–5549.
- [20] 秦趣, 代稳, 陈志霞. 我国城市生态系统健康评价综述[J]. *安全与环境工程*, 2014, 21(4):96–100.
- [21] VALERIE I. *The penguin dictionary of physics*[M]. Beijing: Foreign Language Press, 1996.
- [22] 李志强, 詹锋, 周丽琴. 基于 BP 网络算法的区域协调发展预测与预警研究[J]. *统计研究*, 2006(4):24–26.
- [23] BRETZ E A. Clean coal technologies:A status report[J]. *Electrical World*, 1992(2):37–42.