

# 基于PSR模型和投影寻踪法的 荆州市景观生态风险评价

陈晶晶 李天宏<sup>†</sup>

北京大学环境工程系, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; <sup>†</sup> 通信作者, E-mail: lth@pku.edu.cn

**摘要** 在PSR (pressure-state-response)模型的基础上, 结合投影寻踪法, 建立荆州市景观生态风险评价模型, 分析荆州市景观生态风险变化。结果表明: 1995—2013年间研究区景观生态风险等级由1995年的“低”增大至2013年的“较高”; 压力指数随着社会发展有所增加, 状态指数持续减小, 响应指数随着经济和政策的影响逐渐增大。景观生态风险评价结果也表明, 随着社会经济压力不断增大, 景观生态系统质量日益下降, 但生态环境保护措施的加强能够显著缓解风险增大的趋势。

**关键词** 景观生态风险; PSR模型; 投影寻踪

**中图分类号** X826

## Landscape Ecological Risk Analysis for Jingzhou City Based on PSR Model and Projection Pursuit Method

CHEN Jingjing<sup>1</sup>, LI Tianhong<sup>†</sup>

1. Department of Environmental Engineering, Peking University, the Key Laboratory of Water and Sediment Sciences (MOE), Beijing 100871; <sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: lth@pku.edu.cn

**Abstract** Based on pressure-state-response (PSR) model which was used to assess the landscape ecological risk and projection pursuit method, a landscape ecological risk assessment model was established for Jingzhou City, Hubei Province. The results showed that, Jingzhou City suffered increasing risk from 1995 to 2013 with landscape ecological risk index (LERI) from level I to level IV. Pressure index (PI) increased continuously, state index (SI) decreased, while response index (RI) increased gradually with the influence of economy and policy. The assessment results also showed that with the increasing pressure of society, the quality of landscape ecosystem decreased increasingly, but strengthening environmental protection measures could relieve the risk obviously, and made the risk to increase slowly.

**Key words** landscape ecological risk; PSR model; projection pursuit

大部分生态系统直接或间接地受到人类活动带来的压力影响, 这些压力导致诸多的生态风险。科学的管理生态风险是人类与自然和谐发展的重要前提, 对生态风险的客观准确评价是有效管理生态风险的基础<sup>[1]</sup>。生态风险评价是在一定区域内, 对由自然灾害、人类干扰和环境污染破坏对生态系统产生的不利影响的可能性和危害程度进行评估的方法<sup>[2-3]</sup>。生态风险评价是生态建设、环境修复、资源管理等工

作的重要前提, 已成为当前宏观生态管理的重要途径<sup>[4-5]</sup>。

随着生态风险评价尺度从生态系统向区域、景观的扩大, 评价对象从单一生态系统到多种生态系统的空间镶嵌以及景观生态学空间异质性与格局—功能互馈概念在多学科的应用<sup>[6]</sup>, 基于景观生态过程与空间格局的景观生态风险评价应运而生。景观生态风险是人类活动、自然灾害等干扰因素对景观

内各生态系统的结构和功能造成不利影响的综合可能性和危害程度<sup>[7]</sup>。景观生态风险评价将传统的关注种群、群落、生态系统功能的生态学方法与强调区域、全球空间异质性的地理学思维<sup>[8]</sup>结合,致力于实现多风险源的综合表征<sup>[9]</sup>。

自景观生态风险概念提出以来,中国学者高度关注景观生态风险评价理论与方法的探讨,初步形成有一定国际引领意义的景观生态风险评价研究框架<sup>[10-12]</sup>,近年来,不同学者针对不同区域<sup>[13-14]</sup>、不同评价目的<sup>[15-16]</sup>选择相关指标、模型和方法,开展了景观生态风险评价探索。但是,现有的景观生态风险评价大多局限于景观格局指数的计算<sup>[15-17]</sup>,研究方法体系并不完善。

荆州市地处长江中游,荆江自西向东横贯全市。作为长江中游重要的工业基地,其生态环境状况对经济社会发展和长江生态环境质量都有重要的影响。

本文运用 PSR 模型,基于风险源汇识别胁迫因素,将生态系统服务纳入风险定量表征,运用投影寻踪法判定风险阈值,建立 PSR 景观生态风险评价模型,并在荆州市进行案例应用,以揭示荆州市景观生态风险的变化。

## 1 研究区域及数据

### 1.1 区域概况

荆州市地处湖北省中南部,位于江汉平原腹地,东连武汉,西接三峡,南跨长江,北临汉水,处于

全国“四大增长极”十字轴线的交叉区域,是连东西、跨西北的交通要道和物资集散地,是川、湘、鄂经济纽带。荆州市是长江中游的重要港口城市,国家轻纺工业基地、粮棉油生产基地和淡水渔业基地,素有文化之邦、鱼米之乡和旅游胜地的称誉。地理位置为 111°15′—114°05′E, 29°26′—31°37′N。境内东西最大横距约为 274.8 km,南北最大纵距约为 130.2 km。

### 1.2 研究数据

本研究涉及数据源包括土地利用数据和社会经济环境数据。其中,土地利用数据来自 1995, 2000, 2005, 2008, 2010 和 2013 年荆州市 1:25 万土地利用图,数据地图投影为 Albers 正轴等面积双标准纬线圆锥投影;本研究按土地利用六大类分类系统将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿用地和未利用地 6 个大类,并进行水土流失指数、土地利用强度、生态系统服务价值、景观指数的计算;坡度数据从荆州市的数字高程模型(digital elevation model, DEM)栅格数据提取;社会经济数据来源于 1996—2014 年荆州市统计年鉴和 1996—2014 年湖北省统计年鉴;水资源数据来源于 2004—2014 年荆州市环境状况公报。

## 2 PSR 景观生态风险评价模型

本研究运用景观生态学原理,结合投影寻踪法,借鉴美国 EPA 生态风险框架<sup>[18]</sup>,建立 PSR (Pressure-State-Response, 压力-状态-响应)景观生

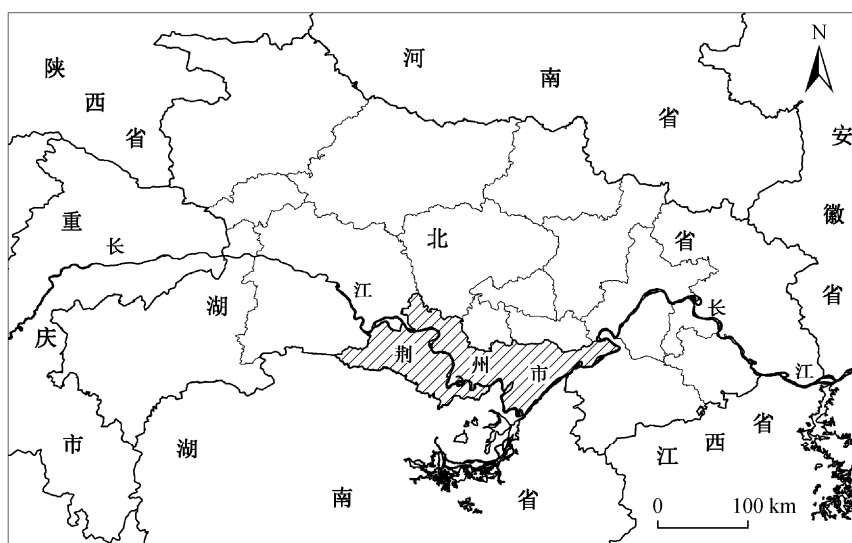


图 1 研究区域位置

Fig. 1 Location of Jingzhou City

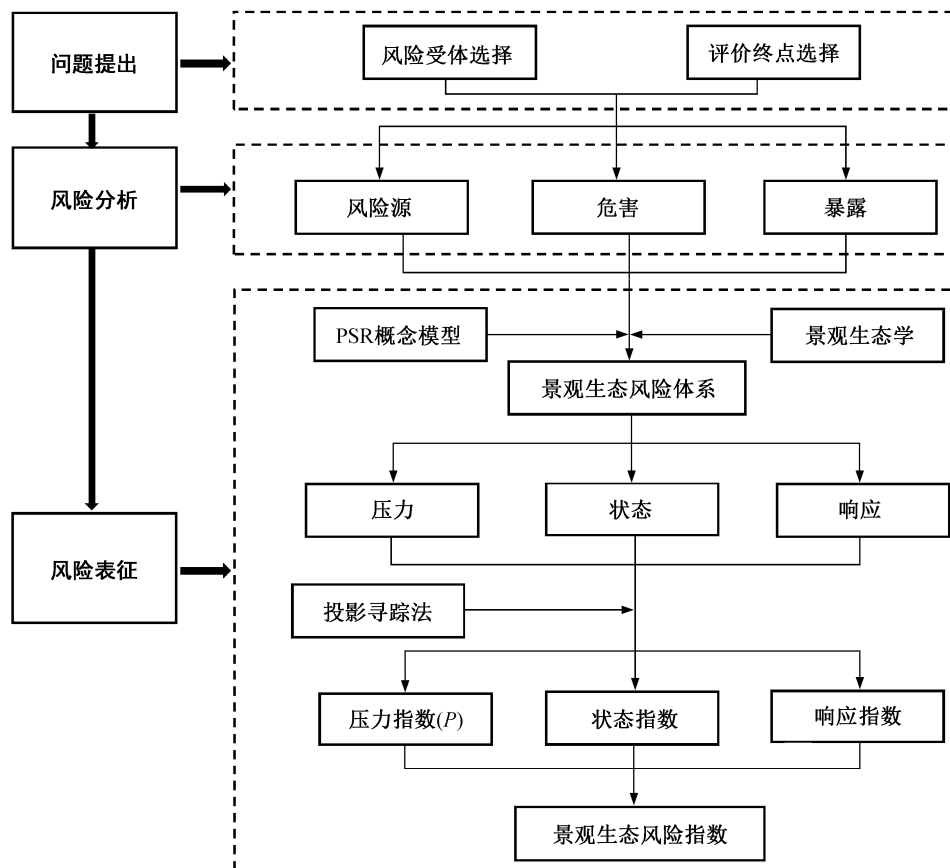


图 2 PSR 景观生态风险评价模型

Fig. 2 PSR Landscape ecological risk assessment model

态风险评价模型(图 2)。选择合适的生态受体是风险评价的关键,本研究选择荆州市城市景观作为评价风险受体。对于荆州市来说,在风险源的影响下,会导致环境质量恶化、生态系统功能损伤、系统结构稳定性下降等不利后果。

景观生态风险源可以是自然压力,也可以是人为压力,主要包括城市发展带来的建设用地扩张占据生态用地、暴雨灾害以及水土流失等。暴露是研究各种风险源与风险受体之间的接触暴露关系,危害是确定风险源对生态系统及其风险受体的损害程度<sup>[19]</sup>。景观在受到压力的影响下,可能会改变其结构和功能。本文通过计算景观生态服务价值及景观格局指数来表示景观在压力作用下的状态。此外,城市在发展的过程中会给生态环境带来双重影响,生态系统本身的自我调节能力以及社会经济系统为缓解压力而提出的一系列响应措施有利于提高生态系统抵抗风险的能力。因此,可以认为风险的大小是压力、状态以及响应共同作用的结果。

## 2.1 PSR 景观生态风险评价指标体系

### 2.1.1 PSR 模型

PSR 模型是国内外生态环境评价较为典型的概念模型<sup>[20-22]</sup>。基于 PSR 模型的理论和逻辑,从景观生态风险的因果关系出发,建立景观生态风险评价 PSR 指标体系。该体系包含生态风险的压力指标、状态指标和响应指标。通过这 3 个指标,并结合投影寻踪法,综合表征荆州市景观生态风险的大小。

指标的选取遵循科学性、可持续性、完备性及可操作性的原则。结合荆州市的具体情况,选取适用于荆州市景观生态风险评价的 29 个指标因子,其中压力指标 8 个,状态指标 14 个,响应指标 7 个。选择相应的表征变量,建立 PSR 景观生态风险评价体系,如表 1 所示。

### 2.1.2 压力指标

压力指标表征风险源,即对生态系统产生危害的风险来源,包括自然灾害风险和人类活动风险。

表 1 指标体系等级划分  
Table 1 Evaluation criterion for each indicator

指标	表征	编码	I	II	III	IV	V	
压力	暴雨灾害	日最大降雨量/mm	U <sub>p1</sub>	10	25	50	100	250
	水土流失	水土流失指数 LSI	U <sub>p2</sub>	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19
	地形	坡度	U <sub>p3</sub>	≤2°	2°~6°	6°~15°	15°~25°	>25°
	土地利用变化	土地利用强度 L	U <sub>p4</sub>	275	276	277	278	279
		人口密度/(人·km <sup>-2</sup> )	U <sub>p5</sub>	300	400	500	600	700
				2000	4000	6000	8000	10000
	社会发展	人均 GDP/(万元·人 <sup>-1</sup> )	U <sub>p6</sub>	20000	18000	16000	14000	12000
		城市化率	U <sub>p7</sub>	35	40	45	50	≥55
		污染负荷	饮用水源地水质达标率	U <sub>p8</sub>	100	95	90	85
状态	生态功能	水源涵养	U <sub>s1</sub>	7	6.5	6.0	5.5	5.0
		土壤形成与保护	U <sub>s2</sub>	2	1.85	1.80	1.75	1.70
		生物多样性保护	U <sub>s3</sub>	1.75	1.70	1.65	1.60	1.55
		废物处理	U <sub>s4</sub>	8.0	7.5	7.0	6.5	6.0
	生产功能	食物生产	U <sub>s5</sub>	1.0	0.95	0.90	0.85	0.80
		原材料	U <sub>s6</sub>	0.35	0.34	0.33	0.32	0.31
	文化功能	娱乐文化	U <sub>s7</sub>	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
	景观破碎度	斑块密度	U <sub>s8</sub>	0.2	0.22	0.24	0.26	0.28
		形状指数	U <sub>s9</sub>	40	38	36	34	32
	景观分离度	分割度指数	U <sub>s10</sub>	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99
		聚集度	U <sub>s11</sub>	100	99	98	97	96
	景观优势度	优势度指数	U <sub>s12</sub>	1	0.95	0.90	0.85	0.80
		Shannon 均匀度指数	U <sub>s13</sub>	0.50	0.52	0.54	0.56	0.58
	景观脆弱度	脆弱度指数	U <sub>s14</sub>	0.180	0.182	0.184	0.186	0.188
响应	生境响应	绿化覆盖率/%	U <sub>R1</sub>	40	35	30	25	20
		湿地退化率/%	U <sub>R2</sub>	0	5	10	15	20
		Shannon 多样性指数	U <sub>R3</sub>	1	0.95	0.90	0.85	0.80
	经济响应	环保投资占 GDP 比例/%	U <sub>R4</sub>	3.5	3	2.5	2	1.5
		第三产业占 GDP 比例/%	U <sub>R5</sub>	40	35	30	25	20
	政策响应	工业废水达标排放率/%	U <sub>R6</sub>	100	95	90	85	80
		城镇污水集中处理率/%	U <sub>R7</sub>	85	80	75	70	65

荆州市位于长江中游,夏季太平洋暖湿气流会带来丰富的降雨,4—9 月降雨量约占全年的 70%。由于地势低平,河道弯曲,排水不畅,极易形成洪涝灾害。本文选取当年的最大日降雨量来表征洪涝灾害。随着城市的快速发展,荆州市水土流失引起的环境恶化越来越受到关注。水土流失会造成水土资源的损失和生态景观的破坏。不同的地形地貌条件下,土地利用的结构会有很大的不同,相应地,

会出现不同的景观格局。此外,人类活动对景观的干扰从低平地区向高峻地区递减,地貌特征对人类活动干扰景观起到促进或限制的作用<sup>[23]</sup>。

人类活动对景观生态的影响较为复杂,引起风险的原因较多,包括社会经济、城市化、土地利用、污染排放等多个方面,严重影响生态系统的结构和功能。第一,城市的快速发展带来社会的快速发展,社会发展造成人口密度的过度增长,会超出



城市生态承载力,使得生态系统无法持续健康发展。第二,城市的快速发展导致土地利用结构发生剧烈变化,生态用地大量转化为城市建设用地,会影响城市水文循环过程,引起城市水土流失现象加剧。第三,城市工业化的发展造成城市污染负荷加剧,迫使大量污染物进入生态环境中,影响景观生态系统状况。

### 2.1.3 状态指标

状态指标表征生态系统在压力作用下,结构、功能和组分所处的状态,本文从景观功能和景观结构两方面构建状态指标。

特定的景观格局有助于土壤保持、水源涵养、防风固沙、生物多样性保护等城市景观功能的维持,景观格局被破坏后将引起生态系统服务的下降,进而影响人类福祉的可持续性<sup>[24-25]</sup>。本文采用“中国生态系统服务价值当量因子表”<sup>[26]</sup>估算景观生态系统在水源涵养、土壤形成与保护、生物多样性保护、废物处理、食物生产、原材料和娱乐文化 7 项生态系统服务价值,表征景观生态系统功能的状态。

景观结构是景观的组分和要素在空间上的排列和组合形式。景观破碎度表示景观被分割的破碎的程度和空间结构的复杂性,表示整个景观或某一类景观类型在给定时间和给定性质上的破碎化程度。景观破碎化程度越大,干扰的作用就越明显<sup>[27]</sup>。景观分离度表示某一类景观类型中不同的元素或斑块个体分布的分离程度。景观分离程度越大,表明景观在整个地域分布上越分散,景观分布越复杂<sup>[28]</sup>。景观优势度是衡量斑块在各类景观中重要地位的一种标示,反映斑块对景观格局形成和变化的影响程度<sup>[19]</sup>。景观优势度是衡量斑块在各类景观中重要地位的一种标示,反映斑块对景观格局形成和变化的影响程度<sup>[29]</sup>。

### 2.1.4 响应指标

响应指标表征人类-自然复合生态系统面临风险所能采取的对策和措施,包括自然生态基底、经济实力、社会组织等方面的指标。

生境是某个种类的个体或群体为完成生命过程需要的、在一定面积上的资源与环境条件的联合体,是生态系统的载体,其质量可直接反映生态系统对抗风险的能力。荆州市由于地势地平,水源丰富,有良好的生态资源。本文选用绿化覆盖率、湿地退化率、Shannon 多样性指数来反映景观生境的好坏。社会经济响应用以表征人类为促进生态环境

的可持续发展所采取的对策,包括为改善环境的一系列环保措施以及经济措施。

## 2.2 基于投影寻踪的景观生态风险表征

### 2.2.1 投影寻踪法分析

投影寻踪<sup>[30]</sup>的基本思想是将高维数据投影到低维子空间上,通过优化投影函数,求解能反映高维数据结构或特征的投影向量,在低维空间上对数据结构进行分析,以达到分析高维数据的目的<sup>[31]</sup>,具有稳健性好、抗干扰性强和准确度高等优点。景观生态风险评价属于多因素综合分析问题,目前多因素评价方法的指标权重确定没有统一的理论和计算方法,评价结果具有一定的主观性。投影寻踪是从统计的思想建立评价模型,不需要人为设定指标权重,因而评价结果比较客观。

投影寻踪评价模型根据给出的标准,利用投影特征值,对评价样本进行等级水平评价,评价模型的建模过程如下。

1) 样本评价指标集的归一化处理。

设评价等级表中各指标值的样本集为  $\{x^*(i, j) | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p\}$ , 其中,  $x^*(i, j)$  为第  $i$  个样本第  $j$  个指标值,  $n$  和  $p$  分别为样本的个数(样本容量)和指标的数目。为消除各指标值的量纲和统一各指标值的变化范围,可采用下式进行极值归一化处理:

$$\text{对于越大越优的指标, } x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)}; \quad (1)$$

$$\text{对于越小越优的指标, } x(i, j) = \frac{x_{\max}(j) - x^*(i, j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)}. \quad (2)$$

其中,  $x_{\max}(j)$  和  $x_{\min}(j)$  分别为第  $j$  个指标的最大值和最小值,  $x(i, j)$  为指标特征值归一化的序列。

2) 构造投影指标函数  $Q(a)$ 。

PP 方法是将  $P$  维数据  $\{x(i, j) | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p\}$  综合成以  $a = \{a(1), a(2), a(3), \dots, a(p)\}$  为投影方向的一维投影值  $z(i)$ , 即

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)x(i, j), \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

然后,根据  $\{z(i) | i=1, 2, \dots, n\}$  的一维散布图进行分类。式(3)中  $a$  为单位长度向量。综合投影指标值时,要求投影值  $z(i)$  的散布特征应为:局部投影点尽可能密集,最好凝聚成若干个团,但在整体上投影点团要尽可能离散。因此,投影指标函数可以

表达为

$$Q(a)=S_z D_z, \quad (4)$$

其中,  $S_z$  为投影值  $z(i)$  的标准差,  $D_z$  为投影值  $z(i)$  的局部密度, 即

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(i) - E(z))^2}{n-1}}, \quad (5)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r(i, j)) \cdot u(R - r(i, j)), \quad (6)$$

其中,  $E(z)$  为序列  $\{z(i)|i=1, 2, \dots, n\}$  的平均值;  $R$  为局部密度的窗口半径, 它的选取既要使包含在窗口内的投影点的平均个数不太少, 避免滑动平均偏差太大, 又不能使其随  $n$  的增大而增加太高。  $R$  可以根据试验来确定, 其取值范围为

$$r_{\max} + \frac{p}{2} \leq R \leq 2p,$$

$r(i, j)$  表示样本之间的距离,  $r(i, j) = |z(i) - z(j)|$ ;  $u(t)$  为一单位阶跃函数, 当  $t \geq 0$  时, 其值为 1, 当  $t < 0$  时, 其值为 0。

3) 优化投影指标函数。

当各指标值的样本集给定时, 投影指标函数  $Q(a)$  只随着投影方向  $a$  的变化而变化。不同的投影方向反映不同的数据结构特征, 最佳投影方向就是最大可能暴露高维数据某类特征图结构的投影方向, 因此可以通过求解投影指标函数最大化问题来估计最佳投影方向, 即

$$\text{最大化目标函数: } \text{Max } Q(a) = S_z \cdot D_z, \quad (7)$$

$$\text{约束条件: s.t. } \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1. \quad (8)$$

这是一个以  $\{a(j)|j=1, 2, \dots, p\}$  为优化变量的复杂非线性优化问题, 用传统的优化方法处理较难。因此, 运用模拟优胜劣汰与群体内部染色体信息交换机制的基于实数编码的加速遗传算法来解决其高维全局寻优问题。

4) 等级评价。

将由第 3 步求得的最佳投影方向  $a^*$  代入式(3), 可得评价等级标准表中各经验等级样本点的投影值  $z^*(i)$ 。根据各经验等级及其对应的投影值  $z^*(i)$  建立投影寻踪等级评价模型  $y^* = f(z)$ 。将待评价的样本归一化处理, 计算待评价样本的投影值  $z(i)$ 。将投影值  $z(i)$  代入投影寻踪等级评价模型  $y^* = f(z)$ , 得出各评价样本的所属等级。

## 2.2.2 压力、状态、响应和景观生态风险指数

将压力、状态、响应指标分别划分为 5 个等级, 等级越高, 对风险的贡献越大。这 5 个等级的定性表达为“低、较低、中、较高、高”。根据这 3 个指标计算的风险也划分为 5 个等级, 从 I 到 V, 依次表示“低风险”、“较低风险”、“中风险”、“较高风险”和“高风险”。各指标等级划分标准和景观生态风险等级划分见表 2。

等级标准的划分在遵循以下 3 个原则的基础上进行适当调整: 1) 指标原有的标准和地方政府颁布的标准及规划目标; 2) 指标可取值范围内的等分; 3) 已有文献的等级划分原则。

根据指标标准值得到压力指数、状态指数和响应指数的等级投影值, 作为其等级划分限值。在此基础上, 建立景观生态风险指数, 计算风险投影值, 判定风险发生的可能性。本文直接将指标标准投影值作为风险等级临界值<sup>[32]</sup>, 根据最近邻原则判定样本风险等级<sup>[33-34]</sup>, 无需人为划分等级临界值, 避免了主观因素对等级划分的影响。

## 3 评价结果与分析

利用本文的方法, 对荆州市 1995, 2000, 2005, 2008, 2010 和 2013 年景观生态风险进行评价, 获得该市压力、状态和响应指数变化(图 3)和景观风险指数变化(图 4)情况。可以看出, 随着城市发展, 景观生态面临压力逐渐增大, 生态系统状态逐渐恶化, 同时响应力度增强, 在三者综合作用下, 荆州市景观生态环境面临的风险逐渐增大。

### 3.1 压力分析

图 3(a)给出荆州市生态风险压力指数的变化。1995—2013 年, 研究区压力指数呈现先减小后增大的变化, 相应的生态风险等级从 II 级增长到 IV 级。压力的变化受到不同因素的共同作用。

表 2 PSR 等级划分和景观生态风险等级

Table 2 Evaluation criteria and description for ecological risk

等级	SI	RI	PI	LERI	生态风险
I	3.7410	2.6458	0	0	低风险
II	2.7429	1.9843	0.6146	0.4238	较低风险
III	1.8286	1.3229	1.3290	0.8553	中风险
IV	0.9143	0.6614	2.0948	1.2973	较高风险
V	0	0	2.8248	1.7320	高风险

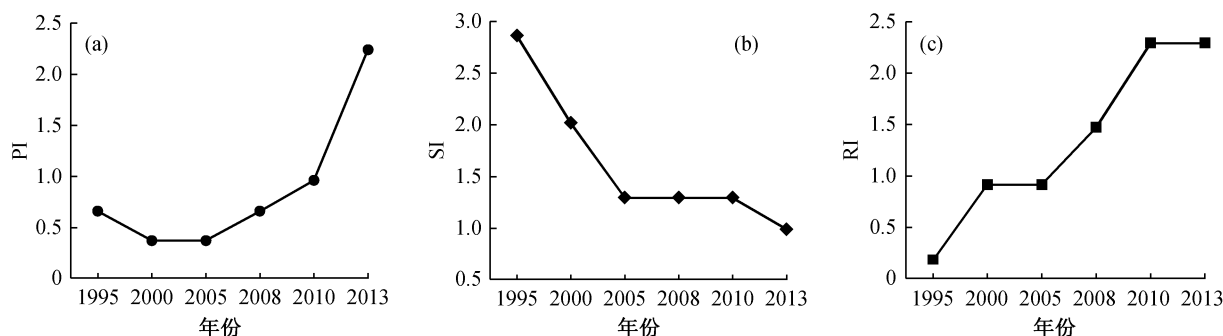


图 3 1995—2013 年荆州市景观生态风险压力指数(a)、状态指数(b)和响应指数(c)

Fig. 3 Results of PI (a), SI (b) and RI (c) for Jingzhou City from 1995 to 2013

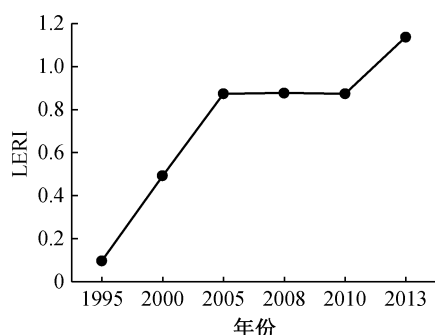


图 4 1995—2013 年荆州市景观生态风险指数变化

Fig. 4 Results of LERI for Jingzhou City from 1995 to 2013

作为荆州市主要气象灾害,暴雨对景观生态系统影响严重。荆州市降雨丰沛,但年际变化较大,年最大降雨量为 1775.4 mm,年最小降雨量为 757.2 mm,降雨多集中在 5—9 月份。2013 年日最大降雨量为 183.9 mm,连续最长降雨天数达 18 天。城市特大暴雨会造成山洪暴发,江河水位陡涨,洪水泛滥,危及水生态循环和人民生命财产安全。除 2005 和 2008 年荆州市的日最大降雨量未达到大暴雨标准以外,研究期内其余年份日最大降雨量均在 100~250 mm 的大暴雨范围,造成生态风险发生的可能性较高。近年来,荆州市极端天气情况时有发生,生态风险发生的可能性相对较高。

人为压力是研究区景观生态风险主要的胁迫因子,造成压力指数的快速增长。首先,荆州市社会经济的快速发展是生态压力的主要作用因素。随着国家“中部崛起”战略的实施、长江经济带的开放开发、“工业兴市”战略的实施等,荆州市迎来前所未有的发展机遇,城市得到快速发展。1995—2013 年,荆州市人口城市化率由 23.69% 增加到 47.90%,

年均增长率达 5.68%。同时,荆州市人均 GDP 由 4297 元增加到 20196 元,增长 4 倍。经济与环境效应处于假定的库伦兹“倒 U”形曲线的上升阶段,随着经济的进一步发展,对于生态环境的影响将逐步增加。

其次,荆州市土地利用结构变化剧烈。土地利用结构的改变将影响城市水文循环,造成城市面源污染频发,影响城市水环境质量、景观及生态系统健康。研究区土地利用结构呈现耕地减少、建设用地和水域增加的趋势。1985—2013 年,荆州市耕地数量减少幅度最大,共减少 910 km<sup>2</sup>,同时,建设用地增长快,共增加 210 km<sup>2</sup>。建设用地的大量增长使得耕地面积减少,转出的耕地面积中有 21.73% 转化为建设用地。人口的增加、城市化和工业化的发展都会给土地资源管理带来巨大压力,将进一步加剧土地资源保护与开发的矛盾,给生态系统带来不可避免的风险。

第三,荆州市水环境质量下降。污染物进入水体,影响水环境质量,破坏生物生存环境,削弱城市供水能力。污染物的排放包括工业污染源和生活污染源,长江及其支流是研究区的污染接纳水体,同时也是城市供水主体。2013 年,长江干流水质总体为优,支流水质总体良好,主要污染物为氨氮和五日生化需氧量,水质状况有所下降。四湖流域水质总体为中度污染,城区及周边水体为重度污染。全市包括长江干流、支流及城市辖区内共 20 个饮用水水源监测地中,按《地表水环境质量标准》(GB3838—2002) III 类水质标准评价,全市监测城市水源地水质达标率在 74.6%~100% 之间,年水质达标率为 84.1%,同比下降 15.9 个百分点,主要超标项目为总磷。

### 3.2 状态分析

状态指数表明受压力影响景观的动态状态值,通过状态值反映其生态状况好坏。从变化情况来看,状态指数呈现持续减小的变化趋势(图 3(b)),荆州市景观生态风险状态指数从 1995 年的较低风险状态(II 级)变化至 2013 年较高风险状态(IV 级)。

研究区景观生态功能主要包括生态、生产和文化。随着社会经济发展,城镇用地大面积增加、生态用地和农业用地大面积流失,使得景观生产和部分生态功能下降<sup>[35]</sup>。自然水域面积和城市绿地面积的增加对调节地表径流和消纳环境污染起到一定的正面作用。

伴随着城市的发展,不透水面面积增加、景观破碎和离散化等现象突出,由此会引起景观格局的演变。随着城市土地资源日趋紧张和社会经济水平的提高,城市景观格局演变将更加复杂,由此带来的生态影响将更加严重。

### 3.3 响应分析

响应指数描述缓解生态风险的措施的大小,反映生态系统抵御风险的能力。荆州市景观生态风险响应指数从 1995 年的 V 级逐步增加到 2013 年的 II 级,响应力度逐渐增强(图 3(c)),表明生态风险的缓解措施加强,生态系统抵抗风险的能力提高。这是因为随着生态环境问题的凸显,社会对生态环境问题的关注度和投入再逐渐增加。首先,环保投入增加,自 2010 年起荆州市环保投资占 GDP 的比例达到 3.5% 以上,达到国家生态城市建设标准。同时,荆州市加大产业结构升级,第三产业产值比重逐步提升,城市现代化进程加快。此外,废污水的处理率明显提高,2008 年,荆州市工业排放废水共 0.55 亿吨,排放达标量为 0.50 亿吨,排放达标率为 91.25%。自 2008 年起,荆州市工业废水达标排放率达到 90% 以上。2013 年污水处理系统对生活污水的处理率接近 80%,与 1995 年相比,提高 50 个百分点以上。

### 3.4 景观生态风险分析

综合压力、状态和响应的计算结果,得出荆州市综合景观生态风险结果(图 4)。荆州市景观生态风险从 1995 年的低风险(I 级)升高至 2013 年的较高风险(IV 级)。1995—2013 年景观生态风险指数呈现“增大—平缓—增大”的变化趋势。1995—2005 年荆州市景观生态风险由低风险(I 级)增大到中风险(III 级),而 2005—2010 年研究区景观生态风险

均处于中风险水平(III 级),2013 年景观生态风险增大至较高风险(IV 级)。

1995—2013 年,荆州市人口增长明显,经济和社会得到迅速发展。据统计资料,区域总人口由 615 万人增加到 661 万人,区域人口密度从 439 人/km<sup>2</sup> 上升至 472 人/km<sup>2</sup>,区域人口数量的增加对生态系统的运行和稳定带来很大压力。1995 年荆州市地区生产总值为 241 亿元,2013 年上升至 1334 亿元,几乎为 1995 年的 6 倍。伴随着经济水平快速增长,工农业生产对生态环境带来巨大压力,如化肥使用量的增加,工业固体废弃物、废水、废气排放量的大量增加等,直接增加了区域景观的生态风险。

利用 PSR 景观生态风险指数可以定量判断景观生态环境质量好坏,评价景观生态风险状况。城市发展对生态环境压力不断增大,但是随着城市经济实力的提高,环保意识不断加强,环境设施进一步完善,使得景观生态环境质量逐渐变好,综合生态风险呈现在波动中缓慢增大的趋势。

## 4 荆州市景观生态风险管理对策

生态风险评价的目的是为区域生态风险管理提供量化的决策依据和理论支持。也可以认为,生态风险管理是生态风险评价后的决策过程,是生态风险评价的最终目标。预测结果显示荆州市的景观生态风险有不断增大的趋势,且由于风险存在不确定性,因而需要采取适当的管理措施来减小景观生态环境生态风险发生的可能性。针对荆州市的具体情况,提出以下 3 点风险管理措施。

1) 编制区域国土规划,调整产业结构。

合理地进行土地利用规划,包括城市建设用地的控制和生态用地的保护。城市建设用地“集中减量增长”是荆州市未来城市建设和发展的必然选择,为了实现城市景观生态环境向健康状态转变,要努力控制新增建设用地面积,对现有建设用地进行改造。由于社会经济的发展,建设用地需求增大,在保护耕地的前提下,要实现社会经济可持续发展,必须加强土地的节约集约利用,实施有保有压的土地管理政策,保障重点建设用地,严格控制建设用地总规模。按照建设资源节约型、环境友好型社会的要求,合理控制建设规模,努力转变用地方式,加快土地利用由外延扩张向内涵挖潜、由粗放低效向集约高效转变。

加快产业转型和升级,改变依靠大量占用土地、大量消耗资源和大量排放污染实现经济较快增长的模式,提升参与全球分工的层次,推动产业结构向高端、高效、高附加值转变,增强高新技术产业、现代服务业、先进制造业对经济增长的带动作用。

## 2) 控制农业污染,减少工业污染。

目前荆州市的化肥、农药施用强度较高,科技兴农工作任重道远。可以通过发展生态农业、做好病虫害预测工作,使用高效、无污染的绿色肥料,推广生物农药、化肥、地膜等的使用等方法减少农业污染。还可实施农村沼气建设工程,促进农村循环经济可持续发展。

根据荆州市的社会经济统计资料,2013 年荆州市工业废水排放达标率、环保投资额等指标指数比 1995 年有较大的提高,但仍存在不足。建议对于污染较为严重的企业,严格限制其排污量,加强对生态环境的治理,减少并消除“三废”对生态系统的危害,实现清洁生产的经营方式。

## 3) 建立景观生态风险预警机制,加强生态环境动态监管。

建立风险预警机制是防范和控制风险的有效手段,风险预警机制的目标是根据荆州市的风险现状,构建适用于该区域的景观生态风险预警系统和风险防范化解机制,使得风险发生后能够有效、规范地抑制。

生态环境的动态监控有助于掌握生态系统的状况,以便在风险发生时采取相应措施控制。同时环境监测也是环境管理的重要组成部分,有助于了解环境质量随时间和空间的变化特征。

# 5 结论

本文基于美国 EPA 的生态风险评价框架和 PSR 模型的原理,构建了 PSR 景观生态风险评价模型,构造了景观生态风险指标体系,结合投影寻踪法,建立了风险指数来表征景观生态风险的大小。该模型考虑了风险评价的因果性和综合性,并用投影寻踪法替代常用的指标权重法,使得评价结果更客观。

利用该模型分析了 1995—2013 年间荆州市的景观生态风险变化。1995—2013 年间研究区景观生态风险有所增大,风险等级由 1995 年的低风险增大 2000 年的中风险,2005—2010 年期间,景观生

态风险变化大,维持在中风险水平,此后,风险增加到 2013 年的较高风险。其中,压力指数随着社会发展有所增加,状态指数持续减小,响应指数随着经济和政策的影响逐渐增大。

研究结果显示,荆州市的景观生态风险持续加剧,应引起足够的重视。未来荆州市生态风险管理中应加强城市生态环境综合整治,调整经济发展产业结构,从宏观尺度上对城市经济社会发展所造成的不良生态后果进行积极有效的预防和调控,降低城市发展的生态风险。从预防风险的角度看,应建立荆州市景观生态风险的预警系统,加强生态环境动态监管,及时了解景观生态风险的现状和变化趋势,为经济发展和城市规划提供相关的决策依据。

## 参考文献

- [1] Cao H F, Shen Y W. Brief review: ecological risk assessment research. *Environmental Chemistry*, 1991, 10(3): 26–30
- [2] Fava J A. Research priorities in environmental risk assessment. Pensacola: Society of Environmental Toxicology and Chemistry, 1987
- [3] Barnthouse L W, Suter II G W. User's manual for ecological risk assessment, ORNL-6251 [R]. Oak Ridge, TN: ORNL, 1986
- [4] Suter II G W, Norton S B, Barnthouse L W. The evolution of frameworks for ecological risk assessment from the Red Book ancestor. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2003, 9(5): 1349–1360
- [5] 阳文锐,王如松,黄锦楼,等.生态风险评价及研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1869–1876
- [6] 彭建,王仰麟,张源,等.土地利用分类对景观格局指数的影响. *地理学报*, 2006, 61(2): 157–168
- [7] 李谢辉,李景宜.基于 GIS 的区域景观生态风险分析:以渭河下游河流沿线区域为例. *干旱区研究*, 2008, 25(6): 899–903
- [8] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(4): 664–677
- [9] 刘焱序,王仰麟,彭建,等.基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价. *地理学报*, 2015, 70(7): 1052–1067
- [10] Li X H, Li J Y. Analysis on regional landscape ecological risk based on GIS — a case study along the lower reaches of the Weihe River. *Arid Zone Research*, 2008, 25(6): 899–903

- [11] Gao B, Li X, Li Z, et al. Assessment of ecological risk of coastal economic developing zone in Jinzhou Bay based on landscape pattern. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12): 3441–3450
- [12] 谢花林. 基于景观结构和空间统计学的区域生态风险分析. *生态学报*, 2008, 28(10): 5020–5026
- [13] 蒙晓, 任志远, 张翀. 咸阳市土地利用变化及生态风险. *干旱区研究*, 2012, 29(1): 137–142
- [14] Wu Jiansheng, Qiao Na, Peng Jian. Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(12): 3816–3824
- [15] 刘世梁, 刘琦, 张兆苓, 等. 云南省红河流域景观生态风险及驱动力分析. *生态学报*, 2014, 34(13): 3728–3734
- [16] 陈鹏, 潘晓玲. 干旱区内陆流域区域景观生态风险分析. *生态学杂志*, 2003, 22(4): 116–120
- [17] 田颖, 李冰, 王水. 江苏沿海地区景观格局的生态风险研究. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 241–245
- [18] 毛小苓, 倪晋仁. 生态风险评价研究述评. *北京大学学报: 自然科学版*, 2005, 41(4): 646–654
- [19] 付在毅, 许学工. 区域生态风险评价. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 267–271
- [20] Hughey K F D, Cullen R, Kerr G N, et al. Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70(1): 85–93
- [21] Wolfslehner B, Vacik H. Evaluating sustainable forest management strategies with the analytic network process in a pressure-state-response framework. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(1): 1–10
- [22] 李佩武, 李贵才, 张金花, 等. 深圳城市生态安全评价与预测. *地理科学进展*, 2009, 28(2): 245–252
- [23] 卜心国, 王仰麟, 吴健生. 深圳快速城市化中地形对景观垂直格局的影响. *地理学报*, 2008, 63(1): 75–82
- [24] 刘文平, 宇振荣. 景观服务研究进展. *生态学报*, 2013, 33(22): 7058–7066
- [25] 王洁, 李锋, 钱谊, 等. 基于生态服务的城乡景观生态安全格局的构建. *环境科学与技术*, 2012, 1(11): 199–205
- [26] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189–196
- [27] 曾勇. 区域生态风险评价. *生态学报*, 2010, 30(3): 668–673
- [28] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 流域景观结构的城市化影响与生态风险评价. *生态学报*, 2011, 31(12): 3432–3440
- [29] 蒙吉军, 赵春红. 区域生态风险评价指标体系. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 983–990
- [30] Krukal J B. Linear transformation of multivariate data to reveal clustering // Shepard R N. *Theory and application in the behavioral sciences*. Oxford: Seminar Press, 1972
- [31] 高杨, 黄华梅, 吴志峰. 基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价. *生态学报*, 2010, 30(21): 5894–5903
- [32] 熊聘, 楼文高. 基于投影寻踪分类的长江流域水质综合评价模型及其应用模型. *水资源与水工程学报*, 2014(6): 156–162
- [33] 付强, 金菊良. 基于 RAGA 的 PPE 模型在土壤质量等级评价中的应用研究. *水土保持通报*, 2002, 22(5): 51–54
- [34] 王顺久, 李跃清. 投影寻踪模型在区域生态环境质量评价中的应用. *生态学杂志*, 2006, 25(7): 869–872
- [35] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(4): 1042–1050