

基于压力-状态-响应模型的引江济淮工程 安徽段沿线区域生态安全评价

顾康康^{1, 2}, 刘飞^{1*}, 汤晶晶¹, 李雨薇¹

(1. 安徽建筑大学 建筑与规划学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽省国土空间规划与生态研究院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 生态安全评价是评估生态环境是否健康安全的一种研究方法。以引江济淮工程安徽段沿线区域为例, 基于压力-状态-响应模型构建生态安全评价指标体系, 运用层次分析法和熵权法分别对选取的20个评价指标因子赋权得到权重值, 进行权重值的组合, 然后计算生态安全等级, 进而评价引江济淮工程安徽段沿线区域的生态安全。结果表明: ①引江济淮工程安徽段沿线部分地区仍处于不安全-较不安全等级, 生态安全指数的分布存在一定空间差异, 人类活动是研究区部分地区生态压力指数偏高的主要影响因素。②PM_{2.5}年排放总量、土地胁迫指数、生境质量指数、水网密度指数、植被覆盖度、年总降雨量、地形坡度、造林面积是影响引江济淮工程安徽段沿线区域生态安全的主要因素。③人口密度大、发展速度快的城市生态安全指数较高, 而发展缓慢的城市生态安全指数反而较低, 这与城市推行生态保护政策的力度有很大的关联性。

关键词: 压力-状态-响应模型; 引江济淮工程安徽段沿线区域; 层次分析法-熵权法; 生态安全评价

中图分类号: C922

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)05-001-09

Regional Ecological Security Assessment of Anhui Section of Yangtze River to Huaihe River Diversion Project Based on the Pressure-State-Response Model

GU Kangkang^{1, 2}, LIU Fei^{1*}, TANG Jingjing¹, LI Yuwei¹

(1. School of Architecture and Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2. Anhui Institute of Land and Space Planning and Ecology, Hefei 230022, China)

Abstract: Ecological safety evaluation is a method to assess whether the ecological environment is healthy. Taking the area along the Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project in Anhui province as an example, the ecological safety evaluation index system was constructed based on the Pressure-State-Response model. The weights were assigned to twenty evaluation index factors using hierarchical analysis and entropy weighting method, and the ecological safety of the area was assessed. The results show that: ① some areas of the study are still in insecure-less secure level, while there are spatial differences in the distribution of ecological security indexes, and the human activities is the main factor for the high ecological stress; ② the main factors affecting ecological security in the study area include the annual PM_{2.5} emission, land stress index, habitat quality index, water network density index, vegetation coverage rate, annual rainfall, slope, and afforestation area; ③ the ecological security index is higher in cities with high population density and fast development rate but lower in cities with slow development, which is strongly correlated with the implementation of local ecological protection policies.

Keywords: Pressure-State-Response model; the area along the Yangtze River to Huaihe River Water Diversion Project in Anhui province; hierarchical analysis-entropy weighting method; ecological security evaluation

收稿日期: 2021-06-18

基金项目: 安徽省自然科学基金面上项目(2008085ME160); 安徽省高校省级自然科学基金项目—研究生项目(YJS20210500)

作者简介: 顾康康(1982-), 男, 教授, 博士, 主要从事城乡生态与环境规划研究;

通讯作者: 刘飞(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为城乡规划与设计。E-mail: 3041317244@qq.com

引江济淮工程是中国 21 世纪重要的航运工程,也是当下综合性最高、影响力最大的供水工程^[1]。该工程连接长江、淮河,纵穿安徽省和河南省,在供水、生态、航运等方面具有深远影响。在供水方面,能够缓解淮河中游干旱缺水情况;在生态方面,能够改善巢湖、淮河水质问题,优化巢湖流域水生态^[2];在航运方面,有利于构建国家南北水运航道,促进中原、长江两大经济区协作发展。有关引江济淮工程生态安全层面的研究也逐渐上升到重要地位。

生态安全的评价研究在国内外已取得很大进展,研究的内容主要有研究生态安全方向、评价方法和评价模型 3 个层面^[3]:①在研究方向层面:Vetrova 等^[4]主要研究环境管理中区域层面的生态安全评估,分析影响区域生态安全的主要指标因子。王一山等^[5]以乌鲁木齐市土地方向生态安全评价为例,分析了影响土地安全的相关因素,发现人类活动对土地安全的影响较为显著。杨文斌等^[6]分析影响水生态安全变化的因素,并优化了原有的水生态安全评价指标体系。②在评价方法层面:杨兆青等^[7]使用熵权 TOPSIS 法对煤炭资源型城市进行生态安全评价,以减小评价指标的主观性,增加评价结果的合理性。郭恒亮等^[8]运用层次分析法,从自然、经济、社会三个层面对南水北调中线主干渠沿线区域的生态安全进行评价分析,构建了用于描述运河沿线地区的生态安全的指标体系。③评价模型层面:Ghosh 等^[9]使用 DEMATEL-ANP 和 CA-Markov 模型对印度加尔各答生态安全进行评价与预测研究,得出影响印度城市群生态安全的主要因素是驱动力与响应指标。赵敏敏等^[10]基于 PSR 模型,耦合生态服务价值理论,选取 23 个指标因子对张掖市的生态安全进行综合分析,为生态安全的分析提供新的视角。

综上,过往的研究尺度大多集中于城市或城市群,而对于工程沿线区域少有研究;生态安全评价大多以时间序列为主线,缺少空间层面的分析。此外,在空间分析上所采用的方法单一,不能合理体现研究指标的准确性和合理性。因此,本研究基于压力-状态-响应(PSR)模型构建生态安全评价指标体系,组合运用熵权法和层次分析法(AHP),为评价指标因子赋权得到组合权重,据此计算生态

安全等级,进而对引江济淮工程安徽段沿线区域进行生态安全评价,以期为引江济淮工程沿线区域生态环境保护相关决策提供参考。

1 研究区概况

引江济淮工程安徽段总干渠全长 582.1 km,贯穿安徽南北。研究区为引江济淮工程安徽段沿线区域(图 1 蓝色部分),经纬度范围为 33°58'~30°72'N,116°03'~117°11'E,区域面积 28 806.81 km²。研究区域范围内包含 15 个县市,约占安徽省总面积的 20%。研究区地势大体南高北低,地质地貌多样,水生态特征各异(图 2),降雨分布存在区域性差异。近年来,随着社会发展,城市扩张,生态环境难以承载人类的活动,出现水污染、空气污染、植被破坏等一系列生态问题。如何协调保护和开发成为当下亟待解决的难题。

2 数据来源与评价方法

2.1 数据来源及处理

引江济淮工程安徽段沿线区域生态安全评价主要基础数据见表 1。

2.2 基于 PSR 模型的指标体系构建

本研究主要采用压力-状态-响应(PSR)模型。该模型由经济合作与发展组织(OECD)提出,适用于自然资源与生态安全方面的研究。模型运行逻辑关系清晰、易理解,可以科学系统地展示人与自然生态之间的作用关系。其中,压力指标反映生态系统所承载的压力,主要包括人类活动和自然本身所施加的压力;状态指标反映自然生态本身的现状,可以用生态系统对外界变化的载荷能力表示;响应指标反映人类面对生态环境恶化采取的生态保护和环境改善措施,是对生态环境变化的积极反馈。

2.3 评价方法

研究采用熵权法和层次分析法组合的分析方法,对评价指标因子进行赋权,得到组合权重值。熵权法为客观赋权,由数据资料决定评价结果,无法体现人的主观经验^[11];层次分析法确定的指标权重则对评价专家的知识丰富度有较高要求,且存在一定主观性,分析以定性为主,公信力不足^[12]。为合理确定指标权重,本文将二者结合,充分发挥

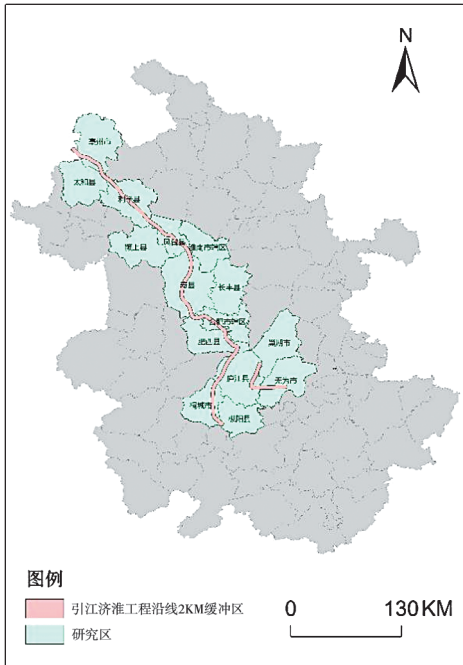


图 1 研究区域区位图

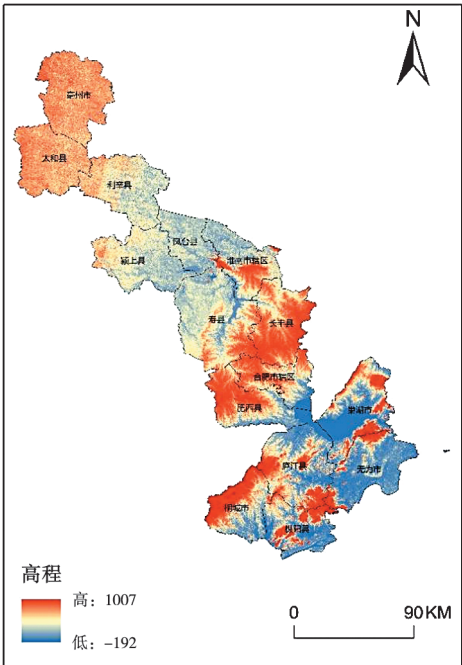


图 2 研究地形地貌图

表 1 基础数据

数据类型	来源	分辨率
全球 30 m 土地覆盖数据集	FROM-GLC	30 m
高程、坡度数据	地理空间数据云	30 m
人口密度数据	WORLDPOP 网站	1000 m
经济、污水排放、固体废物利用、化肥施用量、造林面积等数据	各市县统计局、各市县有关环境部门、安徽省统计局	—
2018 年遥感影像数据	地理空间数据云	30 m
2018 年温度、降雨数据	中国科学院资源环境科学与数据中心	1000 m

定性与定量结合的优势,因此采用 AHP- 熵权法组合赋权计算评价指标的综合权重,减少主观因素的影响,同时也能够削弱数据间的关联性对最终决策的干扰,使权重系数更加合理、准确。以研究区的行政区划为基准,以市县为单位构建 15 个评价单元,参考流域沿线区域生态安全评价的相关文献,并结合引江济淮工程沿线区域实际情况,从自然人文压力、生态系统状态、社会和土地生态响应等方面选取 20 个具有代表性的评价指标,创建 15 × 20 评价样本矩阵^[13-14]。

上述表中,人口密度值是由人口密度栅格数据在 GIS 软件中通过栅格转点,空间连接到研究区域内,计算得到各市县人口密度的均值;土地胁迫指

数、生境质量指数、水网密度指数计算方法见参考文献^[15]。近年来安徽省雾霾天气增多,而 PM_{2.5} 是造成雾霾天气的主要原因^[16-17],因此在选取生态安全评价压力指标时,污染气体以 PM_{2.5} 排放量为代表。

2.3.1 数据标准化

由于选取指标多元化,存在单位、量级等方面的差异,因此在使用熵权法和层次分析法进行权重计算前,需要对数据进行标准化预处理,即将指标数据的绝对值转化为相对值。评价指标一般分为正向指标和负向指标,判别标准取决于决策目标的差异性影响。

正向指标:

表 2 PSR 模型体系框架

模型	评价指标	指标类型	熵权法权重	AHP 权重	组合权重
P	人口密度	-	0.013 9	0.026 3	0.022 2
	农村居民人均可支配收入	+	0.070 8	0.012 7	0.034 9
	城镇居民人均可支配收入	+	0.022 9	0.021 7	0.025 9
	人口自然增长率	-	0.033 3	0.027 9	0.035 5
	建设用地占比	-	0.013 9	0.050 0	0.030 7
	农业用地占比	+	0.020 1	0.007 7	0.014 5
	化肥施用量	-	0.016 8	0.061 8	0.037 5
	PM _{2.5} 年排放总量	-	0.025 9	0.088 9	0.055 7
S	土地胁迫指数	-	0.016 5	0.159 7	0.059 7
	生境质量指数	+	0.107 8	0.069 2	0.100 4
	水网密度指数	+	0.067 9	0.042 3	0.062 3
	植被覆盖度	+	0.030 0	0.154 0	0.079 0
	年平均温度	+	0.029 5	0.024 8	0.031 4
	年总降水量	+	0.068 2	0.042 3	0.062 5
	地形坡度	-	0.095 9	0.023 7	0.055 4
	高程	+	0.062 1	0.023 5	0.044 4
R	造林面积	+	0.171 8	0.102 1	0.154 0
	生活污水处理率	+	0.025 0	0.024 9	0.029 0
	固体废物利用率	+	0.021 7	0.023 6	0.026 3
	人均 GDP	+	0.085 9	0.012 9	0.038 7

$$L_{ij} = \frac{l_{ij} - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \quad (1)$$

负向指标:

$$L_{ij} = \frac{l_{\max} - l_{ij}}{l_{\max} - l_{\min}} \quad (2)$$

式中: L_{ij} 为标准化后数值; l_{ij} 为指标 i 的原数值; $l_{\max}$ 为该指标最大值, $l_{\min}$ 为该指标最小值。

2.3.2 指标权重计算

采用 AHP-熵权法组合权重模型计算指标权重。

(1) AHP 权重计算

AHP 的基本步骤为构建评价指标体系、判断各个指标的重要性得分及计算权重。本研究使用 AHP 软件 yaahp 自动实现检验与修正。

(2) 熵权法计算权重

数据标准化预处理后构建关系矩阵 Z :

$$Z = (C_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: Z 由标准化后的指标数据构成; m 为评价指标的数量; n 为评价区域数。

根据指标数据关系矩阵 Z , 首先用熵权法计算样本值比重:

$$l_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{j=1}^n c_{ij}} \quad (\text{当 } l_{ij} \leq 0 \text{ 时, } l_{ij} \ln l_{ij} = 0) \quad (4)$$

然后计算信息熵:

$$E_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n (l_{ij} \ln l_{ij}) \quad (i=1, 2, \cdots, m, j=1, 2, \cdots, n) \quad (5)$$

计算指标权重:

$$W_i = \frac{1 - e_i}{m - \sum_{i=1}^m e_i} \quad (i=1, 2, \cdots, m) \quad (6)$$

(3) AHP-熵权法组合权重

综合各指标的 AHP 权重 W_j 和熵权法 W_i 权重可得对应的组合权重 W_{ij} 。依据最小相对信息熵原理:

$$\min D = \sum_{i=1}^m W_{ij} (\ln W_{ij} - \ln W_j) + \sum_{i=1}^m W_{ij} (\ln W_{ij} - \ln W_i) \quad (7)$$

$$st \sum_{i=1}^m W_{ij} (W_{ij} > 0) \quad (8)$$

用拉格朗日乘子法解得:

$$W_{ij} = \frac{w_j w_i^{0.5}}{\sum_{i=1}^m w_j w_i^{0.5}} \quad (i=1, 2, 3, \cdots, m) \quad (9)$$

2.3.3 生态安全指数计算

生态安全指数 (ESI) 是指数据标准化后的数值与指标的权重相乘之和, 计算式如下:

$$ESI = \sum_{i=1}^{20} W_{ij} L_{ij} \quad (10)$$

公式中指标的权重为 W_{ij} , 指标标准化值为 L_{ij} 。通过式 (10) 可以得到生态安全指数空间分布图, 在现有研究的基础上, 结合引江济淮工程安徽段沿线区域的实际状况, 利用自然间断点分级法将沿线区域生态安全评价标准划分为 5 个等级^[18] (见表 3)。

3 结果分析

3.1 生态安全综合指数分析

根据表 2 计算得到的组合权重, 结合表 3 的生态安全分级标准, 最终计算得到表 4 的生态安全等级, 基于表 4 及公式 (10) 计算得到引江济淮工程安徽段沿线区域生态安全指数分布图和生态安全指数等级图 (见图 3)。研究区域内生态安全指数最高为 0.524, 最低为 0.212, 总体生态安全指数处于中等水平, 太和县、颍上县、亳州市、利辛县、凤台县、寿县、淮南市辖区、长丰县生态安全指数偏低, 其中太和县 (0.22) 和颍上县 (0.21) 属于生态不安全区域。合肥市辖区、肥西县、巢湖市、桐城市、枞阳县、庐江县、无为市生态安全指数较高, 处于“较安全-安全”区域, 生态环境质量良好。

根据表 2 权重计算得知, 生态的压力层和生态状态层两个子系统是影响引江济淮工程安徽段沿线区域生态安全指数的主要因素, 两者权重较大, 而生态响应层影响相对较小。从评价指标体系来看, 生态压力层和生态状态层子系统由 16 个评价指标组成, 剩下的 4 个评价指标属于生态响应层子系统, 在综合考量权重赋值的基础上, 筛选出权重大于 0.05 的指标, 分别是 $PM_{2.5}$ 年排放总量、土地胁迫指数、生境质量指数、水网密度指数、植被覆盖度、年总降雨量、地形坡度、造林面积等 8 项指标。

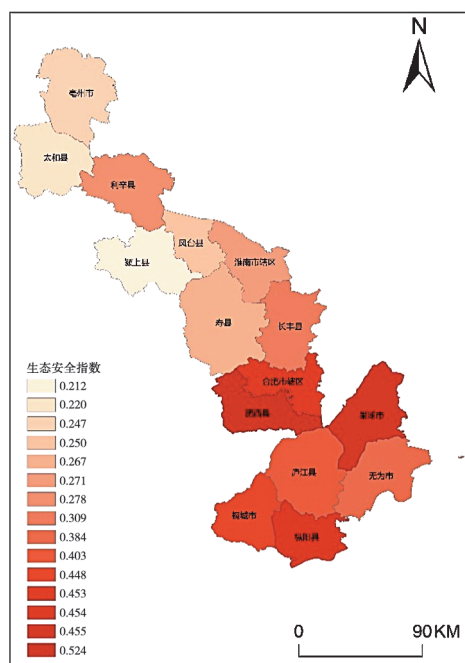
由上述分析可知, 影响引江济淮工程安徽段沿线区域生态安全指数的影响因素众多, 其中起主要作用的有 8 项。以生态安全指数等级和市县行政区划为基础, 分区统计研究区域生态安全指数 (见表 4)。研究区北部以农业用地、建设用地等人类活动强度较大的类型为主, $PM_{2.5}$ 等污染物的排放量也高于南部地区, 因此研究区内北部地区生态安全处于“不安全-较不安全”等级。研究区内南部地区生态安全水平处于“较安全-安全”等级, 原因在于该地区一方面水系发达, 以林地、草地等生态用地为主, 生态压力较小; 另一方面, 依托长三

表 3 研究区生态安全分级标准

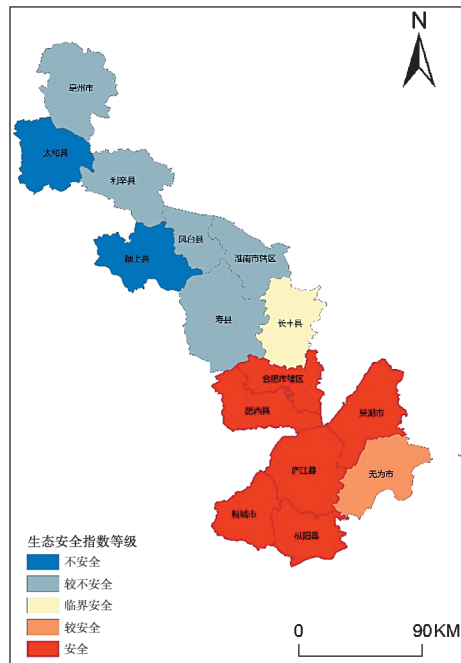
评价等级	I	II	III	IV	V
等级描述	不安全 重警状态	较不安全 中警状态	临界安全 预警状态	较安全 良好状态	安全 舒适状态
ESI	< 0.22	0.22~0.28	0.28~0.31	0.31~0.40	≥ 0.40

表 4 研究区域生态安全指数及生态安全等级

区位	区域	压力指数	状态指数	响应指数	生态安全指数	生态安全等级
北部	颍上县	0.076	0.091	0.046	0.212	不安全
	亳州市	0.127	0.052	0.067	0.247	较不安全
	太和县	0.086	0.090	0.044	0.220	不安全
	利辛县	0.087	0.105	0.086	0.278	较不安全
	凤台县	0.078	0.111	0.060	0.250	较不安全
	淮南市市辖区	0.091	0.129	0.052	0.271	较不安全
	寿县	0.131	0.100	0.036	0.267	较不安全
	长丰县	0.120	0.121	0.068	0.309	临界安全
南部	巢湖市	0.090	0.303	0.062	0.455	安全
	肥西县	0.127	0.166	0.231	0.524	安全
	合肥市市辖区	0.148	0.190	0.115	0.453	安全
	庐江县	0.117	0.246	0.040	0.403	较安全
	无为市	0.095	0.235	0.054	0.384	较安全
	桐城市	0.051	0.326	0.071	0.448	安全
	枞阳县	0.053	0.350	0.051	0.454	安全



(a) 生态安全指数分布图



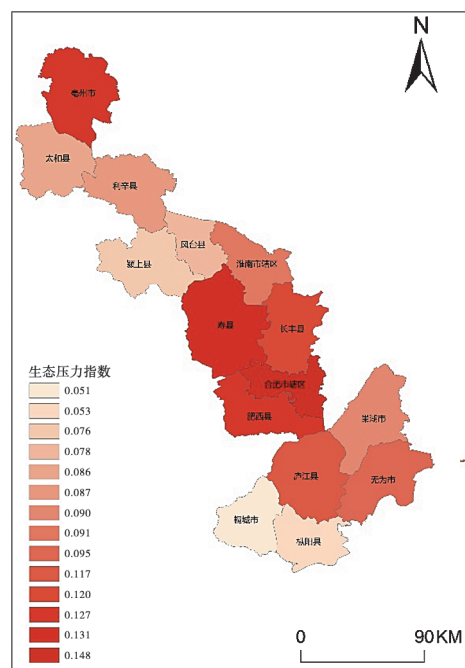
(b) 生态安全指数等级图

图 3 研究区生态安全指数空间分布及等级图

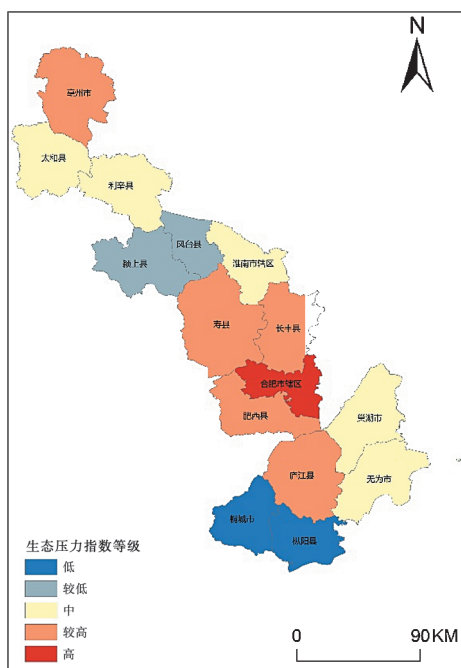
角经济发展圈,经济发展迅速,生态建设稳步推进。因此,提高不安全地区的社会经济水平,提升人民群众生活质量,采取积极的生态保护措施约束建设用地无序扩展,改善生态环境是当务之急。

3.2 生态压力指数分析

基于表 4 及公式 (10) 计算得到引江济淮工程安徽段沿线区域生态压力指数布局图和生态压力指数等级图(见图 4)。研究区域内压力指数最大



(a) 生态压力指数布局图



(b) 生态压力指数等级图

图 4 研究区生态压力指数空间分布及等级图

值为0.148,最小值为0.051,生态压力指数分布具有空间差异性,其中合肥市辖区生态压力指数最高,其次是庐江县、肥西县、长丰县、寿县以及亳州市。研究区南部(桐城市、枞阳县),以及研究区中部(颍上县、凤台县)基本处于“低-较低”的层级。在生态压力指数的评价体系中, $PM_{2.5}$ 年排放总量和化肥施用量所占权重最大,分别为0.055 7和0.037 5,而农业用地占比指标权重最小,仅为0.014 5。

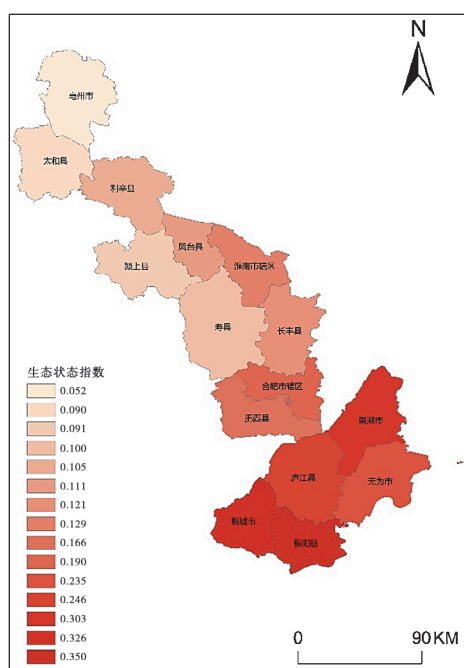
由表4的研究区内各市县的生态压力指数可知,以合肥市辖区为中心及其周边区域的生态压力指数较高,最大达到0.148,而桐城市和枞阳县的生态压力值仅为0.053和0.051,数值上存在一定差异。从自然环境的角度出发,皖南地区地势蜿蜒,多山多水,生态压力小于北部平原地区;从城市发展的角度出发,合肥近年来发展迅速,城镇化进程加快,周边人口不断涌入,已于2020年进入新一线城市之列。可以得出,城市扩张以及人类活动频繁导致建设用地增长、人口密度增大、污染气体排放超标,是造成生态压力增大的潜在因素。

3.3 生态状态指数分析

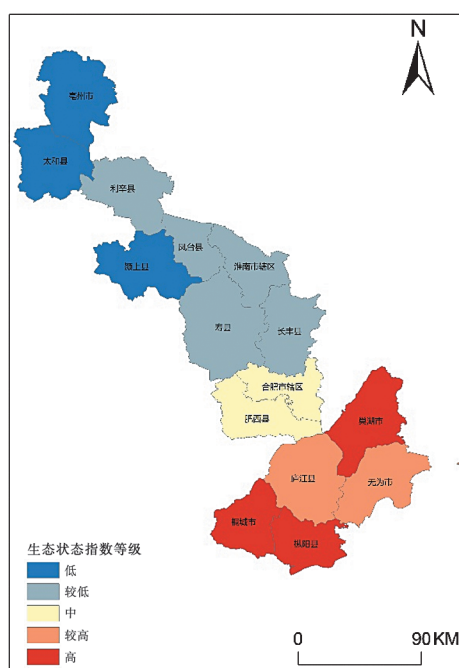
基于表4及公式(10)计算得到引江济淮工程安徽段沿线区域生态状态指数布局图和生态状

态指数等级图(见图5)。研究区域内整体生态状态良好,生态安全状态指数最低为0.052,最高为0.350。生态状态较好的地区主要分布在研究区的南部,分别是桐城市、巢湖市、枞阳县、庐江县、无为市,属于靠近长江、水系较发达地区;生态状态较差的地区主要分布于研究区的北部,即亳州市、太和县、颍上县、利辛县、凤台县,淮南市辖区、寿县、长丰县,大多属于皖北地区,地形平缓,水系不发达。从生态状态指标权重来看,生境质量指数所占权重最大,为0.100 4,即研究区域内水域湿地、林地、草地、耕地等的生态质量是引江济淮工程安徽段沿线区域生态状态指数的主要影响因素;其次,水网密度指数和植被覆盖度对研究区的生态状态指数也有较大影响。

以市县级行政区划为单元,对研究区生态状态指数进行分区统计(见表4)。如图5所示,研究区内北部地区发展速度相对缓慢,生态状态水平处于“低-较低”的层级;生态状态水平处于“较高-高”的区域主要分布在研究区的南部,经济发展相对较好。生态状态指数数值差异与生态安全指数相比较显著,低生态指数地区(亳州市、太和县、颍上县)和高生态指数地区(桐城市、枞阳县、巢湖



(a) 生态状态指数布局图



(b) 生态状态指数等级图

图5 研究区生态状态指数空间分布及等级图

市)相差 0.3 左右。

3.4 生态响应指数分析

基于表 4 及公式 (10) 计算得到引江济淮工程安徽段沿线区域生态响应指数布局图和生态响应指数等级图(见图 6)。引江济淮工程安徽段沿线区域生态响应指数空间分布有一定差异性,最大值为 0.231,分布在合肥市辖区及肥西县;最小值为 0.036,为寿县地区。发展相对缓慢地区,如太和县、颍上县和寿县的生态响应指数明显低于发展速度较快地区,如合肥市辖区和肥西县。从评价指标权重上分析,造林面积是引江济淮工程安徽段沿线区域生态响应指数的主要影响因素,占评价体系的 15% 左右,而固体废物利用率所占权重仅为 0.026,影响较小。

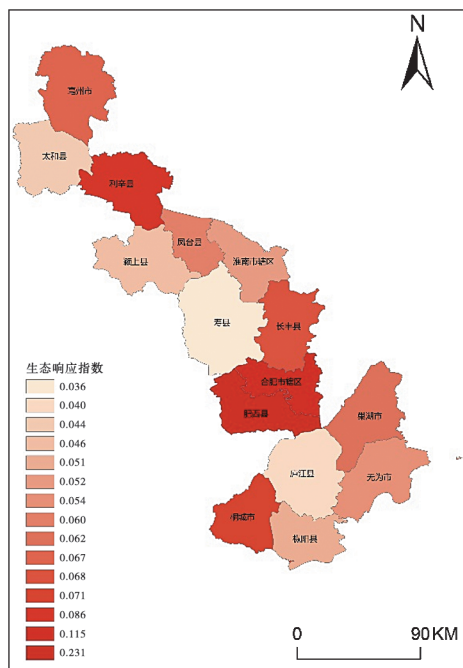
以市县级行政区划为单元,对研究区生态响应指数进行分区统计(见图 6),研究区内生态响应指数总体处于中等偏下水平,太和县、颍上县、寿县、庐江县生态响应指数水平处于“低-较低”层级,而肥西县和合肥市生态响应指数水平处于“较高-高”层级。从生态响应指标中的造林面积、生活污水处理率等方面分析,合肥市推行林长制改革,推进“十大公园”“十大湿地”和大量小公园、

小广场建设,自 2019 年起,围绕公园城市建设,全面优化城市空间布局,提升了城市的生态安全水平,为其他城市改善生态环境提供了一定借鉴。不同于生态压力指数和生态状态指数,生态响应指数的空间分布与经济发展水平和人口密度的分布呈正相关,地区发展越缓慢,生态响应指数越小。因此,需进一步提升区域经济发展水平,提高生态响应措施的有效性。

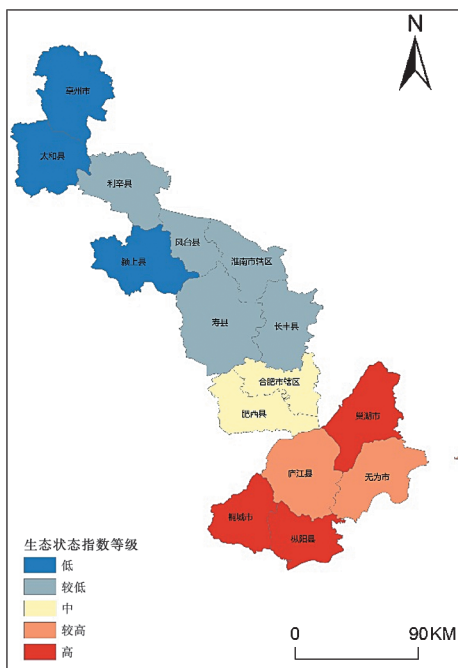
4 结论与展望

污染物排放等非正常的人类活动是研究区部分地区生态压力指数偏高的主要影响因素,城镇化快速发展以及人口流动导致城市建设用地、人口密度增加,致使生态压力指数空间分布出现差异。从生态状态指数来看,皖南沿江区域生态状态良好,受地形地貌以及水网密度的影响较大。对比发展较快地区与发展缓慢地区可知,生态响应指数在造林面积、人均 GDP 指标等方面也存在一定差异。

整体而言,引江济淮工程安徽段沿线区域生态环境状况仍存在一定问题。沿线市县政府部门可以从土地开发利用、植被覆盖、污染物排放等方面加大对生态环境的治理和保护,杜绝沿线高污染产



(a) 生态响应指数布局图



(b) 生态响应指数等级图

图 6 研究区生态响应指数空间分布及等级图

业发展,工程沿线施行更加严格的工业产业生产标准,实施生态环境保护及水源保护策略,为引江济淮工程沿线区域的发展创造良好的自然条件,打好坚实的生态基础。

本次研究仅讨论引江济淮工程安徽段沿线区域2018年生态安全评价分析,获取的数据具有局限性,没有对研究区的生态安全时空进程变化进行动态纵向分析。今后的研究可以从土地利用、环境响应、人口健康和空间策略等方面探讨,并加强对引江济淮工程安徽段沿线区域的动态分析研究。

参考文献:

- [1] 孙贤斌,孙良萍,赵怀琼,等.引江济淮工程调水安徽水源地生态补偿标准研究[J].皖西学院学报,2021,37(5):100-103.
- [2] 吴师.引江济淮工程建设可能次生的生态环境问题应对措施[J].中国防汛抗旱,2018,28(12):33-35.
- [3] 黄金川,林浩曦,漆潇潇.面向国土空间优化的三生空间研究进展[J].地理科学进展,2017,36(3):378-391.
- [4] Vetrova N, Shtofer G, Gaysarova A, et al. Regional ecological security assessment in the environmental management[J].E3S Web of Conferences, 2020, 164: 07004.
- [5] 王一山,张飞,陈瑞,等.乌鲁木齐市土地生态安全综合评价[J].干旱区地理,2021,44(2):427-440.
- [6] 杨文斌,段文秀,崔扬,等.天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素[J].环境科学,2021,42(10):4739-4752.
- [7] 杨兆青,陆兆华,刘丹,等.煤炭资源型城市生态安全评价:以锡林浩特市为例[J].生态学报,2021,41(1):280-289.
- [8] 郭恒亮,韦原原,赫晓慧,等.南水北调中线地区土地利用变化及生态环境效应[J].南水北调与水利科技,2015,13(3):444-447.
- [9] Ghosh S, Das Chatterjee N, Dinda S. Urban ecological security assessment and forecasting using integrated DEMATEL-ANP and CA-Markov models: a case study on Kolkata Metropolitan Area, India[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 68: 102773.
- [10] 赵敏敏,何志斌,蔺鹏飞,等.基于压力-状态-响应模型的黑河中游张掖市生态安全评价[J].生态学报,2021,41(22):9039-9049.
- [11] 原彩萍,刘原一,职璐爽.基于模糊集对法的山西省水资源脆弱性评价[J].水资源保护,2021,37(5):112-116,130.
- [12] 何苏玲,邹凤琼,王金亮.基于AHP和MSE赋权法的龙南县生态敏感性评价[J].生态学杂志,2021,40(9):2927-2935.
- [13] 何刚,王莹莹,阮君,等.基于Dagum基尼系数的生态安全区域差异及收敛度研究:以淮河生态经济带安徽段为例[J].水土保持研究,2021,28(6):348-355.
- [14] 何刚,金兰,朱艳娜.基于云物元的合肥市生态安全评价及生态阻力分析[J].地域研究与开发,2020,39(6):171-176.
- [15] 中华人民共和国环境保护部.生态环境状况评价技术规范:HJ 192—2015[S].北京:中国环境科学出版社,2015.
- [16] 章群英,麻金继,沈非,等.安徽省冬季PM_{2.5}污染来源及其成因分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2737-2746.
- [17] 杨鹏,张红,汪水兵,等.安徽省PM_{2.5}分布特征及区域输送来源分析[J].环境科学与技术,2020,43(2):52-59.
- [18] 李坦,陈天宇,米锋,等.基于变权理论和DPSIRM的中国森林生态安全评价[J].中国环境科学,2021,41(5):2411-2422.