

基于“要素—景观—系统”框架的江苏省长江沿线生态修复格局分析与对策

韩博¹, 金晓斌^{1,2,3}, 项晓敏¹, 赵庆利⁴, 林金煌¹,
洪长桥¹, 金志丰⁵, 胡静⁶, 周寅康^{1,2,3}

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023; 3. 江苏省土地开发整理技术工程中心, 南京 210023; 4. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035; 5. 江苏省国土资源研究中心(智库), 南京 210023; 6. 重庆市农村土地整治中心, 重庆 401121)

摘要: 在当前中国生态文明建设和绿色发展征程中, 实施尺度、要素、途径复合的国土空间生态修复是解决区域系统性生态问题的重要途径。针对江苏省长江沿线地区这一生态保护与经济发展矛盾突出区域, 基于“要素—景观—系统”框架构建生态修复潜力评价体系, 采用K-means聚类分析、Getis-Ord G_i^* 热点分析等方法识别生态修复分区与热点, 构建由点、线(带)、面组成的生态修复格局, 提出生态管控与修复对策。研究结果表明:(1)生态修复具有多尺度性、对象复合性及途径多样性, 在宏观、中观、微观尺度下具有不同的对象、目标与途径, 并可以通过不同级别与类型规划进行衔接;(2)研究区要素层生态修复潜力平均值为0.460, 空间分布呈“大分散、小集聚”的特征, 景观层生态修复潜力热点区分布于环长江入海口区域, 冷点区分布于扬泰平原区, 根据系统层评价指标可将研究区划为5个聚类分区;(3)根据评价结果可以构建“五区、三带、两核心”生态修复总体格局, 并在发展导向、空间管控策略、工程措施等方面提出生态修复对策。本文为江苏省沿江区域生态修复规划编制、生态修复内涵与实施范式探索提供参考借鉴。

关键词: 生态修复; 格局分析; 生态规划; 长江; 江苏省

近代以来随着全球工业化、城市化进程不断推进, 生态环境问题出现愈加频繁, 生态质量持续恶化^[1]。改革开放后中国经济发展速度一直处于世界前列, 但同时也伴随着生态灾害频发、生态系统功能退化、生物多样性降低、水土污染等资源环境问题, 这些问题已成为阻碍中国社会经济可持续发展的重要因素^[2]。面对全球性的生态问题, 国内外围绕生态环境改善目标开展了大量研究与实践。通过生态修复恢复生态系统功能、改善生态脆弱性、促进人地关系和谐, 已成为国内外学者的共识^[3-5]。联合国《生物多样性公约》提出到2020年修复15%的退化生态系统的战略目标。中国政府也进行了大量的生态修复实践^[6]。党的十九大提出了“统一行使所有国土空间用途管制和生态保护修复职责, 统筹山水林田湖草系统治理”的战略要求。2018年国家机构改革后, 自然资源部将“负责统筹国土空间生态修复”写入机构职能, 并成立国土空间生态修复司; 2019年国土空间规划体系建设正式启动, 提出“推进生态系统保护和修复”^[7]。这一系列举措标志着中

收稿日期: 2019-10-23; 修订日期: 2019-12-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD06B02)

作者简介: 韩博(1995-), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 主要从事国土整治与生态修复研究。

E-mail: mg1727028@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 金晓斌(1974-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土地资源管理研究。

E-mail: jinxb@nju.edu.cn

国生态修复逐渐由局部分散开展阶段向全面系统发展阶段转变。尽管当前生态修复实践需求愈发紧迫,但目前还面临着生态修复概念内涵不明确、生态修复路径与范式不清晰、生态修复实践与“整体保护、系统修复、综合治理”的要求不匹配等问题。这些问题的解决对推进生态修复广泛开展、提升实施与管理水平、保障生态修复实施效益具有重要意义,也是当前学者亟需解决的关键命题。

国外学者对生态修复研究开展较早,20世纪初欧美国家为解决采矿和地下水开采导致的环境问题,开始加强废弃工矿用地植被恢复研究,并逐渐形成生态恢复学学科体系^[5]。随着社会发展及研究的深入,欧美国家关注的重点逐渐从湖泊^[8]、海岸带^[9]、生物种群^[10]等特定对象的生态修复工程转向生态修复机制、管理决策、路径分析等研究。如Walters等^[11]选取5个非洲生态修复案例区,比较了生态修复实施主体在组织方式、规划过程、关键决策等方面的差异对生态修复成效的影响;Gocheva等^[12]通过类比中国传统中医理论,构建了生态修复跨政策协调机制,并以Bulgarian为例进行实证分析;Rydstedt等^[13]提出了“疲劳(figured)—修复(Restored)—活力(Vitalized)”生态修复与恢复过程动力机制,探索了生态修复与生态恢复在理论与政策上的整合路径。相比于国外研究重视学科理论发展,当前国内研究更加关注实践需求。自20世纪起我国就开始大规模实施退耕还林、三北防护林建设工程、国家天然林保护工程等重大生态工程,学者们也针对大尺度区域的宏观生态修复战略^[14]、生态价值评估^[15]以及生态补偿机制^[16]等进行了大量研究。同时各地方也围绕水土保持、土壤修复、水污染治理、小流域治理等进行了大量实践,与之相关的选址与规划设计^[17-19]、实施过程管理^[20]、区域特色模式^[21,22]、工程技术^[23,24]、成效评估^[25-27]等也成为研究热点。但目前,将生态修复作为一个独立概念进行的研究尚不多见。曹永强等^[28]以“生态修复”为关键词进行文献计量分析,对比了国内外生态修复在概念内涵、研究热点与研究现状的差异;曹宇等^[29]系统剖析了国土空间生态修复的内涵、理论基础及相关重要研究内容,提出了中宏观尺度生态修复的特征、定位与要求;刘俊国等^[30]在分析白洋淀地区生态问题并对生态属性进行辨析的基础上,定性提出了生态修复与保护的可行性策略。总的来看,当前国内研究已经在生态修复内涵解析、尺度特征、途径措施、效益评估等方面进行了有益探索,但也存在概念界定不清、不同尺度研究难以衔接、生态修复范式提炼不足等问题。

长江经济带发展战略是当前中国最重要的区域发展战略之一^[31],实施长江经济带生态修复是促进区域可持续、高质量发展的重要途径^[32-34]。长江江苏段是我国开发历史悠久、人口经济分布最集中的地区之一,也是当前长江经济带生态承载压力最大、生态保护与经济活动矛盾最突出、生态保护形势最紧迫的区域^[35]。因此拟采用定性定量相结合的方法分析江苏省长江沿线区域生态问题,首先按照尺度特征对生态修复进行内涵解析;其次从“要素—景观—系统”角度构建生态修复潜力评价体系,并基于Getis-Ord G_i^* 热点分析、K-means聚类分析等方法识别生态修复热点与分区;最后构建生态修复总体格局,并提出生态管控与修复对策。以期为江苏省长江沿线生态修复规划编制及生态修复工程实施提供参考,并为探索生态修复范式、丰富生态修复理论体系提供借鉴。

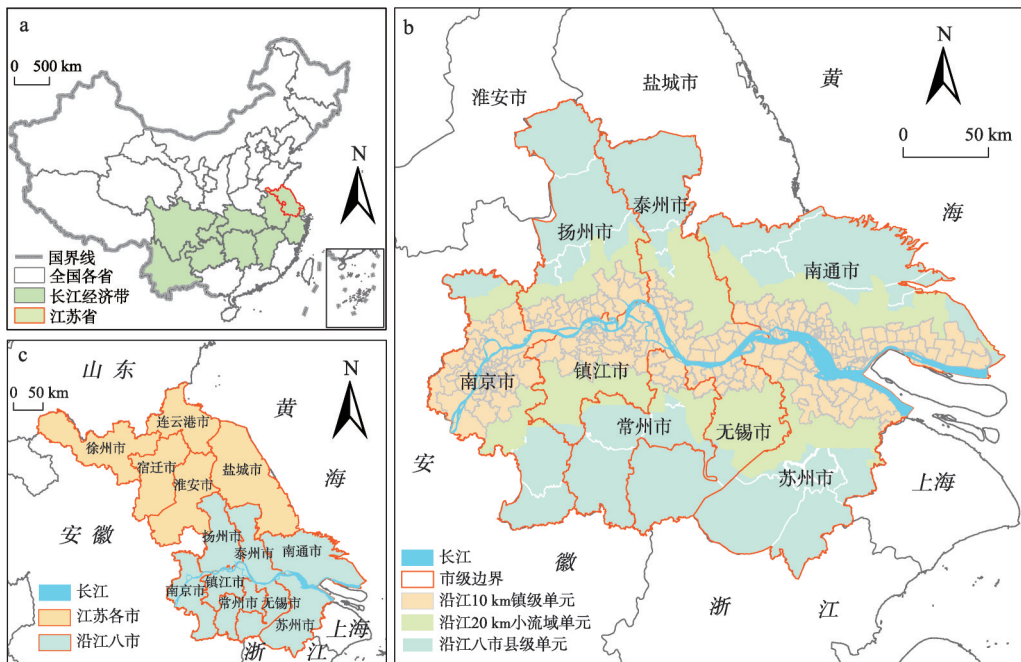
1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

江苏省长江干流从苏皖交界到长江口北支启东寅阳咀,全长432.5 km,流域面积

3.86万 km², 岸线总长 1169.9 km, 涉及南京、无锡、常州、苏州、南通、扬州、镇江、泰州等 8 个地级市、66 个县级单元, 沿江 10 km 范围涉及 303 个镇级单元, 20 km 范围涉及 96 个小流域单元。该区域处于亚热带向暖温带的过渡区, 气候温和, 雨量适中, 四季分明, 平均气温 13~16 ℃, 年降水量 1000 mm 左右。沿江地区地貌以平原为主, 丘陵山地面积很小, 在低山丘陵的坡麓和平原之间, 分布着西南部的黄土岗地和东北部的变质岩石质岗地。沿江地区土壤类型主要有水稻土、潮土等 9 个土类, 共 19 个亚类、52 个土属。沿岸冲积平原主要为灰潮土。该区域是我国开发历史最久、人口经济分布最为集中的地区之一。根据《江苏省 2018 年统计年鉴》, 2017 年末沿江市常住人口 4994.03 万, 地区生产总值 67719.28 亿元, 分别占全省的 62.20%、76.96%。第一产业生产总值 1828.49 亿元, 第二产业生产总值 31085.64 亿元, 第三产业生产总值 34805.15 亿元, 分别占全省的 46.43%、77.59%、79.13%。根据《江苏省国家级生态保护红线规划》, 2017 年末沿江八市国土总面积 47357.88 km², 陆域生态保护红线面积为 4626.65 km², 海域生态保护红线面积为 2471.94 km², 分别占全省的 47.05%、47.77%、22.92%。

研究区不同范围的生态特征与生态问题存在较大差异^[30]。长江岸线工业用地造成的污染、建设用地的阻隔等直接作用于长江干流的生态环境。长江腹地区域的景观生态格局以及人一地相互作用关系给长江造成间接的生态压力, 影响长江沿线区域的生态系统功能。因此本文考虑到研究区生态修复的尺度性与层次性, 选择长江 10 km 缓冲区涉及的镇级行政单元、20 km 缓冲区涉及的小流域单元、沿江八市内所有县级单元分别作为微观、中观、宏观分析对象 (图 1)。



注: 本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2884标准地图制作, 底图无修改。

图1 研究区区位图

Fig. 1 Location of the study area

1.2 江苏省长江沿线生态问题综述

现代意义的江苏省长江沿线开发可追溯到民国时期,该区域是中国民族工业的发祥地^[37]。2003年《江苏省沿江开发总体规划》的发布标志着长江岸线从分散利用向全面开发利用转变,沿江产业迅速布局,建设用地急剧扩张;2007年《江苏省沿海开发总体规划》发布,沿江产业发展重心开始向沿海区域转移;2016年长江经济带发展战略提出“共抓大保护,不搞大开发”,江苏省为落实该战略制定了《长江经济带生态环境保护实施规划》;2019年长江大保护会议提出要将“长江江苏段建成生产发展、生活富裕、生态优良高质量发展的典范”。但是长期高强度开发利用过程形成的历史惯性给生态转型造成了严重阻力^[38],实施区域生态修复仍然是未来一段时期的重要历史任务。

生态问题识别是开展生态修复的基础。长江江苏段是整个长江流域生态环境问题最突出的区域^[31],其中长江岸线部分生态问题表现最为显著^[39]。受历史条件和经济社会发展阶段等因素的影响,当前江苏省长江岸线存在保护利用矛盾大、违建项目多、集约利用效率低等突出问题^[40]。“重化围江”是当前长江岸线最主要的生态胁迫^[41,42]。江苏全省重工业企业数量占全省企业总数的62.9%,化工、火电、冶金等七大高耗能产业产值占全省工业总产值的1/3左右,且主要分布于沿江八市,成为水土污染重要来源。高污染风险企业的不合理布局进一步影响了长江沿岸生态环境质量^[35],重要水源保护区、生态敏感区、部分生态红线管控范围内存在一定数量的化工企业。此外江苏段长江岸线还存在生产性岸线利用比例高、沿江林地湿地带等生态性岸线占比不断下降、滨江生态用地功能退化等问题^[43]。不合理的岸线利用与生物多样性保护矛盾凸显,特别给江豚生存带来了严重威胁^[44,45]。此外,一些建设项目布局不合理,存在局部岸段岸线冲刷调整现象,对防洪安全及河势稳定造成不利影响。

此外,沿江区域生态景观格局变化进一步加剧了长江生态问题。城镇建设扩张一方面导致林草河湖等生态用地面积不断减少,另一方面也导致生态用地格局破碎化^[46]。例如沿江地区生态防护林多以分散林地斑块为主,树种配置单一,功能不够完善,未形成统一、完整的带状空间。沿江水系存在人工破坏现象,导致部分支流滞流、断流,湖泊河网调蓄能力下降,自然湿地面积减少,水域生产力下降^[47]。野生动植物生境分布区日益缩小,栖息地破碎化严重^[48]。

近年来江苏省针对长江沿线生态问题已经实施了一系列举措。江苏省级层面制定了《江苏省长江经济带生态环境保护实施规划》,在2018年完成了国家级生态保护红线划定;实施环太湖生态绿廊工程、宁镇扬淮丘陵生态公益林建设工程,并将“江淮生态大走廊”建设纳入国家规划^[49]。部分地市如南京市开展绿水湾、龙袍、八卦洲等长江滨江三大湿地保护工程,扬州打造长江下游最大的人工恢复岸线湿地等。但是目前长江沿线生态问题恶化的态势尚未得到根本扭转,首先社会经济发展与生态保护的矛盾更加突出,转型实现绿色发展存在障碍;其次,已实施的各类生态修复措施呈现重工程、轻管控和重指标、轻效益等特征;生态修复途径措施较为单一,主要以矿山废弃地治理、造林绿化、水土污染治理、海岸带修复等为主,缺乏区域统筹;部门间、区域间协调较少,难以发挥生态修复整体效益。因此,识别研究区尺度、要素、途径复合的生态修复格局,成为进一步推进生态修复开展的重要基础。

1.3 “要素—景观—系统”生态修复评价体系

1.3.1 生态修复内涵解析框架

狭义的生态修复是指针对已受损的土地、水体、土壤、栖息地等,以工程、化学、

生物、绿化等手段进行恢复与修复,实现污染消除、生态功能与景观恢复、资源再利用等目的的过程。广义的生态修复则包含了以提高生态环境质量为目的的所有人类活动及地表过程。由于生态系统是一个复杂巨系统,狭义的生态修复往往“治标不治本”,因此针对特定区域实施系统性生态修复已逐渐成为共识。本文借鉴人地系统科学、景观生态学、生态学等相关理论,尝试对广义生态修复进行内涵解析(图2)。

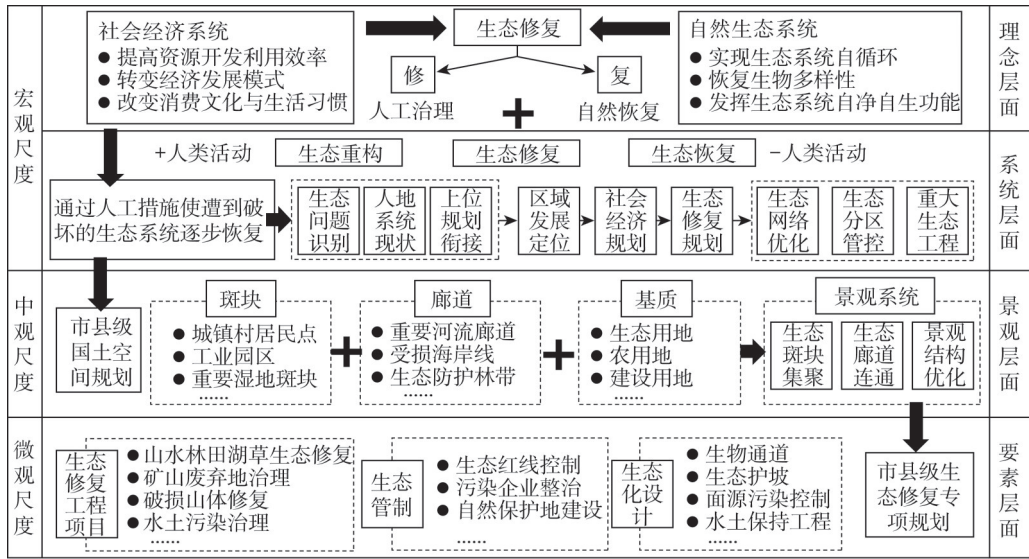


图2 生态修复内涵解析框架

Fig. 2 Framework of ecological restoration connotation

按照人地关系理论,生态修复从对象上可分为社会经济系统及自然生态系统,针对已破损生态系统通过人工措施进行生态重建和生态修补,对生态脆弱区、生态敏感区通过划定生态管控区促进生态恢复。由于当前自然生态系统的高度人工化,实践中生态修复过程需要“修”“复”结合。宏观尺度的生态修复不只是各类生态工程、生态管制、生态措施的空间布局,更是生态修复目标约束下区域社会经济发展的引导。按照生态修复理念调整社会经济发展方向,通过构建生态补偿等机制协调经济活动与生态修复活动,制定区域层面的生态修复规划是宏观尺度生态修复的实现途径。中观尺度生态修复的对象主要是各类景观生态要素,以县区级国土空间规划为载体,通过调整景观结构、优化景观格局、改善景观生态功能等途径落实宏观尺度生态修复规划。微观尺度生态修复与传统狭义的生态修复概念近似,是操作层面实施生态修复的具体途径。通过县区级生态修复专项规划布局生态修复工程项目,制定地块尺度的生态管制规则,推行适宜区域条件的生态设计标准。

1.3.2 评价指标体系构建

基于本文对广义生态修复的内涵解析,结合江苏省长江沿线区域特征及生态环境问题分析,构建基于“要素—景观—系统”框架的生态修复评价指标体系,旨在分析江苏长江沿线多尺度生态修复类型与潜力。镇级行政单元是要素层生态修复的决策单元,小流域单元具有相对独立的景观连通性特征,县级行政单元是社会经济与自然生态复合系统,因此本文分别以镇级行政单元、小流域单元、县级行政单元作为要素层、景观层、

系统层评价单元。考虑生态修复实施的空间布局,按照以下原则确定评价范围:(1)距离长江越近,对长江干流产生的生态压力越大,因此优先对长江岸线及周边进行评价;(2)应尽可能将距离长江干流较近的中心城区纳入评价范围;(3)景观层评价旨在分析生态连通性,因此需覆盖要素层评价单元;(4)系统层评价应覆盖长江沿线完整行政单元。据此本文将长江干流10 km缓冲区范围涉及的303个镇级行政单元、20 km缓冲区范围涉及的96个小流域、沿江8市66个县级行政单元纳入评价范围。

评价对象的生态现状和发展态势是开展生态修复的基本依据,变化过程产生的压力和针对压力已做出的决策响应是影响发展态势的重要因素,因此本文按照PSR(压力—状态—响应)三个维度进行指标选取(表1)。当压力指标值越大,状态指标与响应指标值越小,表明评价单元生态修复潜力越大。

表1 “要素—景观—系统”生态修复评价指标体系

Table 1 Ecological restoration evaluation index system under "element-landscape-system" framework

评价对象	要素	景观	系统
压力	土地利用变化压力指数 A_1	景观压力指数 B_1	人口增长率 C_1 GDP增长率 C_2 工业产值增长率 C_3
状态	工业用地面积比 A_2 水面率 A_3 水田面积比 A_4 土壤重金属污染 A_5 植被覆盖度 A_6	生态景观连通度 B_2 生态景观分割度 B_3 生态景观聚集度 B_4	生境质量 C_4 固碳量 C_5 水源涵养量 C_6
响应	禁止开发区面积比 A_7 基本农田保护区面积比 A_8 风景旅游用地区面积比 A_9 林草业用途区面积比 A_{10}	规划生态景观连通度 B_5 规划生态景观分割度 B_6 规划生态景观聚集度 B_7	国家级生态保护红线面积比 C_7 主体功能区类型 C_8
综合指标	要素层生态修复潜力 A_{11}	景观层生态修复潜力 B_8	/

(1) 要素层指标解释

指标 A_1 具体计算公式如下:

$$A_1 = \alpha_{ab} S_{ab} \quad (1)$$

式中: A_1 为评价单元的土地利用变化压力指数,其值越大表示由于土地利用变化导致的生态压力越大; S_{ab} 指该评价单元从2010-2017年,土地利用类型 a 转移为土地利用类型 b 的面积,其中将土地利用类型划分为水田、其他农用地(水浇地、旱地、田坎、园地)、生态用地(林地、草地、水面、沼泽地、盐碱地、裸地、沙地)、建设用地(城镇村建设用地、设施农用地、交通运输用地)四种类型; α_{ab} 为土地利用类型 a 转移为土地利用类型 b 的压力权重,参考不同土地利用类型的生态服务价值进行取值^[50](表2)。

指标 $A_2 \sim A_4$ 分别表示表示工业用地、水面、水田这三类该区域最重要的土地利用要素占评价单元的面积比;指标 A_5 表示以《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB15618-2018)》为依据,评价单元是否存在重金属超标,存在则值为1,不存在则值为0;指标 A_6 采用增强型植被指数(EVI)表示,取值范围为[-1, 1],值越大表示植被覆盖度越高^[51];指标 $A_7 \sim A_{10}$ 分别表示土地利用总体规划中不同类型土地规划用途区面积

表2 土地利用类型转移压力权重矩阵

Table 2 Weight matrix of land use type transfer pressure

权重矩阵	水田	其他农用地	生态用地	建设用地
水田	0	0.08	-0.1	0.24
其他农用地	-0.08	0	-0.12	0.16
生态用地	0.1	0.12	0	0.3
建设用地	-0.24	-0.16	-0.3	0

注: 纵轴为转出地类, 横轴为转入地类。

占评价单元的面积比, 其中禁止开发区包括生态与环境安全控制区、自然与文化遗产保护区, 林草业用途区包括林业用地区和牧业用地区; 指标 A_{11} 是由各单项指标综合计算得到的复合指标, 具体计算公式如下:

$$A_{11} = \sum_1^i \beta_i A s_i \quad (2)$$

式中: $A s_i$ 为指标 A_i 极差标准化之后的值; β_i 为对应权重, 采用AHP法与熵权法结合的方法进行取值, 本文分别为0.342、0.121、0.019、0.019、0.138、0.031、0.122、0.071、0.079、0.058; i 为要素层单项评价指标个数, 本文为10。

(2) 景观层指标解释

指标 B_1 具体计算公式如下:

$$B_1 = Exp \times CONTAG \quad (3)$$

式中: B_1 为评价单元的景观压力指数, 其值越大表示生态景观格局受到的压力越大。本文将生态景观划分为农用地景观 (包含要素层的水田和其他农用地)、建设用地景观 (对应要素层的建设用地) 以及生态用地景观 (对应要素层的生态用地)。Exp 为该评价单元从2010-2017年的建设用地景观面积增长率; CONTAG 为该评价单元从2010-2017年的建设用地景观蔓延度变化率。

指标 B_2 表示评价单元生态用地景观的景观连通度 (Connectance Index), 取值范围为 [0, 100], 值越大生态用地景观连通性越好; 指标 B_3 表示景观分割度 (Landscape Division Index), 取值范围为 [0, 1], 值越大表示生态用地景观在空间上分离程度越高; 指标 B_4 表示景观聚集度 (Aggregation Index), 取值范围为 [0, 100], 值越大表示生态用地景观空间分布越集聚; 指标 $B_5 \sim B_7$ 分别表示土地利用总体规划中生态相关用途区 (包含要素层的禁止开发区、基本农田保护区、风景旅游用地区、林草业用途区) 的景观连通度、景观分割度、景观聚集度; 指标 B_8 具体计算公式如下:

$$B_8 = \sum_1^i \gamma_i B s_i \quad (4)$$

式中: $B s_i$ 为指标 B_i 极差标准化之后的值; γ_i 为对应权重, 采用AHP法与熵权法结合的方法进行取值, 本文分别为0.337、0.141、0.072、0.124、0.138、0.068、0.120; i 为景观层单项评价指标个数, 本文为7。

(3) 系统层指标解释

指标 $C_1 \sim C_3$ 分别表示评价单元从2010-2017年的人口增长率、GDP增长率及工业产值增长率, 用以表示社会经济发展对人—地系统造成的压力; 指标 $C_4 \sim C_6$ 用以表示生态系统

服务功能； C_7 表示评价单元内国家级生态保护红线面积占比； C_8 表示评价单元所属的主体功能区类别，反映自然生态系统保护及社会经济系统发展导向的决策响应。

1.4 生态修复空间格局识别方法

1.4.1 全局自相关分析

全局空间自相关描述属性值的整体分布状况，选取Moran's I 指数来表征要素及景观层生态修复潜力指标 (A_{11} 、 B_8) 全局空间自相关程度，计算方法如下^[52]：

$$I(d) = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (5)$$

式中： x_i 和 x_j 分别是变量 x 在相邻配对空间点的取值； \bar{x} 是平均值； w_{ij} 是相邻权重（若空间点 i 和 j 相邻， $w_{ij}=1$ ，否则 $w_{ij}=0$ ）； n 是空间点总数。Moran's I 系数的取值为 $[-1, 1]$ ，小于0表示负相关，等于或接近0表示不相关，大于0表示正相关。

1.4.2 Getis-Ord G_i^* 热点分析

采用局部自相关分析中的热点分析方法，计算要素层和景观层生态修复潜力综合评价结果的Getis-Ord G_i^* 统计量，用以作为识别局部高值聚集和低值聚集的指标。通过得到显著统计学意义的 z 得分和 P 值，以此判断高值或低值要素在空间上发生的聚集位置，计算方法如下^[53]：

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j} \right)^2}{n-1}}} \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{x})^2} \quad (7)$$

式中： G_i^* 统计量是 z 得分； x_j 是要素 j 的属性值； $w_{i,j}$ 是要素 i 和 j 之间的空间权重（相邻为1，不相邻为0）； n 为要素总数； S 为标准差。若 $G_i^* > 0$ 并且通过显著性检验， G_i^* 越高，则表明热点聚集越密集，实施生态修复的必要性越高；如果 $G_i^* < 0$ 并且通过显著性检验， G_i^* 越低，表明冷点的聚集越密集，推行生态保护和恢复的必要性越高。

1.4.3 K-means 聚类分析

采用K-means算法对系统层评价指标进行空间聚类分析，从而得到县级单元生态修复分区。K-means聚类算法采用距离作为相似性的评价指标，即认为两个对象的距离越近，其相似度就越大。该算法认为簇是由距离靠近的对象组成的，因此把得到紧凑且独立的簇作为最终目标。该方法是经典的空间聚类方法，具体介绍见参考文献 [54, 55]，在此不再赘述。

1.5 数据来源

所用数据类型主要包括土地利用数据、土地利用规划数据、社会经济数据以及其他数据，数据具体来源及说明见表3。

表3 数据来源及说明
Table 3 Data source and description

数据类型	来源	数据时间	空间分辨率
土地利用数据	江苏省沿江八市土地利用变更调查数据库	2010年、2017年	1 : 10000
工业用地矢量数据	江苏省工业用地调查数据库	2016年	1 : 10000
土地利用规划数据	江苏省沿江八市乡级土地利用总体规划数据库	2020年	1 : 10000
社会经济数据	沿江八市统计年鉴	2010年、2017年	县级
EVI (MOD09A1)	https://search.earthdata.nasa.gov	2018年	500 m
土壤重金属含量数据	江苏省浅层土壤调查数据	2017年	2 km
生态保护红线数据	《江苏省国家级生态保护红线规划》	2018年	1 : 100000
主体功能区数据	《江苏省主体功能区规划》	2014年	县级

2 结果分析

2.1 评价结果

2.1.1 要素层评价结果

根据要素层生态修复评价指标计算结果, 将评价单元各指标计算的值(除土壤重金属污染指标)按自然断点法(Natural Break)划分为五个等级(图3a~图3k)。土地利用

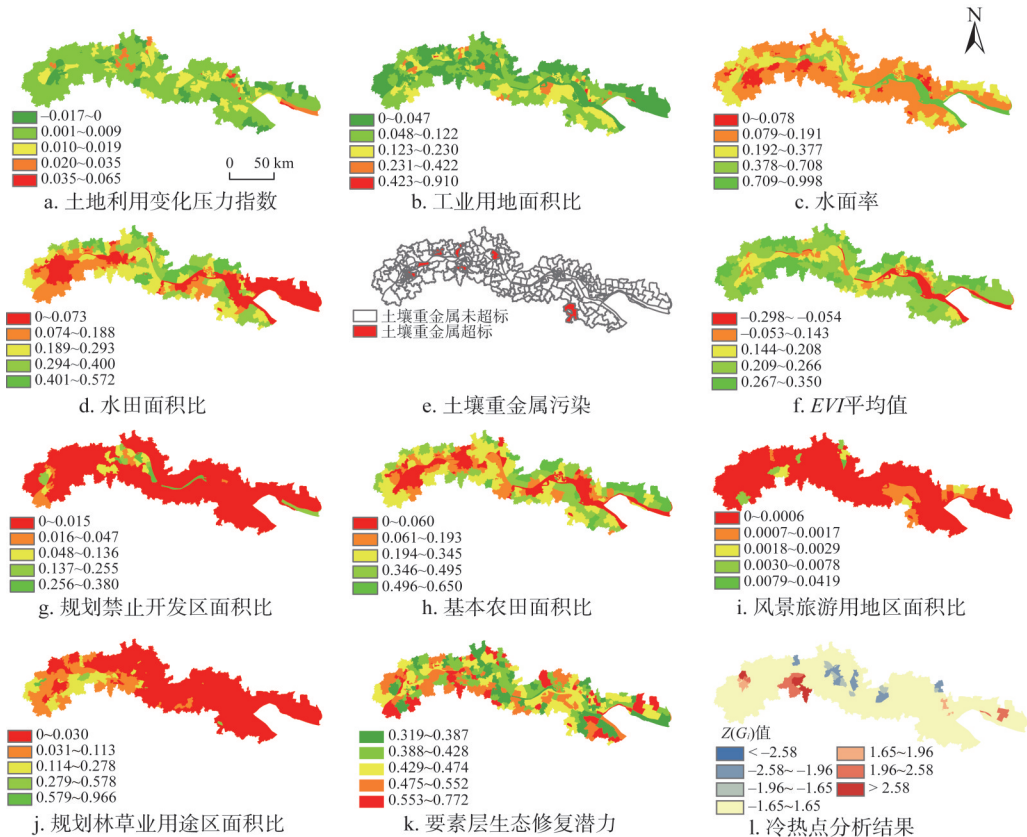


图3 要素层评价结果

Fig. 3 Map showing element level results

变化压力指数反映土地开发利用过程造成的生态胁迫,通过测算,江苏省长江沿线10 km范围镇域单元的土地利用变化压力指数平均值为0.0053,总体呈现建成区周边高、其他区域低,长江北岸高、南岸低的分布,土地利用变化压力较高的区域集中于长江北岸自扬州、镇江到南通启东市沿江区域一带。

状态指标中,研究区工业用地面积比平均值为0.093,无锡、苏州、南通长江沿线工业用地面积比较大。研究区水面率平均值为0.187,南京长江北岸、扬州沿江区域水面率较高,无锡、苏州等传统江南水乡地区以及南京长江南岸、南通市辖区水面率相对较低。研究区水田面积比平均值为0.145,总体呈东西低、中部高的分布趋势,扬州、泰州水田面积比最大,环长江入海口区域以及南京、镇江低山丘陵区水田面积比较小。研究区土壤重金属整体超标情况较少,仅在南京、南京、镇江、扬州部分镇域存在汞元素、铅元素、砷元素超标。区域内EVI年平均值为0.189,总体来看距离长江干流越远,EVI值越高。

以沿江八市土地利用总体规划矢量数据(2020年为规划年)为基础计算指标 $A_7 \sim A_{10}$ 等四个响应指标。禁止开发区严格禁止各类建设活动,是最有效的生态保护途径。研究区禁止开发区面积比平均值为0.015,大部分镇域占比较小,南京镇江邻接区域、镇江扬州长江沿线区域禁止开发区面积比较大。耕地是江苏长江沿线地区具有生态功能重要的用地类型,基本农田保护区划定能够通过限制开发建设活动,保护耕地生态功能。研究区基本农田面积比平均值为0.175,东段占比较高,西段占比较低。风景旅游用地区包含自然与人为景观,具有一定生态保护功能。研究区风景旅游用地区面积比平均值为0.0003,除南京江宁区、镇江句容市、泰州高港区等区域普遍占比较低。林草业用途区是土地利用规划中发展林业和牧业的用地区,江苏省沿江区域自然林地偏少,多为具有一定生态功能的人工林草地。研究区林草业用途区面积比平均值为0.030,主要集中分布在南京、镇江低山丘陵地区。

根据 $A_7 \sim A_{10}$ 计算结果,按照式(2)计算 A_{11} ,测算江苏省沿江镇域的生态修复潜力。通过计算可知江苏沿江镇域生态修复潜力平均值为0.460。使用ArcGIS空间自相关性分析工具测算生态修复潜力全局相关性,得到Moran's I 指数为0.029, P 值为0.802,未通过显著性检验,空间集聚不明显。使用ArcGIS中Getis-Ord G_i^* 热点分析工具分析镇域生态修复潜力,可以得到镇域生态修复冷热点空间分布(图31),热点区($G_i^* > 1.65$) P 值平均值为0.039,通过空间显著性检验;冷点区($G_i^* < -1.65$) P 值平均值为0.053,具有一定空间显著性。总体来看江苏沿江镇域生态修复潜力呈“大分散、小集聚”的特征,生态修复潜力热点区域主要集中于南京市老山以东江北新区、镇江市丹徒区等市辖区、南通启东市等,这些区域面临的生态压力较大,生态基础较薄弱,是生态修复的重点区域。生态修复冷点区域主要集中于江苏省长江中段,包括镇江扬中市沿江地区、常州市新北区北部、泰州泰兴市与靖江市沿江地区、南通通州区西部等,这些区域生态压力相对较小,具有生态功能的土地面积较大,并且通过土地利用规划对开发建设活动进行了一定限制,是生态保护与恢复的重点区域。

2.1.2 景观层评价结果

本文基于2010年及2017年两期土地利用数据,使用Fragstates软件计算涉及的景观指数。根据景观层生态修复评价指标计算结果,将评价单元各指标计算的值(除土壤重金属污染指标)按自然断点法(Natural Break)划分为五个等级(图4a~图4g)。景观压

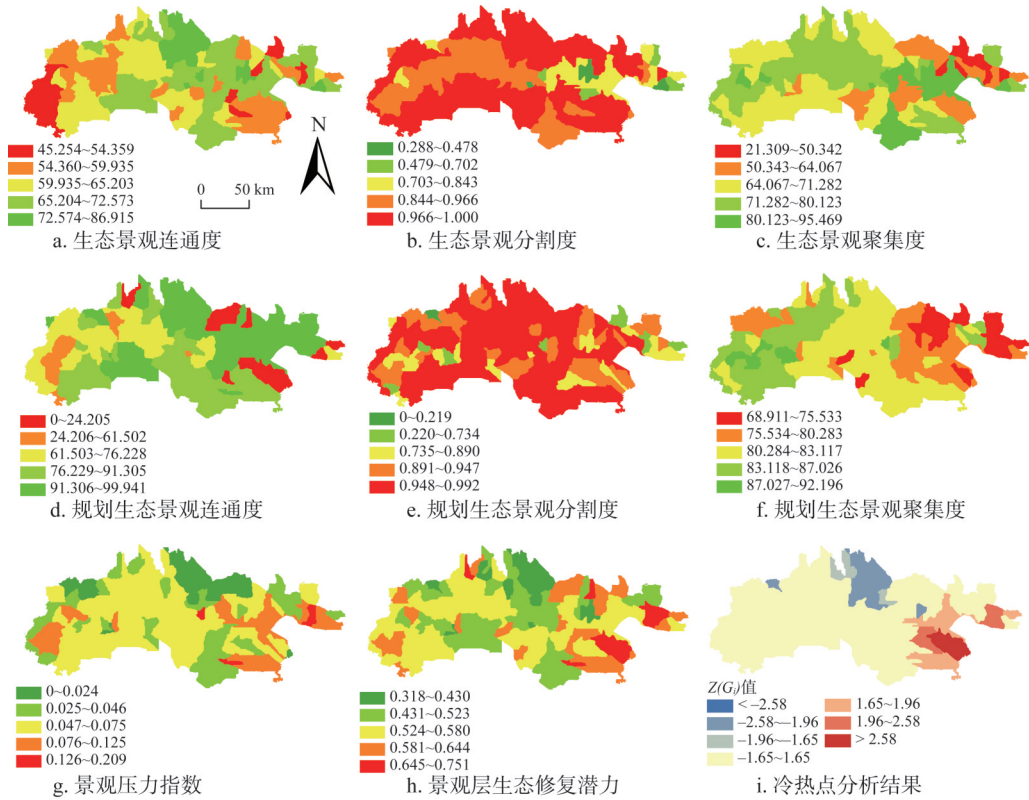


图4 景观层评价结果

Fig. 4 Landscape level results

力指数表示建设用地景观面积增长与布局延展的趋势，从而反映建设用地扩张对生态景观造成的压力。研究区景观压力指数平均值为0.056，总体普遍偏高，其中环长江入海口区域景观压力最大。

生态景观连通度、分割度、聚集度用于表征生态景观在空间上连通、分离和集聚的状况，研究区生态景观连通度、分割度、聚集度平均值分别为62.92、0.890、69.09，生态景观连通度呈东西两段低、中段高的布局，南京、镇江区域受地形与城乡用地布局影响，生态景观连通性最低。研究区生态景观分割度、生态景观聚集度与距离长江干流距离呈正相关，除长江入海口北岸地区，长江岸线区域较长江沿线腹地生态景观更为集聚。

基于土地利用规划用途区数据，计算规划期具有生态功能用地景观的连通度、分割度与聚集度，表征规划决策对生态压力的响应程度。研究区规划生态景观连通度、分割度与聚集度平均值分别为73.57、0.901、80.59。受地形影响，研究区规划生态景观连通度总体呈西低东高趋势，但苏州张家港及泰兴市沿江区域景观连通度最低。研究区规划生态景观分割度普遍较高，表明土地利用规划对可能造成的生态景观分离考虑不足。研究区规划生态景观聚集度呈西高东低趋势，在长江入海口等现状生态景观聚集度较高区域，规划生态景观聚集度反而较低，表明规划响应对生态景观集聚性可能造成进一步的压力。

根据指标 $B_1 \sim B_7$ 计算结果，按照式(4)计算 B_8 (图4h)。通过计算可知江苏沿江小流

域生态修复潜力平均值为0.435。使用ArcGIS空间自相关性分析工具计算得到 P 值为0.0007,通过显著性检验, Moran's I 指数为0.214,具有一定空间集聚性。使用ArcGIS中Getis-Ord G_i^* 热点分析工具计算得到小流域生态修复潜力冷热点区域分布(图4i)。热点区($G_i^* > 1.65$) P 值平均值为0.031,冷点区($G_i^* < 1.65$) P 值平均值为0.048,均通过空间显著性检验。结果显示,江苏省沿长江小流域生态修复潜力具有明显的组团特征,热点区主要集中于环长江入海口区域,冷点区主要集中于扬泰平原区。

2.1.3 系统层评价结果

系统层评价主要包括对社会经济系统压力、自然生态系统功能现状以及规划决策响应的评价。基于2010年和2017年社会经济数据,计算研究区人口、GDP、工业产值增长率(图5a~图5c)。结果显示,研究区人口增长率平均值为0.114,增长率较高区域主要集中于无锡、苏州地区,但同时该区域部分县域人口呈负增长。研究区GDP增长率平均值为1.211,苏锡常等传统长三角经济发达区,除江阴市、新北区、新吴区等之外的县域GDP近年增速相对较慢,南京市总体GDP增速相对较高。研究区工业产值增长率平均值为0.623,南京部分区县以及长江以北地区工业产值增长较快,这些区域也是研究区生态基础较优的地区,可能面临工业发展带来的生态压力。

依据张晓琳等^[56]的研究结果,本文分析了研究区自然生态系统的水源涵养功能、固碳功能及生境质量(图5d~图5f)。研究区2015年水源涵养量、固碳量以及生境质量值的平均值分别为 $54.154 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $150.960 \times 10^6 \text{ t}$ 和0.208。研究区西南山地丘陵区及长江入海口以北区域水源涵养功能较高,环太湖平原区及扬泰平原区水源涵养功能较低。研究区内除环太湖区域以及南京、镇江、南通主城区范围外,生态系统固碳功能较高。长江以南生境质量总体优于长江以北地区。

生态保护红线是今后实施国土空间用途管制、推进生态保护的重要依据。生态红线划定面积一方面受区域生态本底影响,另一方面反映了区域生态管控强度。研究区平均生态红线面积比为0.076,比例较大区域主要包括环太湖区域以及京杭运河流域,苏锡常及南通、泰州沿江区域生态红线划定面积比较低(图5g)。主体功能区规划明确了县级行政单元的社会经济发展主导方法,体现国土开发、利用或保护的主体思路,对生态保护修复方向有重要影响。研究区包括优化开发区、重点开发区及农产品主产区三类主体功能区,长江沿线北岸全部县级单元为重点开发区,长江以南多数经济较发达县级单元为优化开发区,而距离长江干流较远的扬州、泰州、南通、南京、常州部分为农产品主产区(图5h)。

以指标 $C_1 \sim C_8$ 计算结果为分类依据,使用Geoda 1.14软件对评价单元进行K-means空间聚类分析,采用Queen邻接方法构建空间权重矩阵。经实验,聚类数为5时可以在保证分区具有相对独立特征的同时避免分区过度碎片化,由此得到县级单元的空间聚类结果(图5i)。对比分析可知,聚类结果与主体功能区规划具有较高的一致性,但在南京市主城区、环太湖地区、镇江丹阳市和扬中市等区域出现差异。对五个聚类分区进行指标结果统计分析(表4),结果显示聚类I生态系统具有较高的水源涵养量功能和固碳功能,工业产值增长率最低,主导主体功能区类型为优化开发区,社会经济发展水平在各分区中最高,具有良好的生态基础和经济基础,具备开展生态修复的良好条件。聚类II的GDP和工业产值增长率较高,由于包括了西南山地丘陵区、部分平原水网区,平均生境质量相对较好。总体上聚类II具有农业生产、工业生产与生态复合功能,应兼顾生态

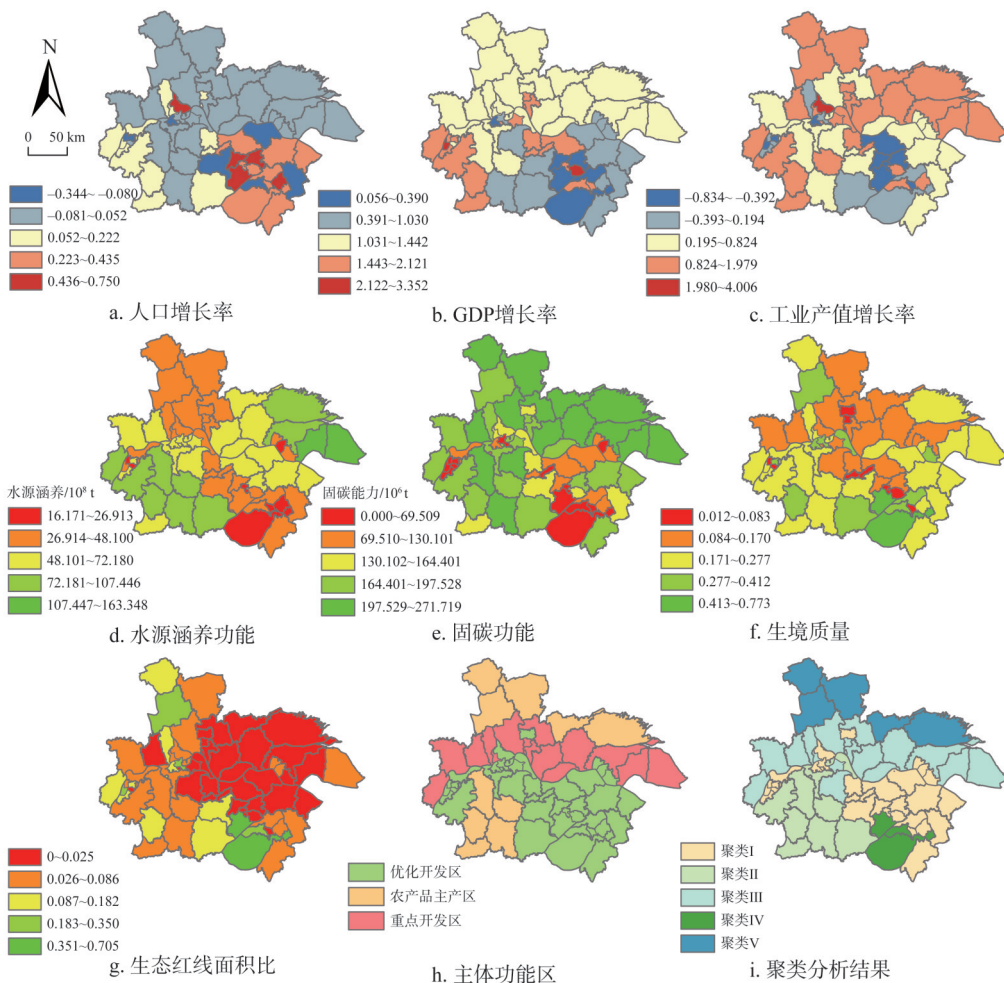


图5 系统层评价结果图

Fig. 5 Map showing system level results

表4 聚类分区指标统计表

Table 4 Statistical table of cluster indexes

聚类分区	县级单元数/个	国土面积/km ²	平均人口增长率/%	平均GDP增长率/%	平均工业产值增长率/%	水源涵养量/10 ⁸ t	固碳量/10 ⁶ t	平均生境质量	平均生态红线面积占比/%	主体功能区类型
聚类 I	31	12154.66	19.05	117.08	36.90	1289.39	3212.70	0.174	5.29	优化开发区
聚类 II	10	10258.23	3.80	124.07	72.61	795.83	1832.41	0.282	8.59	农产品主产区 优化开发区
聚类 III	17	15660.15	3.00	133.06	91.95	1122.60	3589.46	0.157	2.86	重点开发区
聚类 IV	3	3192.08	25.11	63.97	39.83	106.02	188.36	0.618	54.17	优化开发区
聚类 V	5	9754.22	-1.03	133.90	111.62	260.35	1140.36	0.202	8.11	农产品主产区

保护与生态修复。聚类 III 生态系统的固碳功能在各分区中最高, 但平均生态红线面积占比最低, 且所有县级单元均为重点开发区, 是当前长江沿线生态保护压力最大的区域。聚类 IV 的 GDP 和工业产值增长率最低, 但生境质量显著优于其他分区, 同时生态保护红

线划定面积比例较大,是当前长江沿线生态保护核心区域。聚类V全部县级单元为农产品主产区,但GDP和工业产值增长率最高,各类生态功能相对较低,生态质量可能进一步降低。

2.2 生态修复格局与对策建议

区域生态修复是一项系统工程,依赖政府决策与管控、规划引导、市场调控、工程项目建设、宣传教育等复合途径。本文根据要素层、景观层和系统层的指标评价及空间分析结果,进行江苏省长江沿线生态修复总体格局构建,针对不同区域、不同类型的生态修复区提出生态修复对策建议。生态修复总体格局主要由点、线(带)、面等组成。首先以系统层聚类分析结果为依据,确定生态修复总体分区(图6)。以区位及分区特征为主要命名依据,将五个聚类分区命名为沿江城镇群生态修复区、长江南岸生态腹地保护修复区、沿江发展带生态修复区、太湖周边生态修复区、长江北岸生态腹地保护修复区。

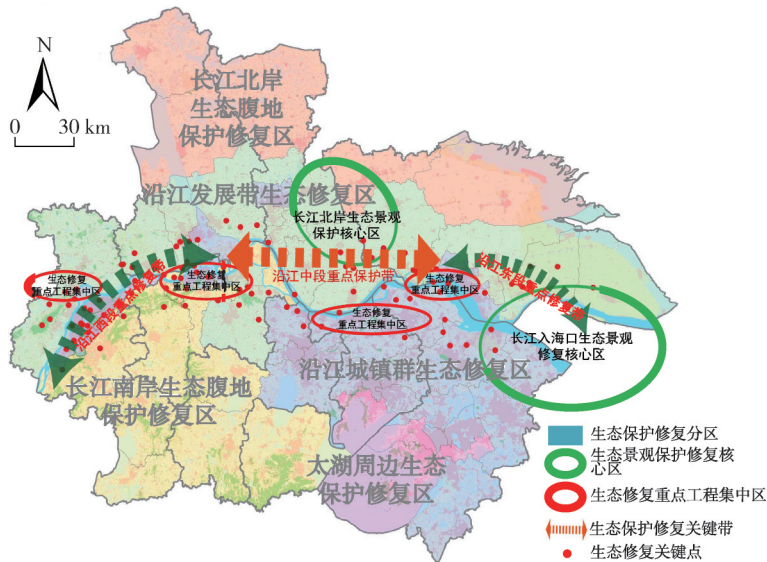


图6 生态修复总体格局

Fig. 6 Overall structure of ecological restoration

(1) 沿江城镇群生态修复区。此区包括除苏州外各市主城区以及苏州、无锡、常州大部分县域,该区域是沿江八市经济最发达区域,但该区域工业化、城市化快速发展造成了严重生态环境破坏,传统江南水乡景观逐渐丧失。该区域近年来逐渐推进产业转型升级和生态环境保护,但生态功能下降的趋势尚未扭转^[57],今后应进一步加强用地管制,推进建设用地减量化发展,推进产业转型升级;通过制定国土空间规划,提高生态用地比例,优化三生用地结构,在区域生态斑块破碎的背景下,加强生态廊道建设,提升生态连通性;开展长江岸线整治修复,降低岸线港口、工业等用地造成的生态影响,提升长江岸线与腹地的生态连通性;实施国土综合整治与生态修复工程,对已受损的污染地块、工矿废弃地、污染水体进行修复;进行区域特色生态设计,提升江南水乡景观风貌。

(2) 长江南岸生态腹地保护修复区包括南京南部、镇江和常州西部等区域,是沿江八市山地丘陵面积最大的区域,林草覆盖率、水面率较高,生态环境相对较好。该区域

中的南京江宁区、溧水区、高淳区、常州金坛区等经济增速较快,特别是江宁区正处于建设用地快速增长阶段。该区域应优化发展路径,降低地耗(单位GDP增长需要的新增建设用地面积),并行推进生态保护与修复;合理划定生态保护红线与永久基本农田,严格限制生态功能区的开发利用活动;加强自然保护地建设,进一步提升茅山、宝华山、长荡湖、天目湖等重要生态区生态功能;保护宁镇至茅山山脉分布的大量库塘湿地,提升湿地水体质量,遏制富营养化趋势;推进乡村规划编制,建设人、地、业协调的美丽乡村,提升江南水乡文化与景观特色;加强农用地整治,优化农用地结构,控制草地、苗圃等可能造成土壤流失的作物种植,控制农业面源污染,修复高强度作物种植造成的耕地破坏。

(3) 沿江发展带生态修复区是研究区内经济增长与工业发展最快的区域之一,同时是主体功能区定位的重点开发区。该区域贯穿长江沿线东西,包含老山国家森林公园、京杭运河、扬州泰州南通滨江湿地等重要生态源地,以及长江豚类自然保护区等生物多样性保护区,具有较高的水源涵养与固碳功能。该区域是当前沿江生态保护压力最大的区域,工业发展与建设用地快速扩张造成农用地与生态用地损失。该区域应权衡经济发展与生态保护关系,推进产业集聚绿色发展,控制新增建设用地规模,增划生态保护红线,严格保护森林、湿地、水域等重要生态用地;通过实施多功能土地综合整治,在保障粮食生产功能前提下进一步提升规模化水田的固碳与水源涵养功能;优化整合港口用地,加快工矿废弃地复垦复绿;实施海岸带整治修复,恢复滩涂湿地,保护自然岸线。

(4) 太湖周边生态修复区是江苏长江沿线最重要的生态源地,具有重要的生态净化、洪水调蓄、气候调节、维护生物多样性、饮用水供应功能,同时太湖周边也是苏南地区人口最密集、经济发展水平最高、建设用地密度最高的区域,也是当前生态修复潜力最高、难度最大的区域。该区域应进一步加强产业转型升级,推进太湖流域水环境综合治理,恢复沿湖湿地;开展生态农业与生态渔业建设,开展退田(圩)还湖(湿);建立太湖流域污染监测预警体系,严格控制水、土污染,修复已受损用地,优先调整为生态用地。

(5) 长江北岸生态腹地保护修复区包括扬州、泰州、南通北部区域,是研究区内重要的农产品主产区,同时也是工业产值增长最快区域。该区域是连接长江流域与淮河流域的通道,应优先保障生态系统连通性。该区域包含了宝应湖、高邮湖等重要湿地及兴化垛田等文化生态景观。应合理规划开发建设活动,减少生态负面效应;提升水系连通性,优化水网结构;实施农村土地综合整治,适当开展居民点用地复垦,提升农用地集中连片规模。

根据景观层冷热点分析结果,可以识别生态景观保护修复核心区,包括长江入海口生态景观修复核心区以及长江北岸生态景观保护核心区。环长江入海口区域生态景观分割度较高,并且面临土地利用规划导致的生态景观进一步破碎。该区域应在今后国土空间规划编制中重点关注生态景观布局优化,提升生态景观集聚性与连通性。长江北岸生态景观保护核心区的生态景观均质性较高,但面临建设用地扩张风险,应在国土空间规划编制过程中尝试划定“生态景观集中保护区”,限制开发建设活动。同时应鼓励农用地流转,促进具有生态功能的农用地进一步集中连片。

通过分析要素层生态修复关键点及冷热点空间分布特征,可以识别得到生态修复重

点工程集中区及生态保护修复关键带。长江东段、西段生态修复潜力热点区为重点修复关键带,该区域特别是沿江岸线区域是重化围江密集区,应依据相关规划推进化工污染企业专项整治,降低重化工企业数量和排污总量;整治违法违规岸线利用项目,调整码头布局,整治占用长江岸线、围垦长江滩地及水面项目,并对腾退的岸线资源进行统一生态建设规划;针对土壤污染问题实施土壤修复工程项目。长江中段生态修复冷点区为重点保护关键带,该区域分布有大量滨江湿地,但湿地生态环境质量一般,河流、湖泊水体水质较差,高强度经济活动对湿地的干扰持续存在。该区域应统一编制长江岸线生态保护与建设相关规划,系统实施护堤护岸造林、岸线复绿、沿线城镇村庄绿化等项目,建设沿江两岸护堤护岸林带体系,实施滨江绿化生态廊道建设工程试点,建设滨江公园绿地、风景林地、湿地公园等。

提取要素层生态修复潜力最高和较高两级单元,使用ArcGIS中要素转点工具得到97个生态修复关键点。针对不同类型的生态修复关键点,实施相应生态修复工程,包括破损山体修复工程、城市环境整治工程、矿山废弃地整治工程、污染土地治理工程、水环境治理工程、防护林带建设工程、湿地修复工程等。其中针对南京江北新区、镇江扬州滨江地区、苏锡常沿江地区、南通中心城区等生态修复重点工程集中区,实施生态修复重大行动,集中连片推进生态修复工程项目建设。

3 结论与讨论

3.1 结论

生态修复作为一项全球议题,当前在中国面临紧迫的实践与研究需求。狭义的生态修复主要指各类生态工程与环境保护措施。面对当前日渐复杂化、系统化、区域化的生态问题,实施多尺度、多途径、多要素的系统性生态修复已成为共识。江苏省长江沿线区域是长江经济带生态保护与经济发展矛盾最突出的区域,本文针对江苏省长江沿线镇级单元、小流域单元及县级单元,采用文献综述法梳理了区域生态问题,借鉴土地利用科学、景观生态学、人地系统科学相关理论与方法,按照宏观、中观、微观尺度进行了生态修复内涵解析,并按照“要素—景观—系统”三个维度构建了生态修复潜力评价体系;然后基于Getis-Ord G_i^* 热点分析、K-means聚类分析等方法识别了生态修复热点与分区,从而构建由点、线(带)、面构成的生态修复格局,并提出针对不同区域的空间发展方向与生态管控修复对策。研究发现:

(1)生态修复具有多尺度性、对象复合性及途径多样性。宏观尺度生态修复聚焦社会经济发展引导、空间布局统筹以及区域生态修复规划,通过优化生态网络结构、实施生态分区管控、建设重大生态工程实现生态系统改善;中观层面侧重生态景观优化,通过国土空间规划调整土地利用要素布局,提升生态连通性与集聚性;微观尺度生态修复主要包括生态工程项目建设、生态管制、生态化设计等具体措施。不同尺度的生态修复通过不同级别与类型规划来衔接。

(2)研究区要素层生态修复潜力最小值为0.319,最大值为0.772,平均值为0.460。要素层生态修复潜力空间分布呈“大分散、小集聚”的特征,生态修复热点区主要分布于南京江北新区、镇江扬州沿江区域及南通启东市沿江区域,生态修复冷点区主要分布于长江以北扬州至南通一带;景观层生态修复潜力最小值为0.318,最大值为0.751,平

均值为0.435。景观层生态修复潜力具有一定空间集聚特征,热点区主要集中于环长江入海口区域,冷点区集中于扬泰平原区;对县级单元系统层评价结果进行聚类,可得到五个分区,在人口经济变化趋势、工业发展速度、生态功能、政策方向等方面具有相异的特征。

(3) 依据评价结果可以构建“五区、三带、两核心”的生态修复总体格局,包括沿江城镇群生态修复区、长江南岸生态腹地保护修复区、沿江发展带生态修复区、太湖周边生态修复区、长江北岸生态腹地保护修复区,沿江东段重点修复带、西段生态景观修复关键带、中段生态景观保护关键带以及长江入海口生态景观修复核心区、长江北岸生态景观保护核心区,此外还筛选出97个生态修复关键点,以及4个生态修复重点工程集中区。针对不同生态修复区域,依据区域特征,可从发展导向、空间管控方向、关键修复对象、生态修复工程措施等方面制定生态修复对策。

3.2 讨论

生态修复不仅是人类改造空间与资源利用方式的途径与过程,更是人地系统发展的长期目标。生态修复概念直观对象是“生态”,但其潜在及根本修复对象是“人”。生态修复解决的主要矛盾是社会经济发展与生态保护的矛盾,只有通过理念革新、管理优化、技术进步等途径,不断降低人类发展对自然生态产生的负面效应,才可能实现可持续、系统性的生态修复。因此,生态修复不仅解决人类活动已经造成的历史问题,更应面向未来可持续发展。江苏省长江沿线区域是长江经济带经济发展与生态保护矛盾最突出的区域,然而当前该区域相关规划(土地利用总体规划、主体功能区规划、生态保护红线规划等)仍体现出“先发展、后修复”的思路。为解决这一矛盾,首先应优化创新发展路径,探索绿色、集约、可持续的经济发展方式;其次是在新一轮国土空间规划中尝试开展生态修复导向的空间布局优化;最后应加快区域间生态补偿机制构建,确保生态保护与经济发

展的区域均衡。

本文立足当前中国生态修复实践的现实需求,针对江苏省长江沿线区域这一关键区域,考虑生态修复的系统性、尺度性等特征,建立了基于“要素—景观—系统”框架的生态修复潜力评价体系,构建了点、线(带)、面等结构组成的生态修复格局,并提出了相应的对策建议。本文可为识别江苏省长江沿线生态问题、开展生态修复规划编制与工程建设提供参考,同时可为探索生态修复规划范式、丰富生态修复内涵解析体系提供思路借鉴。本文也存在一定不足:生态网络格局构建与优化是宏观尺度生态修复的重要内容,由于研究区不是封闭的生态单元,应当将其置于范围更广区域内进行生态网络构建分析,以得到完整生态结构;但受数据获取限制,本文的实证分析部分未进行生态网络构建。此外本文评价指标体系构建侧重框架思路,指标选取难以面面俱到,今后应在实际应用中结合区域特征和数据可获得性,按照评价框架尽可能多地选取具有代表性的指标,使评价结果更加丰富精确。

参考文献(References):

- [1] ROMANELLI J P, FUJIMOTO J T, FERREIRA M D, et al. Assessing ecological restoration as a research topic using bibliometric indicators. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 311-320.
- [2] LIU J, DIAMOND J. China's environment in a globalizing world. *Nature*, 2005, 435(7046): 1179-1186.
- [3] 郭旭东, 谢俊奇. 新时代中国土地生态学发展的思考. *中国土地科学*, 2018, 32(12): 1-6. [GUO X D, XIE J Q.

- Thoughts on the recent development of land ecology in the new era of China. *China Land Science*, 2018, 32(12): 1-6.]
- [4] 陈从喜, 马永欢, 王楠, 等. 生态国土建设的科学内涵和基本框架. *资源科学*, 2018, 40(6): 1130-1137. [CHEN C X, MA Y H, WANG N, et al. Scientific connotation and basic paths for constructing ecological land. *Resources Science*, 2018, 40(6): 1130-1137.]
- [5] ROMANELLI J P, FUJIMOTO J T, FERREIRA M D, et al. Assessing ecological restoration as a research topic using bibliometric indicators. *Ecological Engineering*, 2018, 120: 311-320.
- [6] 王威, 贾文涛. 生态文明理念下的国土综合整治与生态保护修复. *中国土地*, 2019, (5): 29-31. [WANG W, JIA W T. Integrated territory consolidation and ecological protection and restoration under the concept of ecological civilization. *China Land*, 2019, (5): 29-31.]
- [7] 中共中央国务院. 关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见. http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm, 2019-05-23. [CPC Central Committee & The State Council. Some opinions on the establishment and supervision of the implementation of Territory Space Planning System. http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm, 2019-05-23.]
- [8] HORPPILA J. Sediment nutrients, ecological status and restoration of lakes. *Water Research*, 2019, 160: 206-208.
- [9] AWASTHI A, SINGH K, SINGH R P. A concept of diverse perennial cropping systems for integrated bioenergy production and ecological restoration of marginal lands in India. *Ecological Engineering*, 2017, 105: 58-65.
- [10] VOLIS S. Conservation-oriented restoration: A two for one method to restore both threatened species and their habitats. *Plant Diversity*, 2019, 41(2): 50-58.
- [11] WALTERS G, BARUAH M, KARAMBIRI M, et al. The power of choice: How institutional selection influences restoration success in Africa. *Land Use Policy*, 2019: 104090. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104090>.
- [12] GOCHEVA K, LYU Y, LI F, et al. Ecosystem restoration in Europe: Can analogies to Traditional Chinese Medicine facilitate the cross-policy harmonization on managing socio-ecological systems?. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1553-1567.
- [13] RYDSTEDT L W, JOHNSEN S Å K. Towards an integration of recovery and restoration theories. *Heliyon*, 2019, 5(7): e2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02023>.
- [14] WANG J, LIU Y, LI Y. Ecological restoration under rural restructuring: A case study of Yan'an in China's Loess Plateau. *Land Use Policy*, 2019, 87: 104087. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104087>.
- [15] OUYANG Z Y, ZHENG H, XIAO Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [16] YU B, XU L. Review of ecological compensation in hydropower development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 729-738.
- [17] 牛最荣, 陈学林, 黄维东, 等. 阿尔金山东端北部区域生态环境修复模式研究. *冰川冻土*, 2019, 41(2): 275-281. [NIU Z R, CHEN X L, HUANG W D, et al. Study on the restoration model of ecological environment in the northern part of the eastern end of the Altun Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(2): 275-281.]
- [18] 牛远, 胡小贞, 王琳杰, 等. 抚仙湖流域山水林田湖草生态保护修复思路与实践. *环境工程技术学报*, 2019, 9(5): 482-490. [NIU Y, HU X Z, WANG L J, et al. Ideas and practice of ecological protection and restoration of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland system in Lake Fuxian Basin. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(5): 482-490.]
- [19] 吴运连, 谢国华. 赣州山水林田湖草生态保护修复试点的实践与创新. *环境保护*, 2018, 46(13): 80-83. [WU Y L, XIE G H. Practice and innovation of ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-fields-lakes-grass in Ganzhou. *Environmental Protection*, 2018, 46(13): 80-83.]
- [20] 郎亮明, 徐涛, 刘国彬, 等. 农户生态修复行为与修复效果间的互馈效应研究: 基于陕北地区调查数据的实证分析. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(6): 57-63. [LANG L G, XU T, LIU G B, et al. The mutual effect between farmers' ecological restoration and social-economic benefit of restoration project. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(6): 57-63.]
- [21] 曹世雄, 刘伟, 赵麦换, 等. 延安市生态修复双赢模式实证研究. *生态学报*, 2018, 38(22): 7879-7885. [CAO S X, LIU W, ZHAO M H, et al. Test of a win-win path for ecological restoration in Yan'an city. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(22): 7879-7885.]
- [22] SUN J, YUAN X, LIU H, et al. Emergy evaluation of a swamp dike-pond complex: A new ecological restoration mode of coal-mining subsidence areas in China. *Ecological Indicators*. 2019, 107: 105660. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105660>.
- [23] 周伟. 生态环境保护与修复的多元主体协同治理: 以祁连山为例. *甘肃社会科学*, 2018, (2): 250-255. [ZHOU W. Coordinated management of multiple subjects in ecological environment protection and restoration: A case study of Qilian

- Mountain. *Gansu Social Sciences*, 2018, (2): 250-255.]
- [24] 骆汉, 胡小宁, 谢永生, 等. 生态治理技术评价指标体系. *生态学报*, 2019, 39(16): 5766-5777. [LUO H, HU X N, XIE Y S, et al. An evaluation index system for ecological management technology. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 5766-5777.]
- [25] XU X, ZHANG D, ZHANG Y, et al. Evaluating the vegetation restoration potential achievement of ecological projects: A case study of Yan'an, China. *Land Use Policy*, 2020, 90: 104293. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104293>.
- [26] QIN H, WANG Y, ZHANG F, et al. Application of species, phylogenetic and functional diversity to the evaluation on the effects of ecological restoration on biodiversity. *Ecological Informatics*, 2016, 32: 53-62.
- [27] WU Z, WU X, YANG Z, et al. A simple thermodynamic model for evaluating the ecological restoration effect on a manganese tailing wasteland. *Ecological Modelling*, 2017, 346: 20-29.
- [28] 曹永强, 郭明, 刘思然, 等. 基于文献计量分析的生态修复现状研究. *生态学报*, 2016, 36(8): 2442-2450. [CAO Y Q, GUO M, LIU S R, et al. Research on the current situation of ecological restoration based on bibliometric analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8): 2442-2450.]
- [29] 曹宇, 王嘉怡, 李国焜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知. *中国土地科学*, 2019, 33(7): 1-10. [CAO Y, WANG J Y, LI G Y. Ecological restoration for territorial space: Basic concepts and foundations. *China Land Science*, 2019, 33(7): 1-10.]
- [30] 刘俊国, 赵丹丹, 叶斌. 雄安新区白洋淀生态属性辨析及生态修复保护研究. *生态学报*, 2019, 39(9): 3019-3025. [LIU J G, ZHAO D D, YE B. Ecological attributes, restoration, and protection of the Baiyangdian in Xiong'an New district. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3019-3025.]
- [31] 邹辉, 段学军. 长江经济带经济—环境协调发展格局及演变. *地理科学*, 2016, 36(9): 1408-1417. [ZOU H, DUAN X J. Pattern Evolution of economy-environment coordinated development in the Changjiang River Economic Belt. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(9): 1408-1417.]
- [32] 徐梦佳, 刘冬, 葛峰, 等. 长江经济带典型生态脆弱区生态修复和保护现状及对策研究. *环境保护*, 2017, 45(16): 50-53. [XU M J, LIU D, GE F, et al. Study on the ecological restoration and protection countermeasures in the typical ecological fragile zone of Yangtze River Economic Belt. *Environmental Protection*, 2017, 45(16): 50-53.]
- [33] 郜志云, 姚瑞华, 续衍雪, 等. 长江经济带生态环境保护修复的总体思考与谋划. *环境保护*, 2018, 46(9): 13-17. [GAO Z Y, YAO R H, XU Y X, et al. General thinking and planning of promoting the ecological environmental protection and restoration in the Yangtze River Economic Belt. *Environmental Protection*, 2018, 46(9): 13-17.]
- [34] 李焕, 黄贤金, 金雨泽, 等. 长江经济带水资源人口承载力研究. *经济地理*, 2017, 37(1): 181-186. [LI H, HUANG X J, JIN Y Z, et al. Population carrying capacity of water resources in the Yangtze River Economic Belt. *Economic Geography*, 2017, 37(1): 181-186.]
- [35] 陈诚, 陈雯, 赵海霞. 江苏沿江地区生态保护与产业分布空间匹配格局分析. *地理研究*, 2011, 30(2): 269-277. [CHEN C, CHEN W, ZHAO H X. Spatial matching pattern between industrial space and ecological protection in areas along the Yangtze River in Jiangsu province. *Geographical Research*, 2011, 30(2): 269-277.]
- [36] 江慧, 陈惟肖. 江苏省长江岸线管控分区与措施研析. *环境影响评价*, 2019, 41(4): 16-19. [JIANG H, CHEN W X. Study on delimitation and control measures of Yangtze River shoreline resources in Jiangsu province. *Environmental Impact Assessment*, 2019, 41(4): 16-19.]
- [37] 施和金. 江苏长江岸线的历史变迁与沿江开发应注意的问题. *历史地理*, 2007, (0): 212-219. [SHI H J, The historical changes of Jiangsu Yangtze River Coastline and the problems to the development along the Yangtze River. *Historical Geography*, 2007, (0): 212-219.]
- [38] 周思悦, 何金廖, 黄贤金. 江苏长江内河港口群竞争格局与一体化发展研究. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(3): 493-502. [ZHOU S Y, HE J L, HUANG X J. Competition pattern and integration development of inland ports of Yangtze River in Jiangsu province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(3): 493-502.]
- [39] 施少华, 杨桂山, 林承坤. 长江中下游河道岸线的整治与开发利用. *地理科学*, 2002, 22(6): 700-704. [SHI S H, YANG G S, LIN C K. Governing and explore the water front resources at middle and lower reaches of the Yangtze River. *Science Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 700-704.]
- [40] 陈诚, 甄云鹏. 江苏省长江岸线资源利用变化及合理性分析. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 633-642. [CHEN C, ZHEN Y P. Analysis on the waterfront resources utilization change and reasonableness along the Yangtze River in Jiangsu province. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(4): 633-642.]
- [41] 刘燕, 赵海霞. 污染型制造业空间格局演变的特征及影响因素分析: 以长江经济带中下游地区为例. *世界地理研究*, 2019, 28(4): 96-104. [LIU Y, ZHAO H X. Characteristics and influencing factors of spatial evolution of polluting manufacturing: A case study of the Middle and Lower Yangtze River Economic Belt. *World Regional Studies*, 2019, 28(4): 96-104.]

- [42] 陈欢, 陈雯, 曹有挥, 等. 江苏苏中3市的沿江岸线资源开发利用变化及驱动因素. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 711-718. [CHEN H, CHEN W, CAO Y H, et al. Changes of exploration of riverbank resources along Middle Jiangsu Reaches of the Yangtze River and its driving mechanism. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5): 711-718.]
- [43] 段学军, 邹辉. 长江岸线的空间功能、开发问题及管理对策. 地理科学, 2016, 36(12): 1822-1833. [DUAN X J, ZOU H. Development problems and management countermeasures of waterfront resources along the Changjiang River. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(12): 1822-1833.]
- [44] XIONG X, QIAN Z, MEI Z, et al. Trace elements accumulation in the Yangtze finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis asiaeorientalis*): A threat to the endangered freshwater cetacean. Science of the Total Environment, 2019, 686: 797-804.
- [45] ZHAO X, BARLOW J, TAYLOR B L, et al. Abundance and conservation status of the Yangtze finless porpoise in the Yangtze River, China. Biological Conservation, 2008, 141(12): 3006-3018.
- [46] PENG B, LI Y, ELAHI E, et al. Dynamic evolution of ecological carrying capacity based on the ecological footprint theory: A case study of Jiangsu province. Ecological Indicators, 2019, 99: 19-26.
- [47] 顾铮鸣, 金晓斌, 沈春竹, 等. 近15 a江苏省水源涵养功能时空变化与影响因素探析. 长江流域资源与环境, 2018, 27(11): 2453-2462. [GU Z M, JIN X B, SHEN C Z, et al. Variation and influence factors of water conservation service function in Jiangsu province from 2000-2018. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(11): 2453-2462.]
- [48] GAO J, YU Z, WANG L, et al. Suitability of regional development based on ecosystem service benefits and losses: A case study of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration, China. Ecological Indicators, 2019, 107: 105579. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105579>.
- [49] 江苏省生态环境厅. 江苏省长江经济带生态环境保护实施规划. http://hbt.jiangsu.gov.cn/art/2018/3/15/art_51347_7676784.html, 2018-06-12. [Department of Ecology and Environment of Jiangsu Province. Implementation Plan Of Ecological Environment Protection In Yangtze River Economic Belt of Jiangsu province. http://hbt.jiangsu.gov.cn/art/2018/3/15/art_51347_7676784.html, 2018-06-12.]
- [50] 朱治州, 钟业喜. 长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1520-1530. [ZHU Z Z, ZHONG Y X. Spatio-temporal evolution of land use and ecosystem service value in Yangtze River Delta Urban Agglomeration. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(7): 1520-1530.]
- [51] XU W, JIN J, JIN X, et al. Analysis of changes and potential characteristics of cultivated land productivity based on MODIS EVI: A case study of Jiangsu province, China. Remote Sensing, 2019, 17(11): 2041. <https://doi.org/10.3390/rs11172041>.
- [52] 高凤杰, 单培明, 马泉来, 等. 黑土耕作区土壤含水量空间自相关及农业生产分区. 自然资源学报, 2017, 32(11): 1930-1941. [GAO F J, SHAN P M, MA Q L, et al. Spatial autocorrelation of soil moisture and agricultural zoning in a mollisol tillage area of Northeast China. Journal of Natural Resources, 2017, 32(11): 1930-1941.]
- [53] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理. 地理研究, 2019, 38(9): 2173-2187. [CHEN W X, LI J F, ZENG J, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of ecoenvironmental effect of land use change in China. Geographical Research, 2019, 38(9): 2173-2187.]
- [54] XIE H, ZHANG L, LIM C P, et al. Improving K-means clustering with enhanced Firefly Algorithms. Applied Soft Computing, 2019, 84: 105763. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105763>.
- [55] OMRANI H, PARMENTIER B, HELBICH M, et al. The land transformation model-cluster framework: Applying K-means and the spark computing environment for large scale land change analytics. Environmental Modelling & Software, 2019, 111: 182-191.
- [56] 张晓琳, 金晓斌, 范业婷, 等. 1995-2015年江苏省土地利用功能转型特征及其协调性分析. 自然资源学报, 2019, 34(4): 689-706. [ZHANG X L, JIN X B, FAN Y T, et al. Spatial-temporal characteristics and coordination status of the land use function transition in Jiangsu province from 1995 to 2015. Journal of Natural Resources, 2019, 34(4): 689-706.]
- [57] 单薇, 金晓斌, 冉娜, 等. 江苏省土地利用“生产—生活—生态”功能变化与耦合特征分析. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1541-1551. [SHAN W, JIN X B, RAN N, et al. "Production-Living-Ecological" function evaluation and coupling coordination analysis of land use in Jiangsu province. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(7): 689-706.]

Exploration of ecological restoration pattern and countermeasure along the Yangtze River in Jiangsu province based on the "element-landscape-system" framework

HAN Bo¹, JIN Xiao-bin^{1,2,3}, XIANG Xiao-min¹, ZHAO Qing-li⁴, LIN Jin-huang¹,
HONG Chang-qiao¹, JIN Zhi-feng⁵, HU Jing⁶, ZHOU Yin-kang^{1,2,3}

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Land Development and Consolidation Technology Engineering Center, Nanjing 210023, China; 4. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China; 5. Land and Resources Research Center (Think Tank) of Jiangsu Province, Nanjing 210023, China; 6. Chongqing Rural Land Consolidation Center, Chongqing 401121, China)

Abstract: As a global issue, ecological restoration demands for urgent practice and research in the way of Ecological Civilization construction and green development in China. In a narrow sense, ecological restoration mainly refers to ecological engineering and environmental protection measures. In the face of increasingly complex, systematic and regional ecological problems, it has become a consensus to implement multi-scale, multi-path and multi-element systematic ecological restoration. Aiming at the area along the Yangtze River in Jiangsu province, which is the most contradictory area between ecological protection and economic development, this paper used the methods of qualitative and quantitative to identify ecological problems, and used the relevant theories and methods of land use science, landscape ecology and human-land system to construct the evaluation system of ecological restoration potential from the perspective of "element-landscape-system". Based on Getis-Ord G_i^* hot spot analysis and K-means cluster methods, this paper identified ecological restoration zones and hot spots, so as to build an ecological restoration pattern structure composed of points, lines (belts) and areas, and put forward corresponding countermeasures. The results show that: (1) Ecological restoration has multi-scale character, complex-objects character and multi-approaches character. Different scales of ecological restoration have different objects, approaches and objectives, which are connected by different levels and types of planning; (2) The average value of ecological restoration potential at the factor level of the study area is 0.460, and the spatial distribution is characterized by "large scale dispersion and small scale agglomeration". The hot spots of ecological restoration potential at the landscape level are distributed around the Yangtze River Estuary, and the cold spots are distributed in the Yang-Tai plain. According to the evaluation indexes of social economy, ecological function and planning response, the study area can be divided into five clusters; (3) According to the evaluation results, the ecological restoration structure of "five areas, three belts and two cores" can be constructed, and the countermeasures can be put forward in the aspects of development orientation, spatial control strategy, restoration object, engineering measures and so on. This study can provide reference for the compilation of ecological restoration planning of the area along the Yangtze River in Jiangsu province, the exploration of connotation and implementation paradigm.

Keywords: ecological restoration; structure analysis; ecological planning; Yangtze River; Jiangsu province