

DOI: 10.5846/stxb202004130871

陈新闯,李锋,李小倩,胡印红,韩婧,胡盼盼.珠三角城市群生态空间分区方法与管控对策.生态学报,2021,41(13):5233-5241.

Chen X C, Li F, Li X Q, Hu Y H, Han J, Hu P P. Method and control measures of ecological space zoning in Pearl River Delta urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5233-5241.

珠三角城市群生态空间分区方法与管控对策

陈新闯^{1,2}, 李 锋^{3,*}, 李小倩^{1,2}, 胡印红^{1,2}, 韩 婧^{1,2}, 胡盼盼^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 清华大学建筑学院, 北京 100084

摘要:生态空间管控是维护区域生态安全,解决区域生态供需矛盾的重要手段。生态空间分区一直是生态管控的热点问题,对促进城市群可持续发展具有重要意义。以珠三角城市群为例,基于政策目标、民众需求、专家知识等方面综合构建评价体系,开展了基于生态空间质量和生态系统健康评价的生态空间分区的探索研究。结果表明:珠三角城市群生态空间约占城市群面积的 82.8%,生态空间质量好,但生态系统健康水平低。城市尺度肇庆市、深圳市生态空间质量较高,珠海市、中山市生态空间质量较低;惠州市、肇庆市生态系统健康水平较高,佛山市、中山市生态系统健康水平较低。综合生态空间质量和生态系统健康,区域尺度将城市群生态空间分为重点保护区、重点修复区、潜在修复区和生态保育区。重点保护区占生态空间总面积的 10.1%,是区域生态源地,应实行最严格的环境保护制度,划定生态保护红线和自然保护地,加强生态建设和生物多样性保护,并加强生态连通性建设,提升区域整体生态系统服务;重点修复区占生态空间总面积的 21.6%,以生态修复,实施生态治理工程,推进生态产业为主;潜在修复区占生态空间总面积的 13.1%,以保护优先、自然恢复为主,对生态空间进行全面的养护,保护和提升品质,重点提升生态系统服务;生态保育区占生态空间总面积的 55.2%,重点实施生态廊道建设,同时加强区域高标准农田建设,在保护生态空间的基础上合理开展生产建设活动。对生态空间分区管控的研究可方便决策者对生态修复空间和生态保护空间进行识别和分类管理,有效指导国土空间规划和区域生态环境管理体系的完善。

关键词:生态空间;生态系统健康;生态分区;生态修复;珠三角城市群

Method and control measures of ecological space zoning in Pearl River Delta urban agglomeration

CHEN Xinchuang^{1,2}, LI Feng^{3,*}, LI Xiaoqian^{1,2}, HU Yinong^{1,2}, HAN Jing^{1,2}, HU Panpan^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Ecological space management is an important means to maintain regional ecological security and solve the imbalance between regional ecological supply and demand. The classification of ecological space has always been a hot issue in the ecological management and plays an important role in promoting the sustainable development of urban agglomeration. This paper takes the urban agglomeration of Pearl River Delta as an example, based on the policy goals, public preferences, and expert knowledge of urban agglomeration to comprehensively construct the evaluation system. The initial study of the ecological space management zoning was conducted on the basis of the evaluation of the ecological space quality and

基金项目:国家自然科学基金重点项目(71734006);国家重点研发计划项目(2016YFC0502800)

收稿日期:2020-04-13; **网络出版日期:**2021-04-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: feng_li@tsinghua.edu.cn

ecosystem health. The results showed that the ecological space accounted for 82.8% of the area of the urban agglomeration. The quality of the ecological space was good, but the level of the ecosystem health was low. At the urban scale, the ecological space quality of Zhaoqing and Shenzhen was higher, that of Zhuhai and Zhongshan was lower; the ecosystem health of Huizhou and Zhaoqing was higher, that of Foshan and Zhongshan was lower. Integrated with the quality of ecological space and ecosystem health, the ecological space was divided into key protection area, key restoration area, potential restoration area, and ecological conservation area at the regional scale. The key protected areas accounted for 10.1%, which were the regional ecological source areas. The strictest environmental protection system should be implemented, ecological red line and nature protected area should be delimited, strengthen ecological construction and biodiversity protection, also the construction of ecological connectivity should be strengthened to improve the overall regional ecosystem services. The key restoration areas accounted for 21.6%, mainly focusing on ecological restoration, implementation of ecological projects, and promotion of ecological industry. The potential restoration areas account for 13.1%, mainly focusing on protection and natural recovery, comprehensive conservation and protection and improve the quality of ecological space, and focus on improving the function of ecosystem service. The ecological conservation area account for 55.2%, mainly focusing on ecological corridor construction, strengthening the construction of high standard farmland, and protecting the basis of ecological space. Therefore, the production and construction activities should be carried out reasonably. In this paper, the research on the ecological space zoning could facilitate the decision makers to identify and classify the ecological restoration space and the ecological protection space, and could effectively guide the improvement of the land space planning and the regional ecological environment management system.

Key Words: ecological space; ecosystem health; ecological zoning; ecological restoration; Pearl River Delta Urban Agglomeration

生态空间是提供一切生态系统服务或保护的土地利用空间,不仅包括自然生态用地,还应包括人工、半人工生态用地,如农田、绿地、廊道等^[1-3]。生态空间对于区域生态安全具有重要意义,是实现绿水青山就是金山银山的重要载体,也是人类福祉提升的关键^[4]。随着不合理城市化进程,社会生态、经济生态、自然生态的不协调,使得生态空间受到侵占、受损,进而导致生态退化,造成生态系统服务降低,供需矛盾逐渐加剧,严重限制区域可持续发展^[5-9]。随着中国生态文明理念的贯彻和执行,对于生态空间的管控日趋重要,重点集中于生态空间的划定和用途管制,如:党的十九大报告明确表示构建节约资源和保护环境的空间格局作为生态文明建设的优先任务。《粤港澳大湾区发展规划纲要》更是强调要划定并严守生态保护红线,强化自然生态空间用途管制。目前由于对于生态空间的内涵、辨识、分类和生态管控等方面的研究都较为薄弱^[10],限制了区域生态安全格局的构建,亟待从区域角度开展生态空间分区研究,科学布局生产空间、生活空间、生态空间,以便准确实施生态修复和生态保护,加强生态空间管控的实效性,健全国土空间用途管制制度。

准确辨识和评价生态空间并对其分区管控,是进行生态空间保护、修复和建设的前提和基础,是新时代生态文明建设的重要内容^[11-12]。尤其在区域角度,以“山水林田湖草生命共同体”的理念科学评价生态空间并进行分类,可为区域生态安全格局的构建提供决策依据^[13]。目前对于生态空间评价取得较大的进展,包括生态源地的识别^[14-16],生态空间的动态变化规律及驱动力因素^[17-19],量化及预测城市化下生态用地需求及可持续性^[20-22],评估生态空间的生态系统服务、生态敏感性等内容^[23-27]。然而由于对生态空间缺乏“区域综合体”的观念,对于生态空间分区辨识和管控的研究仍不完善,且现有评价体系由于忽视区域生态系统特点及社会需求,具有较低的政策应用性^[28]。基于此,本文根据生态空间特点、政策目标、民众需求,以珠三角城市群为典型案例,区域角度建立生态空间评价体系,科学确定需要保护、修复的生态空间范围,并提出相应的管控对策,以便决策者参考制定科学合理的国土空间规划和区域生态空间管控规划。

1 研究区概况

珠三角城市群是粤港澳大湾区的重要组成部分,主要包括广东省的广州市、东莞市、中山市、深圳市、江门市、肇庆市、珠海市、佛山市、惠州市,总面积约 5.48 万平方公里,年末常住人口约 6446.9 万人,珠三角城市群城镇化率超过 85%,是中国城镇化率最高的城市群^[29-30]。随着城市化的快速发展,珠三角城市群生态空间受到侵占,土地资源需求量持续增加,导致城市发展对生态空间的压力逐渐加大,造成生态系统退化,影响生态系统服务及区域生态安全^[31]。目前生态安全问题已对珠三角城市群可持续发展构成了严重威胁,亟待开展生态空间分区管控研究^[12]。

2 数据与方法

2.1 研究框架

生态空间受社会、经济、自然因子的多重影响,评价指标体系应按照复合生态系统理论、“山水林田湖草生命共同体”的理念,对生态格局、生态过程、生态功能进行综合评价,以构建区域生态空间评价指标体系^[1,11-12]。为了使评价指标体系具有应用指导性,指标还应符合区域政策目标及民众需求^[28]。本文建议基于政策目标、民众需求、专家知识综合选择评价指标,主要评价指标体系由生态空间质量和生态系统健康构成。生态空间质量决定着生态系统的效益和生活环境的质量,直接影响着居民的可用性和舒适性,是政策目标的主要内容^[2]。生态系统健康是生态系统的内在稳定性和抗干扰性水平,强调生态系统的完整性,为生态系统损害评价提供依据^[32]。

对生态空间评价指标的筛选主要采取文献、政策及问卷调查中明确提出该指标对区域生态空间具有重要指示作用。如:《广东省国土空间生态修复规划(2020—2035 年)编制工作方案》提出将生态功能重要、生态系统脆弱、自然生态保护空缺区域划为重要生态空间,纳入自然保护地体系;《粤港澳大湾区发展规划纲要》明确提出强化水资源安全保障、构建生态廊道和生物多样性保护网络及建设宜居宜业宜游的优质生活圈。在与居民的访谈及问卷调查中发现居民普遍关注生活环境,如:植被覆盖度、空气质量、水体健康及生态空间社会服务质量。专家则特别关注生态空间对区域的生态安全保障和生态系统服务(如水资源、空气净化),以及生态敏感性^[2, 33-36]。在系统总结上述的指标偏好,结合生态空间质量和生态系统健康现有评价模型,本研究选取生物多样性指数、植被覆盖度指数、水资源指数、生态敏感性指数、空气质量指数、娱乐休闲指数综合评价生态空间质量。生态系统健康采用“活力—组织力—恢复力”模型对其综合评价。

2.2 数据来源与处理

2.2.1 生态空间质量评价

由于本研究指标的选取上较多侧重于政策目标和民众需求,权重的选取采用层次分析法,更能直观的通过区域特点,按照居民或决策者普遍关注的指标构建科学合理的评价模型。计算公式如下:

$$ESQ = 0.26 \times BI + 0.24 \times VI + 0.15 \times WI + 0.12 \times ES + 0.1 \times AQI + 0.13 \times ORI$$

式中,ESQ 为生态空间质量指数,BI 为生物多样性指数,代表区域生态系统生物类群的层次结构和功能的多样性。鉴于数据的可获取性,我们参考谢高地等^[37]研究成果,确定各土地利用类型下生物多样性当量(表 1),土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>),分辨率为 30 m。

表 1 生物多样性指数当量
Table 1 The equivalent of biodiversity index

指标 Indicator	水田 Paddy field	旱地 Dry land	林地 Forest land	灌木 Shrub	其他林地 Other forest land	高覆盖草地 High coverage grassland	中覆盖草地 Medium coverage grassland	低覆盖草地 Low coverage grassland	河流 River	湖泊 Lake	湿地 Wetland
生物多样性指数 Biodiversity index	0.21	0.13	2.41	1.57	1.57	1.64	0.82	0.27	2.43	2.43	2.55

VI 为植被覆盖度指数,代表区域植被覆盖度,以归一化植被指数表征,数据来源于 MOD13Q1 (<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>); WI 为水资源指数,代表区域水资源的丰贫程度,计算公式如下:

$$WI = (W + WR) / 2$$

式中, WI 为水资源指数, W 为评价单元内水体面积, WR 为评价单元内年均降雨量,数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn>)。

ES 为生态敏感性指数,代表生态空间对外界压力的变异程度,以土壤侵蚀表征(表 2),土壤侵蚀数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。

表 2 生态敏感性指数

Table 2 The ecological sensitivity index

类型 Type	剧烈/极强度侵蚀 Severe/Extreme erosion	强度侵蚀 Serious erosion	中度侵蚀 Moderate erosion	其他土地压力 Other land stress
生态敏感性指数 The ecological sensitivity index	0.6	0.4	0.2	0.1

AQI 为空气质量指数,以珠三角城市群内 53 个监测站的空气质量指数表征,数据来源于中国生态环境部环境数据中心 (<http://datacenter.mep.gov.cn>); ORI 为娱乐休闲指数,表征区域生态空间的娱乐和休闲游憩能力,运用 ESTIMAP 评价日常生活中居民基于生态空间的娱乐活动,由评价单元内自然度、生态保护价值和水体决定^[38]。所有数据均归一化为 0—100 以消除量纲。

2.2.2 生态系统健康评价

生态系统健康是指生态空间在受到外界压力下维持其自身健康结构、自我调节和恢复的能力,采用“活力—组织力—恢复力”模型对其综合评价^[32]。

$$EH = \sqrt[3]{V \times O \times R}$$

式中, EH 为生态健康指数, V 为活力,指输入到生态系统的所有能量,本文以植被净初级生产力表示,数据来源于 MOD17A3 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>)。

O 为组织力,主要由生态空间内景观格局影响,以景观连通性、景观异质性、林地和湿地景观特征进行综合表征^[32, 39],所有数据均归一化为 0—100 以消除量纲,计算公式如下:

$$O = 0.35 \times LC + 0.35 \times LH + 0.3 \times IC$$

$$O = 0.1 \times AWMPFD + 0.25 \times FN_1 + 0.15 \times SHDI + 0.1 \times MSIDI + 0.1 \times CONT + 0.1 \times FN_2 + 0.05 \times CONNECT_1 + 0.1 \times FN_3 + 0.05 \times CONNECT_2$$

式中, O 为组织力, LC 为景观连通性, LH 为景观异质性, IC 为重要生态空间(林地、湿地)的景观连通性, $AWMPFD$ 为面积加权的平均斑块分形指数, FN_1 为景观破碎度指数, $SHDI$ 为香农多样性指数, $MSIDI$ 为修正 Simpson 多样性指数, $CONT$ 为景观蔓延度, FN_2 为林地景观破碎度指数, $CONNECT_1$ 为林地景观连通性, FN_3 为湿地景观破碎度指数, $CONNECT_2$ 为湿地景观连通性。运用 Fragstats 4.2(the University of Massachusetts) 移动窗口法计算各景观格局指数。

R 为恢复力,指生态系统受到外界干扰后所保持的稳定性及恢复速率,表征生态系统的弹性,主要由调节生态过程和生态功能的生态系统服务指标决定。在本研究中,我们选取决策者普遍关注的水资源供给量 and 水质净化能力表征生态系统的恢复力,可以更好地反映区域生态系统的弹性和可持续性。水资源供给量 and 水质净化采用 InVEST 模型计算^[28, 31, 40-41]。

2.2.3 生态空间分区

生态空间分区应从区域角度出发,以“山水林田湖草是一个生命共同体”的理念,结合区域内部生态空间现状及生态系统受损类型,识别区域内需要保护或修复的生态空间。由于生态空间质量和生态系统健康对生态空间具有不同的侧重,应综合二者进行聚类归并和趋同性分析。基于此,本文采取阈值法对生态空间进行

分区^[28],参照《珠江三角洲环境保护规划纲要(2004—2020年)》、《珠江三角洲环境保护一体化规划(2009—2020年)》、《粤港澳大湾区发展规划纲要》、《广东省环境保护“十三五”规划》、《广东省环境保护规划纲要(2006—2020年)》等内容,将阈值取值为生态空间质量指数和生态健康指数累计面积百分含量的10%、25%、75%,将生态空间质量和生态系统健康划分为差、一般、良和优4个级别。在生态空间分区管控中,综合生态空间质量和生态系统健康分级范围,将两个优的区域确定为重点保护区,含有一个差的区域和两个一般的区域为重点修复区,含有一个一般的区域为潜在修复区,其余均为生态保育区。该分类方法可根据区域政策目标和国土空间规划合理调整阈值取值范围,具有较大的灵活性。

3 结果与分析

3.1 珠三角城市群生态空间质量评价与空间分布特征

珠三角城市群生态空间质量指数为12.7—91.5,集中在57—71之间(图1)。城市群内生态空间质量总体良好,空间分布基本呈四周高、中间低的分布趋势(图2)。生态空间质量较高的区域主要集中于肇庆市、江门市,约占生态空间面积18.5%;差的区域集中于惠州市、江门市、广州市,约占生态空间面积的7%。因生态本底、城市化水平、生态管理措施的不同,城市群内城市生态空间质量具有一定的差异性,数值差异集中于44.9—56.9,其中肇庆市、深圳市生态空间质量较高,珠海市、中山市生态空间质量较低。这主要是由于肇庆市拥有较多高质量的生态空间,占城市面积的46%。深圳市虽然高质量生态空间仅占25%,但是其差的生态空间面积较小,仅占城市面积的3.8%。珠海市、中山市生态空间差的面积较大,分别占城市面积的30.3%、25%。

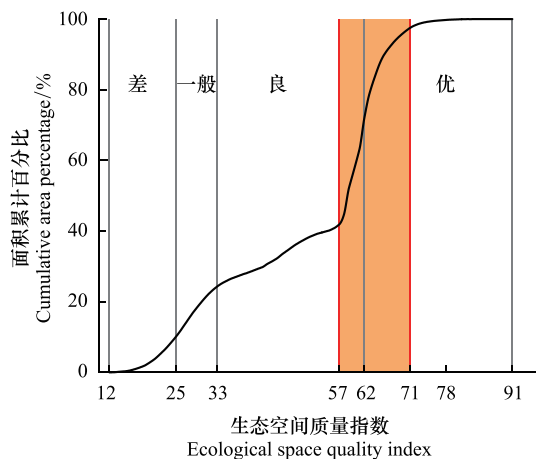


图1 珠三角城市群生态空间质量面积累计百分比

Fig.1 The cumulative percentage of ecological space quality in the Pearl River Delta

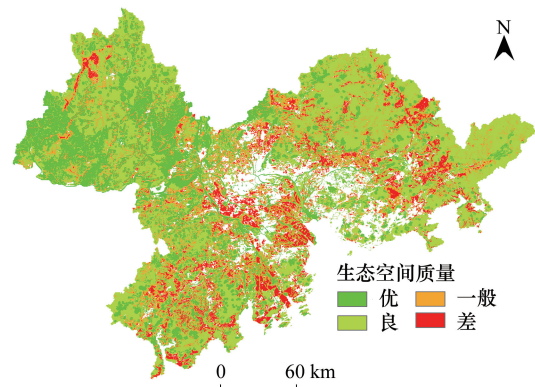


图2 珠三角城市群生态空间质量空间分区

Fig.2 The spatial division of regional ecological space quality in the Pearl River Delta

3.2 珠三角城市群生态系统健康评价与空间分布特征

珠三角城市群生态健康指数在0—79,城市群生态健康水平数值较低,主要集中在17—60之间(图3)。生态系统健康空间分布呈四周高、中间低的空间分布趋势(图4),其中,生态系统健康水平较高的区域主要集中于肇庆市、惠州市,约占生态空间面积13.5%。差的区域集中于佛山市、江门市、广州市,约占生态空间面积的4.1%。一般的区域集中于肇庆市、惠州市、广州市,约占生态空间面积的9.3%。城市群内各城市生态系统健康水平低且差异性较大,集中于27.3—47.2之间,其中惠州市、肇庆市生态系统健康水平较高,佛山市、中山市生态系统健康水平较低。这主要是由于惠州市、肇庆市拥有较多健康的生态空间,且生态系统健康差的面积较小,仅占比3%—3.4%。中山市生态系统健康差的面积占比41.4%,是生态修复的主要区域。佛山市生态系统健康一般的面积占比较高,是造成该市生态系统健康水平总体较低的主要原因。

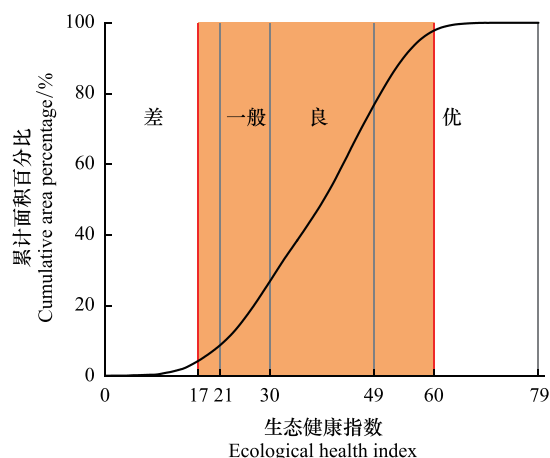


图3 珠三角城市群生态系统健康面积累计百分比

Fig.3 The cumulative percentage of ecological health in the Pearl River Delta

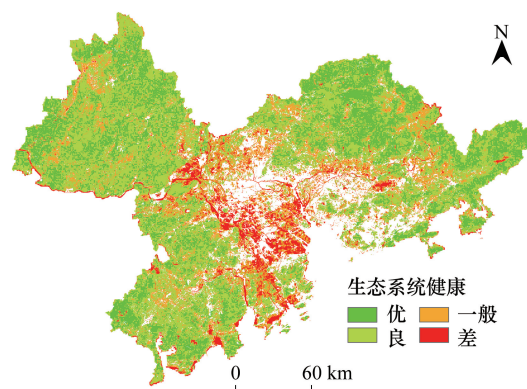


图4 珠三角城市群生态系统健康空间分区

Fig.4 The spatial division of regional ecological health in the Pearl River Delta

3.3 珠三角城市群生态空间分区管控

综合生态空间质量与生态系统健康对生态空间进行分区管控(图5)。生态空间重点保护区集中于城市群的西北部 and 西南部,面积为 4488.7 km²,占生态空间总面积的 10.1%。该区域生态空间质量好,是保障和维护区域生态安全的核心区域,应按照最严格的保护制度实施保护,限制一切人为开发建设项目。强化该区域生态核心位置,加强生物多样性保护,构建生态廊道、大型斑块和生物多样性保护网络,提升生态系统质量和稳定性。

生态空间重点修复区主要集中在城市周边区域,面积为 9663.5 km²,占生态空间总面积的 21.6%。该区域主要以人工生态系统为主,如农田、坑塘及部分人工林。该区域受人为干扰程度较大,生态空间退化且受损比较严重,生态系统过程和功能受到干扰,难以发挥相应的生态系统服务,亟需开展生态修复,实施生态治理工程,严格限制城市周边区域森林、农田、湿地等生态空间被侵占和破坏活动。中山市、珠海市、佛山市是重点实施生态修复的区域。

生态空间潜在修复区分布集中于重点修复区的周边区域,该区域面积 5867.8 km²,占生态空间总面积的 13.1%。该区域生态空间状况一般,生态系统服务比较单一,生态空间存在受损现象。该区域应限制居民开发建设活动,开展生态保护和生态建设,重点优化生态系统结构,提升生态系统服务价值,如:规划建设生态公园、生态湿地,提升其户外游憩功能。

生态空间生态保育区生态状况较好,是珠三角城市群主要存在的生态空间,面积为 24659.1 km²,占生态空间总面积的 55.2%,是发挥生态系统服务和保障区域生态安全的主要区域。该区域应重点实施生态保育,依托区域现有生态服务优势,修复和提升生态系统,优化区域生态系统服务,在保护生态空间的基础上合理开展生产建设活动。

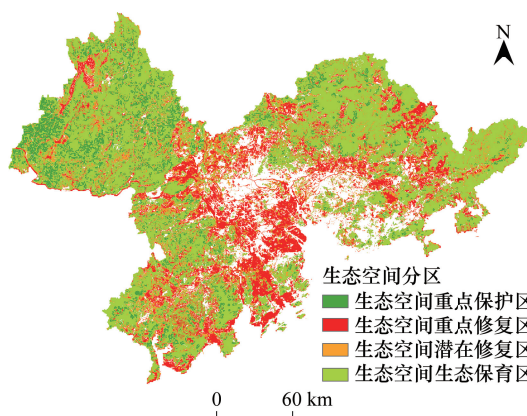


图5 珠三角城市群生态空间分区管控

Fig.5 Regional ecological space management zoning in the Pearl River Delta

4 讨论

城市群尺度生态空间的辨识和分区分管,有利于决策者针对性地实施生态保护和生态修复策略,提升区域生态安全。对于生态空间评价方法和评价体系已取得重要进展,然而由于忽视区域政策目标及民众需求,评价的侧重点与决策者需求具有偏差^[28]。因此,有必要考虑到决策者和利益相关者的需求,建立科学面向政策应用的多学科综合评价框架^[42]。本研究通过景观生态学、城市生态学、区域生态学等的原理和方法,考虑生态系统的复杂性,将山水林田湖草作为一个生命共同体,综合生态空间质量与生态系统健康进行统一评价,分区分管。这与 Bai 等^[28]的研究框架基本一致。Bai 在上海市生态保护红线划定方法的研究中,以生态系统服务、生物多样性和生态脆弱性为基础,结合利益相关者的意见进行阈值的选取和分析。本研究提出的生态空间分区同样从多方面权衡的角度为决策者提供了分区依据,将生态空间评价应用到城市规划中提供了新的见解。为了验证结果的可行性,本文将位于珠三角城市群的国家级自然保护区与生态空间重点保护区进行空间叠加,发现本研究划定的重点保护区基本涵盖了现有保护区,但范围上具有一定的差异性。这主要是由于本文基础数据分辨率较大,存在一定的误差。本研究的成果仅是生态分区的一个基础阶段,更加完善的分区方案,决策者还需考虑更多的社会经济因素。

城市群内不同城市的生态环境现状、社会经济发展水平和建设目标均具有差异性,由于缺乏对生态空间的有效识别和政策管控,导致区域生态管理困难,尤其生态管理边界与行政边界的不匹配,导致政策制定不完善^[42]。目前对于分区分管较多采用生态保护红线区、生态功能保障区、生态防护修复区^[43],本文在此基础上立足于城市群角度,将生态空间建立统一的评价标准和分类标准,构建了更为细化和具体的城市群生态空间分区方案。基于政策目标和民众需求,识别区域生态空间需要提升及完善的方面,按照生态空间的生态过程和生态功能进行管控,满足人类所期望的生态系统状态。生态空间重点保护区和生态空间保育区,主要以生态空间质量高、生态健康风险低的自然生态系统为主,是保障区域生态安全和提供区域生态系统服务的主要区域。在生态管理中,要维护自然生态系统的完整性和可持续发展。加强对肇庆市和江门市生态源地的保护,保障生态系统服务的可持续性供给;合理开发建设生态游憩区,提高区域户外游憩能力,充分发挥区域生态系统服务的文化价值。生态空间保育区中要加强生态廊道的识别和保护,提高城市群内生态系统服务,降低生态系统服务供需矛盾。生态空间重点修复区被定义为低质量或高风险区域,表征了生物多样性、生态系统功能和服务价值较小的区域,自然生态空间较少,是城市群农业的主要分布区。应加大环境治理的资本与力度,积极发展和建设城市绿色基础设施,尤其城郊区域将散乱的生态空间进行统一规划,构建绿色基础设施网络体系,提升生态系统的稳定性。

5 结论

区域尺度生态空间的分区分管能够有针对性地实施生态保护和生态修复,是落实“山水林田湖草”系统治理的重要方法和手段。本文基于政策目标、民众需求、专家知识等因素综合构建生态空间评价体系并对其分区分管,能够较直观地向决策者提供科学的技术支持。珠三角城市群生态空间品质高,生态空间质量和生态系统健康基本呈四周高、中间低的空间分布趋势。生态空间重点保护区,重点关注肇庆市,该区域实施最严格的生态保护制度,构建和优化生态廊道、大型斑块和生物多样性保护网络。生态空间重点修复区主要集中在城市化及周边区域,重点关注江门市、惠州市、中山市、珠海市、佛山市,应实施生态修复工程,发展绿色农业。生态空间潜在修复区应重点关注肇庆市、惠州市、江门市、东莞市,重点实施生态建设和生态修复,提升生态系统服务价值。生态空间保育区应重点关注肇庆市、惠州市、深圳市,实施区域生态廊道建设,在保护生态空间的基础上合理开展生产建设活动。

参考文献 (References):

- [1] 王如松, 李锋, 韩宝龙, 黄和平, 尹科. 城市复合生态及生态空间管理. 生态学报, 2014, 34(1): 1-11.

- [2] 王甫园, 王开泳, 陈田, 李萍. 城市生态空间研究进展与展望. 地理科学进展, 2017, 36(2): 207-218.
- [3] 熊善高, 秦昌波, 于雷, 路路, 关杨, 万军, 李新. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究——以南宁市为例. 生态学报, 2018, 38(22): 7899-7911.
- [4] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [5] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明, Tarver G Jr, 王效科, 苗鸿. 城市热岛的生态环境效应. 生态学报, 2005, 25(8): 2055-2060.
- [6] Wang R S, Li F, Hu D, Li B L. Understanding eco-complexity: social-economic-natural complex ecosystem approach. *Ecological Complexity*, 2011, 8(1): 15-29.
- [7] 李锋, 王如松, 赵丹. 基于生态系统服务的城市生态基础设施: 现状、问题与展望. 生态学报, 2014, 34(1): 190-200.
- [8] Wu J G, Xiang W N, Zhao J Z. Urban ecology in China: historical developments and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 222-233.
- [9] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 刘爱琳, 潘涛. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局. 地理研究, 2017, 36(3): 441-452.
- [10] 高吉喜, 徐德琳, 乔青, 邹长新, 王燕, 田美荣, 王玥. 自然生态空间格局构建与规划理论研究. 生态学报, 2020, 40(3): 749-755.
- [11] 陈利顶, 周伟奇, 韩立建, 孙然好. 京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策. 生态学报, 2016, 36(22): 7125-7129.
- [12] 黄国和, 安春江, 范玉瑞, 徐琳瑜, 李永平, 蔡宴朋, 李延峰, 李锋. 珠江三角洲城市群生态安全保障技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7119-7124.
- [13] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- [14] 文博, 朱高立, 吴敏, 张开亮, 刘友兆, 王玮. 基于景观安全格局理论的宜兴市生态用地分类保护. 生态学报, 2017, 37(11): 3881-3891.
- [15] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710.
- [16] 吴茂全, 胡蒙蒙, 汪涛, 凡宸, 夏北成. 基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别. 生态学报, 2019, 39(13): 4720-4731.
- [17] 刘春艳, 张科, 刘吉平. 1976—2013 年三江平原景观生态风险变化及驱动力. 生态学报, 2018, 38(11): 3729-3740.
- [18] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树文, 颜长珍, 李仁东, 吴世新, 胡云锋, 杜国明, 迟文峰, 潘涛, 宁静. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802.
- [19] Zhou R B, Lin M Z, Gong J Z, Wu Z. Spatiotemporal heterogeneity and influencing mechanism of ecosystem services in the Pearl River Delta from the perspective of LUCC. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(5): 831-845.
- [20] Li F, Ye Y P, Song B W, Wang R S. Evaluation of urban suitable ecological land based on the minimum cumulative resistance model: a case study from Changzhou, China. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 194-203.
- [21] 廖慧璇, 籍永丽, 彭少麟. 资源环境承载力与区域可持续发展. 生态环境学报, 2016, 25(7): 1253-1258.
- [22] 梁宇哲, 谢晓瑜, 郭泰圣, 吴茗华, 王璐. 基于资源环境承载力的国土空间管制分区研究. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 412-418.
- [23] 虞依娜, 彭少麟. 生态系统服务价值评估的研究进展. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2246-2252.
- [24] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Zhuang Q L, Li H P, Wan R R, Su W Z, Zhang J. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020. *Science of the Total Environment*, 2016, 554-555: 7-16.
- [25] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. 地理学报, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [26] Zhang Y, Liu Y F, Zhang Y, Liu Y, Zhang G X, Chen Y Y. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: a case study in Wuhan, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638: 780-790.
- [27] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析. 自然资源学报, 2019, 34(2): 325-337.
- [28] Bai Y, Wong C P, Jiang B, Hughes A C, Wang M, Wang Q. Developing China's Ecological Redline Policy using ecosystem services assessments for land use planning. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3034.
- [29] 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽. 粤港澳大湾区区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考. 环境科学, 2019, 40(12): 5570-5580.
- [30] Dong Y, Xu L Y. Aggregate risk of reactive nitrogen under anthropogenic disturbance in the Pearl River Delta urban agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 490-502.
- [31] Hu M M, Li Z T, Wang Y F, Jiao M Y, Li M, Xia B C. Spatio-temporal changes in ecosystem service value in response to land-use/cover changes in the Pearl River Delta. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 149: 106-114.
- [32] Peng J, Liu Y X, Wu J S, Lv H L, Hu X X. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: a case study in Shenzhen City, China. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143: 56-68.

- [33] 阳文锐. 北京城市土地复合生态服务功效演变特征. 生态学报, 2017, 37(12): 4169-4181.
- [34] 徐丽婷, 姚士谋, 陈爽, 徐羽. 高质量发展下的生态城市评价——以长江三角洲城市群为例. 地理科学, 2019, 39(8): 1228-1237.
- [35] 柴燕妮, 魏冠军, 侯伟, 冯志贤, 翟亮. 空间视角下的多尺度生态环境质量评价方法. 生态学杂志, 2018, 37(2): 596-604.
- [36] 刘世梁, 董玉红, 孙永秀, 史芳宁. 基于生态系统服务提升的山水林田湖草优先区分析——以贵州省为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8957-8965.
- [37] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [38] Baró F, Palomo I, Zulian G, Vizcaino P, Haase D, Gómez-Baggethun E. Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: a case study in the Barcelona metropolitan region. Land Use Policy, 2016, 57: 405-417.
- [39] Kang P, Chen W P, Hou Y, Li Y Z. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Science of the Total Environment, 2018, 636: 1442-1454.
- [40] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2783-2792.
- [41] 孔令桥, 王雅晴, 郑华, 肖赓, 徐卫华, 张路, 肖洋, 欧阳志云. 流域生态空间与生态保护红线规划方法——以长江流域为例. 生态学报, 2019, 39(3): 835-843.
- [42] Defries R, Nagendra H. Ecosystem management as a wicked problem. Science, 2017, 356(6335): 265-270.
- [43] 王晶晶, 迟妍妍, 许开鹏, 张丽苹, 葛荣凤. 京津冀地区生态分区分管研究. 环境保护, 2017, 45(12): 48-51.