

# 基于减排增汇潜力评价的 区域生态安全格局优化研究 ——以南京都市圈为例

卞新寅 胡宏

南京大学建筑与城市规划学院

**摘要：**区域尺度减排增汇目标实现亟需城市协同治理和空间多要素统筹。本研究将城市尺度的减排增汇潜力评价与区域生态安全格局优化进行有效衔接，以南京都市圈为例，建立“城市尺度减排增汇潜力评价——栅格尺度生态安全格局重要性评价——区域国土空间生态源地识别与廊道判定”的多尺度融合分析方法。结果表明：(1)宣城、淮安、马鞍山、镇江减排增汇潜力较大，在区域分工中需承担更多减排增汇责任。(2)以减排增汇潜力评价结果作为空间修正依据进而识别出南京都市圈重要生态基底，主要分布于南部大片林地和大型湖泊、北部林草混合片区和大型湖泊，以及横穿都市圈中部的长江。(3)在都市圈内识别生态源地和廊道，作为实现双碳目标的重要生态保护和修复空间载体。

**关键词：**减排增汇；生态安全；潜力评价；格局优化；南京都市圈

**中图分类号：**Q 1 4 9   **文献标志码：**A   **文章编号：**1 0 0 5 - 8 1 4 1 ( 2 0 2 3 ) 0 9 - 1 1 1 6 - 1 1

作者简介：卞新寅（1998-），男，江苏省盐城人，硕士研究生，研究方向为低碳区域规划与生态治理。；\*胡宏（1983-），女，甘肃省天水人，博士，副教授，研究方向为低碳城市规划支持方法、多尺度社会—生态系统。

**收稿日期：**2023-04-10

**基金：**国家社会科学基金重点项目（编号：20AZD040）

## 0 引言

降低由人类活动造成的二氧化碳排放，缓解全球气候变暖风险已成为人类社会共同面临的重要挑战。在中国“碳达峰、碳中和”的国家战略背景下，减少社会经济系统碳排压力、增加生态系统碳汇潜力成为研究热点。既往有关双碳目标实现途径的研究主要集中在产业转型[1]、能源结构转变[2]、农田管理与植树造林[3]、碳排交易[4]和碳汇市场[5]等领域。随着国土空间低碳治理要求提升，从空间格局优化视角探究实现双碳目标路径的研究逐渐增多，主要关注两个方面：一是不同国土空间类型[6, 7, 8]和土地利用用途转变[9, 10, 11]的碳排碳汇效应；二是通过区域[12, 13]、城市[14, 15, 16]、社区[17]等多尺度空间格局优化实现双碳目标的路径策略。

区域作为国家和地方的中间治理层级，在国家战略意图落实上起到承上启下的协调中介作用，同时在区域尺度进行空间治理有助于实现城乡山水林田湖草一盘棋，因而在区域层面实现双碳目标已成为国土空间格局优化的关注重点。黄贤金、董祚继等人提出实施高碳汇区域保护、建设用地总量管控的碳中和区域空间格局优化思路[13, 18]；也有学者基于区域空间结构对碳排放的锁定效应，提出“多城市中心+快速交通廊道”的低碳紧凑区域空间结构，并从城乡空间统筹、生态空间保护、交通空间集约、产业空间升级等方面提出低碳导向区域空间结构优化思路[19, 20]。

当前研究成果多以指导性政策和原则性要求为主，城乡建设空间的集约利用和碳排效率提升、生态空间的数量增加和碳汇强度提高是减排增汇导向下区域空间格局优化研究的核心结论。近年来开始有学者从区域碳平衡分区出发，在区域碳排碳汇核算基础上依据碳排放经济贡献、碳生态承载力等指标对区域各城市进行减排增汇潜力评价，依据评价结果进行碳平衡分区并分别提出优化建议[21, 22, 23]。然而此类研究落脚点仅限于区域各城市的碳平衡功能定位，缺少国土空间层面的干预保障措施。区域尺度的减排增汇面临城市协同治理和空间多要素统筹的挑战，亟需将城市尺度的减排增汇潜力评价与区域国土空间格局优化进行有效衔接来指导国土空间规划实践。

区域生态安全格局优化作为国土空间规划的重要技术手段，缘起于 20 世纪 90 年代的景观生态规划方法，最初是基于景观格局与生态过程的相互作用机制提出景观格局优化方案[24]。马克明等人对景观生态规划内涵进行发展，强调区域尺度生态环境问题的发生作用机制以及生态保护和生态恢复研究的发展需求，提出区域生态安全格局是针对区域生态环境问题，保护和恢复生物多样性、维持生态系统结构和过程的完整性、实现对区域生态有效控制和持续改善的空间格局[25]。“源地识别—廊道判定”是区域生态安全格局优化的基本模式，由国外学者 Cook 率先提出并应用于景观生态网络的构建[26, 27]。源地识别即提取对维护区域生态安全具有关键意义的生态用地，其识别方法主要从生态功能重要性、生态敏感性评价等方面展开[28, 29]，或是基于形态学空间格局方法（MSPA）进行源地识别[30]。廊道判定依赖于生态阻力面的设置，阻力面构建的主流方法是根据景观类型进行赋值，再通过最小阻力模型来生成廊道[31]。也有学者通过计算空间生态系统服务价值作为源地识别和廊道构建的基础[32]。

随着国土空间规划体系的建立，更多学者将区域生态安全格局优化理念与方法应用于城镇开发边界与生态红线划定[33, 34]，其对于约束碳源空间扩张、保护碳汇空间具有重要意义。既有研究多是对区域国土空间进行整体生态格局分析，得出理想化的生态安全格局优化方案。然而区域由细分的行政实体构成，这些行政实体是生态安全格局优化方案的实施主体，若不考虑各城市的减排增汇潜力、判断其在区域实现双碳目标过程中的功能定位并对其进行差异化的空间规划指引，则会使整体优化方案难以协调实施。因而，为满足城市减排增汇功能定位的国土空间落地需求，衔接城市减排增汇潜力评价与区域生态安全格局优化方法，将城市尺度的减排增汇潜力评价结果进行降尺度传导，规范区域国土空间的保护与利用，推动双碳目标下的国土空间格局优化，一直是亟待开展的工作。

因此，本研究以南京都市圈为研究范围，构建基于城市减排增汇潜力评价的区域生态安全格局优化技术路线，衔接城市减排增汇功能定位与区域生态安全格局重要性评估结果，为低碳导向的区域国土空间规划编制提供方法支撑。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

南京都市圈地处长江下游，横跨苏皖两省，是连通东部中部两大板块的枢纽区域，具有重要的战略地位。南京都市圈由以江苏省南京市为中心、联系紧密的周边城市共同组成，主要包括南京、镇江、扬州、淮安、芜湖、马鞍山、滁州、宣城 8 市全域及常州市金坛区和溧阳市（图 1）。

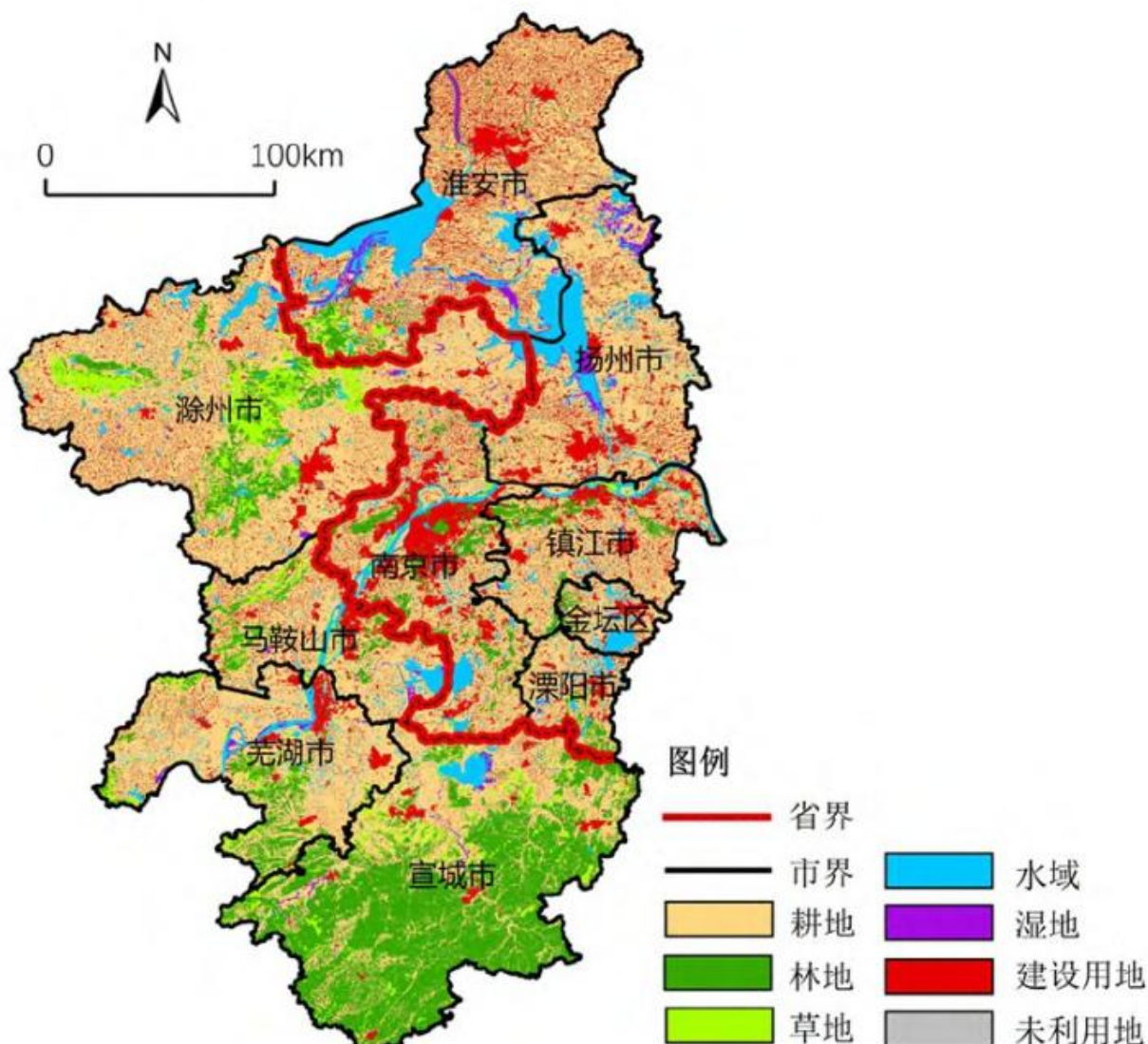


图1 南京都市圈土地利用类型

南京都市圈是中国经济最为活跃的地区之一，面临较大碳减排压力。2021年其成为国家首个批复的都市圈规划，在此背景下如何统筹区域内各城市减排增汇，通过生态安全格局优化助力区域双碳目标实现是亟待探讨的问题。

### 1.2 数据来源

土地利用数据（2015、2020年）、NDVI数据、土壤数据（土壤质地、土壤类型、土壤侵蚀）来源于中国科学院资源环境科学与数据中心，分辨率分别为30m、1km、1km。DEM数据来源于地理空间数据云，分辨率为30m；气候数据（降水、温度、蒸散发）来源于国家基础地理信息平台，分辨率为1km。经济社会统计数据来源于江苏安徽两省、各市年度经济社会统计年鉴以及各市第六和第七次人口普查数据。能源消耗数据来源于各市年度经济社会统计年鉴（表1）。

表1 数据信息与来源

| 数据名称            | 空间分辨率 | 年份        | 数据来源  |
|-----------------|-------|-----------|---|
| 土地利用数据          | 30m   | 2015、2020 | 中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> ) |
| 年度 NDVI         | 1km   | 2015、2020 | 中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> ) |
| 土壤数据(质地、类型、侵蚀)  | 1km   | 1995      | 中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> ) |
| DEM             | 30m   | 2020      | 地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )      |
| 气候数据(降水、温度、蒸散发) | 1 km  | 2020      | 国家基础地理信息平台( <a href="http://www.geodata.cn/">http://www.geodata.cn/</a> )   |
| 经济社会统计数据        | -     | 2010、2020 | 江苏、安徽统计年鉴、各市年度经济社会统计年鉴、各市第六、七次人口普查数据  |
| 能源消耗数据          | -     | 2020      | 各市年度经济社会统计年鉴  |

## 2 研究方法

### 2.1 研究思路与技术路线

本研究主要从区域减排增汇责任分担和区域生态本底重要性评价切入。通过区域内城市尺度的减排增汇潜力评价结果修正区域内栅格尺度的生态安全格局重要性评价,实现城市尺度减排增汇潜力评价结果的降尺度传导,使得减排增汇潜力等级越高的城市有更多的生态空间被纳入保护范围,以约束其建设用地无序扩张,承担更重要的减排增汇责任,从而有利于区域发展保护意图在国土空间上的落实(图2)。

城市碳排碳汇与城市经济、社会、生态3个子系统息息相关,减排增汇意味着传统发展模式的转型。城市减排增汇潜力主要是通过通过对碳排碳汇及其影响因素的现状和发展趋势进行分析,判断城市减排增汇的可能性,从而可采取针对性措施控制碳排放正向影响因素的增加、促进碳汇正向影响因素的发展,最终将减排增汇的潜在能力变成实际能力[35]。双碳目标在区域层面的分解本质上是发展权利和保护义务在空间上的分配,对于区域发展保护格局将产生重大影响。因此双碳目标的实现有赖于区域统筹安排与各城市分工协作,需通过城市减排增汇潜力评价来对各城市碳排放效率、减排潜力、碳汇能力和增汇潜力等方面进行综合研判,城市减排增汇潜力越高,其在区域分工中应承担更多的减排增汇责任,越需要通过技术手段使其减排增汇的潜力转变为实际能力。

国土空间规划是区域层级分解减排增汇责任、落实保护与发展意图的重要政策工具。国内外已有研究表明区域建设用地是主要的碳源,生态空间是主要的碳汇。建设用地的扩张导致生态空间的缩减及其碳汇减少,而建设用地的利用模式和效率则是碳排放的重要影响因素[36]。因此,建设用地总量控制与生态空间保护是在国土空间上耦合增汇与减排的重要方式。区域生态安全格局优化方法通过对区域本底进行生态安全格局重要性评价,识别出对于维护区域生态安全具有较高重要性的国土空间,将其作为生态源地进行重点保护并约束建设用地的扩张。

城市减排增汇潜力评价结果是区域分解减排增汇责任的依据,而区域生态安全格局优化是国土空间层面实现减排增汇目标的技术手段,两者的集成有利于区域减排增汇责任在城市尺度和国土空间层面的传导落实。减排增汇潜力越大的城市,其经济、社会、生态3个子系统低碳转型的需求越大,可以通过引导其保护生态空间、限制建设空间无序扩张来倒逼其实现低碳转型。具体而言,生态安全格局重要性评价对国土空间进行分等定级,但并未考虑城市间差异化的减排增汇潜力。为了进行区域减排增汇责任的传导落实,将城市减排增汇潜力作为生态安全格局重要性评价的修正因子,使得高减排增汇潜力的城市整体生态安全格局重要性越高,从而使这些城市有更多生态空间被纳入保护范围以约束其建设用地扩张,促进其减排增汇的潜力转变为实际能力。

基于减排增汇潜力评价的区域生态安全格局优化方法一方面能保证区域减排增汇目标的空间落实,另一方面能促进区域生

态系统的连通性、完整性和可持续性。面向双碳目标的实现，其还需重点考虑关键碳汇空间的保护与修复，将生态退化严重的碳汇空间作为区域生态安全格局优化方案的校正。森林和湿地生态系统是陆地生态系统中最大的碳库，对于实现碳中和具有重要意义[37, 38]。由于气候变化和人类活动的影响，森林和湿地生态系统出现生态退化，主要表现为面积减少、结构丧失、质量降低、功能下降等状态，从而降低其固碳能力并释放大量 CO<sub>2</sub>，具有较大的碳汇减少以及碳排增加风险[39]。国内外学者多是基于 NDVI 建立监测模型以识别森林和湿地的生态退化状况，通过植被变化率来评估其退化程度，将退化严重的生态空间作为重点保护区域并提出生态修复措施[40]。

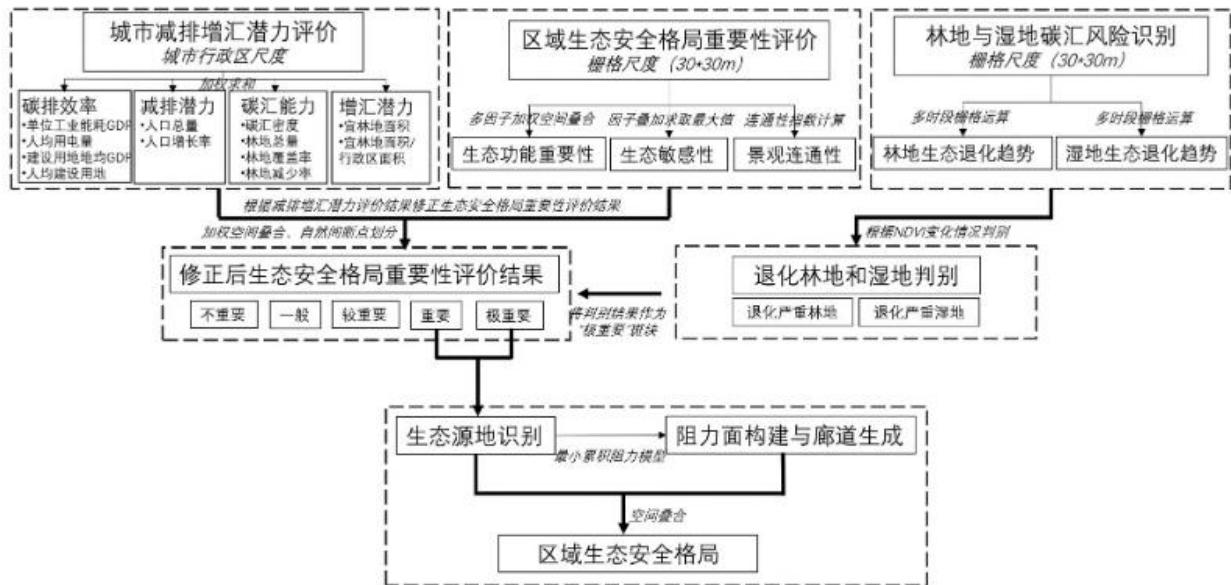


图 2 基于减排增汇潜力评价的区域生态安全格局优化技术路线

## 2.2 城市减排增汇潜力评价方法

已有研究在城市减排增汇潜力评价中主要关注公平性和效率性原则，其中前者更多地着眼于人口规模及其变化情况，主要评价指标有人口数量和人口变化率[41]；而后者主要考察能源、建设用地等碳源利用的集约程度，主要评价指标有单位 GDP 能耗[42]、人均生活用电量[43]、建设用地地均 GDP[44]、人均建设用地[45]等。近年来，更多学者关注生态空间的增汇功能指标，主要考察现有生态空间的碳汇能力以及未来生态空间的增汇潜力，主要评价指标有碳汇总量、林木蓄积量等[46, 47]。本文指标体系在借鉴前人研究的基础上也有所创新，从减排重要性（碳排放效率、减排潜力）和增汇重要性（碳汇能力、增汇潜力）两个维度来建立（表 2）。

减排重要性评价包含碳排放效率和减排潜力两个维度，碳排放效率关注单位用地和单位能耗的绩效。单位用地和单位能耗绩效越低，则碳排放效率越低，表明该城市在土地集约利用水平、产业结构、生活方式、能源利用结构和效率上有更大的低碳改进空间。减排潜力关注城市未来的发展趋势，人口规模越大，人口增长越快，说明该城市具有较强的发展基础和潜力，该地区所应分配的碳排放权和建设用地指标应越多。而人口规模小、人口增长趋缓甚至减少的地区则有较大的减排潜力，对于碳排放和建设用地扩张的需求较小，应更多地承担减排增汇的责任。增汇重要性评价包括碳汇能力和增汇潜力两个维度，碳汇能力关注碳汇密度、林地数量及其变化情况，增汇潜力关注城市行政空间范围内适宜林地建设的空间数量。碳汇能力越强、增汇潜力越大的地区应承担更多的增汇责任。

结合专家打分法和层次分析法确定指标权重，邀请行业内专家对同一层次内多个指标的相对重要性（两两因素之间）进行

打分并构建判断矩阵，获得各指标权重，其满足一致性检验。对各指标进行极差标准化并求和，得到各个城市的减排增汇重要性评价结果，结果可划分为高、中、低 3 个级别，评价结果为高的城市说明其减排增汇潜力相对较大，应承担更多的减排增汇责任。

表 2 城市减排增汇潜力评价指标体系

| 指标        |      | 方向          | 度量方式 | 权重                                     |         |
|-----------|------|-------------|------|--|---------|
| 减排<br>重要性 | 碳排效率 | 单位工业能耗 GDP  | -    | 工业 GDP/工业能耗（标准煤）                       | 0.105 0 |
|           |      | 人均用电量       | +    | 生活用电量/常住人口总量                           | 0.070 0 |
|           |      | 建设用地地均 GDP  | -    | GDP 总量/建成区面积                           | 0.087 5 |
|           | 减排潜力 | 人均建设用地      | +    | 城镇常住人口/建成区面积                           | 0.087 5 |
|           |      | 人口总量        | -    | 七普常住人口                                 | 0.175 0 |
|           |      | 人口增长率       | -    | (七普常住人口 - 六普常住人口) / 六普常住人口             | 0.175 0 |
| 增汇<br>重要性 | 碳汇能力 | 碳汇密度        | +    | 行政区域碳汇总量/行政区总面积                        | 0.080 0 |
|           |      | 林地覆盖率       | +    | 林地面积/行政区总面积                            | 0.040 0 |
|           |      | 林地总量        | +    | 利用 ArcGIS 对土地利用数据进行分类统计                | 0.040 0 |
|           |      | 林地减少率       | +    | (2015 年林地面积 - 2020 年林地面积) / 2015 年林地面积 | 0.040 0 |
|           | 增汇潜力 | 宜林地面积       | +    | 利用 ArcGIS 进行林地建设适宜性分析，统计获得宜林地面积        | 0.050 0 |
|           |      | 宜林地占行政区面积比例 | +    | 宜林地面积/行政区总面积                           | 0.050 0 |

注：行政区域碳汇总量根据前人研究各类型用地碳汇系数[6, 10]计算获得。

### 2.3 区域生态安全格局重要性评价方法

生态安全格局重要性评价包括生态功能重要性、生态敏感性以及景观连通性 3 个维度。根据《江苏省生态保护红线规划》《安徽省生态保护红线》《南京都市圈发展规划》，得出研究区主导的生态功能为水源涵养和生物多样性维护。选取水量平衡法模拟水源涵养的空间格局[48]，基于 InVEST 模型开展生物多样性保护服务的评价[49]。通过对各图层数据进行标准化再等权重叠加，获得生态功能重要性评价结果。

根据南京都市圈以平原和丘陵为主、降雨分布不均、水资源丰富的特点，选取土壤侵蚀、洪涝风险与水质污染 3 项威胁作为主要生态环境问题，根据短板理论将 3 个图层分别进行标准化处理并取最大值作为生态敏感性评价结果。其中土壤侵蚀敏感性评价通过土壤流失方程模型计算获得[50]，洪涝灾害敏感性通过选取降雨、高程、坡度标准差、与河流的距离等多因子进行综合评价[51]。水质污染对区域范围内河流、湖泊与水库分别形成四级缓冲区[52]。景观连通性评价可有效判断各个生态斑块之间的连通性强弱[53]。可能连通性连接指数（PC）被广泛应用于景观连通性的评价。通过对 PC 的计算，可求取景观中各斑块对景观连通性的重要性。记斑块 i 在景观中的重要值为 dPCi（%），含义为当对应斑块被剔除时，整体景观可能连通性的变化。dPCi 值越高，表示该斑块在景观连通中的重要性越高。本文基于 Guidos 软件进行 MSPA 分析，提取其核心区；再利用 Conefor 软件及其 ArcGIS 插件，计算核心区斑块连通重要性值 dPC[54]。

运用自然断点法将生态功能重要性、生态敏感性与景观连通性分为低、中、高 3 个等级。将重要性、敏感性与连通性图层等权重叠加获得生态安全格局重要性评价结果，叠加结果可划分为“极重要”“重要”“较重要”“一般”“不重要”5 个等级。

### 2.4 多尺度评价结果融合方法

将城市减排增汇潜力评价的结果作为区域生态安全格局重要性评价结果的修正因子，使得减排增汇潜力越高的城市栅格尺

度生态安全格局重要性评价结果越高，从而有更多的生态空间被纳入保护范围。以生态安全格局重要性评价结果为基础，若某城市减排增汇潜力为高等级，则将其境内生态安全格局重要性评价结果整体提升一级，即将“重要”“较重要”“一般”“不重要”分别提高为“极重要”“重要”“较重要”“一般”（图3）[55]。

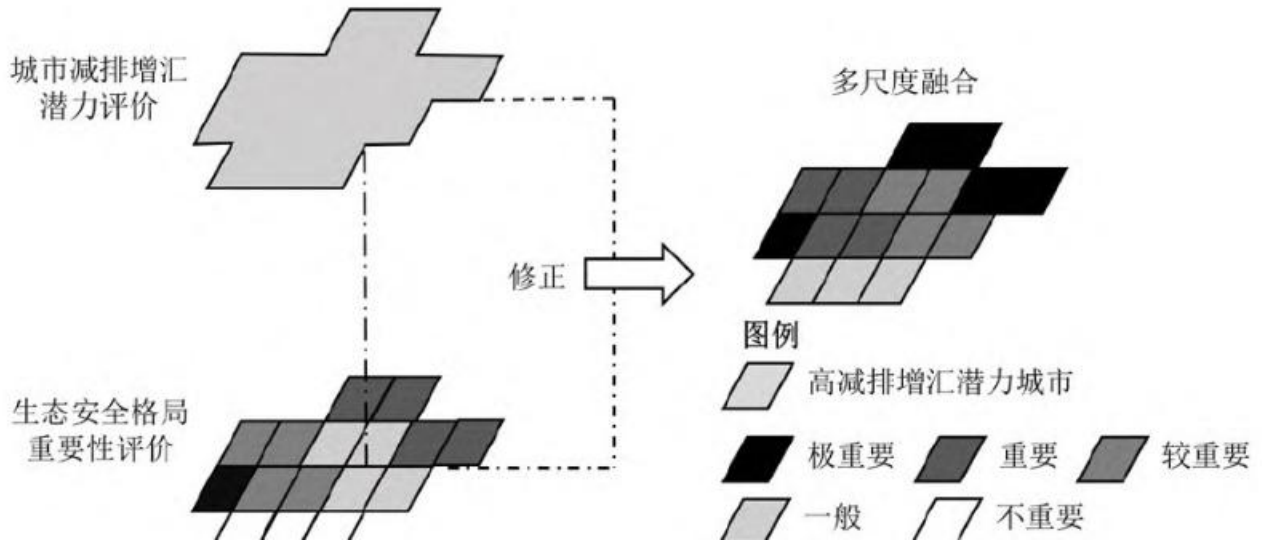


图3 多尺度评价结果融合示意

### 2.5 林地、湿地碳汇风险识别与方案校正

选择林地和湿地作为关键碳汇空间，利用年度 NDVI 表征林地和湿地的植被覆盖情况，植被覆盖度降低则代表生态系统存在退化的趋势，生态碳汇也面临减少的风险，说明林地和湿地生态系统受到了人为或自然的扰动，应给予保护与管理。通过对 2015 年和 2020 年林地和湿地 NDVI 数据利用 ArcGIS 进行栅格运算（2020 年 NDVI—2015 年 NDVI）得到林地、湿地生态退化评价结果，将其分为退化严重（<-0.1）、退化一般（-0.1—0）、未退化（>0）3 种[56]。退化严重的林地和湿地作为亟需保护的重要生态斑块，是优化区域生态安全格局，实现双碳目标的重要干预对象，将其作为“极重要”斑块校正生态安全格局重要性评价结果。

### 2.6 区域生态源地识别与廊道判定

以修正后的生态安全格局重要性评价结果为依据，选取极重要、重要斑块作为生态安全格局的源地。采用最小累积阻力模型提取源地间的生态廊道，利用 ArcGIS 的 Distance 模块工具进行分析，考虑到源、距离和景观介面 3 种因素，计算物种从源地到目的地运动过程中需要耗费的代价，选取其中阻力最低的通道作为源地之间的生态廊道[57]。其中依据各种用地类型阻力系数（林地 1，草地 10，水田 20，旱地 30，水体 50，农村居民点 400，城镇及其他建设用地 500）构建景观阻力界面。计算公式为：

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \dots\dots\dots (1)$$

式中：MCR 为最小累积阻力值； $D_{ij}$  为物种从源地  $j$  到景观单元  $i$  的空间距离； $R_i$  为景观单元  $i$  对物种运动的阻力系数； $f$

表示最小累积阻力与生态过程的正相关关系。

### 3 结果及分析

#### 3.1 区域减排增汇潜力空间格局

减排重要性空间格局。宣城、马鞍山、淮安以及镇江减排重要性高，滁州、芜湖、扬州、金坛和溧阳减排重要性为中等，南京市减排重要性远低于其他城市（图 4a）。镇江、淮安、宣城碳排放效率较低，一方面是因为其工业能源利用效率不高，能源消费结构以煤炭为主，另一方面是因为其土地利用效率低，城市存在无序扩张的情况，导致建设用地地均产值偏低以及人均建设用地面积偏大。而马鞍山、芜湖以及金坛碳排放效率较高，其中马鞍山和芜湖由于其发展阶段的原因，普遍人均用电量较低且城市用地较为集约高效。南京碳排放效率居于南京都市圈中游，其建设用地相对较为紧凑集约，但单位工业能耗 GDP 较低，主要因其以重化工业为重点产业，能源需求较大、能源结构较为高碳，同时南京人均用电量高居南京都市圈首位，与其城镇化率以及居民生活水平高有较强关系。马鞍山、宣城、淮安市减排潜力较大，其中马鞍山和宣城人口基数相对小且其人口呈现流出的趋势，而淮安市虽然人口规模较大，但其七普相对六普常住人口增长率高达-5.07%，人口流失明显。南京减排潜力在研究区中最小，因其人口总量远高于其他城市，且其作为南京都市圈的核心增长极，人口增长趋势明显，七普相对六普常住人口增长率高达 16.37%。

增汇重要性空间格局。宣城市增汇重要性远远高于其他城市，芜湖、南京、金坛及溧阳增汇重要性为中等，滁州、马鞍山、淮安、扬州及镇江增汇重要性低（图 4b）。从碳汇能力来看，宣城市凭借其极高的林地总量和碳汇密度远远高于其他城市，金坛、溧阳、芜湖和南京碳汇能力次之，其中金坛市由于城市扩张，林地减少速率最快。扬州和淮安由于多耕地少林地，碳汇能力最弱。从增汇潜力来看，宣城和溧阳较大，宜林地较多，南京、芜湖、滁州和溧阳次之，扬州、淮安宜林地最少，增汇潜力最小。

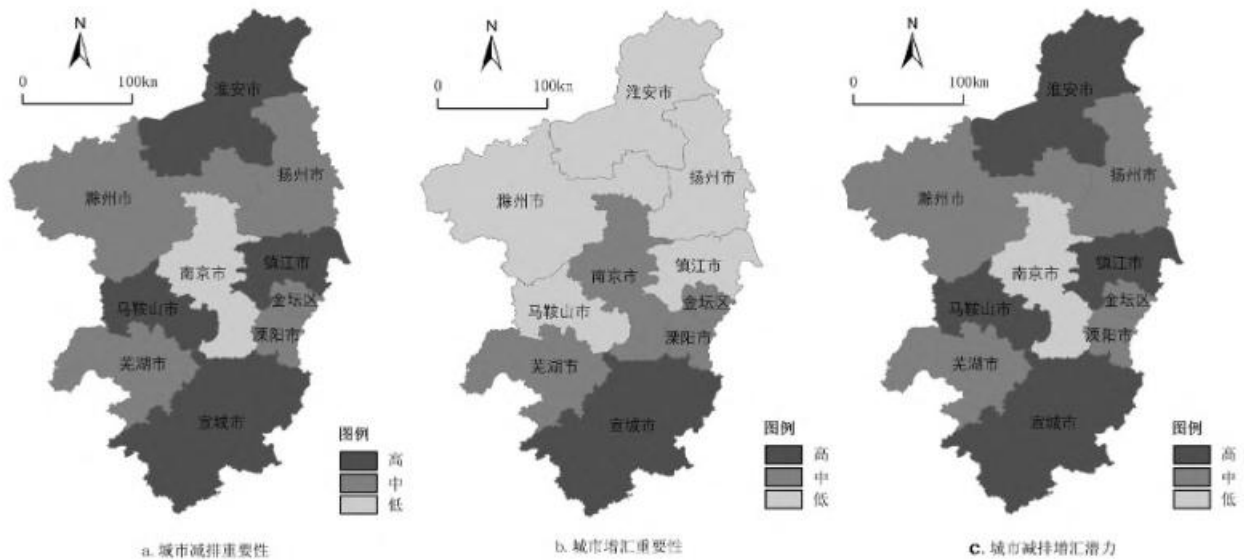


图 4 南京都市圈减排增汇潜力空间格局

基于南京都市圈城市尺度减排增汇潜力评价结果分析，宣城、马鞍山、镇江和淮安 4 市减排增汇潜力为高等级，在区域中应承担更多的减排增汇责任，应通过规划与政策来抑制其碳排放正向影响因素（建设用地扩张）发展，促进碳汇正向影响因素

(生态空间保护与修复)增长, 将其减排增汇的潜力变成实际能力。滁州、芜湖、扬州、金坛和溧阳 5 市减排增汇潜力为中等, 南京市减排增汇潜力最低 (图 4c)。

### 3.2 区域生态安全格局重要性空间格局

生态功能重要性空间格局。水源涵养重要性高值区域主要分布在南京都市圈南部宣城境内 (图 5a), 区域内降雨量相对较高, 植被以林地为主且植被覆盖度较高, 蒸散发能力相对适中。生物多样性保护重要性高值区域主要分布在南京都市圈南部宣城境内、都市圈西北部滁州和淮安境内 (图 5b), 区域内主要为林地密集的山区地带, 这些区域人类开发活动影响较小, 有利于维护生物多样性, 同时区域内的大中型湖泊以及长江也是高值区域, 其水生生物种类丰富, 生境适宜度较高, 已经得到人类的有效保护管理。南京都市圈的低值区域主要分布在南京市、镇江市、金坛区和溧阳市, 这些区域都属于苏南发达地区, 人类开发程度相对较高, 对生物生存具有较大的负面影响。两者加权求和获得区域生态功能重要性空间格局。高值区域主要位于都市圈南部的山区地带、滁州东部的林草混合地带以及长江沿岸的林地片区 (图 5f), 对于固碳释氧、水源涵养以及生物多样性维护都能发挥关键作用。

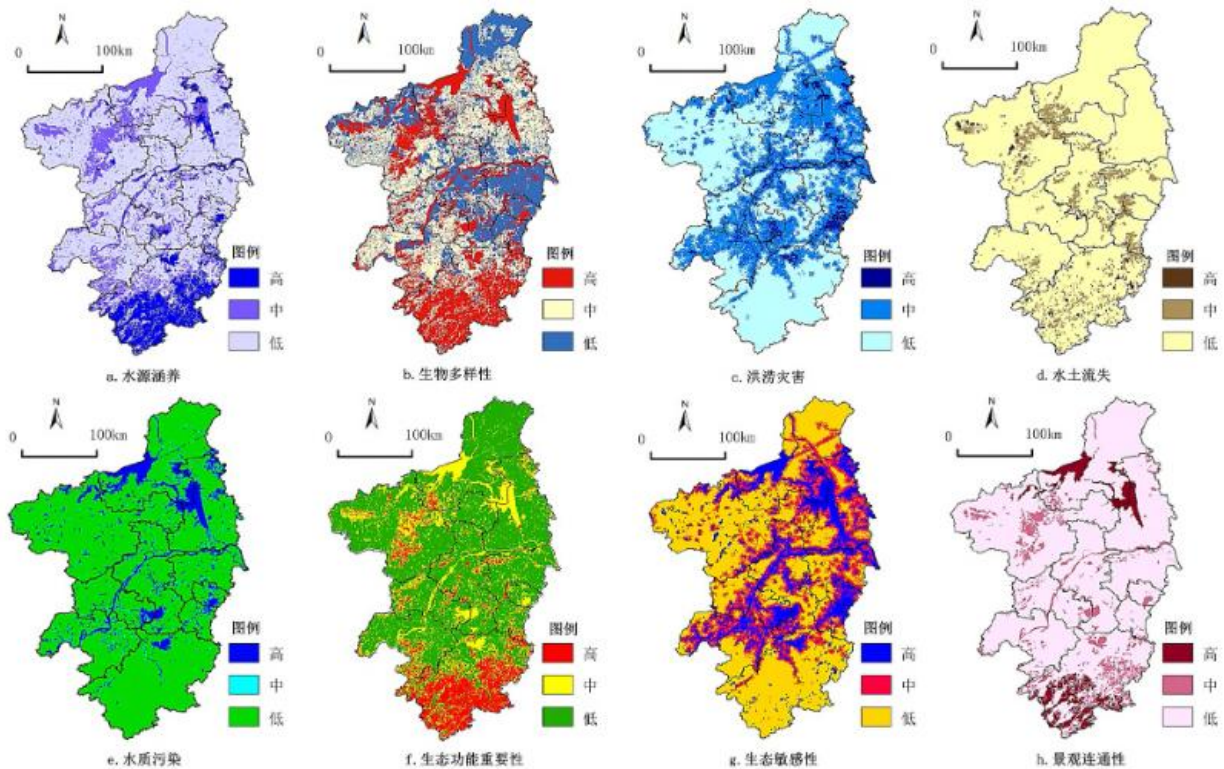


图 5 南京都市圈生态功能重要性、生态敏感性、景观连通性空间格局

生态敏感性空间格局。洪涝灾害敏感性高值和中值区域主要分布在都市圈西部的芜湖和马鞍山、东部的扬州、金坛和溧阳、北部的淮安市以及长江沿岸地区 (图 5c)。这些地区地势较为平坦, 降雨量相对丰富且集中于夏季, 河湖水系众多, 易发生洪涝灾害。水土流失敏感性高值和中值区域主要分布在宣城北部、滁州东部和西部、南京中部、镇江北部以及金坛和溧阳部分地区 (图 5d)。这些地区多山地丘陵, 降雨丰富且集中, 土壤可蚀性较强, 植被覆盖度相对较低, 水土流失较为严重且会产生次生灾害。水质污染敏感性高值区域主要分布在都市圈的中部和北部, 多为大中型河流湖泊和重要水库, 是区域生产生活重要的水源地, 其沿岸地区也是水质污染的高风险区 (图 5e)。三者取最大值获得区域生态敏感性空间格局 (图 5g), 高值区域主要

为都市圈内的大中型河湖水系及其周边地区，呈线状和面状分布，以及都市圈西部和南部的山区，呈点状分布，洪涝灾害的敏感区范围要远远大于水土流失的范围。

景观连通性空间格局。景观连通性高值区域主要为宣城南部的林区以及都市圈北部的洪泽湖及高邮湖，其对于维护整体景观连通性具有显著作用（图 5h）。中值区域主要为长江、滁州的林区和草地密集区以及都市圈南部的石臼湖、南湖和长荡湖。

生态安全格局重要性评价结果及其修正。根据修正前生态安全格局重要性评价结果（图 6a），极重要的生态基底面积占研究区的 8.6%，主要分布在研究区南部的山区地带、中部的长江以及北部的洪泽湖和高邮湖。重要生态基底面积占研究区的 10%，主要分布在研究区北部的丘陵地带，中部宁镇与宁滁交界的山林地带以及南部的石臼湖、长荡湖以及南湖。一般和不重要生态基底分别占研究区的 36.7%和 32%，主要分布在南京都市圈中部、滁州西部以及淮安北部。

基于南京都市圈城市减排增汇潜力评价以及区域生态安全格局重要性评价的结果，将减排增汇潜力评价为高等级的宣城、马鞍山、淮安与镇江境内生态安全格局重要性评价结果整体提升一级（图 6b）。

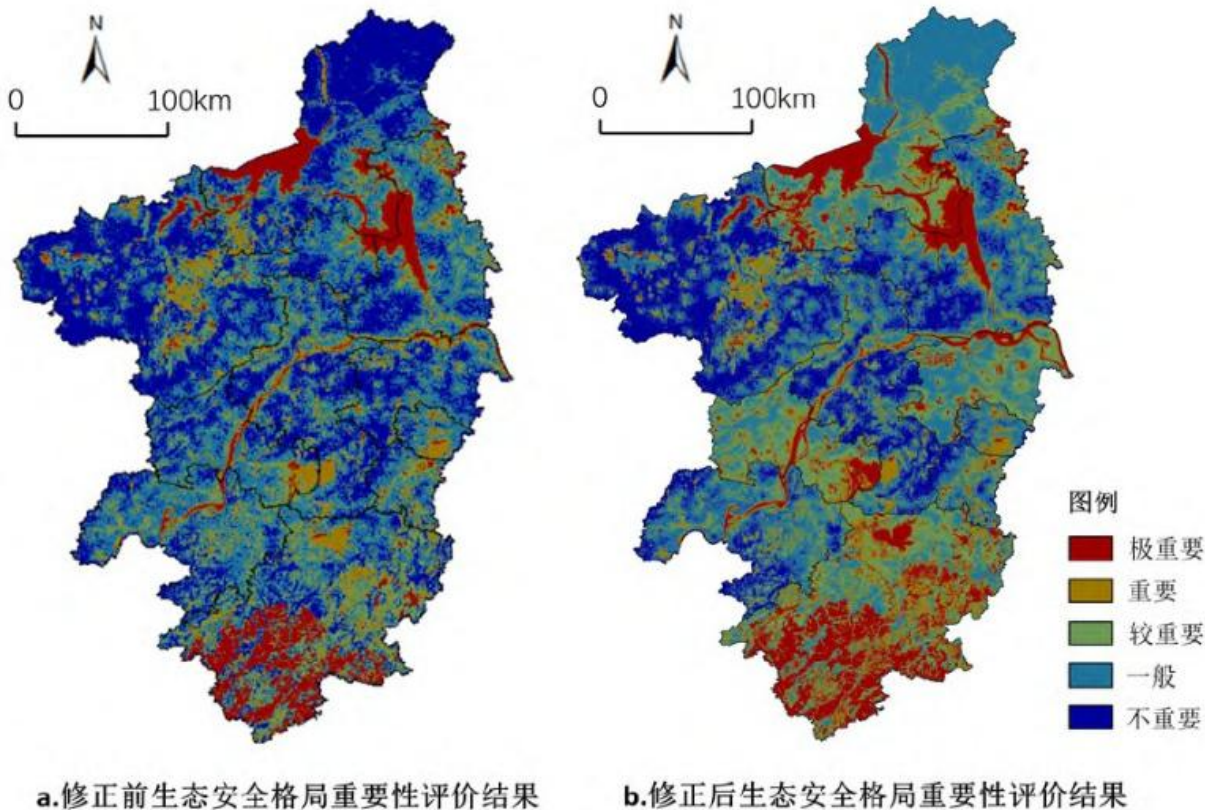


图 6 南京都市圈生态安全格局重要性分级

### 3.3 区域生态碳汇风险空间格局

从图 7 可见，林地生态退化较严重的区域主要位于宣城东部、滁州东部、宁镇以及宁滁交界地带、金坛区西部（图 7a）。

这些地区大都毗邻城镇建设用地或工矿用地，受人类活动干扰影响较大，一定程度上导致林地生态退化。林地生态改善显著的区域主要位于淮安南部、芜湖以及宣城南部。这些林地大都位于城市边缘，受人类影响相对较小。湿地生态退化较严重的区域主要位于扬州中部和东北部、淮安西部以及宁马交界地带。此类地区分别毗邻高邮湖、洪泽湖和石臼湖，且大都属于城市近郊风景名胜，受人类旅游开发影响较大，一定程度上导致其生态功能衰退，固碳能力降低。为满足关键碳汇空间的保护与修复需求，将生态退化严重的林地和湿地作为“极重要”斑块校正图 6b 中结果。

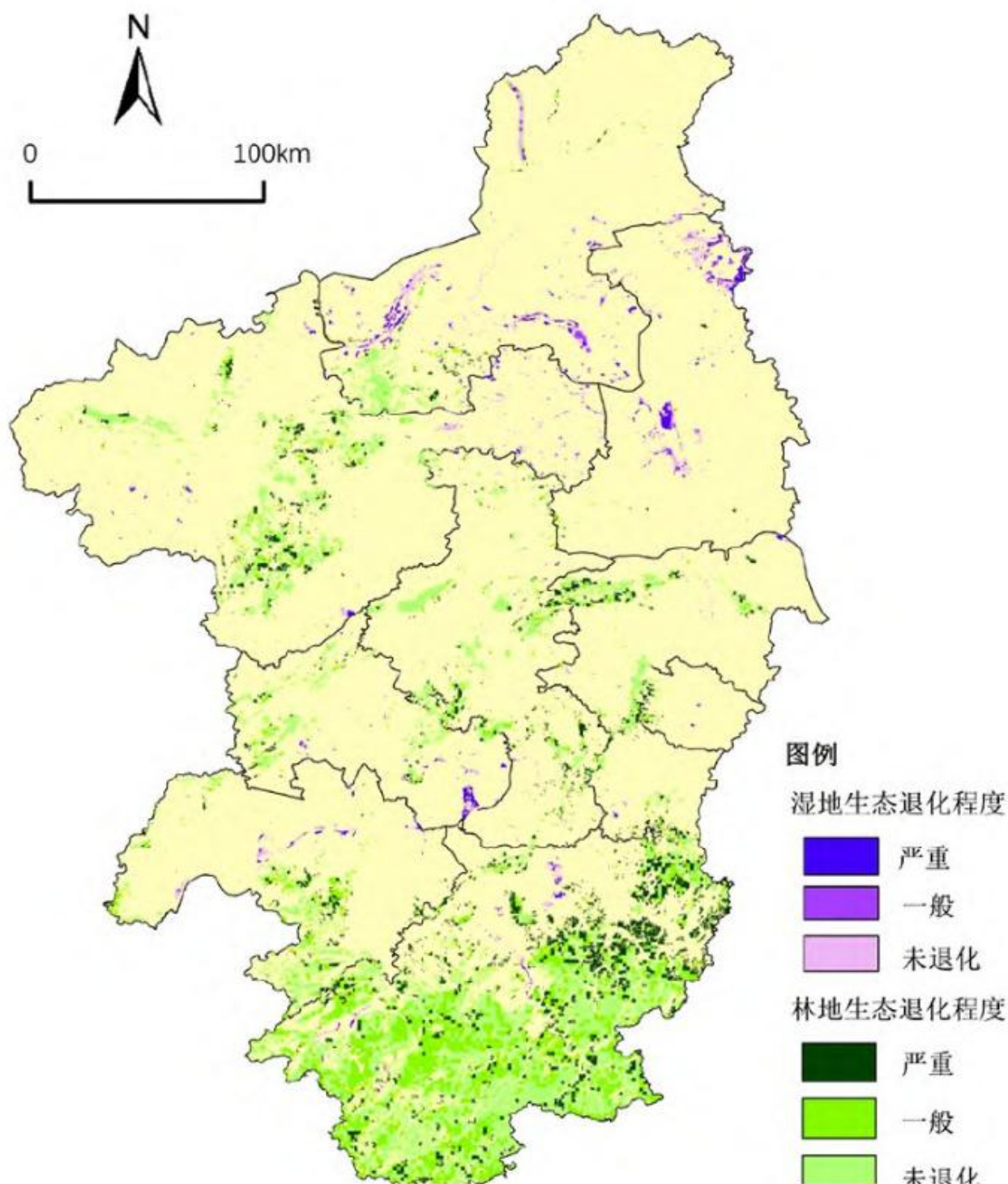


图 7 南京都市圈林地及湿地生态退化程度空间格局

### 3.4 南京都市圈生态安全格局优化

将生态安全格局重要性评价结果（经城市减排潜力评价、生态退化严重林地和湿地校正）中的“极重要”斑块与“重要”斑块作为进行区域生态安全格局优化的依据。根据“重要”和“极重要”生境斑块的面积大小、空间分布格局，选取 28 个大型生境斑块作为区域重要生态源地（图 8）。区域重要生态源地面积共计 1.81 万 km<sup>2</sup>，约占南京都市圈总面积的 28%。都市圈南部和北部分别因为有大片山林和大型水体，单个生态源地面积较大，中部生态源地相对较小。基于最小累积阻力模型提取区域生态廊道共 41 条，总长 948km，主要分布在植被覆盖相对较好、生态系统服务价值较高地带，为源地之间的生物迁徙、基因传递、能量流通与信息交换起到桥梁作用。

生态源地应以保护为主，在国土空间规划中应优先为其划定生态保护红线，严格限制生态源地内进行城市开发建设，有效发挥生态空间的生态服务功能，提升南京都市圈生态系统碳汇。基于城市减排增汇潜力评价，宣城、淮安、马鞍山、镇江碳排放和土地利用效率低，减排增汇潜力大，需在区域分工中承担更多的减排增汇责任。在区域生态安全格局优化中这 4 个城市有更多的生态基底被识别划定为生态源地（表 3），城市主体需对生态源地用途转变实行严格管制，同时以此作为硬约束限制城市无序扩张，倒逼城市进行低碳集约转型。在南京都市圈生态安全格局优化方案中，有 8 个生态源地横跨多个城市行政区域，主要为横跨淮滁扬的高邮湖，横穿宁镇扬马芜五市的长江，宁镇与金坛溧阳交界处的大片林地保护区，宁马交界处的石臼湖以及林区。这些生态源地需要各城市主体进行协同治理，避免各城市各自为政，出于地方保护主义而破坏跨界生态源地保护的完整性。

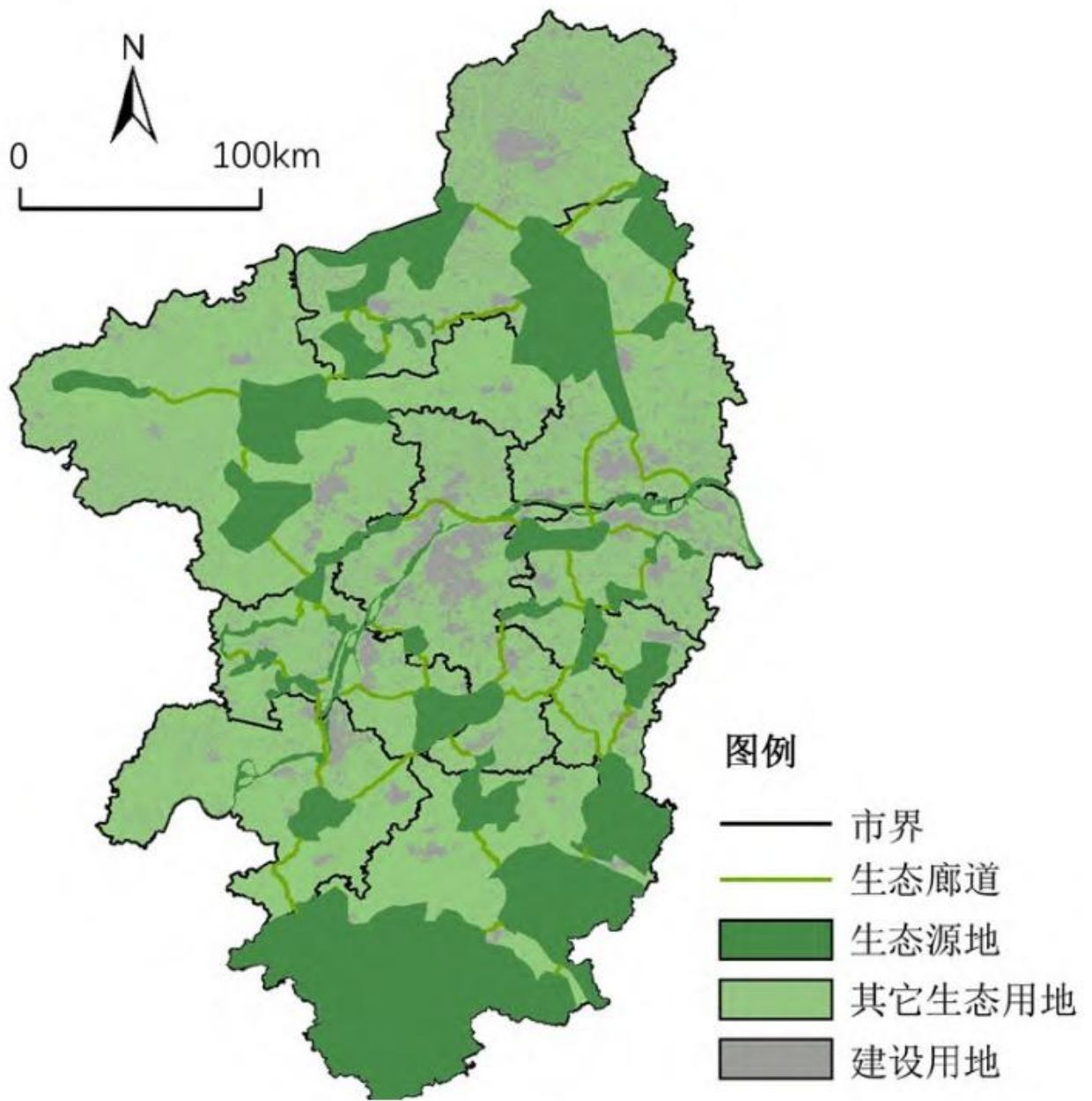


图 8 南京都市圈生态安全格局优化

表 3 南京都市圈生态源地空间分布统计表

| 城市   | 生态源地面积 (km <sup>2</sup> ) | 占行政区面积比例 (%) |
|------|---------------------------|--------------|
| 宣城市  | 8 527                     | 69.1         |
| 淮安市  | 2 703                     | 26.8         |
| 滁州市  | 2 166                     | 16.2         |
| 扬州市  | 1 356                     | 20.6         |
| 马鞍山市 | 987                       | 24.4         |
| 镇江市  | 656                       | 17.3         |

|     |     |       |
|-----|-----|-------|
| 南京市 | 598 | 9. 1  |
| 芜湖市 | 485 | 8. 0  |
| 金坛区 | 306 | 31. 3 |
| 溧阳市 | 273 | 17. 8 |

对于生态源地中的生态退化严重林地，应以生态修复为主，其中因各种工程建设、生产挖损、自然灾害等因素所破坏的林地，应采取措施使其恢复到原来稳定的生态系统状态，以增加退化林地碳汇能力。而对于退化严重的湿地，应保护其现有的景观和生物，通过湿地水环境、土壤环境修复与物种恢复，将其由以旅游开发为主的风光名胜向以生态涵养为主的自然或人工湿地公园转变。

## 4 结论与讨论

本文通过厘清减排增汇目标与区域国土空间格局优化的关系，提出宏观与微观多尺度结合的区域生态安全格局优化思路与技术路线。研究识别出南京都市圈重要生态源地以及区域生态廊道，作为实现双碳目标的重要生态保护和修复空间载体。研究发现宣城、淮安、马鞍山、镇江减排增汇潜力较大，在区域分工中需承担更多减排增汇责任；南京都市圈生态源地主要分布于南部的大片林地和大型湖泊、北部的林草混合片区和大型湖泊以及横穿中部的长江，上述4市有更多的国土空间被识别划定为生态源地以倒逼其低碳集约转型。

本文最大的创新点在于引入城市减排增汇潜力评价和区域生态安全格局优化方法，将区域减排增汇责任的分解与国土空间层面的传导落实有机衔接，为区域实现双碳目标提供国土空间层面的技术方法支撑。本文提出的宏观尺度城市减排增汇潜力评价可以作为城市低碳发展定位的重要依据，而生态安全格局重要性评价作为国土空间双评价的重要内容则更多从生态服务和生态安全的视角对区域生态本底进行分析。通过城市减排增汇潜力评价结果修正区域生态安全格局重要性评价的研究思路，可以有效实现多尺度空间融合，衔接城市主体功能定位与生态基底评价，有利于区域发展意图的传导与落实。最终识别的重要源地以及廊道则可以作为国土空间规划中三区三线划定的参考。本文也存在着部分不足，区域实现减排增汇目标涉及到经济、社会、生态各子系统的转型，应实现其三者的协调可持续发展，仅仅考虑国土空间的生态服务功能，而不对其经济社会价值进行统筹考量，存在一定局限性。

未来需进一步研究双碳目标下区域生态安全格局优化方案的可实施性。首先，双碳目标的实现需要在区域层面进行统筹，通过目标的分解与落实，势必会有城市的发展权受到限制，更多的承担减排增汇的责任。在本文的生态安全格局优化方案中，诸如宣城有近70%的国土空间作为区域重要生态源地以进行生态保护与修复，意味着宣城需要进行巨大的生态投入且空间发展受限。如何将固碳收益为主的生态服务功能市场化，进行科学的碳汇核算并通过市场机制和政府补偿机制实现，值得深入研究。其次，在识别的生态源地中，有不少源地都横跨多个城市行政辖区范围，如何在方案中加强区域跨界地区的生态治理，厘清相关城市的责权利关系是需要深入讨论的方向。最后，如何在双碳目标导向下的国土空间优化过程中，综合利用区域生态安全格局优化与城市用地变化模拟方法，统筹生态安全、粮食安全与经济社会发展也是亟需解决的关键问题。

## 参考文献

- [1] 金乐琴, 刘瑞. 低碳经济与中国经济发展模式转型[J]. 经济问题探索, 2009, 318(1): 84-87.
- [2] 林伯强, 姚昕, 刘希颖. 节能和碳排放约束下的中国能源结构战略调整[J]. 中国社会科学, 2010, (1): 58-71, 222.
- [3] 王礼茂. 几种主要碳增汇/减排途径的对比分析[J]. 第四纪研究, 2004, (2): 191-197.

- 
- [4] 潘家华. 碳排放交易体系的构建、挑战与市场拓展[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(8):1-5.
- [5] 何英, 张小全, 刘云仙. 中国森林碳汇交易市场现状与潜力[J]. 林业科学, 2007, (7):106-111.
- [6] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981-2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2007, (6):804-812.
- [7] Martin H, Markus R. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks[J]. Nature, 2008, 451(7176):289-292.
- [8] W B Zhu, J Zhang J, Y P Cui, et al. Ecosystem carbon storage under different scenarios of land use change in Qihe catchment, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(9):1507-1522.
- [9] 袁凯华, 梅昀, 陈银蓉, 等. 中国建设用地集约利用与碳排放效率的时空演变与影响机制[J]. 资源科学, 2017, 39(10):1882-1895.
- [10] 李颖, 黄贤金, 甄峰. 江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(S2):102-107.
- [11] 赖力. 中国土地利用的碳排放效应研究[D]. 南京: 南京大学博士学位论文, 2010.
- [12] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J]. 自然资源学报, 2021, 36(12):2995-3006.
- [13] 董祚继. 低碳概念下的国土规划[J]. 城市发展研究, 2010, 17(7):1-5.
- [14] 熊健, 卢柯, 姜紫莹, 等. “碳达峰、碳中和”目标下国土空间规划编制研究与思考[J]. 城市规划学刊, 2021, (4):74-80.
- [15] 闫凤英, 杨一苇. 空间规划的碳排放约束机制与治理框架[J]. 西部人居环境学刊, 2021, 36(3):37-45.
- [16] 刘志林, 秦波. 城市形态与低碳城市: 研究进展与规划策略[J]. 国际城市规划, 2013, 28(2):4-11.
- [17] 郑德高, 吴浩, 林辰辉, 等. 基于碳核算的城市减碳单元构建与规划技术集成研究[J]. 城市规划学刊, 2021, (4):43-50.
- [18] 黄贤金, 张安录, 赵荣钦, 等. 碳达峰、碳中和与国土空间规划实现机制[J]. 现代城市研究, 2022, (1):1-5.
- [19] 覃盟琳, 黎小元, 袁倩文, 等. 北部湾城市群(广西)低碳空间结构评价与优化策略[J]. 规划师, 2019, 35(13):82-86.
- [20] 潘海啸, 汤葐, 吴锦瑜, 等. 中国“低碳城市”的空间规划策略[J]. 城市规划学刊, 2008, (6):57-64.
- [21] 赵荣钦, 张帅, 黄贤金, 等. 中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J]. 地理学报, 2014, 69(10):1425-1437.
- [22] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J]. 生态学报, 2021, 41(14):5814-5824.
- [23] 李璐, 董捷, 徐磊, 等. 功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区——以武汉城市圈为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34(5):1003-1015.

- 
- [24] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, (1):10-17.
- [25] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. 生态学报, 2004(4):761-768.
- [26] Cook E A. Urban landscape networks:An ecological planning framework[J]. Landscape Research, 1991, 16(3):7-15.
- [27] F Kong,H Yin,Nakagoshi N,et al.Urban green space network development for biodiversity conservation:Identification based on graph theory and gravity modeling[J].Landscape and Urban Planning, 2010, 95(1-2):16-27.
- [28] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性-敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J]. 地理研究, 2017, 36(3):471-484.
- [29] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 等. 湖南省城市群生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2011, 31(10):2863-2874.
- [30] 戴璐, 刘耀彬, 黄开忠. 基于 MCR 模型和 DO 指数的九江滨水城市生态安全网络构建[J]. 地理学报, 2020, 75(11):2459-2474.
- [31] 蒙古军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7):1052-1061.
- [32] 彭建, 杨旻, 谢盼, 等. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区[J]. 生态学报, 2017, 37(13):4562-4572.
- [33] 杨清可, 王磊, 李永乐, 等. 基于景观生态安全格局构建的城镇空间扩展模式研究——以江苏沿海地区为例[J]. 地理科学, 2021, 41(5):737-746.
- [34] 胡飞, 余亦奇, 郑玥, 等. 生态保护红线划定方法研究[J]. 规划师, 2018, 34(5):108-114.
- [35] 刘鑫. 黑龙江省碳排放及增汇减排潜力研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学博士学位论文, 2021.
- [36] 荣培君, 张丽君, 秦耀辰, 等. 建成环境对城市居民日常出行碳排放的影响——以开封市 248 个居住区为例[J]. 地理研究, 2019, 38(6):1464-1480.
- [37] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263:185-190.
- [38] Were D, Kansime F, Fetahi T, et al. Carbon sequestration by wetlands:A critical review of enhancement measures for climate change mitigation[J]. Earth Systems and Environment, 2019, 3(2):327-340.
- [39] 曹宇, 王嘉怡, 李国焯. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知[J]. 中国土地科学, 2019, 33(7):1-10.
- [40] 付梦娣, 唐文家, 刘伟玮, 等. 基于生态系统服务视角的生态风险评估及生态修复空间辨识——以长江源区为例[J]. 生态学报, 2021, 41(10):3846-3855.

- 
- [41] 周迪, 王文捷, 陈梓佳. 基于配额指标重要性视角的中国碳排放配额再分配[J]. 中国环境科学, 2020, 40(12):5551-5560.
- [42] 丁明磊, 李宇翔, 赵荣钦, 等. 面向配额分配模拟的工业行业碳排放绩效——以郑州市为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34(5):1027-1040.
- [43] Y Kong, T Zhao, R Yuan, et al. Allocation of carbon emission quotas in Chinese provinces based on equality and efficiency principles[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211:222-232.
- [44] 张继宏, 程芳萍. “双碳”目标下中国制造业的碳减排责任分配[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9):64-72.
- [45] 张苗, 甘臣林, 陈银蓉, 等. 中国城市建设用地开发强度的碳排放效率分析与低碳优化[J]. 资源科学, 2016, 38(2):265-275.
- [46] 杨超, 吴立军, 李江风, 等. 公平视角下中国地区碳排放权分配研究[J]. 资源科学, 2019, 41(10):1801-1813.
- [47] 田云, 林子娟. 巴黎协定下中国碳排放权省域分配及减排潜力评估研究[J]. 自然资源学报, 2021, 36(4):921-933.
- [48] 白杨, 初东, 田良, 等. 武汉城市圈的水源涵养功能重要性评价研究[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(2):233-241.
- [49] 刘园, 周勇, 杜越天. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10):2429-2440.
- [50] 赵明松, 李德成, 张甘霖, 等. 基于 RUSLE 模型的安徽省土壤侵蚀及其养分流失评估[J]. 土壤学报, 2016, 53(1):28-38.
- [51] 莫建飞, 陆甲, 李艳兰, 等. 基于 GIS 的广西洪涝灾害孕灾环境敏感性评估[J]. 灾害学, 2010, 25(4):33-37.
- [52] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 基于“重要性-敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J]. 地理研究, 2017, 36(3):471-484.
- [53] 吴健生, 张理卿, 彭建, 等. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J]. 生态学报, 2013, 33(13):4125-4133.
- [54] F Tang, X Zhou, L Wang, et al. Linking ecosystem service and MS-PA to construct landscape ecological network of the Huaiyang Section of the Grand Canal[J]. Land, 2021, 10(9):919.
- [55] 夏皓轩, 岳文泽, 王田雨, 等. 省级“双评价”的理论思考与实践方案——以浙江省为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10):2325-2338.
- [56] 闫俊杰, 黄辉, 崔东, 等. 新疆伊犁河谷草地退化及其对生态服务价值的影响[J]. 生态经济, 2018, 34(1):191-196.
- [57] 冯舒, 唐正宇, 俞露, 等. 城市群生态网络协同构建场景分析研究——以粤港澳大湾区为例[J]. 生态学报, 2022, (20):1-15.