

王立, 陆林, 杨永峰, 程亚文, 王 原. 基于生态系统服务权衡的自然保护区功能区划研究——以安徽升金湖国家级自然保护区为例. 国家公园, 2023, 1(3): - .

Wang L, Lu L, Yang Y F, Cheng Y W, Wang Y. Functional zoning of nature reserves based on ecosystem service trade-offs: A case study of Anhui Shengjin lake national nature reserve. National Park, 2023, 1(3): - .

基于生态系统服务权衡的自然保护区功能区划研究 ——以安徽升金湖国家级自然保护区为例

王 立¹, 陆 林¹, 杨永峰², 程亚文^{1,3}, 王 原^{1,4,*}

1 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241000

2 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100101

3 中铁城市规划设计研究院有限公司, 芜湖 241000

4 上海栖星生态环境咨询有限公司, 上海 200433

摘要:功能区划作为自然保护区进行科学布局和功能定位的重要手段,旨在促进生态系统服务功能的协同发挥。运用 Marxan With Zones 模型方法,将生态系统服务权衡分析纳入到安徽升金湖国家级自然保护区的功能区划研究,并展开情景模拟,得出不同生态系统服务保护目标下的功能区划方案。结论如下:(1)保护区的上湖区域及其周边河流入湖区域的生物多样性和防洪蓄水价值较高;东南部林地区域的水源涵养与碳储存价值较高,食物生产价值从西北部到东南部逐渐降低;社会文化价值较高的区域主要是沿湖地带。(2)生态系统服务之间存在不同程度的权衡/协同关系,其中,生物多样性作为关键生态系统服务,与其它生态系统服务之间存在显著的权衡/协同关系,根据相关性系数大小可分为高协同关系(防洪蓄水)、低协同关系(水源涵养和社会文化)与权衡关系(碳储存和食物生产);(3)生态系统服务权衡关系视角下的不同保护目标分配得到的功能区划情景均表现出核心区面积大幅增加的特征。此外,高协同情景下的功能区划更能兼顾多种生态系统服务,且对不同典型珍稀濒危鸟类的保护强度更大,能够总体上改善生态系统服务之间的权衡关系,提升生物多样性与防洪蓄水和水源涵养的协同关系,并降低与碳储存的权衡关系。

关键词:升金湖;国家级自然保护区;生态系统服务权衡;Marxan With Zones;功能分区

Functional zoning of nature reserves based on ecosystem service trade-offs: A case study of Anhui Shengjin lake national nature reserve

WANG Li¹, LU Lin¹, YANG Yongfeng², CHENG Yawen^{1,3}, WANG Yuan^{1,4,*}

1 School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China

2 Survey Planning and Design Institute, State Forestry Bureau, Beijing 100101, China

3 China Railway Urban Planning & Design Institute Co. Ltd, Wuhu 241000, China

4 Neweco Design Co. Ltd, Shanghai 200433, China

Abstract: Functional zoning is an essential strategy for the scientific layout and functional positioning of nature reserves, aiming to facilitate the coordinated delivery of ecosystem services. Using the Marxan With Zones model, an ecosystem service trade-off analysis was integrated into the functional zoning study of the Anhui Shengjin lake national nature reserve. Scenario simulations were conducted to derive functional zoning schemes under different conservation objectives for ecosystem services. The conclusions are as follows: (1) The Upper Lake area within the reserve and the surrounding river inflow areas hold the highest biodiversity and flood control and water storage values. The southeastern forested region

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41930644);安徽省哲学社会科学规划重点项目(AHSKZ2022D09)

收稿日期:2023-06-28; **采用日期:**2023- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: oneyuan1216@gmail.com

exhibits relatively high values for water conservation and carbon storage, whereas food production values gradually decrease from the northwest to the southeast. Areas along the lakefront hold relatively high social and cultural values. (2) There exist varying degrees of trade-offs/synergies among different ecosystem services. Biodiversity, as a crucial ecosystem service, exhibits significant trade-offs/synergies with other services. Based on correlation coefficients, these relationships are categorized into high synergy (flood control and water storage), low synergy (water containment and social culture), and trade-off relationships (carbon solids and food production). (3) Different conservation objectives derived from the perspective of ecosystem service trade-offs lead to scenarios wherein core area sizes in the functional zoning notably increase. Furthermore, scenarios under high synergy demonstrate more comprehensive consideration for multiple ecosystem services. They exhibit higher conservation intensity for various endangered and rare bird species, overall improving trade-offs between ecosystem services and enhancing the synergy between biodiversity, flood control and water storage, and water containment. Moreover, they mitigate trade-offs with carbon solids.

Key Words: Shengjin lake; national nature reserve; ecosystem service trade-offs; Marxan with Zones; functional zoning

我国自然保护区经过数十年的发展,已形成了国家公园、自然保护区、湿地公园、森林公园、地质公园、风景名胜、沙漠公园、海洋特别保护区等自然保护区,数量达 1.18 万处,其中陆域自然保护区总面积约占陆地国土面积的 18% 以上^[1-2]。自然保护区的快速发展也伴随着的诸多问题,如交叉重叠、孤岛化严重等,严重影响了保护成效,难以满足保障国家生态安全的基本要求^[3]。为了解决自然保护区发展中存在的问题,国家陆续出台了《生态文明体制改革总体方案(2015)》《建立国家公园体制总体方案(2017)》《关于建立以国家公园为主体的自然保护区体系的指导意见(2019)》(以下简称“《指导意见》”)等政策文件,旨在构建以国家公园为主体,自然保护区为基础,各类自然公园为补充的自然保护区体系。新体系对自然保护区功能区划提出了新的要求,以解决发展过程中产生的功能区划不合理问题^[4-6]。

功能区划作为自然保护区科学布局 and 空间管治的重要手段,目的是促进区域内生态系统服务功能的充分发挥与管理措施的有效实施^[7-8]。自然保护区作为自然资源丰富的区域,通常也是居民生产生活的重要空间,因此在满足生态保护的同时,也要兼顾到社区的生产生活。此外,还需要满足公众对自然教育、生态游憩等多种生态系统服务的需求。这些需求的合理配置都需要在功能区划中对有限的自然资源进行权衡与协调,以实现自然保护区基础性作用的发挥。目前,我国自然保护区功能区划研究主要以保护物种分布模拟、生态敏感性、自然生态分布特征、生态系统服务功能、景观资源等为重点,方法上主要有物种分布模型、不可替代性法、综合指标评价法等^[9-11],侧重于生物多样性与自然资源角度进行区划研究,较少反映自然保护区多种生态系统服务功能之间的权衡关系,导致功能区划无法满足不同生态系统服务功能在空间上的优化配置^[12]。随着自然保护区研究越来越重视生物多样性与生态系统服务的综合研究,系统保护规划方法和情景模拟得到越来越多的应用^[13-14]。系统保护规划从保护成本与保护目标两方面出发,解决生物多样性保护与资源利用的冲突,从而实现自然保护区功能区划的目标^[15]。Marxan with Zones 是系统保护规划的方法模型之一,是在 Marxan 模型的基础上扩展而来^[16],该方法可以将多种生态系统服务价值纳入功能分区方案中,并根据需求设置不同保护目标,模拟不同情景下的功能分区方案,有助于自然保护区功能区划方案的研究与探讨^[17-18]。

安徽升金湖国家级自然保护区生物种类丰富,是东亚-澳大利西亚珍稀候鸟迁徙路线中的重要越冬地与中国主要的鹤类越冬地之一,具有较高的生物多样性保护价值。升金湖承担着调蓄洪水、农业灌溉、调节气候等重要生态功能,是长江中下游重要生态屏障。此外,保护区内部存在大量的农田,是重要的粮食生产地区。本文以安徽升金湖国家级自然保护区为例,将生态系统服务权衡关系评价与 Marxan With Zones 模型方法相结合,通过设定不同保护目标,探讨不同目标情景下自然保护区功能区划方案,为安徽升金湖国家级自然保护区功能区划提供科学支撑。

1 研究区概况

安徽升金湖国家级自然保护区(以下简称“保护区”)位于东经 $116^{\circ}55'$ — $117^{\circ}15'$, 北纬 $30^{\circ}15'$ — $30^{\circ}30'$ 之间, 于 1986 年经安徽省政府批准建立, 并在 1997 年成为国家级自然保护区, 总面积 33340hm^2 , 地处长江下游南岸, 东南部属九华山余脉, 为低山丘陵, 西北部属沿江冲积平原, 为平原圩畈。保护区是我国和亚太地区水禽的重要越冬地、东亚-澳大利西亚候鸟迁徙通道上的重要停歇地以及长江下游重要水源地, 保护对象主要是白鹤、白头鹤、东方白鹳等珍稀濒危水鸟及其所栖息的湿地生态系统, 因白头鹤、东方白鹳、鸿雁、豆雁等越冬水禽数量连续多年均超过国际重要湿地 1% 数量标准, 于 2015 年被纳入国际重要湿地保护名录, 是安徽省目前唯一一处国际重要湿地。保护区的行政区域位于安徽省池州市东至县和贵池区交界处的滨江地区(图 1), 涉及两个区县的 6 个镇, 内部生活约有 6 万居民, 经济活动主要是农业为主, 主要种植水稻等作物。此外, 升金湖面积约 1.3万 hm^2 , 水产资源丰富, 渔业发展历史较为悠久, 素有“日产升金”之说, 其湖名也由此而来。

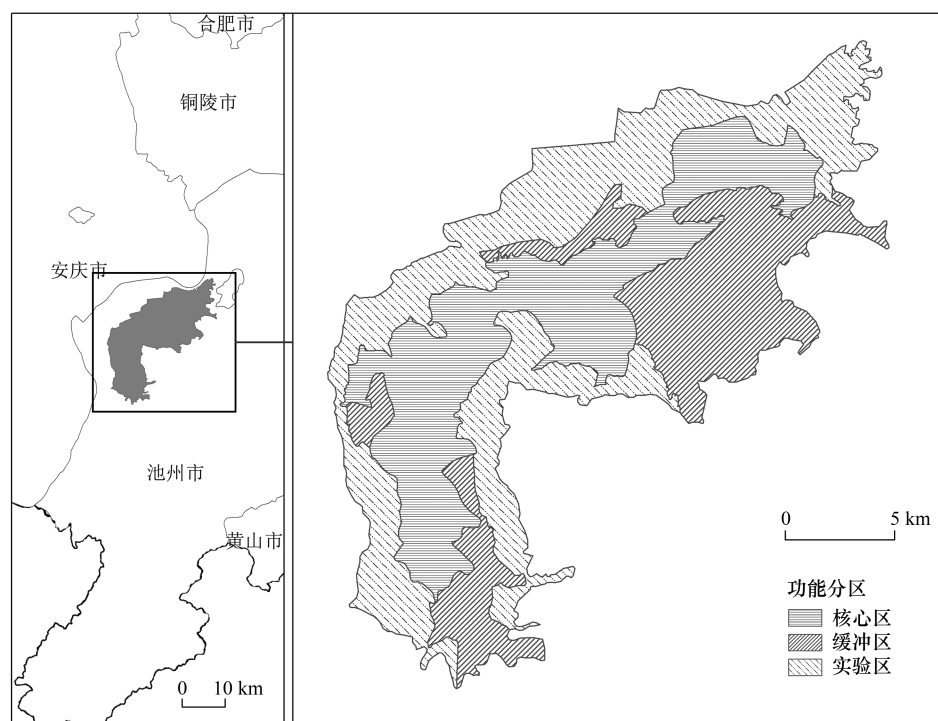


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

根据典型生态系统服务评价的数据需求与研究数据的可获性, 收集整理了保护区土地利用数据、气象数据、数字高程数据、鸟类分布点位数据以及边界数据等, 所有数据统一投影坐标。具体数据来源见表 1。此外, 根据保护区范围生成 $30\text{m}\times 30\text{m}$ 网格数据作为分析单元, 用以对生态系统服务数据进行统计分析。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务评价

(1) 生物多样性

MaxEnt 模型以生态位原理为理论基础, 依据物种出现点位与环境变量数据计算最大熵区域, 预测物种分布的潜在区域。本研究使用保护区重点保护的三种珍稀濒危鸟类潜在栖息地适宜性作为生物多样性评价标

准,分别是白头鹤、白鹤与东方白鹳。采用 MaxEnt 模型模拟三种候鸟的潜在栖息地^[19-20],得出候鸟的空间分布概率图。然后,以等权重加权求和方法将三种候鸟的潜在栖息地结果进行叠加分析,再以自然断裂点法将叠加结果划分为 1—5 等级^[21],值越高表示越适宜候鸟栖息,生物多样性价值越高,具体计算方法参考文献^[22-24]。此外,将鸟类适宜性分析结果中的 3—5 等级作为鸟类保护的适宜栖息地,以适宜栖息地功能区划的变化,表示情景方案与原区划对不同保护对象的保护效应。

表 1 数据来源
Table 1 Data source

数据 Data	内容 Contents	来源 Sources
土地利用数据 Land Use	农田、林地、草地、水域、湿地、裸地、建设用地	根据保护区管理处提供的土地利用数据整理
气象数据 Weather Data	降水、温度	中国气象数据网
	辐射数据	NASA 官网
	年均温、等温性、温度季节性变化、最热月最高温度、最冷月最低温度、最干季平均温度、年降雨量、最湿季降水量、最热季降水量、最冷季降水量	世界气象数据库
	潜在蒸散发量	Climatic Research Unit Climatic Research Unit
高程数据 DEM Data	30m 分辨率 DEM 数字高程	地理空间数据云
植被覆盖度数据 NDVI	Landsat8 遥感影像计算	地理空间数据云
鸟类数据 Bird Distribution Data	重点鸟类空间分布点位	保护区管理处提供的综合考察报告
人口数据 Population data	各村庄人口数量	保护区管理处提供《乡(镇)社会经济基本情况》
边界数据 Boundary Data	保护区功能分区	保护区管理处提供空间矢量数据

NDVI:归一化差异植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; DEM:数字高程模型 Digital Elevation Model

(2) 水源涵养

水量平衡方程基于整体性原理,通过水分的输入与输出来计算生态系统持水量,仅需要降雨量、蒸散量和土地利用类型等 3 个参数就能够较为准确的计算水源涵养量,是水源涵养测量的常用方法^[25-26],公式如下:

$$WS = \sum_{i=1}^j \left(\frac{P_i - R_i - ET_i}{1000} \right) \times A_i \tag{1}$$

式中,WS 为水源涵养供给量(m³);P_i为平均降水量(mm);R_i为地表径流量,通过降水量与地表径流系数相乘计算得到,其值基于相关研究归纳获得^[27-29];ET_i为日潜在蒸散发量;A_i为第 i 种土地利用的面积(hm²)。

(3) 碳储存

采用 InVEST Carbon Storage Sequestration 模型计算碳储量,公式如下:

$$C_{sum} = (C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil}) \times A \tag{2}$$

式中,C_{sum}为碳储量(t);C_{above}为地上碳储量;C_{below}为地下碳储量;C_{dead}为死亡有机碳储量;C_{soil}为土壤碳储量;A 为第 i 规划单元的面积。本文旨在研究保护区碳储存总量情况,因此未对碳库做深入研究^[30],该模型方法所需四个碳库的碳密度数据来源于相关研究文献^[31-35]。

(4) 防洪蓄水

湖泊蓄水量的大小可以有效的反映湖泊调洪蓄水能力的强弱,与湖泊水面面积、水位高度相关。但由于湖泊岸线的形状复杂,与断面并非垂直,所以湖泊蓄水量并不能按照简单的水面面积和水深相乘求得^[36]。根据升金湖的水文资料得出升金湖水面面积与容积的关系,通过线性回归分析,求得回归方程和相关系数的平方(R²)其中,R²为 0.9951,说明该方程的拟合优度较高。回归方程如下:

$$V = 2.4864 \times e^{0.041} \times A \tag{3}$$

式中,A 为升金湖面积;V 为蓄水量。

将某一水位的容积与该水位下的水面面积相除,求出该水位下的湖泊岸线形状参数,基于形状参数和高程数据求得 2020 年升金湖汛期、平水期以及枯水期蓄水量的空间分布。以湖泊不同湖区、不同水位段的蓄水

量作为衡量湖泊调洪蓄水能力的评估指数,采用自然间断点法划分为 1—5 等级,值越高表示防洪蓄水价值越高。

(5) 食物生产

采用食物营养转化模型,将各类食物重量转化为能量计算得出食物生产供给^[37—38]。公式如下:

$$FS = \sum_{i=1}^i FS_i = \sum_{i=1}^i M_i \times N_i \quad (4)$$

式中, FS_i 为食物生产供给总量(Kcal); M_i 为*i*种食物的总产量(t), N_i 为*i*种食物的单位能量(kcal/t),参考《中国食物成分表》^[39]。保护区主要以农田和湖泊为主,本文根据保护区资源情况,选择水稻和鱼类作为升金湖主要食物生产供给,将谷物能量分配给农田,水产品能量分配给水域。通过查阅《2019 年池州市统计年鉴》《2019 年全国农产品成本收益资料汇编》、保护区专著论文等公开出版资料以及实地走访当地居民等方式,可知保护区水稻亩产约为 406.87kg,鱼类亩产约为 342.04kg,以此作为食物生产能量值的单位食物产量。

(6) 社会文化价值

生态系统服务社会价值模型(Social Values for Ecosystem Service model, SolVES)是生态系统服务中社会文化价值量化评价与空间可视化的常用方法^[40]。具体方法是:通过问卷调查、半结构化访谈等方式获取利益相关者对生态系统服务的偏好,筛选出重要的社会文化价值类型;依据每种社会文化价值类型的空间分布及其所分配到的总金额,利用模型中的核密度分析工具生成价值指数数据;然后依据社会文化价值点及其环境因子,采用 MaxEnt 模型模拟社会文化价值点的潜在分布区域,得到潜在分布区域数据;最后,将价值指数与潜在分布区域数据相乘得到最终的社会文化价值^[41—44]。本文根据《升金湖国家级自然保护区及周边区域生态旅游规划(2018—2030)》、现场实地调研以及访客群体的问卷调查等方式,筛选出 2 种社会文化价值类型(美学价值、自然教育价值)和 27 个社会文化价值点,采用上述方法得到美学价值和自然教育价值的空间分布数据,再采用加权求和与自然断点法得到社会文化价值的 1—5 级的等级分布图,值越高表明社会文化价值越高。

2.2.2 功能区划方法

(1) 生态系统服务权衡分析

生态系统服务权衡是对生态系统服务间关系的一种综合把控。生态系统服务间的关系包括权衡(负相关关系)、协同(正向关系)和兼容(无显著关系)等多种类型。其中,权衡(tradeoffs)指不同生态系统服务此消彼长的情况,而协同(synergies)是两种或多种生态系统服务同时增强的情形^[45]。本研究采用 Pearson 相关系数表示生态系统服务之间的权衡/协同关系,正值表示两个 ESs 之间存在协同关系,负值表示两个 ESs 之间存在权衡关系^[46—47]。以生物多样性为关键生态系统服务,根据其与其他生态系统服务相关性值得相对大小,将其其他 5 类生态系统服务分为三类权衡/协同关系,分别是高协同、低协同与权衡,并以此作为功能区划中不同情景设定保护目标分配的依据,以期减少生态系统服务间的权衡关系,实现生态系统服务的综合保护。

(2) Marxan with Zones

Marxan with Zones 模型采用模拟退火算法选择“保护价值高、保护成本低”的规划单元来构成分区,通过迭代运算计算出各个单元不可替代性以选择“性价比”最高的单元,当选择的单元包含的 ESs 之和满足目标数值时,该单元形成分区^[14,17—18]。具体公式如下:

$$\text{ObjectiveFunction} = \sum_{\text{PU}_s} \text{Cost} + \text{BLM} \sum_{\text{PU}_s} \text{Boundary} + \sum_{\text{Features}} \text{FPF} \times \text{FeaturePenalty} \quad (5)$$

式中,Cost 为成本因子;PU_s 为规划单元;BLM 为边缘长度调节系数,是控制解决方案空间紧凑性的参数,与 Marxan 不同的是,在 Marxan with Zones 中,BLM 参数不需要校准,取值为 0 表示不考虑空间连接性,取值为 1 则相反;Boundary 为规划单元边界长度;FPF 为惩罚因子,当无法达到保护目标时,添加到目标函数的惩罚值,其值越高,表示对应的特征因子重要性越高;Feature Penalty 为保护特征因子^[48—49]。功能分区的技术路线见图 2。

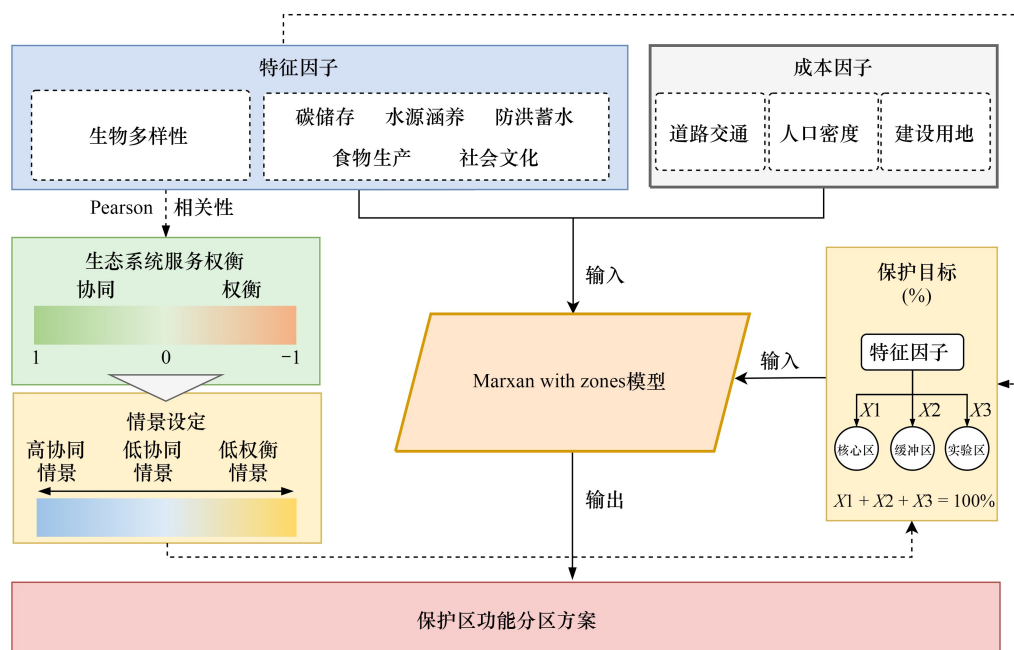


图2 功能分区技术路线

Fig.2 Research framework of the study

X_1 、 X_2 、 X_3 表示不同特征因子在功能区中的分配比例

本研究以人口密度、道路交通和建设用地等3个指标为成本因子,其中人口密度数据是对各村庄人口统计数据进行了克里金插值统计,然后以规划单元的中心点提取人口密度值,村镇住宅区和交通道路矢量数据与规划单元在GIS分析平台进行交集制表分析,统计每个规划单元中村镇住宅与交通道路用地的面积;BLM取值为1;FPF值得设定参考文献^[17,48],并根据生物多样性与其它生态系统服务的权衡/协同关系,将生物多样性和防洪蓄水的FPF设置为10,水源涵养和社会文化的FPF设置为7,碳储存和食物生产的FPF设置为5,以保证与生物多样性协同的生态系统服务功能的优先满足;特征因子是本研究选取的6个典型生态系统服务;保护目标是指分配到保护区不同功能区的生态系统服务占该服务保护总量的比例,依据不同功能区所侧重的保护特征,将各特征因子保护目标分配到不同功能区中,当规划单元数量达到目标数量时形成分区方案。为了比较不同特征因子的保护目标分配对保护区功能区划方案产生的影响,依据生态系统服务间的权衡协调关系,分配原则参考文献^[48],设置3种情景(表2):分别是情景一(权衡情景)、情景二(低协同情景)与情景三(高协同情景)。此外,对模型分析结果产生的细碎斑块进行融合处理,得到相对连续的功能区划方案。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务空间分布

由图3可知,生态系统服务价值分布具有明显的空间异质性。其中,生物多样性价值较高的区域主要集中在东至县范围内保护区的上湖区及其周边区域,尤其是黄湓河流入升金湖的河湖交汇处,中湖区生物多样性价值较低,保护区北部与东南部最低,反映了水鸟栖息环境主要是集中在沿湖滩涂与浅水区,而人类生产生活密集区域的生物多样性价值较低;防洪蓄水价值较高的区域为上湖区,是因为上湖区有集中成片的滩涂与河流能够蓄积更多的水量,其他陆域区域主要是南部丘陵与北部平原,能够起到的防洪蓄水价值相对较低;水源涵养价值较高的区域为升金湖与高桥湖,东南部山地次之,西北部平原最低;碳储存价值整体分布与水源涵养功能具有明显差异,碳储存价值的整体分布呈中间低、东南高的趋势,东南部的山地具有最高的碳储存价值,湿地与农田等碳储存价值明显低于林地;食物生产价值整体呈西北部高、东南部低的趋势,价值最高的是以水田和旱地为主体的保护区农田区域;社会文化价值较高的区域集中在沿湖区域,该区域是重要的鸟

类分布区,观鸟相关的自然教育设施较为集中,且视野开阔,具有优质的农田景观和湿地景观资源,是良好的生态体验与自然教育区域。

表 2 情景设置方案

Table 2 Scenario Setting Program

情景设置 Scenario setting	生态系统服务功能 Ecosystem service functions	核心区 Core zone	缓冲区 Buffer zone	实验区 Experimental zone
情景一 Scenario 1	生物多样性	100%	—	—
	防洪蓄水	100%	—	—
	水源涵养	—	100%	—
	社会文化	—	—	100%
	碳储存	—	100%	—
	食物生产	—	—	100%
情景二 Scenario 2	生物多样性	100%	—	—
	防洪蓄水	70%	30%	—
	水源涵养	70%	30%	—
	社会文化	—	—	100%
	碳储存	—	70%	30%
	食物生产	—	—	100%
情景三 Scenario 3	生物多样性	100%	—	—
	防洪蓄水	50%	30%	20%
	水源涵养	50%	30%	20%
	社会文化	—	—	100%
	碳储存	—	50%	50%
	食物生产	—	—	100%

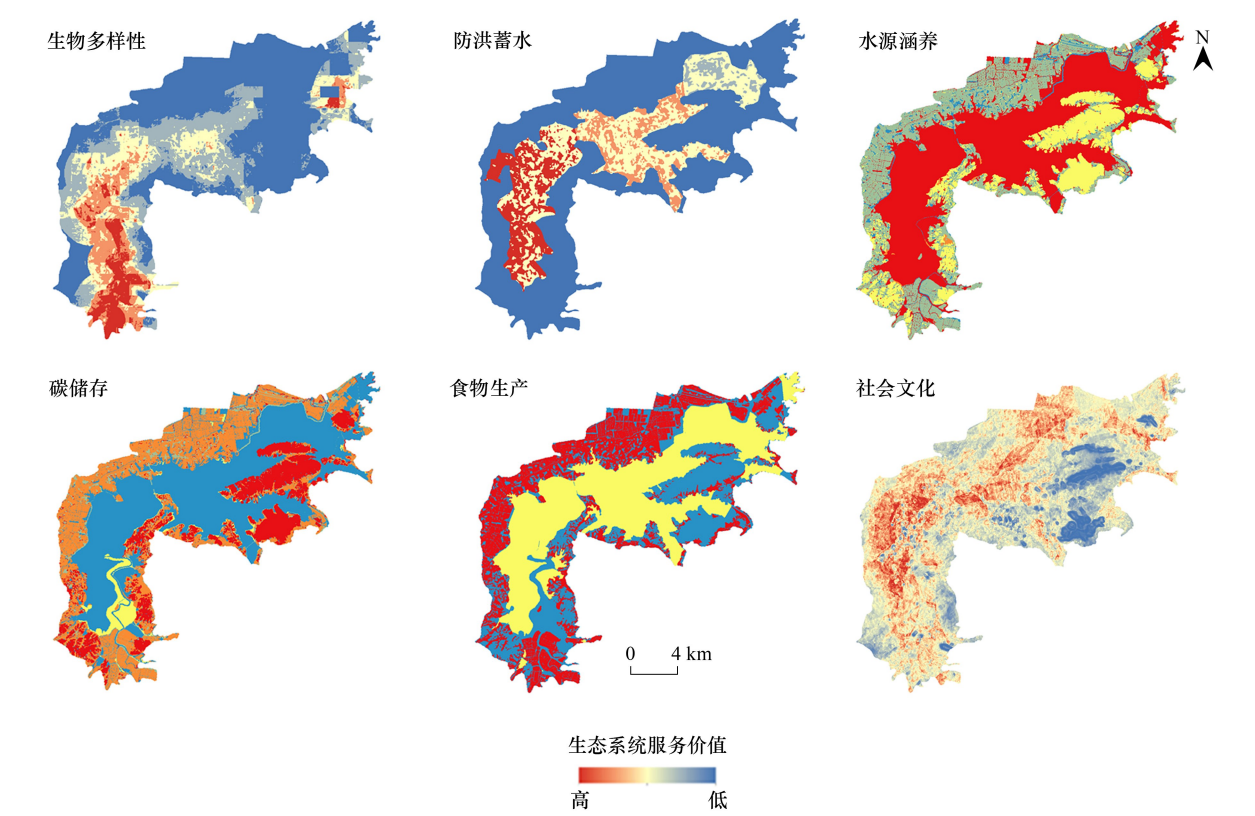


图 3 生态系统服务评价

Fig.3 Ecosystem Service Evaluation

3.2 生态系统服务权衡分析

通过 Person 相关性分析结果可知(图 4),生物多样性与其他生态系统服务之间存在显著的权衡/协同关系。以生物多样性为关键生态系统服务,将其他 5 类生态系统服务与生物多样性关系分为三类,分别是碳储存、食物生产表现为权衡关系,防洪蓄水表现为高协同关系,水源涵养、社会文化表现为低协同关系。此外,水源涵养与防洪蓄水存在较高的协同关系,与社会文化权衡/协同关系不明显,而与碳储存和食物生产存在权衡关系;防洪蓄水与社会文化存在协同关系,与碳储存和食物生产存在权衡关系;碳储存与社会文化存在权衡关系,而与食物生产相关性不明显;社会文化与食物生产存在较低的协同关系。

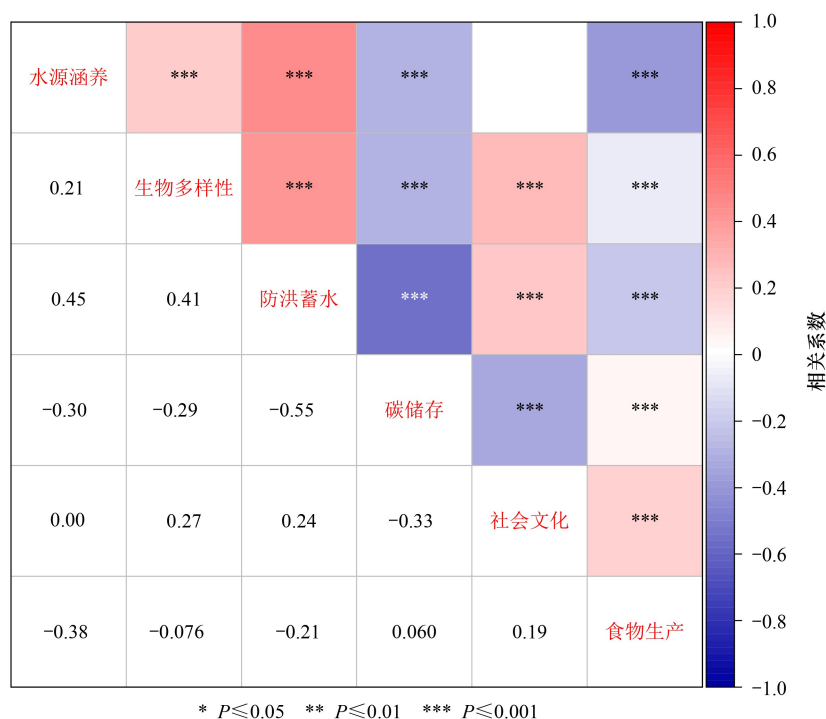


图 4 保护区典型生态系统服务相关性

Fig.4 Relevance of typical ecosystem services in nature reserve

3.3 功能区划结果

通过 Marxan with Zones 模型分析得到三种情景的区划方案(图 5)。与原区划方案相比,三种情景核心区面积大幅提升,均超过保护区总面积的 70%,缓冲区与实验区面积则不同程度减少。其中,核心区面积提升最大的是情景 2,相较于原功能区划方案提升了 135.74%,面积增加了 4.12 万 hm^2 ,其余两个情景的核心区面积提升比例也在 120%左右,均增加了约 1.25 万 hm^2 ;缓冲区面积减少最多的是情景 2,降低了 51.41%,面积减少了 4551.99 hm^2 ,而情景 3 中的缓冲区面积减少最少,降低了 28.86%,面积减少了 2555.07 hm^2 ;实验区面积减少最多的是情景 3,降低了约 75%左右,面积减少了约 9600 hm^2 。

不同情景方案的功能分区变化区域主要集中表现为大范围的原实验区转变为核心区,综合考虑功能区划的生态系统服务多目标保护与空间分布形态,选择高协同情景下(情景 3)的功能区划结果作为方案进行评估,既能保证功能区划范围与生态系统的完整性,也能留足一定的可持续利用空间。

情景 3 与原区划对不同保护对象的适宜栖息地各功能区分布面积进行比较可知(图 6),情景 3 中三种典型珍稀保护鸟类的适宜栖息地主要分布在核心区,表明其栖息环境得到了严格保护。其中,东方白鹳适宜栖息地面积变化最大,由原实验区和缓冲区纳入到情景 3 核心区的面积达到约 6270 hm^2 ,核心区适宜栖息地面积占有所有适宜栖息地面积的 89.92%;白鹤在核心区适宜栖息地面积提升比例最大而面积增加最少,核心区

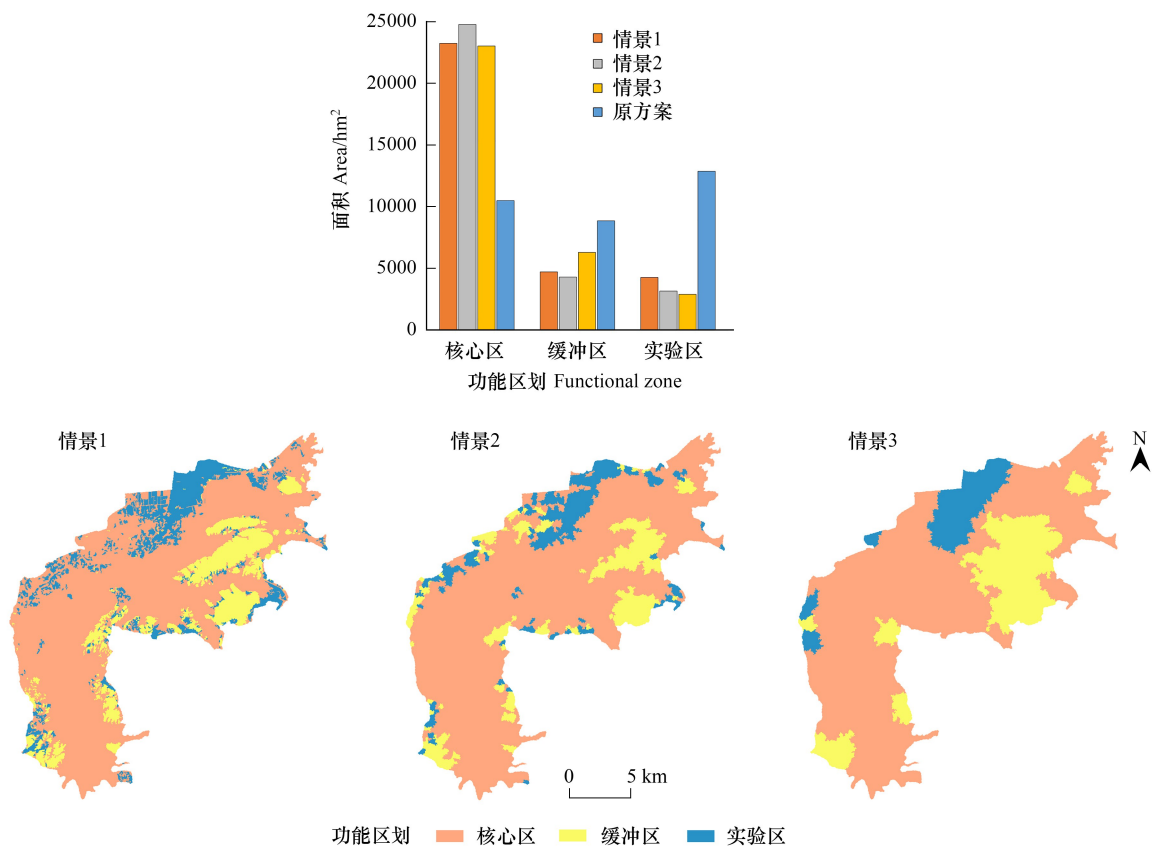


图5 功能分区多情景方案

Fig.5 Functional zoning multi-scenario solutions

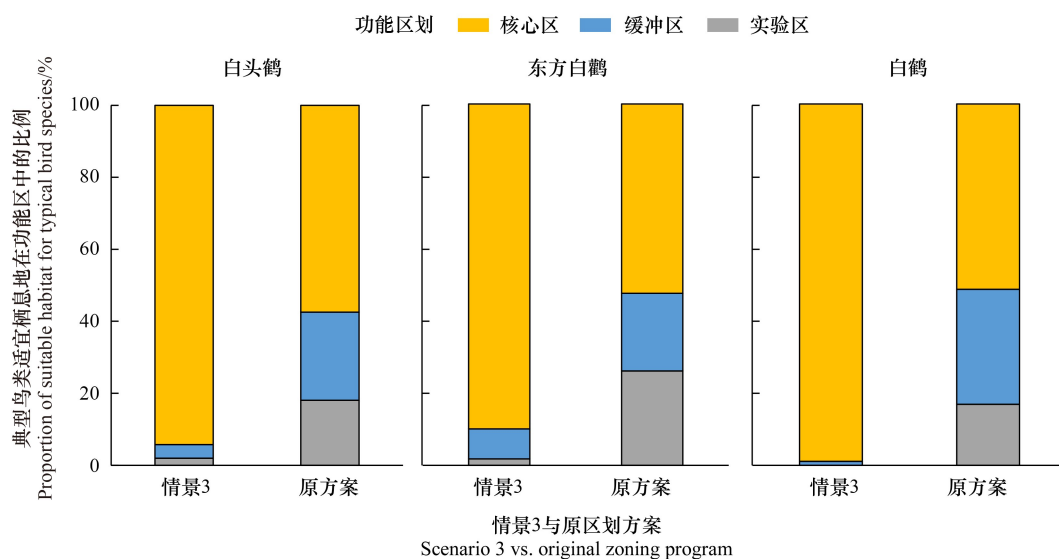


图6 不同保护对象适宜栖息地面积变化

Fig.6 Changes in the area of suitable habitat for different conservation targets

适宜栖息地面积占有所有适宜栖息地面积达 98.91%, 由于白鹤适宜栖息地面积较小, 因此, 白鹤核心区适宜栖息地面积增加仅约 3140hm²; 白头鹤在核心区适宜栖息地增加面积与白鹤相差不大, 增加了约 3200hm², 而核心

区适宜性面积占有所有适宜栖息地的 94.26%。

此外,根据《指导意见》中对自然保护区分区管控要求,本研究将情景 3 和原区划转变为两级管控分区后进行了生态系统服务权衡关系的探讨。从生态系统服务权衡关系可以看出(图 7),情景 3 中的核心保护区生态系统服务权衡关系总体上得到了改善,生物多样性与防洪蓄水、水源涵养等协同关系进一步提升,与碳储存的权衡关系有所下降,其他生态系统服务之间的权衡关系总体上也得到了改善;此外,与原功能区划各种生态系统服务之间关系不明显相比,情景 3 中一般控制区生物多样性与其他生态系统服务总体上趋向协同。



图 7 情景 3 与原功能区划两级管控方案生态系统服务权衡关系

Fig.7 Ecosystem services trade-off between the scenario 3 and the original functional zoning in the two-level control scheme

4 讨论

自然保护区不仅在生物多样性保护方面发挥着重要的作用,还能为社区居民提供大量的原材料,并且在科研教育、娱乐游憩、涵养水源、净化大气等方面起着重要的作用,因此充分发挥自然保护区的生态系统服务价值受到越来越多人的关注^[5,50]。功能区划作为自然保护地管理与保护工作的重要手段,需要将生态系统服务及其权衡关系的研究纳入政策制定中,促进自然保护区科学保护与可持续发展。目前自然保护区整合优化工作尚未完成,新的自然保护区条例尚未颁布,自然保护区功能区划依然参考是《中华人民共和国自然保护

区条例(2017)》《自然保护区总体规划技术规程》(GB/T 20399—2006)等法规与标准文件,因此,本文按照核心区、缓冲区和实验区进行功能区划研究。然而,《指导意见》中要求自然保护区实行核心保护区和一般控制区的管控分区,所以本研究也将情景3与原区划的功能区划转变为两级管控分区进行了探讨。

从相关研究来看,与既有关于升金湖保护区研究相比^[51],本文方案更加关注生态系统服务权衡在功能区划中的方法应用,探讨基于生态系统服务权衡与 Marx with Zones 模型进行功能分区情景模拟,能够让管理方认知到自然保护区功能区划的关键在于对不同生态系统服务功能在空间上的协调与配置,从而保证空间区划与保护发展策略实施的可行性。

本文也存在一定的局限性,需要在未来的研究中进一步完善:首先受到数据可得性和模型参数选择的影响,因为本研究重点关注的是保护区生态系统服务总量与空间分布,因此主要参考已经发表的研究文献,与实地监测可能存在一定误差;其次,在未来的研究中要深入探讨基于生态系统服务权衡的生态优化管理对策与人类活动管控措施。

5 结论

本文从生态系统服务权衡/协同关系角度对自然保护区功能区划进行研究,运用 Marxan With Zones 模型模拟安徽升金湖国家级自然保护区生态系统服务不同保护目标下的功能区划方案,并与原区划方案进行比较分析,得出以下结论:(1)生态系统服务价值分布具有明显的空间异质性。升金湖上湖区及其周边区域的生物多样性与防洪蓄水价值较高,升金湖与高桥湖水源涵养价值较高,东南部的山地具有较高的碳储存价值,北部农田区域的食物生产价值较高,沿湖区域的社会文化价值较高。(2)生物多样性与其他生态系统服务之间存在显著的权衡/协同关系,其中与碳储存与食物生产存在权衡关系,与水源涵养和社会文化存在低协同关系,与防洪蓄水存在高协同关系。(3)三种情景中,高协同情景的功能区划结果相对完整且更能兼顾多种生态系统服务;与原区划方案相比,高协同情景中三种珍稀濒危保护鸟类适宜栖息地主要分布在了核心区,实现了更严格保护。在两级管控分区下,高协同情景中的核心保护区生态系统服务权衡关系总体上得到了改善,生物多样性与防洪蓄水、水源涵养等协同关系进一步提升,与碳储存的权衡关系有所下降,其他生态系统服务之间的权衡关系总体上也得到了改善。

参考文献(References):

- [1] 高吉喜,徐梦佳,邹长新.中国自然保护地70年发展历程与成效.中国环境管理,2019,11(4):25-29.
- [2] 欧阳志云,唐小平,杜傲,臧振华,徐卫华.科学建设国家公园:进展、挑战与机遇.国家公园,2023,1(2):67-74.
- [3] 唐小平,栾晓峰.构建以国家公园为主体的自然保护地体系.林业资源管理,2017(6):1-8.
- [4] 杜金鸿,刘方正,周越,张立博,冯春婷,王伟.自然保护地生态系统服务价值评估研究进展.环境科学研究,2019,32(9):1475-1482.
- [5] 吕偲,曾晴,雷光春.基于生态系统服务的保护地分类体系构建.中国园林,2017,33(8):19-23.
- [6] 唐小平,欧阳志云,蒋亚芳,马伟,徐卫华,陈尚,刘增力.中国国家公园空间布局研究.国家公园,2023,1(1):1-10.
- [7] 曲艺,王秀磊,栾晓峰,李迪强.基于不可替代性的青海省三江源地区保护区功能区划研究.生态学报,2011,31(13):3609-3620.
- [8] 马佳雯,杨志娇,王宇航,文苑玉,刘刚,李惠鑫,高军,虎永胜,李斌,九落,龚明昊.基于目标物种栖息地适宜性和景观特征的保护地功能区划研究——以甘肃多儿国家级自然保护区为例.生态学报,2023,43(7):2703-2710.
- [9] 华俊钦,石江艳,李建强,杨海,徐基良.基于物种分布的森林生态系统类型自然保护区功能区划评价——以河南连康山国家级自然保护区为例.生态学报,2020,40(20):7287-7298.
- [10] 马冰然,曾维华,解钰茜.自然公园功能分区方法研究——以黄山风景名胜区为例.生态学报,2019,39(22):8286-8298.
- [11] 付梦娣,田俊量,朱彦鹏,田瑜,赵志平,李俊生.三江源国家公园功能分区与目标管理.生物多样性,2017,25(1):71-79.
- [12] 呼延俊奇,肖静,于博威,徐卫华.我国自然保护区功能分区研究进展.生态学报,2014,34(22):6391-6396.
- [13] 封志雪,周键,杨飞彪,武瑞东.集成生态系统服务与生物多样性的系统保护规划.生态学报,2023,43(2):522-533.
- [14] Watts M E, Ball I R, Stewart R S, Klein C J, Wilson K, Steinback C, Lourival R, Kircher L, Possingham H P. Marxan with Zones: software for optimal conservation based land- and sea-use zoning. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(12): 1513-1521.
- [15] 张路,欧阳志云,徐卫华.系统保护规划的理论、方法及关键问题.生态学报,2015,35(4):1284-1295.
- [16] Barbosa A, Martín B, Hermoso V, Arévalo-Torres J, Barbière J, Martínez-López J, Domisch S, Langhans S D, Balbi S, Villa F, Delacámara G, Teixeira H, Nogueira A J A, Lillebø A I, Gil-Jiménez Y, McDonald H, Iglesias-Campos A. Cost-effective restoration and conservation planning in Green and Blue Infrastructure designs. A case study on the Intercontinental Biosphere Reserve of the Mediterranean: Andalusia (Spain) - Morocco.

- Science of the Total Environment, 2019, 652: 1463-1473.
- [17] Lanzas M, Hermoso V, de-Miguel S, Bota G, Brotons L. Designing a network of green infrastructure to enhance the conservation value of protected areas and maintain ecosystem services. Science of the Total Environment, 2019, 651: 541-550.
- [18] Esfandeh S, Kaboli M. Using simulated annealing optimization algorithm for prioritizing protected areas in Alborz Province, Iran. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2019, 11: 100211.
- [19] 邢丁亮, 郝占庆. 最大熵原理及其在生态学研究中的应用. 生物多样性, 2011, 19(3): 295-302.
- [20] 戎战磊, 周宏, 韦伟, 张晋东, 湛利民, 张泽钧. 基于 MAXENT 模型的唐家河自然保护区大熊猫生境适宜性评价. 兰州大学学报: 自然科学版, 2017, 53(2): 269-273, 278.
- [21] 罗绮琪, 胡慧建, 徐正春, 丁志锋, 杨锡涛, 陈秋菊, 张春霞, 李爱英, 邹洁建, 叶冬梅, 王家彬, 张志翔, 梁健超. 基于 Maxent 模型的粤港澳大湾区水鸟多样性热点研究. 生态学报, 2021, 41(19): 7589-7598.
- [22] 塔旗, 李言阔, 范文青, 单继红, 涂晓斌, 应钦, 缪沪君, 邵瑞清, 申锦. 基于最大熵生态位模型的中华穿山甲潜在适宜生境预测. 生态学报, 2021, 41(24): 9941-9952.
- [23] 李龙, 王亮, 温阿敏, 闫世伟, 姚晓军. 基于 MaxEnt 模型的甘肃安西极旱荒漠国家级自然保护区北山羊生境评估. 生态学报, 2021, 41(24): 9932-9940.
- [24] 杨楠, 马东源, 钟雪, 杨孔, 周志强, 周华龙, 周材权, 王彬. 基于 MaxEnt 模型的四川王朗国家级自然保护区蓝马鸡栖息地适宜性评价. 生态学报, 2020, 40(19): 7064-7072.
- [25] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [26] 杜世勋, 刘海江, 张梦莹, 王亚璐, 刘雪佳, 刘军会. 水源涵养型国家重点生态功能区生态系统服务功能评估. 生态学报, 2022, 42(11): 4349-4361.
- [27] 赵辉, 郭索彦, 解明曙, 陈国玉. 南方花岗岩红壤区不同土地利用类型坡地产流与侵蚀产沙研究. 水土保持通报, 2008, 28(2): 6-10.
- [28] 李莹莹, 马晓双, 吴鹏海. 水源涵养量多源遥感反演及时空变化分析——以黄山市为例. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(4): 104-111, 120.
- [29] 权全, 罗纨, 沈冰, 贾忠华, 唐双成. 城市化土地利用对降雨径流的影响与调控. 水土保持学报, 2013, 27(1): 46-50.
- [30] 隋玉正, 孙大鹏, 李淑娟, 徐永臣, 吴晶晶. 碳储存变化背景下东营市海岸带生态系统保护修复. 生态学报, 2021, 41(20): 8112-8123.
- [31] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量. 中国科学: D 辑, 2003(1): 72-80.
- [32] 黄从红, 杨军, 张文娟. 森林资源二类调查数据在生态系统服务评估模型 InVEST 中的应用. 林业资源管理, 2014(5): 126-131.
- [33] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩, 李安波. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.
- [34] 朱超, 赵淑清, 周德成. 1997—2006 年中国城市建成区有机碳储量的估算. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1195-1202.
- [35] 彭怡, 王玉宽, 傅斌, 马飞. 汶川地震重灾区生态系统碳储存功能空间格局与地震破坏评估. 生态学报, 2013, 33(3): 798-808.
- [36] 徐伟平, 康文星, 何介南. 洞庭湖蓄水能力的时空变化特征. 水土保持学报, 2015, 29(3): 62-67, 324.
- [37] 卢慧婷, Stringer Lindsay C., 严岩, 王辰星, 赵春黎, 荣月静, 朱捷缘, 吴钢, DALLIMER Martin. 西南地区生态系统服务供需历史变化与 SSP-RCP 情景预测. 生态学报, 2023, 43(4): 1309-1325.
- [38] 凌云, 杨宜男, 许迦龙, 王立, 王子豪, 孙艺妍, 姚晨心, 王原. 京津冀地区城市化对典型生态系统服务供需关系的影响. 生态学报, 2023, 43(13): 5289-5304.
- [39] 王光亚. 中国食物成分表. 北京: 北京大学医学出版社, 2009.
- [40] 赵金龙, 王添鑫, 韩海荣, 康峰峰, 张彦雷. 森林生态系统服务功能价值评估研究进展与趋势. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2229-2237.
- [41] 潘健峰, 马伟伟, 陈艳, 蔡思青, 陈玉美. 社会-生态耦合分析视角下普达措国家公园生物多样性价值评估. 生态与农村环境学报, 2022, 38(5): 609-620.
- [42] 张红娟, 高艳, 华亚伟, 李言言, 张越, 刘康. SolVES 模型价值转移方法对不同空间尺度的响应评估. 生态学报, 2019, 39(24): 9233-9245.
- [43] Sherrouse B C, Semmens D J. Social Values for Ecosystem Services, Version 3.0 (SolVES3.0): Documentation and User Manual. Reston, VA: US Geological Survey, 2015.
- [44] Sherrouse B C, Semmens D J, Clement J M. An application of Social Values for Ecosystem Services (SolVES) to three national forests in Colorado and Wyoming. Ecological Indicators, 2014, 36: 68-79.
- [45] 王志芳, 彭瑶瑶, 徐传语. 生态系统服务权衡研究的实践应用进展与趋势. 北京大学学报: 自然科学版, 2019, 55(4): 773-781.
- [46] Abera W, Tamene L, Kassawmar T, Mulatu K, Kassa H, Verchot L, Quintero M. Impacts of land use and land cover dynamics on ecosystem services in the Yayo coffee forest biosphere reserve, southwestern Ethiopia. Ecosystem Services, 2021, 50: 101338.
- [47] Vallet A, Locatelli B, Levrel H, Wunder S, Seppelt R, Scholes R J, Oszwald J. Relationships between ecosystem services: Comparing methods for assessing tradeoffs and synergies. Ecological Economics, 2018, 150(AUG.): 96-106.
- [48] 艾昕, 兰亦阳, 郑曦. 基于生态系统服务协同增益的城市生态空间区划研究——以北京市生态涵养区为例. 风景园林, 2020, 27(11): 82-89.
- [49] Mehri A, Salmanmahiny A, Momeni Dehaghi I. Incorporating zoning and socioeconomic costs in planning for bird conservation. Journal for Nature Conservation, 2017, 40: 77-84.
- [50] 唐芳林, 吕雪蕾, 蔡芳, 孙鸿雁, 罗伟雄. 自然保护地整合优化方案思考. 风景园林, 2020, 27(3): 8-13.
- [51] 周燕, 叶水清, 赵晓雪, 孙瀛, 罗巧灵. 基于物种保护的天然保护地生态旅游功能区划研究——以安徽升金湖国家级自然保护区为例. 中国城市林业, 2023, 21(4): 15-22.