

DOI: 10.5846/stxb202004240990

王良杰, 马帅, 许稼昌, 朱殿珍, 张金池. 基于生态系统服务权衡的优先保护区选取研究——以南方丘陵山地带为例. 生态学报, 2021, 41(5): 1716-1727.

Wang L J, Ma S, Xu J C, Zhu D Z, Zhang J C. Selection of priority protected region based on ecosystem service trade-offs: a case study of the southern hill and mountain belt, China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1716-1727.

基于生态系统服务权衡的优先保护区选取研究 ——以南方丘陵山地带为例

王良杰^{1,2,*}, 马 帅^{1,2}, 许稼昌^{1,2}, 朱殿珍^{1,2}, 张金池^{1,2}

1 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京林业大学, 南京 210037

2 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京林业大学, 南京 210037

摘要: 南方丘陵山地带作为“两屏三带”国家生态屏障区之一, 发挥着保障华南和西南地区生态安全的作用, 优先保护区的选取对区域的生态系统服务提升、生态安全和可持续发展具有重要的意义。以南方丘陵山地带为研究对象, 采用 InVEST 模型和森林游憩模型评估产水量、土壤保持、碳储存、生境质量和生态休闲的空间分布, 基于有序加权平均算子 (OWA) 建立了 11 种情景, 通过对比各情景的保护效率筛选出了优先保护区。结果表明: (1) 南方丘陵山地带产水量和土壤保持分布不均, 平均产水量 1108mm, 高值区均集中在中部地区, 而东部区域和西部区域的生态休闲较高; (2) 研究区固碳能力强, 平均碳储量为 45.58t/hm², 生境质量良好, 平均生境质量为 0.75, 碳储存和生境质量与土地利用/覆被类型关系密切; (3) 情景 2 的保护效率最优, 对产水量、土壤保持、碳储存、生境质量和生态休闲的保护效率分别为 1.17, 1.89, 1.32, 1.48, 1.18。研究结果可为研究区生态系统服务的提升提供决策支持。

关键词: 生态系统服务; 优先保护区; 有序加权平均; 南方丘陵山地带

Selection of priority protected region based on ecosystem service trade-offs: a case study of the southern hill and mountain belt, China

WANG Liangjie^{1,2,*}, MA Shuai^{1,2}, XU Jiachang^{1,2}, ZHU Dianzhen^{1,2}, ZHANG Jinchu^{1,2}

1 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China of Nanjing Forestry University, College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: As an important part of “two shelters and three belts”, the southern hill and mountain belt plays an ecological security role in south and southwest China. Selection of priority protected region is of great importance to the improvement of regional ecosystem services, ecological security, and sustainable development. In this study, InVEST model and forest recreation model were used to evaluate the spatial distribution of water yield, soil conservation, carbon storage, habitat quality and ecological recreation. Eleven scenarios were established by using the Ordered Weighted Averaged (OWA). The results showed that: (1) the distributions of water yield and soil conservation were uneven in the southern hill and mountain belt with an average water yield of 1108 mm, high water yield concentrated in the central region, while the ecological leisure in the eastern region and the western region was relatively high. (2) In the study area, the carbon fixation capacity was strong with an average carbon storage of 45.58 t/hm²; the habitat quality was good with an average habitat quality of 0.75; and the carbon storage and habitat quality were closely related to the land use/cover. (3) Scenario 2 indicated the

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0507304); 国家自然科学基金项目 (41601209)

收稿日期: 2020-04-24; 网络出版日期: 2021-01-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liang-jiewang@njfu.edu.cn

optimal conservation efficiency, and the conservation efficiencies of water yield, soil conservation, carbon storage, habitat quality and ecological recreation were 1.17, 1.89, 1.32, 1.48 and 1.18, respectively. The results can provide decision support for the improvement of ecosystem services in the study area.

Key Words: ecosystem services; conservation priorities; Ordered Weighted Averaged; the southern hill and mountain belt

生态系统可以为人们提供各种生态系统服务,包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务,是人类福祉的重要保障^[1-2]。不同生态系统服务之间关系复杂,互相作用,常常表现为此消彼长的权衡关系和同增同减的协同关系^[3]。国内外许多学者对不同区域的生态系统服务的相互关系进行了大量研究^[4-5]。在我国重点生态脆弱区,产水服务、NPP 和土壤保持表现为整体协同、局部权衡的关系^[6]。在汉江上游流域产水服务和土壤保持呈现权衡关系^[7],但在新疆土壤保持与产水之间却表现为明显的协同关系^[8]。生态系统服务权衡协同关系具有区域差异性,决策者在制定政策的过程中如果没有充分考虑当地生态系统服务间复杂的权衡关系,将会导致多个生态系统服务相互竞争,破坏其因果关系^[9-11]。因此,如何通过科学的方法协调生态系统服务权衡是实现生态系统管理可持续发展的关键^[12-13]。

近年来,由于人口增多、经济快速发展,生态系统服务退化严重,进而导致一系列生态环境问题^[14]。优先保护区是指自然资源合理分布、物种丰富、生态系统健康和生态系统服务高的地区,它的建立是分配有限资源进行保育的关键过程,并且能够有效改善当地脆弱生态系统的自然环境,调整当地生态,保护生物多样性和生态系统服务的可持续性^[9-10]。目前有大量研究对生态系统服务权衡关系进行了探究,也有研究保护区的选择,而从生态系统服务权衡的角度选择优先保护区的研究还较为罕见。因此,基于生态系统服务权衡关系的基础上选取优先保护区对区域的生态保护和生态发展具有重要的意义。有部分学者基于生态系统服务的权衡关系对优先保护区的选取进行了探索,研究表明有序加权平均(OWA)算子可以权衡各种生态系统服务来确定优先保护区^[9,15-17]。

南方丘陵山地带作为“两屏三带”国家生态屏障区之一,发挥着保障华南和西南地区生态安全的作用。目前已有学者对南方丘陵山地带进行了生态系统服务及其权衡协同的研究,傅伯杰等^[14]系统评估了国家生态屏障区的生态系统服务;尹礼唱等^[18]探索了“两屏三带”产水、土壤保持和固碳的权衡和协同关系,研究表明在南方丘陵山地带产水与固碳以及土壤保持与固碳的权衡关系占比超过协同关系,而有关国家生态屏障区优先保护区选取的研究鲜见报道。近年来,由于全球气候变暖、人口剧增以及资源的不断开发利用,南方丘陵山地带存在植被覆盖度低、水土流失严重、石漠化面积大等生态环境问题^[14],威胁区域的生态安全,影响区域的可持续发展,而优先保护区的建立可以提升南方丘陵山地带的生态系统服务,对保障南方地区以及国家的生态安全具有重要的意义。

本研究通过采用 InVEST 模型定量评估了南方丘陵山地带产水量、土壤保持、碳储存和生境质量的空间分布,改进森林游憩服务模型计算了生态休闲功能,并基于有序加权平均(OWA)算子平衡生态系统服务选取了南方丘陵山地带的优先保护区,以期为区域的生态环境保护建设以及相关政策的制定提供科学的参考。

1 研究区概况与数据来源

南方丘陵山地带位于长江流域与珠江流域内,是珠江流域与长江流域的分水岭及源头区,地跨云南省、广西省、广东省、贵州省、湖南省和江西省,位于北纬 22°45′—27°15′,东经 102°45′—117°10′之间,总面积为 28.85 万 km²(图 1)。气候属于亚热带季风气候,多年平均温度在 15—23℃之间,多年平均降雨量在 1400—1800mm 之间。海拔范围在 -25—3019m 之间,区域地势西北高东南低,以丘陵、山地地貌类型为主。土壤类型从南到北依次为砖红壤、赤红壤、红壤、黄壤和黄棕壤。植被类型主要为亚热带常绿阔叶林和针阔叶混交林。

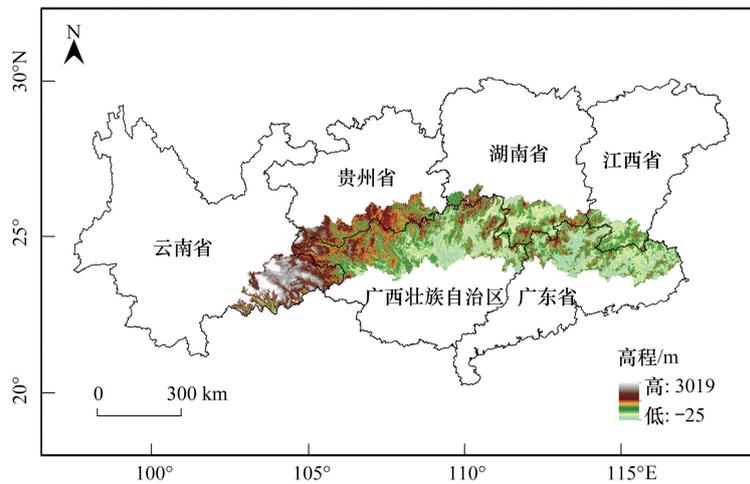


图1 研究区概况

Fig. 1 Study area

土地覆被数据来源于中国土地覆盖数据 (ChinaCover) [19-20], 数据时相为 2015 年, 分辨率为 90m, 分为林地、草地、耕地、湿地、人工表面和其他 7 类。2015 年气象数据包括降水量和潜在蒸发散, 降雨数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 分辨率为 1000m, ArcGIS10.3 重采样为 90m。潜在蒸发散数据采用 MODIS16A3 产品, 源于 NASA MODIS 网站 (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>), 分辨率为 1000m, ArcGIS10.3 重采样为 90m。1:100 万全国县级行政区矢量数据; 1:100 万土壤类型相关数据来自世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSD) (<http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>); 数字高程模型 DEM 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 分辨率为 90m; 1:10 万地理信息基础数据。2015 年初级净生产力、人口密度数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 分辨率为 1000m, ArcGIS10.3 重采样为 90m。

2 研究方法

2.1 生态系统服务评估

由于南方丘陵山地带季节性缺水、石漠化面积大、部分区域植被覆盖度低和水土流失严重等问题普遍存在 [14], 因此本研究选择了产水量、水土保持、碳储量和生境质量作为研究区域的生态系统服务。InVEST 模型是一种生态系统服务和权衡的综合评估模型, 可用于评估生态系统服务功能, 支持生态系统管理和决策。目前, InVEST 模型已在 20 多个国家和地区得到广泛应用, 它不仅能定量评估生态系统服务功能, 而且可以和“3S”技术结合, 实现评估结果的空间可视化。因此, 本文采用 InVEST 模型定量评估南方丘陵山地带的产水量、水土保持、碳储存和生境质量, 对森林游憩服务模型进行改进, 从而构建了生态休闲模型并评估了研究区的生态休闲功能。

2.1.1 产水量

InVEST 模型产水模块基于水量平衡原理, 利用 Budyko 曲线和降水量来计算产水量, 即各栅格上的降水量减去实际蒸散量得到该栅格的产水量 [21-23], 其主要计算过程如下:

$$P_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

式中: P_{xj} 是当土地利用/覆被类型为 j 时栅格单元 x 的年产水量 (mm), AET_{xj} 表示土地利用/覆被类型为 j 时栅格单元 x 的实际蒸散量 (mm), P_x 为栅格单元 x 的年降雨量 (mm)。

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

式中: R_{xj} 是当土地利用/覆被类型为 j 时栅格单元 x 的 Budyko 干燥度指数, 为潜在蒸发散与降雨量的比值, 无量纲。 ω_x 为非物理参数, 无量纲, 描述气候-土壤的属性, 是植被可利用含水量与降雨量的比值。

2.1.2 土壤保持

目前, 土壤保持最为普遍的计算方法是通用土壤流失方程 (ULSE), 通过每个栅格单元的潜在土壤流失量 (RKLS) 减去实际土壤流失量 (USLE) 得到土壤保持量^[24]。然而, 由于南方丘陵山地带流域众多, 存在一个泥沙输移比 (SDR) 的过程。在土壤侵蚀的过程中, 植被等地表覆盖物起到拦截泥沙的作用。InVEST 模型泥沙输移模块 (SDR) 在通用土壤流失方程的基础上考虑了泥沙输移比, 描述坡面土壤侵蚀和输沙的空间过程, 其计算公式如下:

$$RKLS_i = R_i K_i LS_i \quad (3)$$

式中: $RKLS_i$ 为栅格单元 i 的潜在土壤流失量 (t/hm^2), R_i 、 K_i 和 LS_i 分别代表栅格单元 i 的降雨侵蚀力因子 ($MJ\ mm\ hm^{-2}\ h^{-1}\ a^{-1}$)、土壤可蚀性因子和坡长坡度因子。

$$S_i = RKLS_i \times SDR_{bare-i} \quad (4)$$

式中: S_i 是栅格单元 i 的实际泥沙量 (t/hm^2), SDR_{bare-i} 为栅格单元 i 在裸地条件下的泥沙输移比。

$$USLE_i = R_i K_i LS_i C_i P_i \quad (5)$$

式中: $USLE_i$ 代表栅格单元 i 的实际土壤流失量 (t/hm^2), C_i 是作物经营因子, P_i 为水土保持措施因子。

$$E_i = USLE_i \times SDR_i \quad (6)$$

InVEST 模型通过对作物经营因子 C 和水土保持措施因子 P 直接赋值来计算土壤保持功能。参照张海波^[25]的研究, 对不同土地利用/土地覆被类型进行赋值。

2.1.3 碳储存

InVEST 模型通过四个碳库 (地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库和死亡有机质碳库) 密度相加来估算碳储量等^[26]。本研究采取 InVEST 模型来评估碳储存, 其计算原理如下:

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil} \quad (7)$$

式中: C_{total} 为栅格单元总的碳储量 (mg/hm^2), C_{above} 为栅格单元地上生物中储存的碳量 (mg/hm^2), C_{below} 为栅格单元地下生物中储存的碳量 (mg/hm^2), C_{dead} 为栅格单元死亡有机物中储存的碳量 (mg/hm^2), C_{soil} 为栅格单元土壤中的碳储量 (mg/hm^2)。

土壤碳储量数据通过换算世界土壤数据库 (HWSD) 中有机碳的含量来获取, 其他碳库的数据根据野外调查结果、InVEST 模型使用手册以及相关研究^[27]得到。

2.1.4 生境质量

生境是指生物个体、物种和群落的生存空间, 生境质量能反映出生态系统为生物个体、物种和群落生存提供适合条件的能力, 还可以反映出生物多样性^[28]。InVEST 模型生境质量模块提供选取威胁源, 对其威胁程度、威胁距离以及与其他土地利用/土地覆被的相对影响进行分析, 从而评估出各个栅格的生境质量, 其具体评估过程如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right] \quad (8)$$

式中: Q_{xj} 表示当土地利用/土地覆被类型为 j 时栅格单元 x 的生境质量, H_j 为土地利用/土地覆被类型 j 的生境适宜度, D_{xj} 表示土地利用/土地覆被类型为 j 时栅格单元 x 的生境退化程度, k 是半饱和常数 (值相当于栅格分辨率的一半, 45)。

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_x} \left(\frac{\omega_x}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jx} \quad (9)$$

式中: r 是图层的栅格数, y 为胁迫因子, Y_x 表示胁迫因子的栅格数, ω_x 为胁迫因子的权重 (weight), 范围为 0 到 1, R_y 是栅格单元 y 的胁迫因子值, 其值为 0 或 1, i_{rxy} 代表栅格单元 y 的胁迫因子值 r_y 对生境栅格单元 x 的胁迫水平, β_x 为栅格单元 x 的可达性, S_{jx} 为土地利用/土地覆被类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性。

InVEST 模型中胁迫因子对其他土地利用/土地覆被类型的影响通过空间距离来表达, 由于不同的胁迫因子与其他土地利用/土地覆被类型的空间关系不同, 空间距离的表达方式也不同, 主要有线性衰退和指数衰退两种, 具体公式如下:

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad \text{if linear} \quad (10)$$

$$i_{rxy} = \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{rmax}} \right) d_{xy} \right] \quad \text{if exponential} \quad (11)$$

式中: d_{xy} 代表栅格单元 x 和 y 之间的线性距离, d_{rmax} 表示胁迫因子 r 的最大影响距离。

根据南方丘陵山地带的土地利用/覆被, 本研究选取建设用地、交通用地、采矿场、水田、旱地和沙漠作为南方丘陵山地带的胁迫因子。参考相关文献^[27]和 InVEST 模型使用手册对胁迫因子的参数进行了设置。

2.1.5 生态休闲

生态系统可以为人们提供文化和美学享受。生态休闲是指人们在休闲时间可到达的光合作用较强的林地环境, 并能够为人们提供呼吸清新的空气, 放松身心, 恢复体力, 使人们获得愉悦感的能力。南方丘陵山地带植被覆盖度高, 林地面积大, 为人们提供了良好的休闲环境。本文对森林游憩服务模型^[29-30]进行改进, 将游憩机会替换为 NPP, 从而构建了生态休闲模型:

$$ER = \sum (NPP_i + POP_i + ROAD_i) \quad (12)$$

式中: ER 为生态休闲功能, NPP_i 指净初级生产力值, POP_i 代表人口密度值, 采用自然分类法将净初级生产力和人口密度值分级赋值 0—10。 $ROAD_i$ 为距离高速公路的距离以及距离公路的距离值, 对距离高速公路 4km 以内的区域采用等距离分级赋值 0—5, 对距离公路 1km 以内的区域采用等距离分级赋值 0—5。

2.2 最优保护区选取

2.2.1 OWA 算法

有序加权平均算子 (OWA) 已被证明可以很好的平衡生态系统服务之间的权衡关系^[9,15-17], 并且可以与 GIS 相结合, 首先对各个图层进行归一化处理, 然后再进行有序加权平均, 计算公式如下:

$$OWA(a_{xj}) = \sum_x^n \omega_x S_{xj}, (\omega_x [0, 1] \quad \sum_x^n \omega_x = 1, \quad \text{for } i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (13)$$

其中, a_{xj} 表示经过归一化处理后的第 x 个栅格图上第 j 个位置的属性值, 在本研究中, 归一化处理后的栅格图层为经过归一化处理后的产水量、土壤保持、碳储存、生境质量和生态休闲服务。为避免不同栅格图层数据差异带来的影响, 在上述五种生态系统服务进行 OWA 处理排序处理前, 对各生态系统服务进行归一化处理, 归一化为 0 到 1 范围内。 S_{xj} 是与 a_{xj} 对应的经过归一化处理后, 五种生态系统服务栅格值在 MATLAB 中进行从大到小排序后得到的新的五个图层, ω_x 是五个新数据集 S_{xj} 的有序权重。

2.2.2 OWA 情景的风险与权衡

不同有序权重的选择, 风险权衡也不同, 其关系式如下:

$$\text{risk} = (n - 1)^{-1} \sum_x^n (n - x) \omega_x \quad (0 \leq \text{risk} \leq 1) \quad (14)$$

$$\text{tradeoff} = 1 - \sqrt{\frac{n \sum_x^n (\omega_x - \frac{1}{n})^2}{n - 1}} \quad (0 \leq \text{tradeoff} \leq 1) \quad (15)$$

式中: n 为生态系统服务栅格图层的总数, ω_x 为栅格图层 x 的权重, 通过改变 OWA 决策的风险和权衡, 可以

获得无数种情景。

根据风险和权衡的定义,在 python 中求解以下数学公式获得最佳情景:

$$\text{maxtradeoff} = 1 - \sqrt{\frac{n \sum_x (\omega_x - \frac{1}{n})^2}{n-1}} \quad (0 \leq \text{tradeoff} \leq 1) \quad (16)$$

$$\sum_x \omega_x = 1, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (17)$$

$$\omega_i \in [0, 1] \quad (18)$$

由于风险的值在 0 到 1 之间,为了均衡每一种风险,风险值从 0 开始间隔 0.1 设置一种情景,共计 11 种情景。基于 11 个确定的风险的 11 个情景,本研究选择相同风险的最大的权衡来设置不同权重组合的情景。

2.2.3 优先保护区的保护效率

通过对比不同情景的生态系统服务的保护效率,确定一个各种生态系统服务都得到最高的保护效率,该情景所对应的区域即为优先保护区,服务效率计算公式如下:

$$E = \frac{\overline{ES_c}}{\overline{ES_0}} \quad (19)$$

式中: E 为优先保护区特定生态系统服务的保护效率, $\overline{ES_c}$ 为优先保护区特定生态系统服务的平均值, $\overline{ES_0}$ 为研究区特定的生态系统服务的平均值。

3 结果分析

3.1 生态系统服务评价

南方丘陵山地带的产水量、土壤保持、碳储量、生境质量和生态休闲空间分布如图 2 所示。南方丘陵山地带平均产水量 1108mm,区域差异显著,有着明显的中南部高,西部低的趋势。中部地区产水量较大,最高可达 2625.43mm,而西部地区产水量较少,最低区域产水量仅有 80.34mm。产水量与降雨空间分布相似,有着明显的正相关关系,该区域的产水量较高主要是因为降雨量较大(图 3)。尽管产水量与土地利用/覆被类型关系并不密切,仍然可以看出耕地较林地的产水量高。林地的蒸发散较高,对地表径流有拦截作用,导致林地

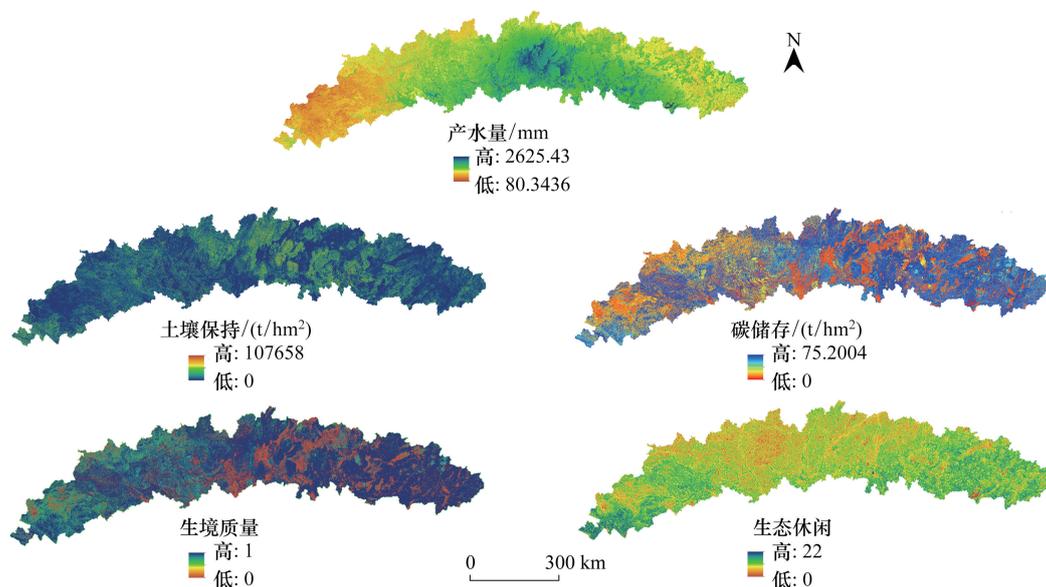


图 2 产水量、土壤保持、碳储存、生境质量和生态休闲空间分布图

Fig. 2 The spatial distribution of water yield, soil conservation, carbon storage, habitat quality and ecological recreation

的产水量不高。南方丘陵山地带土壤保持空间分布差异明显,高值区分布在林地和草地。林地、草地植被覆盖度高,对降雨有缓冲作用,降低了降雨动能,植物的根系可以有效的固定土壤,拦截地表径流和泥沙,从而减少了水土流失量。西部土壤保持量较低,而中东部的土壤保持量相对较高。这是因为山地上土地利用/覆被类型为草地和林地,而东部主要为林地,草地的土壤保持功能较林地低。

碳储存和生境质量高值区与低值区均位于南方丘陵山地带东部,这与土地利用/覆被类型有关。林地具有较高的生态系统服务,碳储存和生境质量较高,草地、耕地次之,建设用地、裸地和水域的贡献最小。林地、耕地、建设用地和水域大多分布于东部地区,使得东部地区的生态系统服务功能差异明显。但东部的碳储存和生境质量仍高于西部,这主要是因为东部地区的土地利用/覆被类型多为林地,而西部地区多为草地。从整体来看,平均碳储量为 $45.58\text{t}/\text{hm}^2$,生境质量平均值为 0.75,表明南方丘陵山地带固碳能力强,生境质量好。南方丘陵山地带生态休闲指数平均值为 0.40。生态休闲高值区主要分布在东南和西南地区,低值区主要分布在中部。东南地区净初级生产力处于较高水平,人口相对较多,因此具有较好的生态休闲功能(图 3)。

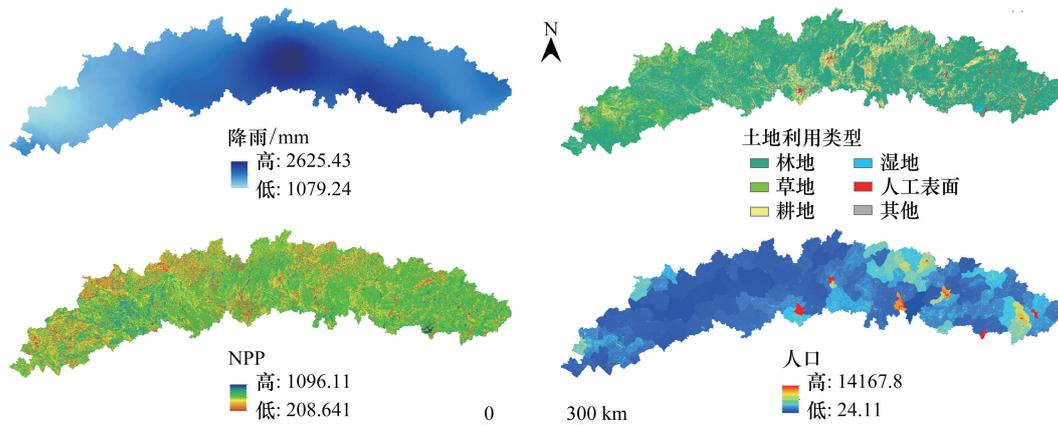


图 3 降雨、土地利用类型、NPP 和人口的空间分布图

Fig. 3 The spatial distribution of precipitation, land use types, NPP and population

3.2 各情景下的保护区位

随着风险的增加,权衡呈先增加后减小的趋势。当风险从 0 增加到 0.5 时,最大的权重优先赋给排序处理后栅格值最小的图层;当风险从 0.5 增长到 1 时,排序处理后栅格值最大的图层优先得到最大的权重;当风险为 0.5 时,各个栅格图层权重均衡化,此时权衡最高(图 4)。

如果决策者选择较低的风险,他们将赋予低的生态系统服务以高权重;如果他们选择较高的风险,他们将高权重赋给高生态系统服务。如果决策者想得到最大的权衡 1,则他们将分配相同的权重给每种生态系统服务,即每种生态系统服务获得的权重值均为 0.2。如果决策者赋予最高或者最低的生态系统服务最大的权重值 1,则他们将获得最低的权衡值 0。权衡越高代表每个生态系统服务获得的权重越平均(表 1)。

将五种生态系统服务与其对应的权重相乘,得到 11 种情景的栅格分布图。目前有关优先保护区范围确

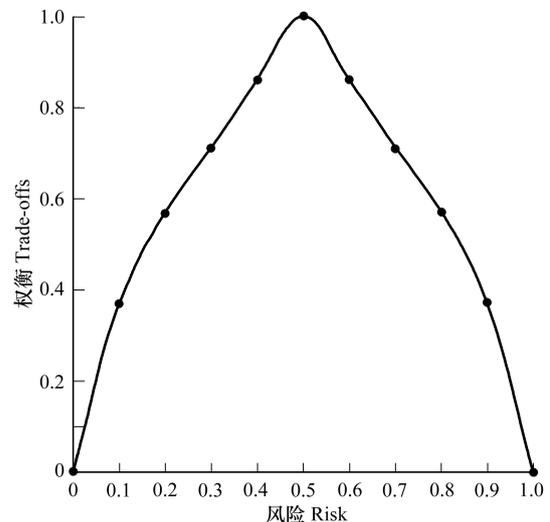


图 4 风险和权衡的关系

Fig. 4 The relationship between risk and trade-off

定的研究较少,为了有效的选取优先保护区,本研究采用 ArcGIS10.3 中的分位数分级法将研究区分为 5 个等级,取最大的一类作为南方丘陵山地带的优先保护区,各情景下的优先保护区位如图 5 所示。

由于存在多个栅格值对应同一个数值,情景 1 的优先保护区面积很小,而情景 11 的优先保护区遍布整个南方丘陵山地带,因此本研究在进行优先保护区的选择时不考虑情景 1 和情景 11。情景 2 至情景 10 的优先保护区多位于南方丘陵山地带的东南部,即广东省的西北部、广西壮族自治区的东北部和湖南省南部区域,分布相似但又略有不同。从情景 2 到情景 5,优先保护区呈向北和向东扩散的趋势,而情景 6 到情景 10,优先保护区的分布变得越来越分散。从表 2 可以看出,各情景下林地、草地和湿地的总面积占优先保护区的 97%,其中林地占比超过 70%,林地具有较高的土壤保持、碳储量和生境质量,因此优先保护区的分布更多的集中在林地。随着风险的增加,林地和湿地的占比增加,草地呈现相反的趋势。基于 OWA 算法,随着风险增加,较高地生态系统服务得到更多的重视,较低的生态系统服务得到更少的考虑。

表 1 不同情景下的风险与权衡

Table 1 Risks and trade-offs under different scenarios

情景 Scenario	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	风险 Risk	权衡 Trade-offs
1	0	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.03	0.33	0.63	0.1	0.37
3	0	0.04	0.18	0.32	0.46	0.2	0.57
4	0.04	0.12	0.20	0.28	0.36	0.3	0.71
5	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.4	0.86
6	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.5	1
7	0.28	0.24	0.20	0.16	0.12	0.6	0.86
8	0.36	0.28	0.20	0.12	0.04	0.7	0.71
9	0.46	0.32	0.18	0.04	0	0.8	0.57
10	0.63	0.33	0.03	0	0	0.9	0.37
11	1	0	0	0	0	1	0

表 2 不同情景下土地利用类型占比

Table 2 The proportion of land use types in different scenarios

土地利用类型 Land use type	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
林地 Forest land	81.90%	84.37%	84.61%	84.26%	84.16%	84.44%	86.42%	88.57%	90.29%	91.15%	73.14%
草地 Grassland	16.10%	13.48%	13.13%	12.96%	11.99%	9.95%	6.70%	3.61%	1.84%	1.17%	0.00%
耕地 Cropland	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%	0.76%	1.95%	2.37%	2.25%	1.56%	0.98%	0.00%
湿地 Wetland	2.01%	2.15%	2.26%	2.59%	3.09%	3.66%	4.51%	5.58%	6.31%	6.70%	26.86%
人工表面 Built-up land	0.00%	0.00%	0.01%	0.09%	0.19%	0.32%	0.39%	0.40%	0.39%	0.33%	0.03%
其他 Other land	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.03%	0.03%	0.03%	0.02%	0.00%

3.3 各情景下的保护效率

从表 3 可以看出,情景 2-情景 4 的产水量保护效率最高,保护效率均为 1.17;情景 2 对土壤保持保护效率最高,保护效率为 1.89;情景 5-情景 10 对生境质量保护效率最高,保护效率均为 1.34;情景 10 对碳储存保护效率最高,保护效率为 1.65;情景 3 和情景 4 对生态休闲保护效率最高,保护效率均为 1.21。

综合对比 9 种情景,除情景 9 和情景 10 外,其他情景对产水量、土壤保持、碳储存、生境质量和生态休闲均有较好的保护效率。对比剩余 7 种情景,发现情景 2 的平均保护效率略高,对产水量、土壤保持、生境质量、碳储存和生态休闲的保护效率分别为 1.17,1.89,1.32,1.48,1.18。因此,情景 2 对应的优先保护区范围即为南方丘陵山地带的优先保护区。情景 2 中,土壤保持的保护效率最高,表明土壤保持是南方丘陵山地带最主要

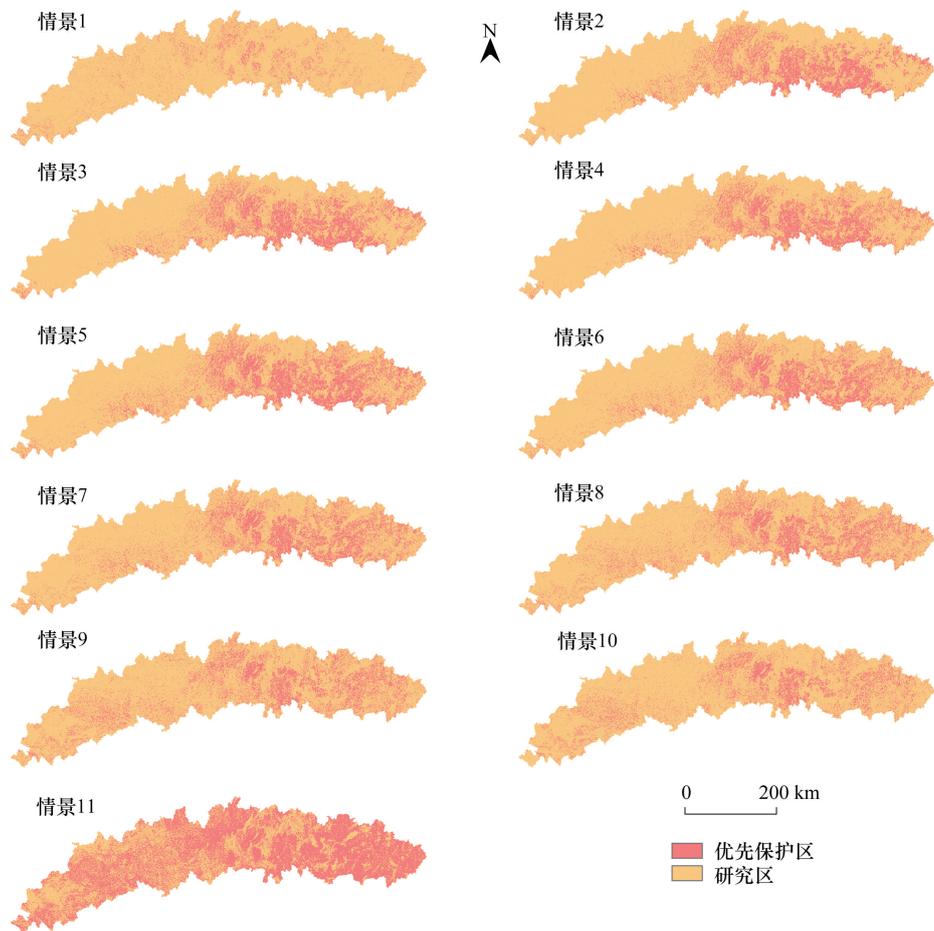


图5 各情景下的优先保护区

Fig. 5 The conservation priorities under each scenario

要的生态系统服务。南方丘陵山地带优先保护区主要位于东部丘陵区域,即广东省的西北部、广西壮族自治区的东北部和湖南省南部区域,面积为 5.93 万 km^2 ,土地利用/覆被类型主要为林地,因为林地具有较高的生态系统服务。林地的固碳能力强,生境质量的分布与碳储存相似可以看出碳储存较高的区域有利于保存生物多样性。林地的土壤保持量较强,其拦截地表径流的能力削弱了产水量。根据保护效率综合分析,情景 2 为最优情景,土地利用/覆被面积分别为林地 5.00 万 km^2 ,草地 0.80 万 km^2 ,湿地面积 0.13 万 km^2 。

4 结论与讨论

4.1 讨论

南方丘陵山地带对维护华南地区的生态安全格局起着至关重要的作用,对其优先保护区的生态系统服务效率进行分析有助于南方丘陵山地带的可持续管理。从图 6 可以看出,优先保护区对产水量、碳储存、生境质量和生态休闲的保护效率较好,存在较多大于平均保护效率的区域,但保护区内仍存在小部分区域对产水量的保护效率低于平均保护效率。优先保护区土壤保持的保护效率差异很大,存在不少区域低于平均保护效率,但从优先保护区土壤保持保护效率看,优先保护区对土壤保持的平均效率最高,这是由于低于平均保护效率的区域保护效率值接近 1,而高于平均保护效率的区域保护效率值较大,使得优先保护区对土壤保持的保护效率最好。

表 3 各情景下的保护效率

Table 3 The conservation efficiencies under each scenario

情景 Scenario	产水量 Water yield	土壤保持 Soil conservation	生境质量 Habitat quality	碳储存 Carbon storage	生态休闲 Ecological recreation	平均保护效率 Average conservation efficiency
1	1.05	6.48	1.27	1.31	1.01	2.22
2	1.17	1.89	1.32	1.48	1.18	1.41
3	1.17	1.75	1.33	1.50	1.21	1.39
4	1.17	1.72	1.33	1.53	1.21	1.39
5	1.14	1.66	1.34	1.55	1.20	1.38
6	1.12	1.62	1.34	1.57	1.19	1.37
7	1.10	1.57	1.34	1.59	1.19	1.36
8	1.06	1.50	1.34	1.61	1.18	1.34
9	0.98	1.40	1.34	1.64	1.13	1.30
10	0.99	1.45	1.34	1.65	1.14	1.31
11	0.91	1.21	1.34	1.48	1.03	1.19

在情景 2 中,最大的权重优先赋给排序处理后栅格值最小的图层,与其他标准化处理的生态系统服务相比,而土壤保持大部分栅格值最小,所以土壤保持被分配了最大的权重。近年来,南方丘陵山地带植被遭到破坏,部分区域植被覆盖度低,导致水土流失严重,因此,土壤保持是优先保护区最重要的生态系统服务。林地可以有效的保护土壤免遭侵蚀,同时具备较好的碳储存、生境质量和生态休闲功能,各生态系统服务都得到了有效的保护。因此,需要对优先保护区的林地进行重点保护,限制对林地的开发,保障南方丘陵山地带生态系统的稳定和发展。

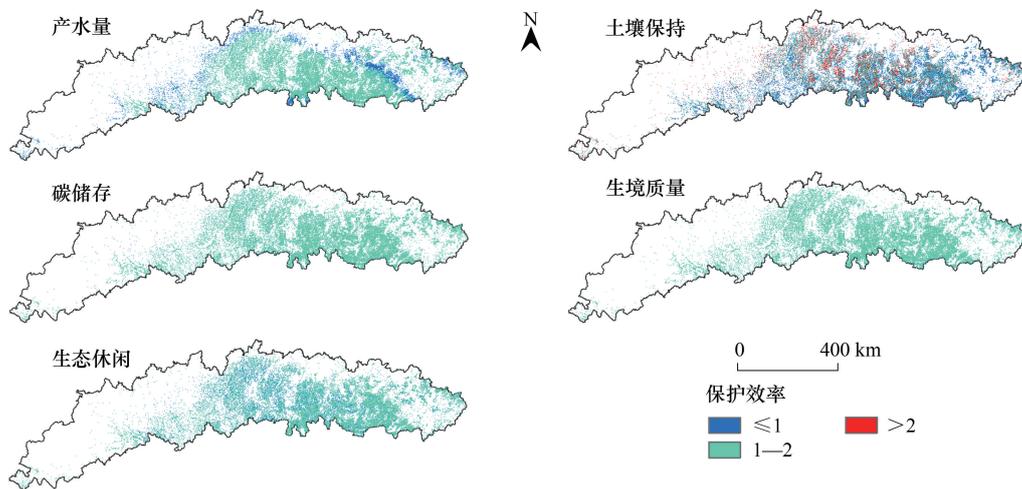


图 6 优先保护区的生态系统服务保护效率

Fig. 6 The conservation efficiencies of ecosystem services in conservation priorities

许多学者对土地利用与生态系统服务的关系进行了大量探索,表明林地对生态系统服务的贡献最大^[31-32],但他们在研究过程中并没有区分不同的林地类型^[33]。基于此,本研究把优先保护区的林地划分为常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林、常绿阔叶灌丛、落叶阔叶灌丛、乔木园地和灌木园地来探索不同的林地类型对生态系统服务的影响。由于土壤保持受很多因素的影响,如高程、降雨、土壤类型等,本研究在进行不同林地类型与生态系统服务关系研究时只考虑产水量、碳储存、生境质量和生态休闲 4 种生态系统服务。

图7中生态系统服务保护效率范围为0—2,常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林和针阔混交林的产水量<乔木园地和灌木园地的产水量<常绿阔叶灌丛和落叶阔叶灌丛的产水量,产水量的差别主要为林地、园地与灌丛之间的差别,而它们自身的差别很小。这可能与各林地的蒸发散有关,阔叶林、针叶林和混交林的蒸发散较大,使得其产水量较少。从碳储存来看,灌丛的碳储存最少,常绿针叶林和常绿阔叶林的碳储存较大,常绿的林地任何时候都能发挥其储存碳的功能,而落叶林地,由于树叶的凋落在秋冬季节的碳储存能力较弱。常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林和针阔混交林比乔木园地、灌木园地、常绿阔叶灌丛和落叶阔叶灌丛生境质量高,更适合物种居住,有利于保持生物物种多样性。不同林地类型的生态休闲差异不大,这主要是因为生态休闲由NPP、人口密度和距道路的距离所决定,与林木的覆盖度、结构等有关,与林地类型关系并不密切。由此可见,不同的林地类型或多或少都将影响生态系统服务。南方丘陵山地带的林地占比高达70%,而优先保护区林地占比极高,因此,本研究在对南方丘陵山地带进行林地管理、格局优化时,需要考虑林地的类型,重点保护和改善常绿阔叶林和常绿针叶林。

本文通过OWA算法设置不同的权重组合,平衡多个生态系统服务之间的冲突,为决策者提供了多种选择的方案。其中,情景1和情景11是两种极端情景,这两种情景往往以牺牲其他生态系统服务为代价,而情景2以低风险、高保护效率、配置较为均衡为保护目的,来保障优先保护区的全面性,是优先保护区的最佳选择。本研究仅选取了5个主要的生态系统服务,在未来的研究中可以考虑更多的生态系统服务来增加优先保护区选择的可信度。在情景分析过程中,为方便计算设置了11种情景,未来可根据决策者的目的和需求进行更多的情景模拟。优先保护区的确定是在2015年生态系统服务的基础上进行,而以静态时间节点来进行优先保护区的选择具有一定局限性,以长时间序列的生态系统服务来确定优先保护区则能够增加结果的说理力。随着人口的不断增加,经济化和城市化不断发展以及气候变化,生态系统服务必然发生改变,而优先保护区能否保持稳定,继续发挥其保护效益还有待验证。

4.2 结论

本文采用InVEST定量评估了南方丘陵山地带2015年5种生态系统服务,基于OWA方法权衡生态系统服务,设置了11种情景,综合考虑各情景下生态系统服务的保护效率确定了优先保护区。各情景的优先保护区分布相对集中,位于广东省的西北部、广西壮族自治区的东北部和湖南省南部区域。其中情景2的保护效率最优,对产水量、土壤保持、碳储存、生境质量和生态休闲的保护效率分别为1.17,1.89,1.32,1.48,1.18,南方丘陵山地带的优先保护区即为情景2的保护范围。为了最大程度的优化生态系统服务,应该重点保护保护区的常绿阔叶林和常绿针叶林。基于生态系统服务权衡的优先保护区选取研究能够为国家生态屏障区优先保护区的确定提供重要的参考,进一步保障国家的生态安全。

参考文献(References):

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, V. O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [3] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390.

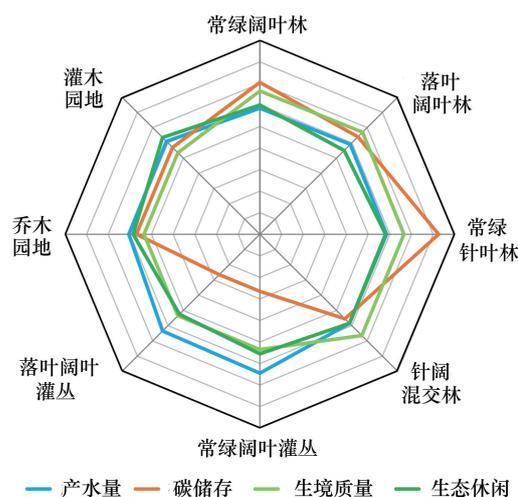


图7 不同林地类型的生态系统服务保护效率

Fig.7 The conservation priorities of ecosystem services in different forest types

- [4] Wang J T, Peng J, Zhao M Y, Liu Y X, Chen Y Q. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in North-western Yunnan, China. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 57-64.
- [5] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, Xu D L, Wang L, Ye X, Yang Y, Huang X F. Temporal variation and spatial scale dependency of the trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 218-229.
- [6] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 周潮伟, 傅伯杰. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *生态学报*, 2019, 39(20): 7344-7355.
- [7] 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.
- [8] 王晓峰, 程昌武, 尹礼唱, 冯晓明, 卫新东. 新疆生态系统服务时空变化及权衡协同关系. *生态学杂志*, 2020, 39(3): 990-1000.
- [9] Zhang L W, Fu B J, Lü Y H, Zeng Y. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 535-546.
- [10] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.
- [11] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Liu J P, Hu H Z. Ecosystem services trade-offs and determinants in China's Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1601-1614.
- [12] Zheng H, Wang L J, Peng W J, Zhang C P, Li C, Robinson B E, Wu X C, Kong L Q, Li R N, Xiao Y, Xu W H, Ouyang Z Y, Daily G C. Realizing the values of natural capital for inclusive, sustainable development: Informing China's new ecological development strategy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(17): 8623-8628.
- [13] 江波, 王晓媛, 杨梦斐, 蔡金洲. 生态系统服务研究在生态红线政策保护成效评估中的应用. *生态学报*, 2019, 39(09): 3365-3371.
- [14] 傅伯杰, 王晓峰, 冯晓明. 国家生态屏障区生态系统评估. 北京: 科学出版社, 2017: 271-345.
- [15] Qin K Y, Li J, Liu J Y, Yan L W, Huang H J. Setting conservation priorities based on ecosystem services-A case study of the Guanzhong-Tianshui Economic Region. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 3062-3074.
- [16] 张渝萌, 李晶, 曾莉, 杨晓楠, 刘婧雅, 周自翔. 基于 OWA 多属性决策的生态系统服务最优保护区选择研究——以渭河流域(关天段)为例. *中国农业科学*, 2019, 52(12): 2114-2127.
- [17] 赵文楨, 韩增林, 闫晓露, 钟敬秋. 基于生态系统服务多情景权衡的生态安全格局构建——以大连市瓦房店为例. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 546-562.
- [18] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 肖飞艳, 程昌武, 张欣蓉. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同. *地理研究*, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [19] 吴炳方, 张磊, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松, 常存, 刘成林, 苑全治, 李晓松, 曾源, 包安明. 2010 年中国土地覆盖监测的方法与特色. *生态学报*, 2015, 35(5): 723-731.
- [20] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松, 常存, 刘成林, 张磊, 李晓松, 曾源, 包安明. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 723-731.
- [21] Zhao M Y, Peng J, Liu Y X, Li T Y, Wang Y L. Mapping Watershed-Level Ecosystem Service Bundles in the Pearl River Delta, China. *Ecological Economics*, 2018, 152: 106-117.
- [22] Yang D, Liu W, Tang L Y, Chen L, Li X Z, Xu X L. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182: 133-143.
- [23] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [24] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 柳冬青, 马学成. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系. *地理学报*, 2018, 73(5): 868-879.
- [25] 张海波. 南方丘陵山地带水源涵养与土壤保持功能变化及其区域生态环境响应[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.
- [26] Sharps K, Masante D, Thomas A, Jackson B, Redhead J, May L, Prosser H, Cosby B, Emmett B, Jones L. Comparing strengths and weaknesses of three ecosystem services modelling tools in a diverse UK river catchment. *Science of the Total Environment*, 2017, 584-585: 118-130.
- [27] 孙兴齐. 基于 InVEST 模型的香格里拉市生态系统服务功能评估[D]. 昆明: 云南师范大学, 2017.
- [28] Hou Y, Lu Y H, Chen W P, Fu B J. Temporal variation and spatial scale dependency of ecosystem service interactions: a case study on the central Loess Plateau of China. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1201-1217.
- [29] Daniel T C, Muhar A, Arnberger A, Aznar O, Boyd J W, Chan K M A, Costanza R, Elmqvist T, Flint C G, Gobster P H, Grêt-Regamey A, Lave R, Muhar S, Penker M, Ribe R G, Schauppenlehner T, Sikor T, Soloviy I, Spierenburg M, Taczanowska K, Tam J, von der Dunk A. Contributions of cultural services to the ecosystem services agenda. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(23): 8812-8819.
- [30] Qiu J X, Turner M G. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(29): 12149-12154.
- [31] Chen W X, Chi G Q, Li J F. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995-2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 459-470.
- [32] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, Yan H M, Zhang F, Wei X Q. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 228-238.
- [33] Rimal B, Sharma R, Kunwar R, Keshtkar H, Stork N E, Rijal S, Rahman S A, Baral H. Effects of land use and land cover change on ecosystem services in the Koshi River Basin, Eastern Nepal. *Ecosystem Services*, 2019, 38, 100963.