

DOI: 10.5846/stxb202110112843

吴树荣, 潘换换, 姬倩倩, 杜自强, 武志涛, 张红. 基于生态系统服务的山西黄河流域保护优先区识别. 生态学报, 2022, 42(20): 8126-8137.

Wu S R, Pan H H, Ji Q Q, Du Z Q, Wu Z T, Zhang H. Identification of priority conservation areas in the Yellow River Basin of Shanxi Province based on ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8126-8137.

基于生态系统服务的山西黄河流域保护优先区识别

吴树荣¹, 潘换换¹, 姬倩倩¹, 杜自强^{1,*}, 武志涛¹, 张红²

1 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006

2 山西大学环境与资源学院, 太原 030006

摘要:山西黄河流域当前面临生态环境快速退化问题,从生态系统服务视角进行保护优先区识别是自然保护和可持续发展的关键步骤。为给研究区生态平衡的维护及生态保护规划和决策提供信息来源和理论依据,基于 2010—2020 年多源数据,通过 GIS 空间分析和 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade offs)模型等方法模拟主要生态系统服务(生境质量、土壤保持、防风固沙、产水、碳固定、粮食供给)时空格局并采用热点分析和 OWA(Ordered Weighted Averaged)多属性决策方法构建保护情景,评估保护效率筛选出最佳保护优先区。结果表明:(1)2010—2020 年,土壤保持、防风固沙、产水、碳固定和粮食供给服务整体呈现出上升趋势,仅生境质量小幅度下降。空间上,研究区西部和东南部生境质量、土壤保持、产水和碳固定服务突出,防风固沙服务分布较破碎,中部及西南部平原地区粮食供给服务显著。(2)保护情景中,单项生态系统服务保护优先区主要位于三川河流域、昕水河流域和沁河流域,由单一服务主导呈现空间异质性。综合生态系统服务构建了 11 种保护优先区情景,受生态系统服务耦合机制影响,整体呈现西北连片东南破碎的空间态势。(3)综合考虑风险、权衡及保护效率,情景 8 为最佳保护优先区,保护面积 1.85 万 km²,能高效保护多项生态系统服务,对生境质量、土壤保持、防风固沙、产水、碳固定和粮食供给服务保护效率分别为 1.45、1.38、1.04、1.31、1.16 和 0.98。本文研究结果可为山西黄河流域生态保护和可持续发展提供决策支持。

关键词:生态系统服务;保护优先区;InVEST 模型;黄河流域;山西

Identification of priority conservation areas in the Yellow River Basin of Shanxi Province based on ecosystem services

WU Shurong¹, PAN Huanhuan¹, JI Qianqian¹, DU Ziqiang^{1,*}, WU Zhitao¹, ZHANG Hong²

1 Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2 School of Environment and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: Facing the rapid degradation of the ecological environment in the Yellow River Basin of Shanxi Province, the determination of conservation priority areas from the perspective of ecosystem services is a key step for nature protection and sustainable development. In this study, comprehensive multi-source data integration was used to simulate the changes in the spatial-temporal patterns of main ecosystem services (habitat quality, soil conservation, sand prevention, water yield, carbon sequestration, and crop production) by GIS spatial analysis tools and InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade offs)model. Multiple conservation scenarios were established by using hot spot analysis tool and OWA (Ordered Weighted Averaged) multi-attribute decision-making method. Finally, the optimal conservation priority area was screened out by evaluating conservation efficiency. The work can provide information source and theoretical basis for the maintenance of ecological balance and ecological protection planning and decision-making in the Yellow River Basin of Shanxi Province. The results showed that: (1) Temporally, soil conservation, sand prevention, water yield, carbon sequestration, and crop production showed an overall upward trend, and only habitat quality decreased slightly from 2010 to 2020. Spatially, the services of habitat quality, soil conservation, water yield, and carbon sequestration were prominent in

基金项目:国家自然科学基金(U1810101, 41977412, 41871193);山西省研究生创新项目(2021Y118)

收稿日期:2021-10-11; **网络出版日期:**2022-06-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: duzq@sxu.edu.cn

the western and southeastern parts of the study area, while the distribution of sand prevention service was fragmented, and the crop production service in the central and southwest plain areas was significant. (2) In the constructed conservation scenarios, the conservation priority areas for single ecosystem service were mainly located in the Sanchuan River Basin, Xinchui River Basin, and Qinhe River Basin, which were dominated by the single service, showing spatial heterogeneity. Additionally, balancing the intricate relationship between ecosystem services, eleven conservation priority areas scenarios were constructed, which were affected by the coupling mechanism of ecosystem services, showing the overall spatial situation of the northwest contiguous and southeast fragmented. (3) Taking risks, trade-offs and protection efficiency into consideration, Scenario 8 is the optimal conservation priority area, with a protection area of 18,500 km², which can efficiently protect a variety of essential ecosystem services. The protection efficiency of habitat quality, soil conservation, sand prevention, water yield, carbon storage, and crop production are 1.45, 1.38, 1.04, 1.31, 1.16 and 0.98, respectively. The conservation priority area selection in this paper can provide a reference for the government's growing nature conservation affairs, which will contribute to sustainable development in the Yellow River Basin of Shanxi Province.

Key Words: ecosystem services; conservation priority areas; InVEST model; Yellow River Basin; Shanxi

生态系统服务是指自然生态系统提供的能够满足和维持人类生活需要的条件和过程,是人类直接或间接从生态系统获得的所有惠益^[1]。生态系统服务作为人与自然的纽带,基于社会—生态耦合系统框架连接自然生态系统与人类社会福祉,是当前宏观生态学研究的热点^[2-4]。

由于人类活动强度的增加引起生境的退化和生物多样性的减少,逐渐威胁到人类持续从自然生态系统中获得各种惠益^[5]。传统生态学家们首先认识到保护动物、植物、微生物物种及其基因和生境的重要性^[6], Myers^[7]提出生物多样性热点区域概念,经过十年的应用与修正将之推广至全球,服务于保护优先区识别与决策。最初建立的自然保护区对于维持生境和保护濒危物种起到一定作用,但地理单元上未形成系统的保护网络,物种缺乏交流与互馈,甚至保护区之间互相割裂^[8]。从长远来看,物种暂时得以保育,但栖息地的衰减和生态系统的退化逐渐印证了以生物多样性为单一保护目标的局限性^[5,9]。生物多样性和生态系统服务政府间平台(IPBES)建立,开始将生态系统服务和生物多样性价值共同纳入国家和地方规划、发展进程和减贫战略^[10]。为此,国外学者率先讨论将生态系统服务运用于保护优先区识别^[11]。Egoh^[12]选取特定草原生态系统基于 MARXAN 模型探索南非生物多样性和生态系统服务保护优先区域是否有结合的可能性;Minin^[10]试图提供一种空间优先排序来最大限度体现乌拉圭区域生态系统服务;Duarte^[13]通过对生态系统服务建模来评价巴西铁四角地区生态系统服务与生物多样性指标重叠区域。国内学者也在寻求保护优先区识别方法上的改进,李英杰^[14]为识别陕西土壤保持保护优先区通过对比不同热冷点空间聚类的方法,指出 G_i^* 热冷点在显著性分级和斑块连通性具科学性和优越性;秦克玉^[15]通过 OWA 构建情景模拟风险权重识别关中—天水生态系统服务保护效率高的区域,提供了一种权衡生态系统服务之间关系的科学方法;张立伟^[16]对中国七大生态保护区和恢复区进行保护成效评价来明确保护优先区范围。将生态系统服务纳入保护优先目标并建立约束体系仍处于起步探索阶段,尽管上述学者已就此展开研究,目前基于生态系统服务功能评估来划定保护优先区的工作报道仍然较少^[17-18],且在保护优先区规划中主要考虑物种—环境之间的关系,往往忽略人类赖以生存的生命支持系统(主要是生态系统服务)的保护^[19]。此外科学协调生态系统服务指标之间的关系工作仍有待扩展,还需验证生态系统服务与传统保护区的空间关联性。

生态系统服务关系着整个黄河流域生态保护与高质量发展。山西黄河流域是我国煤化工、能源电力等高耗水行业及煤炭开采业的重点区域,发展和保护矛盾突出,生态本底脆弱,水土流失和能源污染最突出,是目前生态治理和环境改善的关键点。流域生态系统的水源涵养、固土固沙、碳固定和粮食生产等服务的重要性不可忽视,如果纳入保护区分配资源对其予以保育,能够有效改善当地脆弱生态环境,保护生物多样性和生态系统服务^[20]。因此通过一套统一的生态系统服务评估体系,明确生态系统服务空间和数量信息,构建不同保护情景协调生态系统服务之间的关系,评估保护效率确定保护优先区,对黄河流域生态建设和可持续发展具

有重要意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

山西黄河流域范围(34°33'—40°18'N, 110°11'—113°37'E), 涉及11市(地)91个县(市、区)。土地面积9.7万km², 约占全省总面积的62%。该区域煤炭、天然气、矿产等资源丰富, 在全国占有重要地位。在“黄河流域生态保护与高质量发展”国家战略引领下, 该区域正在成为我国未来发展的重点区域之一。

研究区属于暖温带大陆性季风气候, 雨热同期, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥。该区地貌呈“两山夹一川”(太行山和吕梁山, 中为汾河谷地), 属于典型的黄土覆盖的山地高原地区。土壤类型以土质疏松的泥土和含砂土为主^[21], 抗侵蚀能力低, 遇水极易流失。按照流域水系特征, 研究区分为6个子流域(图1), 其中I区为入黄支流流域; II区为三川河流域; III区为昕水河流域; IV区为涑水河流域; V区为汾河流域; VI区为沁河流域。该区生态环境脆弱、生态系统稳定性差, 是土壤侵蚀、土壤盐渍化、土地荒漠化等多重自然生态风险集中分布区。特别是近年来随着该区域重点发展产业的迅速推进, 人为环境与自然生态风险交织在一起, 极易产生生态风险的放大效应。因此, 该区域是黄河流域生态保护的重点监控区。

1.2 数据来源与处理

本文使用的基础数据包括: 2010—2020年气象数据(月均气温、降水和风速)、DEM高程数据、土地利用数据、土壤类型数据、NDVI数据、碳密度数据、社会经济数据、自然保护区分布数据(表1)。利用ArcGIS工具箱中的数据管理工具(Data management tools)统一坐标系, 数据转换工具(Data conversion tools)对数据格式进行均一化处理, 最终转换为分辨率1km的栅格数据。

1.3 生态系统服务评估

针对研究区自然地理特征, 选取关键生态系统服务。栖息地的破坏和随之面临的生物多样性的丧失是一个全球性的问题^[22], 为探讨生物多样性与生态系统服务结合的可能性, 选取生境质量作为生物多样性的替代指标。山西黄河流域地处黄河中游, 水土流失严重, 选取土壤保持服务来衡量近年来水土保持工作成效^[23]。研究区作为华北平原的生态屏障, 防风固沙功能也是目前备受关注的服务^[24]。此外, 该区域水资源匮乏, 产水供给服务对整个流域生态平衡具有重要作用^[25]。由于碳固定服务能够影响流域小气候并指示人类活动, 是揭示生态系统变化的关键指标^[26], 因此也被纳入评估。粮食供给与国计民生息息相关^[27], 在考虑自然生态系统时, 不该忽视人类生产需求。各项服务评估方法见表2。

1.4 生态系统服务保护优先区情景构建

1.4.1 单项生态系统服务

通过Getis-Ord G_i^* 统计指数的热点分析工具对单项生态系统服务服务的热点和冷点进行识别, 以热点区域作为保护优先区。该方法通过计算不同斑块之间的Z得分, Z值的高低, 反应热点区域的集聚程度^[28]。

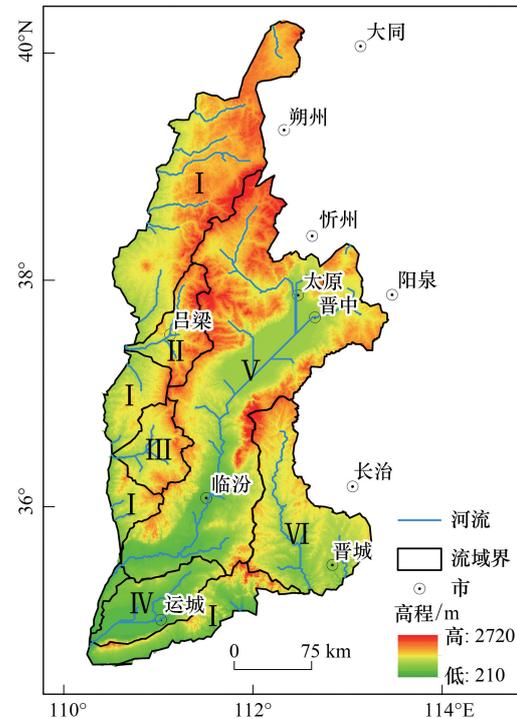


图1 山西黄河流域示意图

Fig.1 Location of the Yellow River Basin in Shanxi

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据名称 Data name	时间 Time	分辨率 Resolution/m	数据来源 Data sources
DEM 数据 DEM data	2004 年	90	地理空间数据云网站
LULC 数据 LULC data	2010—2020 年	30	地理国情监测云平台
气象数据 Meteorological data	2010—2020 年		中国气象数据网
土壤类型数据 Soil type data		1000	寒区旱区科学数据中心
NDVI 数据 NDVI data	2010—2020 年	300	中国科学院资源环境科学与数据中心
碳密度数据 Carbon density data	2010—2020 年		国家生态科学数据中心
粮食数据 Food production data	2010—2020 年		山西省统计年鉴
自然保护区分布及相关数据 Distribution of nature reserves and related data			中国自然保护区标本资源共享平台、国家冰川沙漠冻土数据中心

DEM: 数字高程模型 Digital Elevation Model; LULC: 土地利用和土地覆盖 Land-Use/Land-Cover; NDVI: 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index

表 2 生态系统服务评估方法

Table 2 Assessment methods of ecosystem services

评估指标 Evaluation index	评估方法 Evaluation method	参数含义 Parameter meaning
生境质量 Habitat Quality	$HQ_{xj} = H_j(1 - (\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z}))$	HQ_{xj} 为土地利用 j 中栅格 x 的生境质量指数; H_j 为生境类型 j 的生境适宜度, 取值范围 0—1; k 为半饱和常数, 一般为生境退化度最大值的 1/2; z 为常量, 通常设为 2.5
土壤保持 Soil Conservation	$SC = R \times K \times L \times S(1 - C \times P)$	SC 为土壤保持量 (t/hm^2); R 为降雨侵蚀力因子 ($MJ \cdot mm/hm^2 \cdot h$); K 为土壤可蚀性因子 (t/hm^2); L 是坡长因子; S 是坡度因子; C 是作物与覆盖因子; P 是水土保持措施因子 (L, S, C, P 无量纲)
防风固沙 Sand Prevention	$SP = \frac{2Z}{S^2} \times Q_{max} \times e^{-(z/s)^2}$ $s = 150.71 \times (WF \times EF \times SCF \times K' \times C) - 0.3711$ $Q_{max} = 109.8 \times WF \times EF \times SCF \times K' \times C$	SP 为单位面积年实际风蚀量 (kg/m^2); z 为下风向距离 (m), 本次计算取 50 m; s 为关键地块长度 (m); Q_{max} 为风力的最大输沙能力 (kg/m); WF 为气候因子 (kg/m); EF 为土壤可蚀性因子; SCF 为土壤结皮因子; K' 为土壤糙度因子; C 为植被因子 (WF, SCF, K', C 无量纲)
产水量 Water Yield	$WY_i = (1 - \frac{AET_i}{P_i}) \times P_i$	WY_i 某栅格单元 i 的年产水量 (mm); AET_i 为栅格单元 i 的年实际水分蒸散量 (mm); P_i 为栅格单元 i 的年降雨量 (mm)
碳固定 Carbon Storage	$CS = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead}$	C_{above} 为地上部分碳储量 (t/hm^2); C_{below} 为地下部分碳储量 (t/hm^2); C_{soil} 为土壤碳储量 (t/hm^2); C_{dead} 为死亡有机碳储量 (t/hm^2)
粮食供给 Crop Production	$CP_i = CP_{sum} \times \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}}$	CP_i 为耕地栅格 i 的粮食产量 (t/hm^2); CP_{sum} 为县域粮食产量 (t/hm^2); $NDVI_i$ 为耕地栅格 i 的 NDVI 值; $NDVI_{sum}$ 为县域 NDVI 总值

其计算公式如下:

$$Gi^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{[N \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2]}{n - 1}}}$$

式中, w_{ij} 为斑块 i j 之间的空间权重矩阵; x_j 为斑块 j 的属性值; n 为总斑块数; 其中:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}$$

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

1.4.2 综合生态系统服务

利用 OWA 有序决策方法权衡多项生态系统服务之间的关系, 该方法是一种依据风险系数任意选择指标之间重要程度的决策方法^[29-30]。指标权重经过准则权重(某项指标在所有指标中的权重)和次序权重(指标按属性值降序排列得到的权重)加权得到。OWA 算子定义如下:

$$\text{OWA} = \sum_{j=1}^n w_j S_{ij}$$

$$w_i = \frac{u_i v_i}{\sum_{j=1}^n u_j v_j} \quad (w_i \in [0, 1], \sum_i w_i = 1)$$

式中, u_i 为第 i 个图层的准则权重; v_i 为第 i 个图层的次序权重; S_{ij} 为按照生态系统服务第 i 个图层第 j 个位置属性值大小进行降序排列后得到的新图层属性值; w_i 为第 i 个图层的权重。根据降序后新图层的权重计算风险和权衡, n 为栅格图层总数, 公式如下:

$$\text{risk} = (n-1)^{-1} \sum_i^n (n-1) w_i \quad (0 \leq \text{risk} \leq 1)$$

$$\text{tradeoff} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_i^n \left(w_i - \frac{1}{n} \right)^2}{n-1}} \quad (0 \leq \text{tradeoff} \leq 1)$$

1.4.3 生态系统服务保护效率评价

为实现高生态效益和低保护成本的目标, 需明确生态系统服务保护优先区的保护成效。生态系统服务保护效率的值为无单位正数^[31-32], 计算公式如下:

$$E = \frac{E_p}{E_s}$$

式中, E 为保护优先区某项生态系统服务的保护效率, E_p 为保护优先区的某项生态系统服务均值, E_s 为全区域某项生态系统服务均值。保护效率大于 1, 说明区域的生态系统服务保护成效较高, 若小于 1, 则相反。

2 研究结果

2.1 生态系统服务时空分布

研究区生境质量、土壤保持、防风固沙、产水量、碳固定和粮食供给多年均值分别为 0.67(无量纲)、94.95、37.2、114.76mm、119.05、3.19t/hm²。宏观来看, 土壤保持、产水和粮食供给服务低于全国范围内的服务供应^[33-34], 防风固沙服务水平低于国内风沙源区^[24], 这与研究区域独特的地理环境和脆弱的生态系统密切相关。空间上, 研究区西部和东南部生境质量、土壤保持、产水和碳固定服务突出, 防风固沙服务分布较破碎, 主要位于草地覆盖区域, 中部及西南部平原地区粮食供给服务显著。此外, 研究期内土壤保持、防风固沙、产水、碳固定、粮食供给呈现出整体上升趋势, 仅生境质量呈现下降趋势。总体看, 最高值年份普遍在 2015 年以后。

2010—2020 年主要生态系统服务时空分布(图 2)显示:(1)生境质量呈中部低、东西高的特征, 其中高值

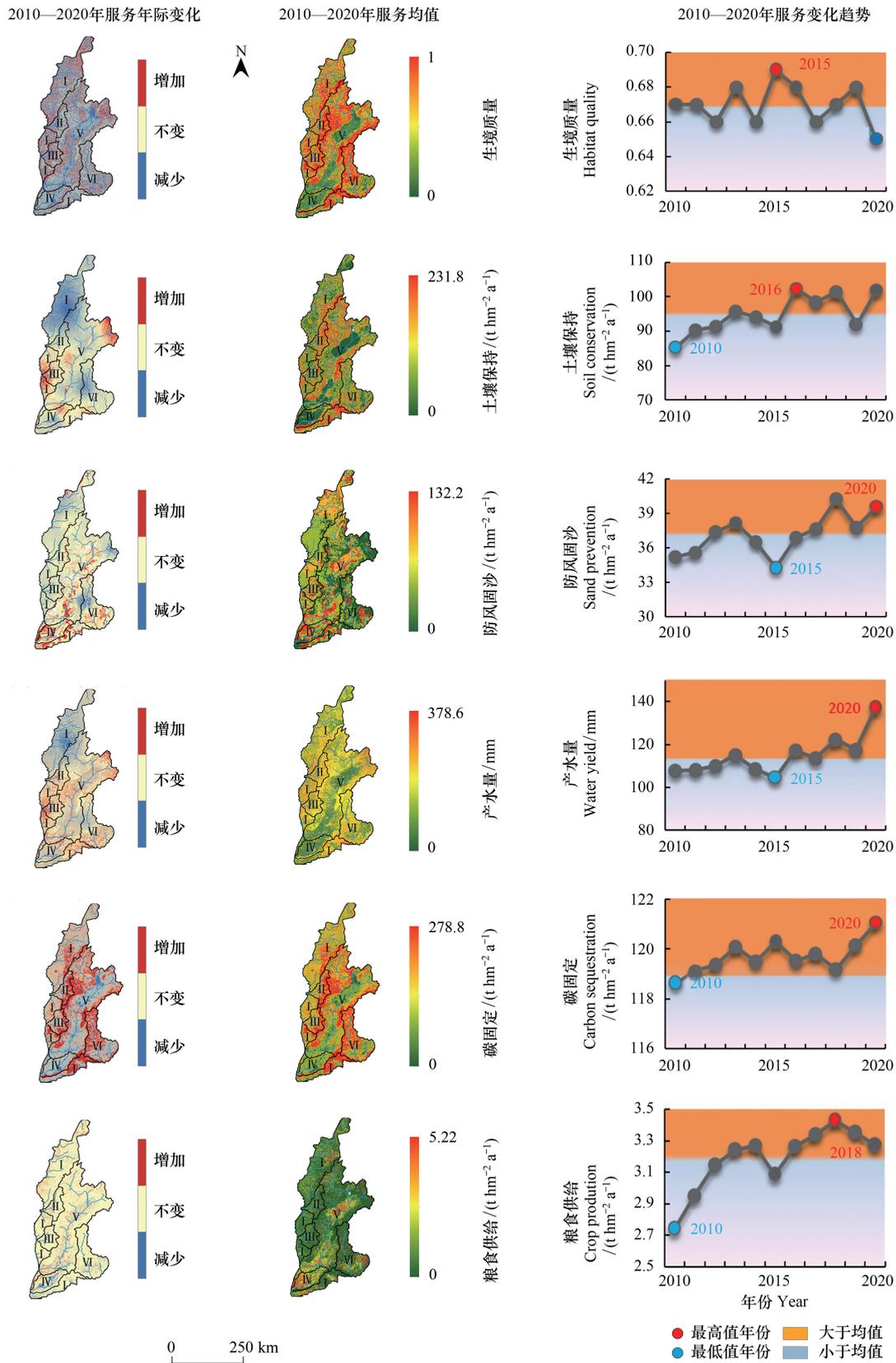


图2 山西黄河流域生态系统服务时空格局

Fig.2 Spatio-temporal pattern of ecosystem services in the Yellow River Basin of Shanxi

HQ: 生境质量 Habitat quality; SC: 土壤保持 Soil conservation; SP: 防风固沙 Sand prevention; WY: 产水量 Water yield; CS: 碳固定 Carbon Ssequestration; CP: 粮食供给 Crop production

区主要位于两山区域(太行山和吕梁山),即 II、III 和 VI 区植被覆盖率高的区域,生境适宜性高。低值则主要位于 IV 和 V 区。时间上,生境质量呈现降低趋势,各子流域无大面积增减。(2) 土壤保持服务高值点主要位于研究区林草覆盖且地形起伏的区域,包括 II 区东部和 I、III 区局部。低值区位于 IV 和 V 区中部平原盆地,这些区域土地利用以耕地为主,景观格局较为破碎,更容易受到人为扰动,土壤保持能力弱。时间上,土壤保持服务呈波动上升趋势, I 和 III 区交界处及 V 区东北部的土壤保持服务呈大面积增加趋势。(3) 防风固沙服务呈现低值广泛分布,高值点状分布于晋北、IV 和 V 区。研究期内服务能力逐渐提高,主要为晋北区域、涑水河和汾河沿岸草地覆盖区域,年际增长快。(4) 产水服务低值分布于 IV 和 V 区,其他区域均大于多年均值。从时间来看,产水服务波动增加, I 区北部的产水服务年际变化呈下降趋势,其他区域呈现不同程度的增加。(5) 碳固定服务空间分异明显,高低值分布与生境质量基本一致,两山区域林草地碳固定服务显著,主要由于林草地可利用其地上和地下空间充分发挥固碳能力。服务增加区域主要位于高值区,降低区域则明显分布于低值区。(6) 粮食供给服务主要分布在耕地覆盖区域,高值区域主要为 IV 区涑水河谷地、V 区汾河谷地,其他区域也有少量分布。从年际变化来看,粮食供给能力明显在不断提高。

2.2 生态系统服务保护优先区情景模式

2.2.1 基于单项生态系统服务评估的保护优先区情景模式

基于热点分析工具统计各项生态系统服务的热冷点(图 3)得出:(1) 生境质量热冷点空间分布呈东北—西南走向特征,热点在 II、III 和 VI 区分布面积较大,IV 和 V 区广泛分布冷点。(2) 土壤保持服务热点主要分布于 I、II、V 和 VI 区局部,冷点位于河流流经的平坦区域。(3) 防风固沙服务热点在晋北、IV 和 V 区分布面积较大,集中分布于涑水河、汾河沿岸,冷点在区域内广布。(4) 产水服务热点主要位于两山区域 II、III 和 VI 区的草地覆盖区域,IV、V 区广泛分布冷点。(5) 碳固定热点主要分布于两山区域的 II、III 和 VI 区,与生境质量热点分布大体一致。(6) 粮食供给服务热点主要分布于 IV 区和 V 区河流沿岸,其他区域也有零星分布。

从单项生态系统服务保护情景来看(图 3),生境质量、土壤保持、产水和碳固定服务保护优先区主要分布

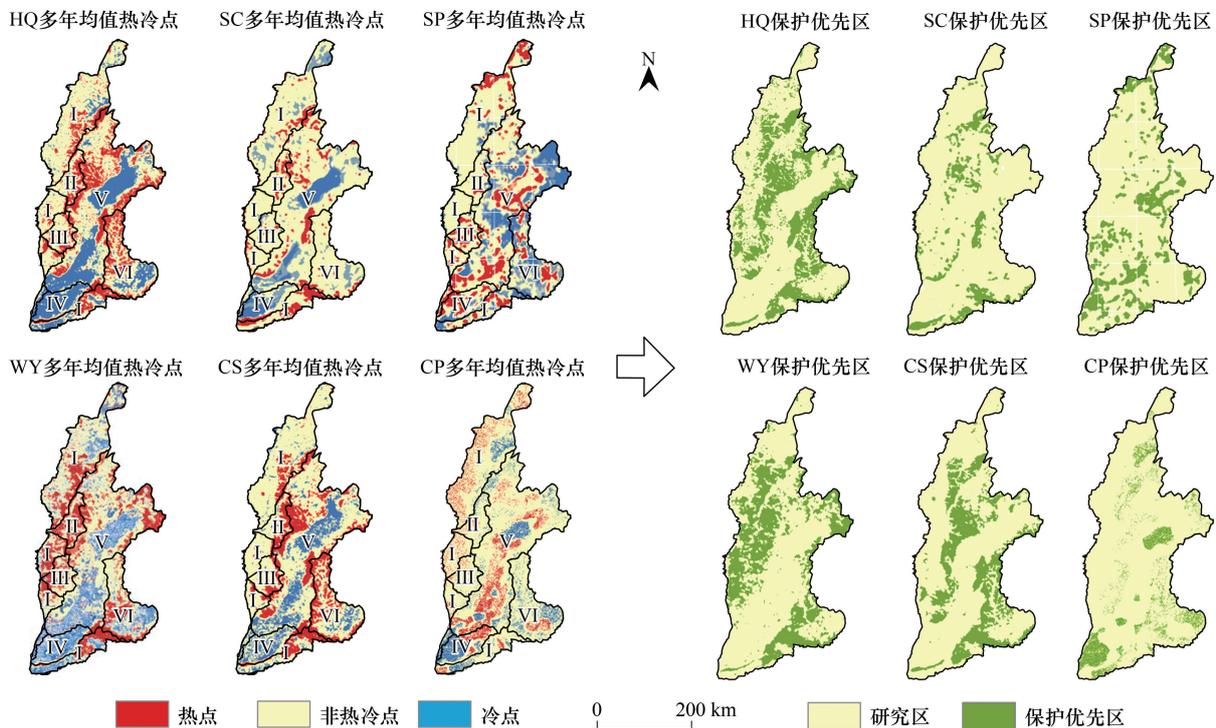


图 3 单项生态系统服务保护优先区

Fig.3 Single ecosystem service conservation priority area

于三川河流域、昕水河流域和沁河流域,森林斑块和草地斑块面积足够大,不容易受边缘效应影响,且以山地丘陵为主,地形上受到保护不人为土地利用的影响;防风固沙服务保护优先区分布于研究区草地高覆盖区域,土地覆被和气候条件对其影响关键;粮食供给服务保护优先区位于涑水河谷地、汾河谷地,土壤肥沃,灌溉便利,适合作物耕作。

2.2.2 基于生态系统服务综合评估的保护优先区情景模式

通过 OWA 多准则决策方法构建保护情景,设置风险范围 0—1,以 0.1 为间隔增加风险,模拟出 11 种情景(表 3)。其风险与权衡之间的关系表明,当风险从 0 到 1 增加时,权衡的趋势接近抛物线。风险为 0.5,权衡达到其最高值 1,其两面为对称分布。风险接近于 0,权重偏向于低值,风险达到 1,权重分配给高值^[20],将权重与对应栅格图层相乘得到 11 种情景栅格图。目前我国关于确定保护优先区范围的研究相对尚少,综合考虑保护效益和成本,并结合学者们相关研究^[18, 29—30],前 20% 的区域不仅在空间上与既有保护区广泛重叠,还能维持更多生物多样性和生态系统服务且集约化保护面积。因此本文选取不同情景前 20% 的区域作为保护优先区。

表 3 不同情景下的风险与权衡

Table 3 Risks and trade-offs in different scenarios

情景 Scenario	风险 Risk	权衡 Trade-offs	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
1	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0.1	0.37	0	0	0.01	0.03	0.34	0.62
3	0.2	0.57	0	0.03	0.08	0.15	0.28	0.46
4	0.3	0.71	0.02	0.08	0.14	0.16	0.26	0.34
5	0.4	0.86	0.10	0.12	0.15	0.17	0.20	0.26
6	0.5	1	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
7	0.6	0.86	0.26	0.20	0.17	0.15	0.12	0.10
8	0.7	0.71	0.34	0.26	0.16	0.14	0.08	0.02
9	0.8	0.57	0.46	0.28	0.15	0.08	0.03	0
10	0.9	0.37	0.62	0.34	0.03	0.01	0	0
11	1	0	1	0	0	0	0	0

w_1 — w_6 : 表示按标准化后的六项生态系统服务属性值降序排序获得的第 1—6 个图层的权重 weight 1—6

通过 OWA 多属性决策方法得出(图 4),情景 1 至情景 11,生态系统服务高值集聚越来越明显,从点状开始向连片状扩散,两山区域高值明显增加。情景 1 低值广布研究区,高值零星分布于吕梁山林草地覆盖区域。情景 2 高值区域开始扩散,且研究区东南部开始有高值覆盖,水域为主的土地利用类型成为明显的低值区域。情景 3、情景 4 和情景 5 空间分布相类似,但高低值区域存在面积上的差异,耕地和建设用地区域的低值分布逐渐减少。情景 6 为权衡达到 1 时无偏向的情景,高低值分布最为均衡。情景 7、情景 8 和情景 9 逐渐偏向高值区域,林地和草地区域高值分布越来越多。情景 9 和情景 10 决策风险较高,除汾河流域和涑水河流域以外区域,全部为高值区域。

不同情景下保护优先区空间分布显示(图 4),情景 1 至情景 10 保护优先区分布相似局部不同,基本呈片状分布于研究区西北部,点状分布于研究区东南部,两山区域分布最为明显;情景 11 除汾河流域外呈片状遍布研究区。结合前文的研究结果,保护情景空间分布很大程度受到碳固定和生境质量服务的影响,二者贡献度最大,服务高值区林草地长势好,生境完整性强,固碳能力也高。其他服务也有影响,经过生态系统服务耦合机制,故而整体呈现西北连片东南破碎的空间态势。

2.3 最佳保护优先区识别

单项生态系统服务保护情景,由于设置了单一保护标准,当仅考虑单个服务的热点时,单一服务保护效率达到最高,而其他服务保护成效则相对较低。对单一服务保护优先区进行叠加,生境质量、产水量和碳固定保

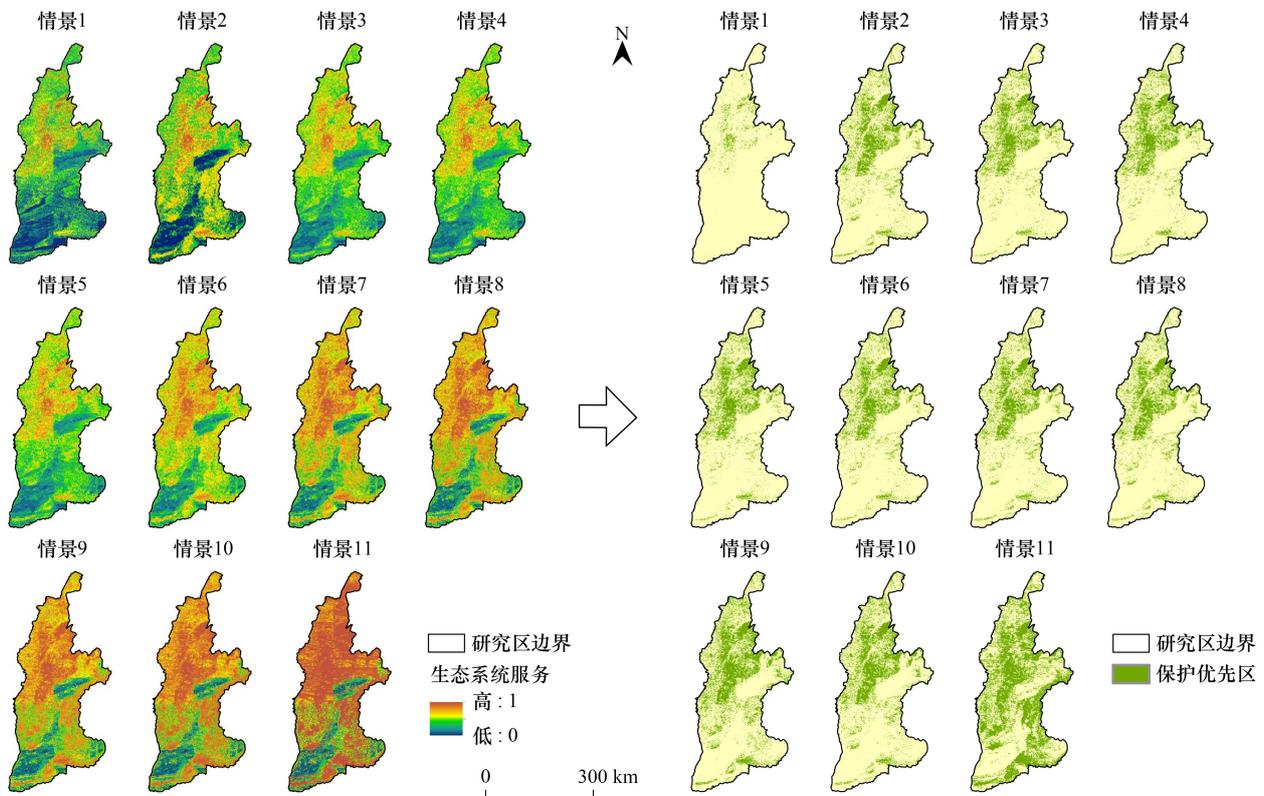


图 4 不同情景下的生态系统服务保护优先区

Fig.4 Ecosystem service conservation priority areas under different scenarios

护优先区两两之间空间重叠度达到 60% 以上,表明三者 在空间上具有较高的协同效应。此外,其他服务保护 优先区两两间重叠度较弱,均在 15% 左右。其中,粮 食供给与其他保护优先区之间的重叠度接近于 0,表 明这项服务与其他生态系统服务叠加时会降低其他 服务相关性,空间呈现权衡。因此,如果以单一保 护目标设置保护优先区,难以合理协调生态系统服 务之间的复杂关系。

经验证 OWA 模拟出的情景能够合理平衡生态系 统服务之间的关系(图 5),对多项服务保护效率更为 均衡,充分体现了 OWA 多准则决策方法的优越性。 综合生态系统服务保护情景中,情景 7 和 8 对生境 质量、土壤保持和产水服务保护效率最高,情景 2 对 碳固定服务保护效率最高,情景 1 对防风固沙和粮 食供给服务保护效率最高。情景 11 面积最大但保 护效率最低,情景 6 至情景 10 保护效率都比较高。 其中,情景 8 对多项生态系统服务保护效率最高,为 最佳情景,对生境质量、土壤保持、防风固沙、产 水、碳固定和粮食供给服务的保护效率分别为 1.45、 1.38、1.04、1.31、1.16 和 0.98,面积 1.85 万 km², 相对其他情景面积较小,能高效保护多项生态系 统服务。

决策者可以将情景 8 作为确定保护优先区的信 息来源(图 6),与实际保护区(包括太行山保护优先 区和国家级自然保护区,占研究区 25.5%)重叠面积 为 1.1 万 km²,主要位于两山区域的 II、III 和 VI 流 域,其土地利用类型主要为林地和草地,二者占比 达 90% 以上,其中林地占 50% 以上,林草地具有 较高维持生态系统服务的能力。此外,存在着不在 任何法定保护区的高连通性地区,对于维持景观连 通性十分重要,还能保护部分敏感物种,考虑到其 未来所提供的生态效益,可作为可持续发展的保护 优先区进而充分管理。

3 结论

以山西黄河流域为例,基于 2010—2020 年多源 数据通过 GIS 空间分析和 InVEST 等模型方法模拟 主要生

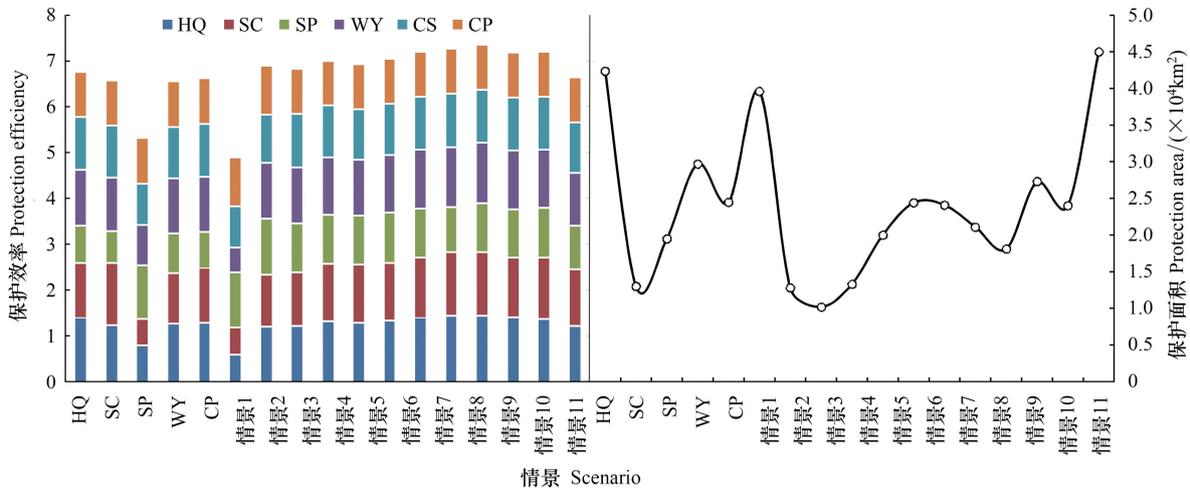


图5 情景对比分析

Fig.5 Comparative analysis of scenarios

态系统服务时空格局并采用热点分析和 OWA 多准则决策方法构建保护情景,评估保护效率筛选出保护优先区。结果表明:

(1)2010—2020 年,土壤保持、防风固沙、产水、碳固定和粮食供给服务整体呈现出上升趋势,仅生境质量小幅度下降。空间上,研究区西部和东南部生境质量、土壤保持、产水和碳固定服务突出,防风固沙服务分布较破碎,中部及西南部平原地区粮食供给服务显著。

(2)保护情景中,单项生态系统服务保护优先区主要位于三川河流域、昕水河流域和沁河流域,由单一服务主导呈现空间异质性。综合生态系统服务构建了 11 种保护优先区情景,受生态系统服务耦合机制影响,整体呈现西北连片东南破碎的空间态势。

(3)综合考虑风险、权衡及保护效率,情景 8 为最佳保护优先区,保护面积 1.85 万 km^2 ,能高效保护多项生态系统服务,对生境质量、土壤保持、防风固沙、产水、碳固定和粮食供给服务保护效率分别为 1.45、1.38、1.04、1.31、1.16 和 0.98。

4 讨论

目前,实际保护区倾向于保护单一目标,如太行山保护优先区以保护生物多样性为目标,国家级自然保护区设立目标更明确于保护特定珍稀动植物种,研究区的庞泉沟、芦芽山、五鹿山和灵空山国家级自然保护区均以保护珍禽褐马鸡和一些特定生态系统及树种为目标,构建保护区过程中并未考虑物种的迁移与交流,部分保护区甚至处于“生态孤岛”状态,有可能将生物多样性与生态系统完整性割裂开来^[8]。从生态系统服务视

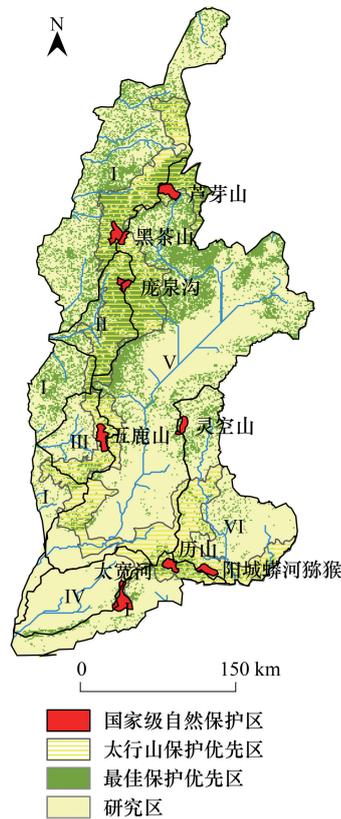


图6 山西黄河流域最佳保护优先区

Fig.6 The optimal conservation priority areas of the Yellow River Basin in Shanxi

角识别保护区是经过权衡多指标加权集成的结果,空间上更考虑生态系统的完整性,集中于森林和草地相对完整的斑块,其林草面积达到 94%,而实际保护区林草面积占 60%,农田灌丛占 35%。本文基于的方法能够最大程度揭示自然生态系统服务为人类所带来的惠益,提供多目标权衡和双赢的空间规划信息,以减少社会经济和保护成本冲突为目标,服务于黄河流域生态保护与高质量发展大局。随着当前人口增长和经济发展需求,整合生物多样性、生态系统服务和社会经济活动之间协同发展,是未来极具前景的选择^[10]。

本研究构建生态系统服务的保护优先区情景,并结合法定自然保护区作验证,其高度重叠表明将生态系统服务和生物多样性保护优先区结合在一个空间规划中是有可能的,这是对 Egoh 等^[12]发现的南非区域中度重叠以及 Turner 等^[35]关于全球其他地方生物多样性和生态系统服务整合研究的有力例证。从生态系统服务评估方法上看,生境质量、土壤保持、产水量和碳固定服务均利用 InVEST 模型实现,数据获取便捷且评估准确性和灵活性高,可结合研究区实际环境去调节和校正参数,因此在不同区域被广泛应用,本文的评估结果与其他学者在黄河流域尺度的研究空间格局相吻合^[33-34]。防风固沙量基于修正的土壤风蚀方程模型评估得到,该模型在干旱与半干旱区验证效果最佳,因山西黄河流域属于风沙源区的缓冲区,这项服务供给量相对较少,空间和数量特征呈现结果并不显著。粮食供给 NDVI 配比法空间化得到,在实际中耕地的生产能力受诸多因素影响,结果难免存在误差,但不会对空间格局造成重要影响。在这项研究中,生境质量、产水量和土壤保持服务在山西黄河流域具有较高空间相关性,与徐建英^[36]关于“一带一路”地区生态系统服务相关研究一致,然而其他服务两两间协同度较弱,粮食供给与其他服务之间甚至呈现权衡关系。因此,考虑到生态系统服务之间的复杂关系,在保护优先区识别过程中,从单项和综合生态系统服务权衡两方面入手,以热点识别单项服务保护情景,以验证 OWA 综合服务保护情景,协调多项生态系统服务之间的关系,实现小范围达到生态系统服务最高值,最大程度减少成本投入,提高生态系统服务提供能力。

本文突破了传统生物多样性保护优先区识别方法,将生态系统服务纳入保护优先区识别,但研究仍具局限性,生态系统服务无法完全表征生物多样性,评估只能独立进行,尽管选取生境质量作为替代指标,但其与生态系统服务之间的关系仍需辅以广泛的案例研究来验证。在本研究中,保护优先区范围并不代表人类受益的规模,不同生态系统服务的空间供应和需求不尽相同,例如碳固定服务由当地供应,但其可受益全球,因此未来可结合生态系统服务供应和需求,为具争议的区域的政策提供更直观的依据。由于研究区脆弱敏感的生态环境,保护优先区具体管理过程可能具有挑战性,从目前的植树造林以固定碳的恢复方案到防治水土流失和水质恶化的管理措施等等,如需达到生态系统服务和生物多样性的双赢,仍需创新形成一种动态管理方法,在战略制定和实施的框架内,确保人类生产和发展活动得到适当的定位和管理,以便生物多样性保护和生态系统服务的提供不受损害^[12]。此外,这个框架下对其他区域进行保护规划时,需要从多方面、多层次综合考虑该地区的自然生态和社会经济问题、提供的典型服务类型以及多种服务之间的复杂关系,鼓励在识别出的保护优先区域采取可持续的土地利用政策,以维持和扩展其生态效益。

参考文献 (References):

- [1] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [2] Palmer M, Bernhardt E, Chornesky E, Collins S, Dobson A, Duke C, Gold B, Jacobson R, Kingsland S, Kranz R, Mappin M, Martinez M L, Micheli F, Morse J, Pace M, Pascual M, Palumbi S, Reichman O J, Simons A, Townsend A, Turner M. Ecology for a crowded planet. *Science*, 2004, 304(5675): 1251-1252.
- [3] Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, Tam C, Chen X D. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9477-9482.
- [4] Crossman N D, Burkhard B, Nedkov S. Quantifying and mapping ecosystem services. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 2012, 8(1/2): 1-4.
- [5] Pimm S L, Jenkins C N, Abell R, Brooks T M, Gittleman J L, Joppa L N, Raven P H, Roberts C M, Sexton J O. The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*, 2014, 344(6187): 1246752.
- [6] Li G, Xiao N W, Luo Z L, Liu D M, Zhao Z P, Guan X, Zang C X, Li J S, Shen Z H. Identifying conservation priority areas for gymnosperm species under climate changes in China. *Biological Conservation*, 2021, 253: 108914.

- [7] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403 (6772): 853-858.
- [8] Cao M T, Peng L, Liu S Q. Analysis of the network of protected areas in China based on a geographic perspective: current status, issues and integration. *Sustainability*, 2015, 7(11): 15617-15631.
- [9] Wilcove D, Rothstein D, Dubow J, Phillips A. Quantifying Threats to Species in the United States & Assessing the relative importance of habitat destruction, alien species, pollution, overexploitation, and disease. *Bioscience*, 1998, 48: 2007.
- [10] Minin E D, Soutullo A, Bartesaghi L, Rios M, Szephegyi M N, Moilanen A. Integrating biodiversity, ecosystem services and socio-economic data to identify priority areas and landowners for conservation actions at the national scale. *Biological Conservation*, 2017, 206: 56-64.
- [11] 申嘉澍, 李双成, 梁泽, 王玥瑶, 孙福月. 生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望. *自然资源学报*, 2021, 36(8): 1909-1922.
- [12] Egoh B N, Reyers B, Rouget M, Richardson D M. Identifying priority areas for ecosystem service management in South African grasslands. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6): 1642-1650.
- [13] Duarte G T, Ribeiro M C, Paglia A P. Ecosystem services modeling as a tool for defining priority areas for conservation. *PLoS One*, 2016, 11(5): e0154573.
- [14] Li Y J, Zhang L W, Yan J P, Wang P T, Hu N K, Cheng W, Fu B J. Mapping the hotspots and coldspots of ecosystem services in conservation priority setting. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(6): 681-696.
- [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] 张立伟, 傅伯杰, 吕一河, 董治宝, 李英杰, 曾源, 吴炳方. 基于综合指标法的中国生态系统服务保护有效性评价研究. *地理学报*, 2016, 71(5): 768-780.
- [17] 余艳红, 宋福强, 李卓卿, 周盈涛, 温权, 王珺, 段禾祥. 基于生态服务功能评估的滇西北脆弱区保护优先区识别及管理策略. *生态经济*, 2015, 31(9): 156-161.
- [18] 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.
- [19] 王治良. 嫩江流域湿地自然保护区空缺(GAP)分析[D]. 哈尔滨: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2016.
- [20] 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.
- [21] 王振亚. 从生态平衡视角出发——浅析黄河流域山西段植树造林存在的问题及提升措施. *林业科技情报*, 2020, 52(4): 37-38, 41.
- [22] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 12-22.
- [23] 陈心盟. 黄河流域生态系统服务时空变化及其权衡关系分析. *农业与技术*, 2020, 40(20): 122-125.
- [24] 申陆, 田美荣, 高吉喜. 基于 RWEQ 模型的浑善达克沙漠化防治生态功能区土壤风蚀与主要影响因子分析. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 90-97.
- [25] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2731-2739.
- [26] 张燕, 师学义, 唐倩. 不同土地利用情景下汾河上游地区碳储量评估. *生态学报*, 2021, 41(1): 360-373.
- [27] 吴平, 林浩曦, 田璐. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态安全格局构建. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(9): 5-11.
- [28] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 王鹏涛, 李英杰, 吕一河, 延军平. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征. *生态学报*, 2019, 39(3): 823-834.
- [29] 陈田田, 彭立, 王强. 基于生态系统服务权衡的生态安全多情景决策. *中国环境科学*, 2021, 41(8): 3956-3968.
- [30] 赵文祯, 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.
- [31] 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.
- [32] Zhang H. Identifying priority areas for the conservation of ecosystem services using GIS-based multicriteria evaluation. *Polish Journal of Ecology*, 2013, 61(1): 415-430.
- [33] Rao E M, Ouyang Z Y, Yu X X, Xiao Y. Spatial patterns and impacts of soil conservation service in China. *Geomorphology*, 2014, 207: 64-70.
- [34] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, Xu K, Zhou Y L, Zhao Y T. Recent trends in vegetation greenness in China significantly altered annual evapotranspiration and water yield. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): 094010.
- [35] Turner W R, Brandon K, Brooks T M, Costanza R, da Fonseca G A B, Portela R. Global conservation of biodiversity and ecosystem services. *BioScience*, 2007, 57(10): 868-873.
- [36] 徐建英, 陈吉星, 刘焱序, 樊斐斐, 魏建瑛. “一带一路”地区生态系统服务关系的时空分异与区域响应. *生态学报*, 2020, 40(10): 3258-3270.