

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.003.

丁禹元, 席愉, 王玉, 等. 生态脆弱区县域生态系统服务综合管控分区模拟与优化: 以陕西陇县为例[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 344-354, 364.
Ding Yuyuan, Xi Yu, Wang Yu, et al. Simulation and Optimization of Zoning and Management of County Ecosystem Services in Ecologically Fragile Areas: Taking Long County of Shaanxi Province as an Example. [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 344-354, 364.

生态脆弱区县域生态系统服务综合管控分区模拟与优化

——以陕西陇县为例

丁禹元¹, 席愉², 王玉¹, 岳邦瑞¹, 朱玲^{1,3}

(1.西安建筑科技大学 建筑学院, 西安 710055; 2.山西林业职业技术学院,
太原 030009; 3.中国城乡建设与文化遗产研究院, 西安 710055)

摘要: [目的]明晰生态脆弱区县域单元内多元生态系统服务时空分异特征与综合管控路径,对维护区域生态安全,践行生态文明战略有重要意义。[方法]以陕西陇县为例,评估县域空间 2000 年、2010 年、2020 年 5 项关键生态系统服务物质质量值,识别服务供给高值区及权衡关系、权衡协同变化趋势;结合 OWA 方法,筛选出综合最优的管控情景并给出优化建议。[结果](1) 2000—2020 年,县域多项服务整体呈现出上升趋势;(2) 生境质量的高值聚集区分布与自然保护地位置一致;土壤保持和水源涵养热点区主要分布于南北部林草高覆盖区域;食物供给的热点区沿千河主河道分布。(3) 生态休闲与食物供给服务在东南镇、温水镇、天成镇权衡空间扩张较为明显。水源涵养和生境质量的协同空间在西南部呈扩大趋势。(4) 选取能够响应“供给高值区、权衡协同变化区”管控需求的模拟情景 9 作为最优管控模式,其中管控优先级最高的“关键保护与修复区”占县域面积的 13.9%。[结论]生态脆弱区县域生态系统服务管控不仅应注重对服务供给高值地区的保护,还应关注局部服务权衡加剧、协同减弱的现象,适时调控地域发展导向,探索综合可持续管控模式。

关键词: 生态系统服务; 生态脆弱区; 县域; 生态管控; 多情景模拟

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0344-11

Simulation and Optimization of Zoning and Management of County Ecosystem Services in Ecologically Fragile Areas —Taking Long County of Shaanxi Province as an Example.

Ding Yuyuan¹, Xi Yu², Wang Yu¹, Yue Bangrui¹, Zhu Ling^{1,3}

(1.School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2.Shanxi Forestry Vocational Technical College, Taiyuan 030009, China;

3.China Academy of Urban-Rural Development & Cultural Heritage, Xi'an 710055, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study is to explore the spatiotemporal differentiation characteristics and comprehensive management points of multiple ecosystem services within county units in ecologically fragile areas, which is of great significance to maintaining regional ecological security and implementing the ecological civilization strategy. [Methods] Long County, Shaanxi Province was taken as an example. The quality values of five key ecosystem services in 2000, 2010, and 2020 were systematically evaluated. High-value service supply areas, pairwise trade-off relationships, and changing trends were identified. The OWA method was applied to identify the optimal management scenario to provide improvement suggestions.

收稿日期: 2023-11-04

修回日期: 2023-12-04

资助项目: 国家重点研发计划(2022YFC3802803); 教育部人文社会科学研究一般项目(22XJCZH006); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-QN-0420); 陕西省自然科学基金青年项目(2024JC-YBQN-0511)

第一作者: 丁禹元(1988—), 女(满族), 陕西西安人, 博士研究生, 主要从事国土空间生态规划与生态系统服务研究。E-mail: 380334143@qq.com

通信作者: 岳邦瑞(1973—), 男, 陕西西安人, 教授, 博士, 主要从事西北脆弱区景观生态规划理论与方法研究。E-mail: bangruiyue@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

[Results] (1) From 2000 to 2020, multiple services showed an overall upward trend. (2) High-value clustering areas of habitat quality were incompatible with the existing protected areas. The areas with high values of soil conservation and water conservation mainly distributed in the areas with high forest and grass coverage in the north and south. (3) The trade-off spatial expansion of ecological leisure and food supply services was more obvious in Southeast Town, Wenshui Town, and Tiancheng Town. The synergies between water conservation and habitat quality in the southwest exhibited an expanding trend. (4) Among the simulated scenarios, Scenario 9, capable of responding to the demand for managing high-value supply areas and trade-off synergies, is chosen as the optimal management model. Within this model, the highest management priority ‘Critical Protection and Restoration Zones’ covers 13.9% of the county’s area. [Conclusion] Management of ecosystem services in ecologically fragile areas at the county level should focus not only on protecting high-value service supply areas but also on addressing the exacerbated local service trade-offs and the diminished synergies. Timely adjustments in regional development orientations and the exploration of comprehensive sustainable management models are imperative.

Keywords: ecosystem services; ecologically fragile areas; county area; ecological management; multi-scenario

生态系统服务(Ecosystem Services, ES)作为关联自然生态系统与人类福祉的桥梁,在协调人地关系、维护可持续发展上具有优势^[1]。生态脆弱区是人地系统敏感脆弱且生态功能难以自我恢复的地区^[2],占据我国55%以上的国土面积,综合管控生态脆弱区内多种生态系统服务,实现区域可持续发展是现阶段生态文明建设的关键任务^[3]。生态系统服务的空间特性往往随研究尺度变化而改变^[4],既有生态脆弱区管控研究多聚焦于自然流域^[5]、省域等广域尺度^[6-7],少见以区县为对象的研究反馈。而空间治理体系下,生态管控面临层级博弈加剧、修复效率低下等问题^[8],作为管控实施主体,区县行政层级其单元内生态系统服务的时空分异特性与科学管控路径亟待探究明晰。

当前生态系统服务研究已广泛应用于生态管控区划、优先级研判,包括(1)识别生态系统服务多年物质或价值量变化的关键区域、地类单元,作为重点生态保护与修复区^[9-10]。(2)关注生态系统服务间权衡协同特征,制定促进多元生态系统服务协同增益的空间政策和管控格局^[11-12]。(3)通过探索区域生态系统服务供给热冷点分布的空间特征及影响因素,提供相应的生态保护决策建议^[13-14]。(4)基于区域生态系统服务的供需关系及空间流动,制定生态管控区划^[15-16]。同时,研究者还关注到现实中多样化需求所带来的不确定性,应用算法模型来进行生态管控情景模拟,常见的有模拟退火算法(Annealing algorithm)^[11]、蚁群算法(Annealing algorithm)^[17]、最大熵模型(Max Ent)^[18]及有序加权平均OWA(Ordered Weighted Averaging, OWA)方法等^[19],其中OWA方法能够较好的耦合空间对象客观属性与主

观决策偏好,呈现出不同管控准则优先级间的空间转化过程,更有利于决策者进行对比判断。

陇县位于陕甘宁三省交界处,境内生态本底脆弱,水土流失、自然生境破碎化等问题突出^[20]。2020年陇县入选国家级重点生态功能区及国家级生态文明示范县,新的发展阶段要求其升级原先以工业、农业为主导的发展模式,探索兼顾生态基底保护与资源利用、更加系统可持续的管控路径^[21]。

本研究采用物质质量评估与相关性分析等方法,揭示县域内多种关键生态系统服务在2000年、2010年、2020年的时空分异与权衡协同关系变化特征,结合OWA方法多情景模拟方法,探讨匹配地域生态系统服务时空特性的最优综合管控情景及新政策背景下的管控建议,旨在为同类地区决策实践提供有益借鉴。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

陇县位于陕西省宝鸡市西北部,地理坐标位于东经106°26′32″—107°8′11″、北纬34°35′17″—35°6′45″,总面积2 276.95 km²,辖10个乡镇,常住人口20.17万余人。陇县属暖温带大陆性季风气候,年平均气温10.7℃,多年平均降水量为607.9 mm。县域地势西高东低,千河经中部斜贯而过,其间山、塬、丘陵、沟壑、梁峁多种地貌类型共存。境内的自然保护地主要分布于西北部、南部的千山、关山山地区域,包含1个国家级自然保护区和2个省级自然公园,总面积占县域国土面积的5.4%。当前实施的总体规划中陇县以工业、特色农业作为主导产业,各乡镇分属“工贸型”“农贸型”“旅游服务型”和“综合发展型”4种职能^[22],其区位与布局见图1。

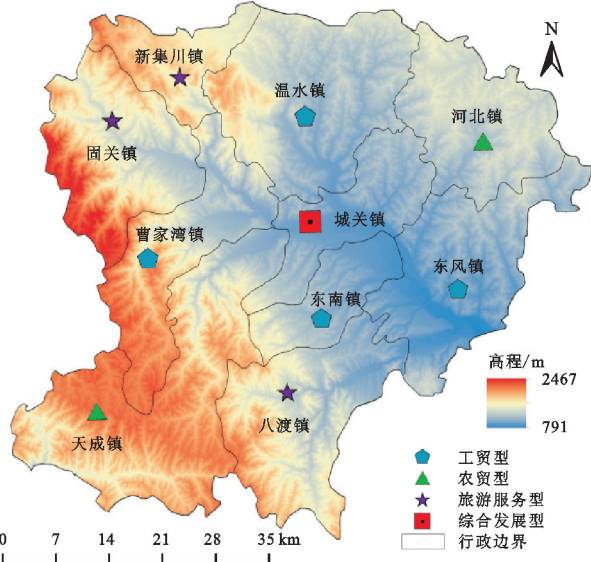


图 1 研究区区位与各乡镇发展定位
Fig. 1 Geographical location and development positioning of each town

1.2 数据来源与处理

(1) 2000 年、2010 年、2020 年陇县土地利用数据、陇县 DEM 数据、行政区划数据、归一化植被指数数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。其中土地利用数据使用二级分类体系并结合规划调研数据进行局部修正。
(2) 土壤数据来源于世界土壤数据库(HSWD ver1.2)。
(3) 气象数据来源于陕西省宝鸡市气象局。(4) 农业、

林业、畜牧业相关数据、人口及社会经济数据来源于《陇县统计年鉴 2000—2020》，相关规划文件资料来源于陇县自然资源局。(5) 为保证数据的统一性与精准性,所有栅格数据在 ArcGIS 10.7 软件支持下,进行空间化处理并统一为 30 m 空间分辨率。

1.3 生态系统服务评估方法

1.3.1 生态系统服务选择 研究区关键生态系统服务类型应代表地域资源禀赋,且评估方法具备实证研究先例。本研究根据《陕西省陇县城市总体规划(2013—2030)》《陇县国土空间总体规划(2021—2035)草案公示版》中“农产品供给”“生态休闲目的地”“水源涵养地”等发展定位选取食物供给(Food supply, FS)、生态休闲(Ecological recreation, ER)、水源涵养(Water conservation, WC)、生境质量(habitat quality, HQ)、土壤保持(Soil conservation, SC)5 种服务作为陇县的关键生态系统服务类型。

1.3.2 单项生态系统服务评估制图 借助 InVEST 中的“生境质量(Habitat quality)”进行生境质量指数计算、“产水量(Water Yield)”计算后应用地形指数、土壤饱和导水率和流速系数修正获得水源涵养量值^[23];土壤保持使用 RUSLE 模型进行评估;食物供给根据陇县多元农产品供给的特征,参考前人研究以不同土地利用类型单位面积上的农产品产值作为表征,并对照社会经济数据进行校正^[24](表 1)。

表 1 生态系统服务评估方法

Table 1 Methods for ecosystem service assessment

生态系统服务	计算公式	变量解释
土壤保持	$SE_p = R \times K \times LS$ $SE_a = R \times K \times LS \times C \times P$ $SC = SE_p - SE_a$	SC 表示土壤保持量[t/(hm ² ·a)];SE _p 表示潜在的土壤侵蚀量[t/(hm ² ·a)];SE _a 为实际的土壤侵蚀量 t/(hm ² ·a);R 为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm ² ·h·a)];K 为土壤可蚀性因子[t·h/(MJ·mm)];LS,C,P 分别为地形因子、植被覆盖管理因子、土壤保持措施因子
水源涵养	$Retention = \min\left(1, \frac{249}{Velocity}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TWI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{sat}}{300}\right) \times Y$	Retention 为水源涵养量(mm);TWI 为地形湿度指数;K _{sat} 为土壤饱和导水率(cm/d),Velocity 为流速系数;Y 为年降水量(mm)
生境质量	$Q_{xj} = H_{xj} \times \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + K^2}\right)\right]$	Q _{xj} 是土地利用类型中的栅格的生境质量;D _{xj} 是生境的退化度,代表土地利用类型栅格的生境退化程度;H _{xj} 为土地利用类型中栅格的生境适应性;K 是半饱和常数
食物供给	$G_i = \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \times G_{sum}$	G _i 为第 i 个栅格所分配的农业产值、林业产值与畜牧业产值[万元/(hm ² ·a)];G _{sum} 为农业总产量、林业总产值与畜牧业总产值(万元);NDVI _i 表示第 i 个栅格的 NDVI;NDVI _{sum} 为研究区耕地、林地或草地的 NDVI 之和
生态休闲	$ER = \sum (NPP_i + POP_i + ROAD_i)$	ER 表示生态休闲功能;NPP _i 表示净初级生产力值;POP _i 表示人口密度值;ROAD _i 是距离道路的距离值

1.3.3 生态系统服务热点空间分析 以陇县的县域边界范围创建 300 m×300 m 的格网,将 2000 年、

2010 年、2020 年三年生态系统服务评估结果均值图进行分区统计—值提取至点等操作,提取该格网单元

中生态系统服务的 MEAN 值作为该格网单元的属性值。应用 ArcGIS 平台中的 Getis-Ord G_i^* 统计指数的热点分析工具(hotspot analysis),获取格网要素之间的 Z 值和 p 值,以反映生态系统服务量值高值集聚区(热点区域)与低值集聚区(冷点区域)的分布情况,其中 Z 值是标准差的倍数, p 值为概率, Z 值越高且 p 值越小,说明热点区域的集聚越明显, Z 值越小且 p 值越大,说明冷点区域的集聚越明显^[25]。计算公式如下:

$$G_i^* = \left(\frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \right) \left(\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n-1} - \bar{X}^2} \right) \quad (8)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (9)$$

式中: x_j 为要素 j 的属性值; w_{ij} 为 i 与 j 之间的空间权重矩阵; n 为总斑块数; \bar{X} 为所有栅格生态系统服务总量的平均数; G_i^* 是 Z 得分。

1.3.4 生态系统服务间权衡分析 生态系统服务权衡分析可以探测出区域内不同生态系统服务关系的竞争或协同增益变化情况。研究使用 SPSS 22.0 软件对 2000、2010 年及 2020 年生态系统服务进行 Pearson 相关分析,当系数为负数时表示生态系统服务发生权衡,系数为正数时表示生态系统服务间保持协同。通过 GeoDa 软件对各生态系统服务格网图进行双变量局部莫兰指数(Bivariate Local Moran's I)运算,以实现权衡协同关系空间表达,结果分为:高高集聚和低低集聚的协同关系、高低集聚和低高集聚的权衡关系以及不显著相关关系^[26]。

1.4 基于 OWA 的综合生态系统服务管控模拟

有序加权平均(Ordered Weighted Averaging, OWA)是多属性决策的常用模型^[27],将其与 GIS 平台结合,基于不同生态系统服务物质质量评估结果对其重新排序,考虑不同的决策偏好(风险)赋予评估图层不同的次序权重,方便决策者对比不同情景综合管控下的空间差异。相关核心公式如下:

$$OWA(x_{ij}) = \sum_{i=1}^n w_i s_{ij} \quad (w_i \in [0, 1]; \sum_i w_i = 1; i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

式中: x_{ij} 表示综合生态系统服务栅格图层; S_{ij} 表示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属性值序列,研究取 2020 年生态系统服务栅格图层标准化后的均值进行计算; n 为指

标数,即选取的生态系统服务数量; w_i 为 S_{ij} 的位序权重,基于前人研究,采用模糊量化方法进行求解。

$$w_i = Q_{\text{RIM}}\left(\frac{i}{n}\right) - Q_{\text{RIM}}\left(\frac{i-1}{n}\right) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (11)$$

$$Q_{\text{RIM}}(r) = r^\alpha \quad \alpha \in (0, \infty) \quad (12)$$

式中: i 为位序数; r 为自变量; α 为表征决策偏好的计量系数,大于 0 且不存在极值,当 α 取值越低则位序权重倾向于分配给本身属性值较高的位序图层,即原本供给值高的服务类型获得更多保护,是一种较为“保守”的决策模式, $\alpha = 1$ 代表无偏好的进行不同生态系统服务的综合管控, $\alpha > 1$ 时,本身属性值较低的位序图层获得更多权重,即决策者给予量值较低的服务更多关注,是一种倾向于对“弱势”服务进行保护或修复干预的管控模式。

由于在 α 量值区间上可以产生无数种偏好情景,研究首先设置 7 种偏好情景($\alpha = 0.000, 1, 0.1, 0.5, 1, 2, 10, 10\ 000$)进行模拟试算,将其综合布局情景与真实生态系统服务时空特征进行比对后确定更加细化的 α 量值区间,并按此进行反复迭代模拟^[19]。

2 结果与分析

2.1 2000—2020 年生态系统服务量化评估与热点区域分布

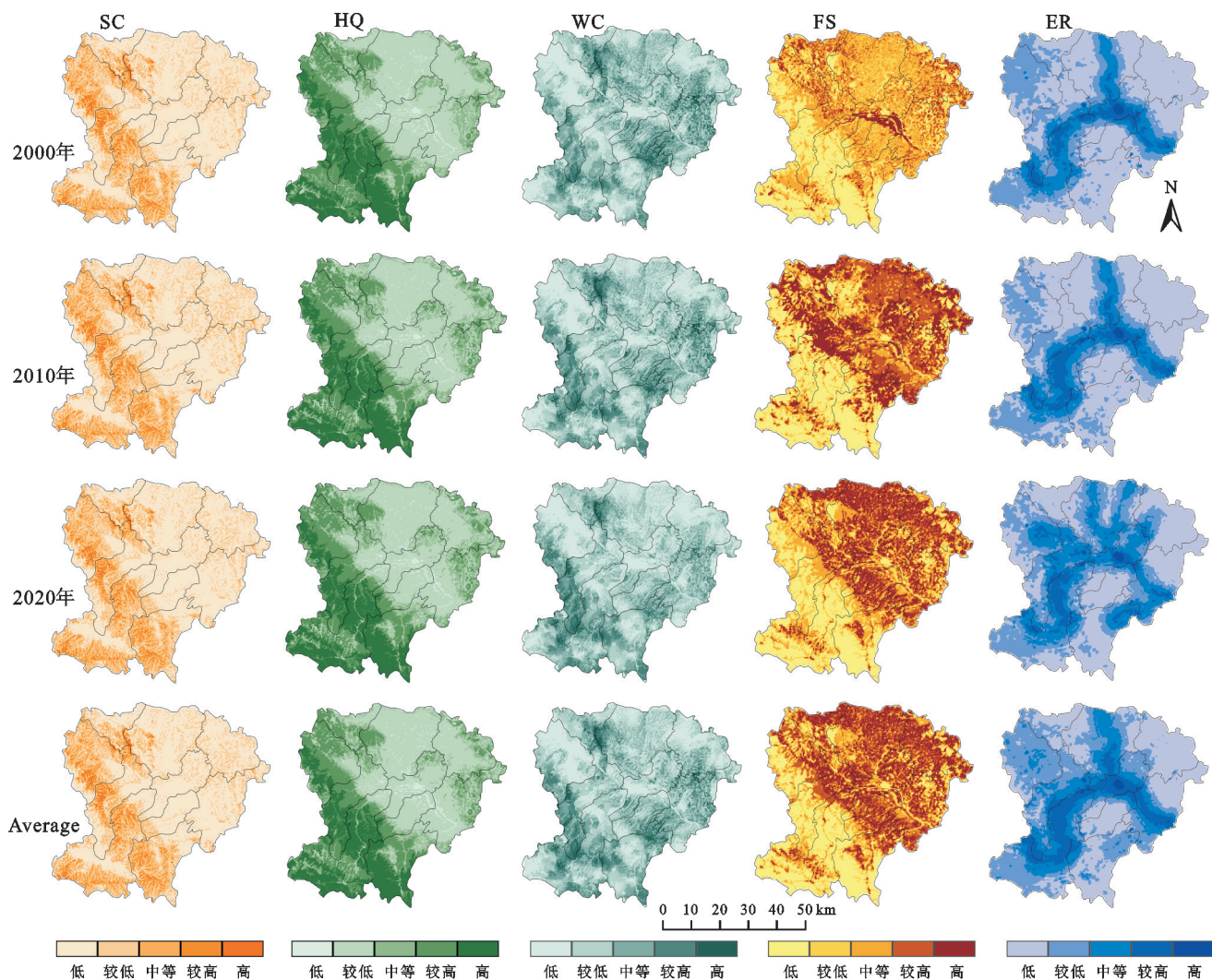
2000—2020 年,陇县县域 5 种关键生态系统服务整体呈现出上升趋势(图 2)。其中土壤保持高值由 2000 年的 184.59 t/(hm² · a)增加到 2020 年的 296.52 t/(hm² · a),增幅较为显著。其高值区域集中在北部的千山及西南部陇山山区,中部千河谷地、北部旱塬区域以及关山草场区域土壤保持量较低且上升趋势不明显;水源涵养高值由 2000 年的 119 mm 增加到 194 mm,北部河北镇及曹家湾镇、东南镇西南部为水源涵养服务的热点区,中部城关镇至北部温水镇带状区域水源涵养服务呈退化趋势;生境质量在 20 年间分布趋势无明显变化,生境质量较高的区域主要集中在西南的关山、千山山地区域,其林草覆盖面积广泛,物种丰富度高;受到城镇扩张影响,中心城镇区域及西北部旱塬区域生境质量下降较为明显。食物供给高值区主要分布于北部、中部的农耕粮食产区以及西南部草场区域。生态休闲服务的高值区主要沿道路分布,其空间演化与 20 年间主要风景区、交通设施的建设完善紧密相关,热点区域分布见图 3。

2.2 生态系统服务的权衡、协同关系及变化特征

陇县 5 种关键生态系统服务在 2000 年、2010 年、2020 年 3 个年份共呈现出 15 种相关关系,由图 4

可知,其相关关系都具有统计学意义($p < 0.05$)。总体上看,生态休闲、食物供给服务与其他 3 种服务呈现明显权衡关系,生态休闲与食物供给之间也一直存在权衡关系,但随时间逐渐减弱。生态休闲与土壤保持之间相关性不明显;食物供给与生境质量、水源涵养以及土壤保持之间均存在权衡关系且呈加剧趋势;生境质量、水源涵养二者均与土壤保持服务呈协同关系,且逐渐加强,侧面说明县域相应的生态管控措施取得了一定成效。

空间上,东南镇、温水镇、天成镇权衡空间扩张较为明显。特别是 2010 年后温水镇与东南镇区域的食物供给和土壤保持权衡空间急剧增加,这与当时侧重农产品供给的规划目标有一定关联;呈现协同关系的服务中,水源涵养和生境质量的协同空间在西南部呈扩大趋势,水源涵养与土壤保持的协同空间在曹家湾镇及天成镇北部退化明显(图 5)。各镇域呈现的生态系统服务热点类型、权衡关系及变化见表 2。



注: ER 表示生态休闲; SC 表示土壤保持; HQ 表示生境质量; WC 表示水源涵养; FS 表示食物供给,下同。

图 2 2000—2020 年陇县 5 种生态系统服务空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of five ecosystem services in Long County between 2000 and 2020

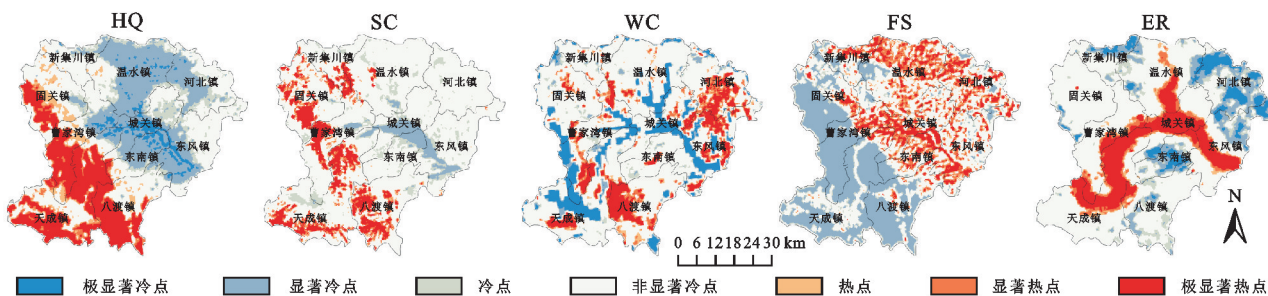


图 3 2000—2020 年陇县 5 种生态系统服务年均值冷热点

Fig. 3 The hotspots and cold spots of the annual average of five ecosystem services in Long County between 2000 and 2020

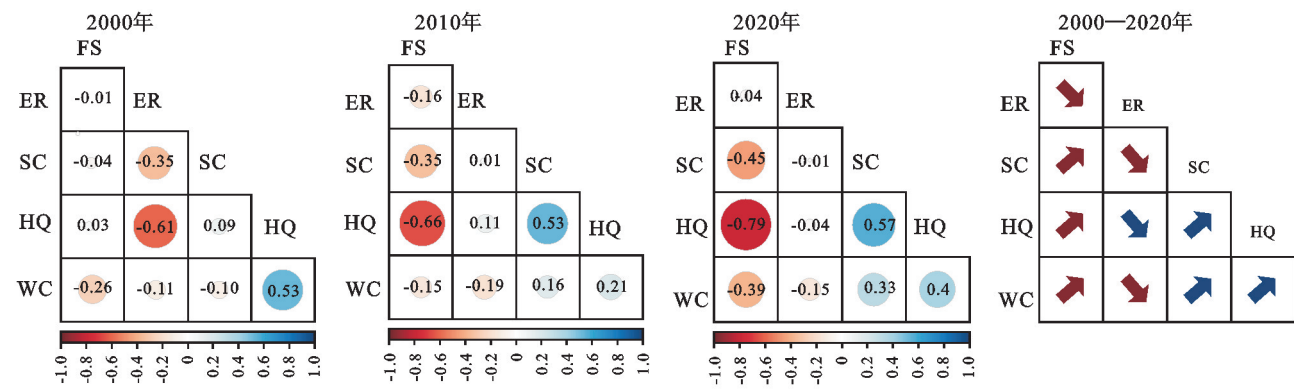


图 4 2000—2020 年生态系统服务 Spearman 相关系数及其变化趋势

Fig. 4 Spearman's correlation coefficients among ecosystem services and its changing trend from 2000 to 2020

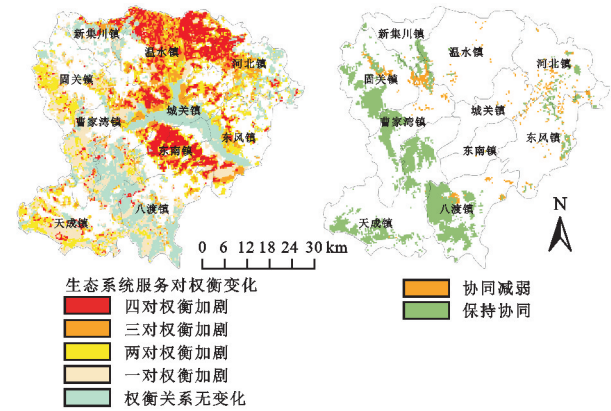


图 5 2000—2020 年陇县生态系统服务
权衡及协同关系变化

Fig. 5 The changes of tradeoffs and synergies
between ecosystem services in
Long County between 2000 and 2020

2.3 生态系统服务综合管控分区模拟与优化建议

2.3.1 不同决策偏好下的情景模拟 将各生态系统服务标准化处理后按照栅格平均值降序排列,得到W1—W5代表的指标分别为生境质量、食物供给、生态休闲、水源涵养以及土壤保持。

在试算过程中,发现当系数 α 为0.000 1(趋于0)与10 000(趋于无穷)时,县域空间分别出现高值与低值聚集的极端情景。当 α 向1靠近时,生态系统服务高值区域由西南向东北扩散,低值区域开始向中部及北部集中。排除极限情景,在高值分布相对均衡的 $\alpha=0.5$ 以及 $\alpha=2$ 的两种情景区间内以 α 递增0.1的情景计算,结果见表3。

2.3.2 对比分析与管控区划 情景1~20,随着系数 α 值增加,陇县综合生态系统服务的高值区域逐渐从西南、北部山地向中部河谷地带扩散。考虑到研究区自然生态本底脆弱、发展定位转型及面向实施的层级特性,其生态系统服务分区导向应在充分尊重自然生态供给功能的基础上满足其对问题治理,多元多维度协同发展的需求,选取的 $\alpha=0.5$ 至 $\alpha=2$ 的情景图

层,按照自然断点法将其量值划分为五级,提取高值前三的区域图层,作为管控优先等级从高到低的3种生态系统服务综合管控区划,将3个分区空间分别命名为“保护与修复关键区、保护与发展协调区、综合调控区”,剩余空间作为“综合发展区”。不同情景下生态系统服务综合管控区面积占比见图6。

表 2 各镇域涉及生态系统服务热点及权衡关系类型

Table 2 Main ecosystem services and related tradeoff types in each town			
名称	生态系统服务热点类型	权衡类型	趋势
八渡镇	SC-WC-HQ	WC-SC 高低权衡	协同增强
		ER-SC 高低权衡	权衡减弱
		FS-SC 高低权衡	权衡增强
		ER-HQ 高低权衡	协同减弱
		FS-HQ 高低权衡	权衡增强
		ER-SC 高低权衡	权衡减弱
		FS-SC 高低权衡	权衡增强
曹家湾镇	SC-WC-ER-HQ	ER-WC 高低权衡	权衡减弱
		FS-WC 高低权衡	权衡增强
		ER-HQ 高低权衡	协同减弱
城关镇	ER-FS	FS-HQ 高低权衡	权衡增强
		FS-SC 高低权衡	权衡增强
		ER-SC 高低权衡	权衡减弱
东风镇	WC-FS	FS-SC 高低权衡	权衡增强
		FS-HQ 高低权衡	权衡增强
东南镇	FS	FS-SC 高低权衡	权衡增强
		FS-HQ 高低权衡	权衡增强
固关镇	SC-WC-HQ	ER-SC 高低权衡	权衡减弱
		ER-HQ 高低权衡	协同减弱
		FS-HQ 高低权衡	权衡增强
河北镇	WC-FS	FS-WC 高低权衡	权衡增强
		ER-SC 高低权衡	权衡减弱
		FS-SC 高低权衡	权衡增强
天成镇	SC-WC-HQ	WC-SC 高低权衡	协同增强
		ER-WC 高低权衡	权衡减弱
		FS-WC 高低权衡	权衡增强
新集川镇	FS	主导功能没有明显的权衡关系	—
温汤镇	ER-FS	FS-ER 高低权衡	权衡减弱

表 3 不同情景下各生态系统服务指标位序权重
Table 3 Ordered weights of various ecosystem service indicators under different scenarios

情景	决策偏好系数 α	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
1	0.0001	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.1	0.851	0.061	0.038	0.028	0.022
3	0.5	0.447	0.185	0.142	0.120	0.106
4	0.6	0.381	0.196	0.159	0.139	0.125
5	0.7	0.324	0.202	0.173	0.156	0.145
6	0.8	0.276	0.205	0.184	0.172	0.163
7	0.9	0.235	0.203	0.193	0.187	0.182
8	1	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
9	1.1	0.170	0.195	0.205	0.212	0.218
10	1.2	0.145	0.188	0.209	0.223	0.235
11	1.3	0.123	0.180	0.211	0.233	0.252
12	1.4	0.105	0.172	0.212	0.243	0.268
13	1.5	0.089	0.164	0.212	0.251	0.284
14	1.6	0.076	0.155	0.211	0.258	0.300
15	1.7	0.065	0.146	0.209	0.265	0.316
16	1.8	0.055	0.137	0.207	0.270	0.331
17	1.9	0.047	0.128	0.204	0.276	0.346
18	2	0.040	0.120	0.200	0.280	0.360
19	10	0.000	0.000	0.006	0.101	0.893
20	10000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

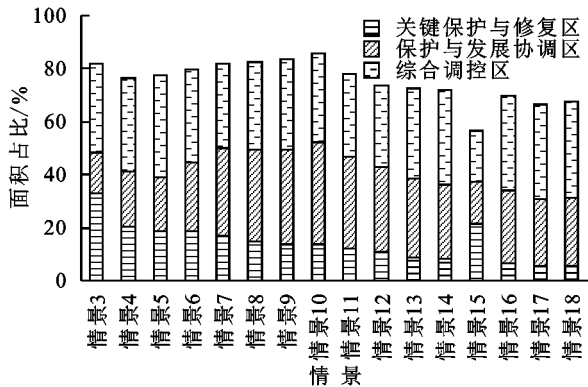


图 6 各情景不同分区面积占比

Fig. 6 Proportion of area in each scenario

考虑到真实管控情景,重要性最高的“关键保护与修复区”面积比例应小于次级“保护与发展协调区”,因而提取 $\alpha=0.8$ 至 1.4 的情景 6~12 进一步进行对比分析(图 7)。

对比表中的位序权重值与空间变化趋势,可以看出情景 6—8 即 α 在 0.8~1 时,5 种生态系统服务的位序权重为 生境质量>食物供给>生态休闲>水源涵养>土壤保持,代表与供给量值位序一致的保守管控倾向; α 在 1~1.4 时,其权重次序完全相反,代表采取积极干预的综合管控倾向。同时对比“关键保护与修复区”(图 8)及联合次一级“保护与发展协调区”内两级 5 种服务热点区域的面积占比情况(图 9),情

景 6~8 包含的服务热点区面积较大,生境质量的供给区域占比面积最大,次之的是生态休闲,反馈出此类型的管控模式能够较好的兼顾生境质量和生态休闲的热点空间;情景 9~12 生态休闲仍旧占据较大比重,土壤保持和生境质量能够兼顾获取较大的热点面积,水源涵养的面积值变化不大,但综合高值中心从西南向东部城关镇东侧和东风镇、八渡镇北部转移,由自然生态空间转向城镇建设和人口更密集的地区。

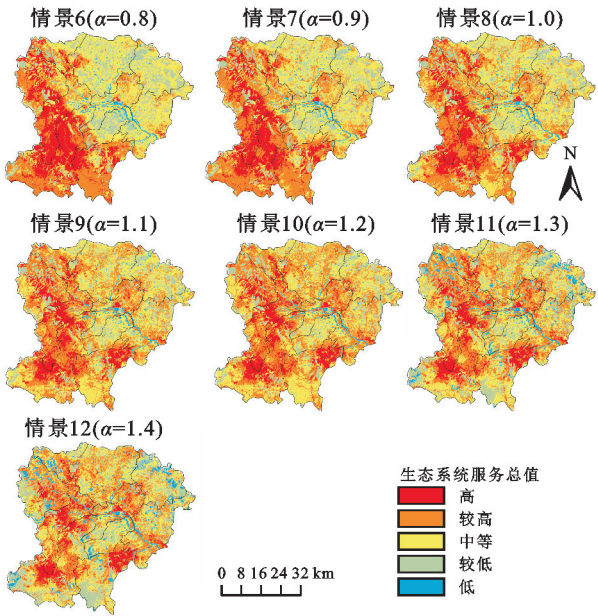


图 7 各情景生态系统服务空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of ecosystem services for different scenarios

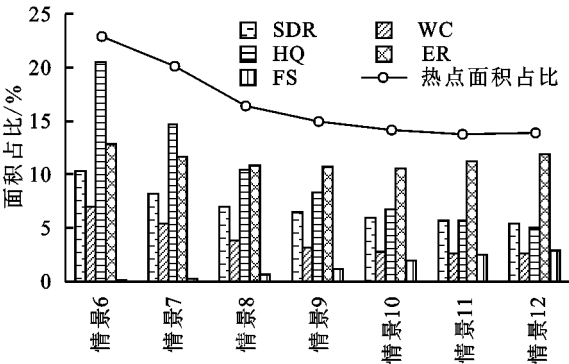


图 8 各情景关键保护与修复区中生态系统服务及热点面积占比

Fig. 8 Proportion of ecosystem services and hotspots in key protection and restoration areas in each scenario

既有研究表明,多种生态系统服务的相互关系及其变化趋势也应纳入生态管理的决策考量。关注生态系统服务协同的区域有助于以较小的管控投入获取较高的生态效益^[28],多年保持服务高协同的区域也意味着其形成了能够提供稳定供给的生态组织模式,应实施严格的保护政策^[17]。模拟情景 6—10 的

“关键保护与修复区”能够包含大部分的服务协同区域并且空间较为集聚,至情景 11,12 时其呈连片状扩散趋势,管控覆盖的乡镇区域更为广泛。

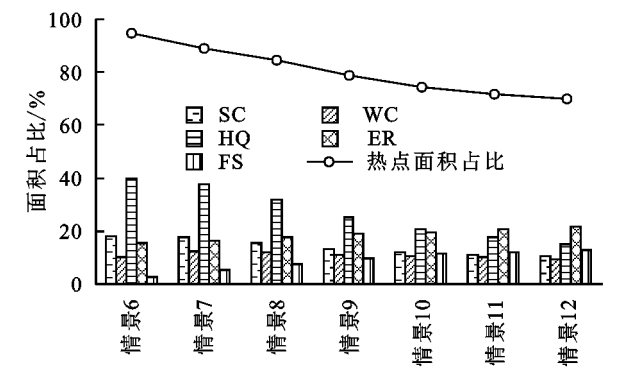


图 9 各情景生态系统服务及热点面积在两级管控区内占比

Fig. 9 Proportion of ecosystem services and hotspots in each scenario

在权衡关系上,首先考虑到土壤保持是上位主体功能区划的主导功能,面对土壤保持、生境质量和食物供给等服务对呈现出权衡增强趋势,应确保温水镇、河北镇北部与东风镇中部等权衡加剧的区域位属较高的管控等级,情景 9—11 较为符合;再者固关镇、天成镇南部均呈现多对服务权衡加剧的情况,应予以关注,可参考情景 9—10 管控布局。

综合对照不同情景与陇县关键生态系统服务的时空变化特征,情景 9 能够较好的兼顾当前规划主导的水土保持功能和原先定位中生态休闲等服务的空间管控需求,并形成契合实际管控情景的分级面积比,具有一定的决策参考价值(图 10)。

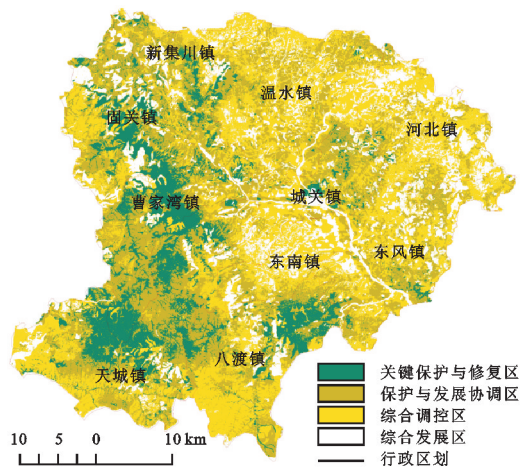


图 10 陇县生态系统服务综合管控分区

Fig. 10 Comprehensive management zones of ecological system services in long county

2.3.3 管控优化建议 如前所述,生态综合管控应该是统筹保护与开发,平衡多元生态系统服务特性的综合管控,不同分区的管控导向应该充分考虑生态系

统服务的空间供给量、变化趋势以及不同功能类型间竞争所带来的影响。研究从县域整体及乡镇两个层面提出优化管控建议。

县域层面按照管控重要性等级划分为“关键保护与修复区”“保护与发展协调区”“综合调控区”与“综合发展区”4 类。其中“关键保护与修复区”对应需要严格进行保护和人工干预修复的生态系统服务供给空间,占县域面积 13.9%,其管控范围涵盖了自然保护区的核心保护区,较好的回应自然生态资源的保护需求;中部城关镇、温水镇和东分镇的点状区域可考虑结合绿地、植被恢复,固土保塬等生态治理目标进行工程性干预。“保护与发展协调区”占县域面积 35.6%,应注重对权衡增强的生态系统服务进行平衡调控。“综合调控区”占县域面积的 33.9%,其生态系统服务供给较为稳定,可布局对环境破坏较小的生态产业;“综合发展区”对应城镇及产业建设集中的区域,占县域面积 16.6%,可承载旅游配套、生态人居、工贸产业等建设需求。

乡镇层面,综合考虑南部生境质量、水源涵养生态系统服务供给热点分布与中部、北部权衡加剧的空间,建议将天成镇“农贸型”,曹家湾镇“工贸型”定位改为“旅游服务型”,强化旅游产业配套建设,降低传统农牧业、工矿产业对生境的扰动破坏;温水镇、东风镇则应关注交通设施建设后的地形与植被修复,强化连片农产品种植区的土壤保育等方面的措施。

3 讨论

3.1 生态脆弱区生态系统服务评估与管理

近年来,生态脆弱区的 ES 特征评估及其管理应用引发了广泛关注,主要集中在对 ES 量值变化、权衡协同关系演化及驱动因素的探查等方面。Ying Liang 等^[29]提出评估多种 ES 量值变化可用于识别潜在的生态风险区域,但多数研究结论均指向对生态脆弱区服务功能下降、热点变化的空间给予高等级的保护干预措施^[30-31]。同时,更多研究聚焦于探究生态系统服务权衡协同关系,用于解决生态脆弱区生态保护与生产利用之间的矛盾^[7],本研究核心视角的选取亦基于以上观点。在关键服务类型选取上,生态休闲和食物供给是两种与人类行为高度相关的服务类型,其与生境质量、土壤保持、水源涵养关系的探查也能反馈出人地矛盾的时空演化特征,这与 Fan Wu 等^[32]研究结论一致。在定量评测上,本研究中的权衡分析结论与李怡等^[33]对陇县生态系统服务价值量变化的研究结果相吻合,一定程度上证明了研究结论的科学性。对于权衡分析工具选取,生态系统服务簇

(ecosystem service bundle, ESB)方法也多用于表征多元生态系统服务结构关系及进行生态分区研究,但对两两服务关系的探差更有助于厘清县域生态管理导向和制定针对性的干预政策,此观点也与王川^[34]、薛曾辉^[35]等研究结论相符。

3.2 生态脆弱区县域生态管控建议

生态系统服务权衡具有相对复杂的时空尺度特性,从不同尺度进行ES权衡研究对ES管控具有重要意义。由于县域层级的管控决策需要承担多层级传导的效用风险,往往倾向于“固守底线”的保守管控模式^[36],容易忽视ES权衡变化所带来的不良影响。近年来,在退耕还林等生态治理政策背景下,县域多种ES量值均呈上升趋势,较少出现ES下降现象,转而应关注多种服务的协同程度变化,此观点与王琳等^[37]在志丹县的研究结论一致,可见动态化评估、调控将有助于生态系统服务可持续管理。陇县食物供给和土壤保持的权衡关系较为突出,应作为县域生态调控的重点,杨孟豪^[38]的研究也有类似的结论。生态休闲与其他服务的权衡关系呈下降趋势,也说明科学利用生态资源进行休闲游憩活动,有益于县域经济发展与生态保护的平衡,此结论与陇县在新时期空间规划中的定位目标一致^[22]。

3.3 研究不足与展望

国际上,生态系统服务综合管控还强调供需视角的分析,尤其是对多利益群体需求的响应,本文管控情景未能考虑利益相关者认知、部门管理偏好等因素,存在一定的局限性。土壤保持作为陇县的关键服务类型,在研究评估过程采用的土壤数据精度尚有不足,后续研究中应通过调研收集更精细的研究数据、优化局地评估结论。

对照已有的生态脆弱区研究,除生态系统服务功能外,区域生态脆弱性、敏感性和恢复力等也是生态管控的重要考虑因素;同时,考虑到陇县优化管控策略缺乏对影响因子、驱动机制的系统探究,后续生态脆弱区县域生态管控应探索更具有现实意义的耦合指标与模拟方法,进一步研究不同生态系统服务、影响因子在多尺度上的效益差异,实现精准化、科学化的决策支撑。

4 结论

(1) 2000—2020年,陇县县域多项服务整体呈现出上升趋势,但中心城镇区域及西南部山地生境质量有所下降,城关镇至温水镇带状区域水源涵养服务呈退化趋势;结合热点分析可以看出生境质量的高值聚集区主要集中在固关镇、曹家湾镇等区域,接近现

有自然保护区分布格局;土壤保持和水源涵养高值区主要分布于南北部林草高覆盖区域;食物供给高值区主要位于千河主河道两侧,生态休闲高值区与县域内交通干道布局趋近,体现了人类建设行为对生态休闲服务功能的重要影响。

(2) 陇县生态休闲与食物供给服务与其他服务呈现明显权衡关系,东南镇、温水镇、天城镇权衡空间扩张较为明显。水源涵养、土壤保持及生境质量三项服务呈协同关系,水源涵养和生境质量的协同空间在西南部呈扩大趋势,水源涵养与土壤保持的协同空间在曹家湾镇及天城镇北部呈退化趋势。

(3) 县域生态系统服务的演化特征表明现有保护为主导的管控模式未涉及土壤保持和食物供给权衡较高的区域,建议将高等级的管控区域向中部和北部调整。多种模拟情景中,情景9的空间管控模式能够最大程度地覆盖生态系统服务的特征区域,划分管控优先度最高的“关键保护与修复区”及“保护与发展协调区”中,生态休闲、土壤保持、水源涵养、食物供给、生境质量热点区面积占比分别为19.1%, 13.4%, 11.2%, 9.7%, 25.1%, 较好的匹配了县域发展导向要求。同时建议天城镇、曹家湾镇调整规划发展导向,温水镇西部、东风镇东部强化对食物供给和土壤保持服务的平衡调控。

(4) 生态脆弱区区县应关注境内多元生态系统服务量值、服务关系的时空演化特征,不仅应对服务高供给区域、多服务协同区域进行保护保育,还应关注服务权衡协同关系的动态演化特征,适时调控地域发展导向、更新管控策略以匹配科学决策需求。

参考文献(References):

- [1] Peng J, Wang X Y, Liu Y X, et al. Urbanization impact on the supply-demand budget of ecosystem services: Decoupling analysis[J]. *Ecosystem Services*, 2020, 44: 101139.
- [2] 鄢继尧, 赵媛. 近三十年我国生态脆弱区研究热点与展望[J]. *南京师大学报: 自然科学版*, 2020, 43(4): 74-85.
Yan J Y, Zhao Y. Research hotspot and prospect of ecologically vulnerable area in China in the past three decades[J]. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition*, 2020, 43(4): 74-85.
- [3] 刘军会, 邹长新, 高吉喜, 等. 中国生态环境脆弱区范围界定[J]. *生物多样性*, 2015, 23(6): 725-732.
Liu J H, Zou C X, Gao J X, et al. Location determination of ecologically vulnerable regions in China [J]. *Biodiversity Science*, 2015, 23(6): 725-732.
- [4] 邓钰栋, 王丹, 许涵. 双尺度下广东韶关市生态系统服务及其权衡/协同关系及社会生态驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 3073-3084.

- Deng Y Y, Wang D, Xu H. Trade-offs and synergies relationships of ecosystem services and their socio-ecological driving factors under different spatial scales in Shaoguan City, Guangdong, China[J]. The Journal of Applied Ecology, 2023,34(11):3073-3084.
- [5] Wang X F, Sun Z C, Feng X M, et al. Identification of priority protected areas in Yellow River Basin and detection of key factors for its optimal management based on multi-scenario trade-off of ecosystem services [J]. Ecological Engineering, 2023,194:107037.
- [6] 刘春芳,李鹏杰,刘立程,等.西北生态脆弱区省域国土空间生态修复分区[J].农业工程学报,2020,36(17):254-263.
- Liu C F, Li P J, Liu L C, et al. Ecological restoration zoning of provincial territorial space in the ecologically fragile areas of Northwest China[J]. Transactions of the Csa, 2020,36(17):254-263.
- [7] Zhang Z H, Shen Z, Liu L L, et al. Integrating ecosystem services conservation into the optimization of urban planning policies in eco-fragile areas: A scenario-based case study[J]. Cities, 2023,134:104200.
- [8] 陈阳,岳文泽,张亮,等.国土空间规划视角下生态空间管制分区的理论思考[J].中国土地科学,2020,34(8):1-9.
- Chen Y, Yue W Z, Zhang L, et al. Theoretical thinking on ecological space zoning from the perspective of territorial space planning[J]. China Land Science, 2020,34(8):1-9.
- [9] 李潇,吴克宁,刘亚男,等.基于生态系统服务的山水林田湖草生态保护修复研究:以南太行地区鹤山区为例[J].生态学报,2019,39(23):8806-8816.
- Li X, Wu K N, Liu Y N, et al. Ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands based on ecosystem services-utilizing Heshan section of the South Taihang Area as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(23):8806-8816.
- [10] 王文静,逯非,欧阳志云.国土空间生态修复与保护空间识别:以北京市为例[J].生态学报,2022,42(6):2074-2085.
- Wang W J, Lu F, Ouyang Z Y. Spatial identification of territory space ecological conservation and restoration: A case study of Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(6):2074-2085.
- [11] 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[J].风景园林,2020,27(11):82-89.
- Ai X, Lan Y Y, Zheng X. Urban ecological space zoning planning based on ecosystem services synergy gains: A case study of ecological conservation area of Beijing[J]. Landscape Architecture, 2020,27(11):82-89.
- [12] Xia H, Yuan S F, Prishchepov A V. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: Implications for spatial planning and management [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023,189:106767.
- [13] Hou Y, Li B, Müller F, et al. A conservation decision-making framework based on ecosystem service hotspot and interaction analyses on multiple scales[J]. Science of the Total Environment, 2018,643:277-291.
- [14] Zuo L Y, Gao J B, Du F J. The pairwise interaction of environmental factors for ecosystem services relationships in Karst ecological priority protection and key restoration areas[J]. Ecological Indicators, 2021,131:108125.
- [15] 岳文泽,侯丽,夏皓轩,等.基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略[J].应用生态学报,2022,33(1):149-158.
- Yue W Z, Hou L, Xia H X, et al. Territorially ecological restoration zoning and optimization strategy in Guyuan City of Ningxia, China: Based on the balance of ecosystem service supply and demand[J]. the Journal of Applied Ecology, 2022,33(1):149-158.
- [16] 熊昕莹,孟梅.基于生态系统服务供需关系及空间流动的新疆生态管理分区与优化策略[J].应用生态学报,2023,34(8):2237-2248.
- Xiong X Y, Meng M. Regionalization and optimization strategy of ecological management in Xinjiang, China based on supply-demand relationship and spatial flow of ecosystem services[J]. the Journal of Applied Ecology, 2023,34(8):2237-2248.
- [17] 刘颂,董宇翔,蒋理,等.基于生态系统服务协同优化的生态空间划定及弹性分级策略:以山东省栖霞市为例[J].风景园林,2022,29(8):86-92.
- Liu S, Dong Y X, Jiang L, et al. Strategy for demarcation and elastic grading of ecological space based on synergistic optimization of ecosystem services: A case study of Qixia city in Shandong Province [J]. Landscape Architecture, 2022,29(8):86-92.
- [18] 李晓文,吕江涛,智烈慧,等.基于“目标-成本-效益”协同优化的山水林田湖草沙一体化生态保护与修复格局[J].生态学报,2023,43(9):3625-3635.
- Li X W, Lü J T, Zhi L H, et al. Optimization of integrated ecological conservation and restoration pattern by trading off the targets, costs, and ecological benefits[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(9):3625-3635.
- [19] 张渝萌,李晶,曾莉,等.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[J].中国农业科学,2019,52(12):2114-2127.
- Zhang Y M, Li J, Zeng L, et al. Optimal protected area selection: Based on multiple attribute decision making method and ecosystem service research: illustrated by Guanzhong-Tianshui Economic Region Section of the Weihe River Basin[J]. Scientia Agricultura

- Sinica, 2019, 52(12): 2114-2127.
- [20] 陇县人民政府. 陇县人民政府关于印发陇县地质灾害防治“十四五”规划(2021—2025年)的通知[EB/OL]. (2022-11-08)[2022-11-22]. http://www.longxian.gov.cn/art/2022/11/22/art_15091_1573210.html. The People's Government of Long County. Notice of the People's Government of Long County on Issuing the 14th Five-Year Plan for Geological Disaster Prevention and Control in Long County(2021—2025)[EB/OL]. (2022-11-08)[2022-11-22]. http://www.longxian.gov.cn/art/2022/11/22/art_15091_1573210.html.
- [21] 陇县人民政府. 陇县人民政府办公室关于印发陇县国土空间规划(2020—2035年)编制工作方案的通知[EB/OL]. (2020-03-11)[2020-03-20]. http://www.longxian.gov.cn/art/2020/3/20/art_15091_1307108.html. The People's Government of Long County. Notice from the Office of the People's Government of Long County on Issuing the Work Plan for the Compilation of Long County's Land Spatial Planning(2020—2035)[EB/OL]. (2020-03-11)[2020-03-20]. http://www.longxian.gov.cn/art/2020/3/20/art_15091_1307108.html.
- [22] 陇县人民政府. 陇县国土空间总体规划(2020—2035年)城镇化与城镇体系规划研究专题[EB/OL]. (2021-04-08)[2021-04-08]. http://www.longxian.gov.cn/art/2021/4/8/art_15125_1365806.html. The People's Government of Long County. Special Study on Urbanization and Urban System Planning in the Territorial Space Planning(2020—2035) of Long County[EB/OL]. (2021-04-08)[2021-04-08]. http://www.longxian.gov.cn/art/2021/4/8/art_15125_1365806.html.
- [23] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 664-676. Bao Y B, Li T, Liu H, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi province by InVEST model[J]. Geographical Research, 2016, 35(4): 664-676.
- [24] 赵文祯, 韩增林, 闫晓露, 等. 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[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3): 546-562. Zhao W Z, Han Z L, Yan X L, et al. Ecological security pattern construction based on multi-scenario trade-off of ecosystem services: A case study of Wafangdian, Dalian[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(3): 546-562.
- [25] 高会, 付同刚, 梁红柱, 等. 太行山区生态系统服务冷热点区域识别及其权衡/协同关系分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(7): 1045-1053. Gao H, Fu T G, Liang H Z, et al. Cold/hot spots identification and tradeoff/synergy analysis of ecosystem services in Taihang Mountain Area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(7): 1045-1053.
- [26] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系: 以甘肃白龙江流域为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1278-1288. Gong J, Liu D Q, Gao B L, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in western mountainous China: A case study of the Bailongjiang watershed in Gansu, China[J]. the Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1278-1288.
- [27] Yager R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making[J]. Ieee Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1988, 18(1): 183-190.
- [28] Domisch S, Kakouei K, Martínez-López J, et al. Social equity shapes zone-selection: Balancing aquatic biodiversity conservation and ecosystem services delivery in the transboundary Danube River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2019, 656: 797-807.
- [29] Liang Y, Song W. Integrating potential ecosystem services losses into ecological risk assessment of land use changes: A case study on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 318: 115607.
- [30] 吴树荣, 潘换换, 姬倩倩, 等. 基于生态系统服务的山西黄河流域保护优先区识别[J]. 生态学报, 2022, 42(20): 8126-8137. Wu S R, Pan H H, Ji Q Q, et al. Identification of priority conservation areas in the Yellow River Basin of Shanxi Province based on ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8126-8137.
- [31] 田美荣, 高吉喜, 宋国宝, 等. 基于主导生态功能与生态退化程度的生态修复分区研究[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1): 7-14. Tian M R, Gao J X, Song G B, et al. Zoning for ecological remediation by dominant ecological function and ecological degradation degree[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(1): 7-14.
- [32] Wu F, Liang Y J, Peng S Z, et al. Challenges in trade-off governance of ecosystem services: Evidence from the Loess Plateau in China[J]. Ecological Indicators, 2022, 145: 109686.
- [33] 李怡, 郭力宇, 温豪. 陕西渭北旱塬区土地利用与生态系统服务价值变化: 以陇县为例[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 368-373. Li Y, Guo L Y, Wen H. Dynamic changes of land use and ecosystem service values in the Arid-Highland, North of Weihe River in Shaanxi Province: A case study of the Long County[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 368-373.

- 河中游生境质量时空变化分析[J].干旱区研究,2023,40(3):456-468.
- Chen S, Huang Y L, Jin Y X. Spatiotemporal changes of habitat quality before and after the implementation of Grain for Green Project in the middle reaches of the Yellow River [J]. Arid Zone Research, 2023,40(3):456-468.
- [16] 陈珊珊,臧淑英,孙丽.基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境质量的影响研究:以松嫩平原为例[J].中国农学通报,2020,36(3):74-80.
- Chen S S, Zang S Y, Sun L. Effects of land use on habitat quality based on InVEST model: A case of the Songnen plain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020,36(3):74-80.
- [17] 高庆彦,潘玉君,刘化.基于 InVEST 模型的大理州生境质量时空演化研究[J].生态与农村环境学报,2021,37(3):402-408.
- Gao Q Y, Pan Y J, Liu H. Spatial-temporal evolution of habitat quality in the Dali Bai autonomous prefecture based on the InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021,37(3):402-408.
- [18] Wu H P, Zeng G M, Liang J, et al. Changes of soil microbial biomass and bacterial community structure in Dongting Lake: Impacts of 50 000 dams of Yangtze River[J]. Ecological Engineering, 2013,57:72-78.
- [19] Zhang X R, Zhou J, Li G N, et al. Spatial pattern reconstruction of regional habitat quality based on the simulation of land use changes from 1975 to 2010[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020,30(4):601-620.
- [20] Caro C, Marques J C, Cunha P P, et al. Ecosystem services as a resilience descriptor in habitat risk assessment using the InVEST model[J]. Ecological Indicators, 2020,115:106426.
- [21] Berta Aneseyee A, Noszczyk T, Soromessa T, et al. The InVEST habitat quality model associated with land use/cover changes: A qualitative case study of the Winike watershed in the Omo-Gibe basin, Southwest Ethiopia[J]. Remote Sensing, 2020,12(7):1103.
- [22] Tian J X, Zhang Z X, Ahmed Z, et al. Projections of precipitation over China based on CMIP6 models[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021,35(4):831-848.
- [23] 周俊鑫,蔡梅芳,黄志强,等.江西省生境质量时空演化特征及预测[J].生态学报,2023,43(18):7623-7636.
- Zhou J X, Cai M F, Huang Z Q, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and prediction of habitat quality in Jiangxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(18):7623-7636.
- [24] Zheng L, Wang Y, Li J F. Quantifying the spatial impact of landscape fragmentation on habitat quality: A multi-temporal dimensional comparison between the Yangtze River Economic Belt and Yellow River Basin of China [J]. Land Use Policy, 2023,125:106463.
- ~~~~~
- (上接第 354 页)
- [34] 王川,刘春芳,乌亚汗,等.黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系:以榆中县为例[J].生态学杂志,2019,38(2):521-531.
- Wang C, Liu C F, Wu Y H, et al. Spatial pattern, tradeoffs and synergies of ecosystem services in Loess Hilly Region: A case study in Yuzhong County[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(2):521-531.
- [35] 薛曾辉,高驭洋,卢桦达,等.基于土地利用和地形的生态系统服务空间分布及权衡-协同-独立关系:以安塞区为例[J].水土保持研究,2024,31(2):240-251,263.
- Xue Z H, Gao Y Y, Lu P D, et al. Spatial distribution and tradeoff-synergy-independence relationships of ecosystem services based on land use and topography[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):240-251,263.
- [36] 张强,林少颖.分级事权下县级国土空间规划的编制[J].厦门理工学院学报,2021,29(3):70-76.
- Zhang Q, Lin S Y. County-level territory spatial planning considering delegation of authority[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2021,29(3):70-76.
- [37] 王琳,卫伟.黄土高原典型县域生态系统服务变化特征及驱动因素[J].生态环境学报,2023,32(6):1140-1148.
- Wang L, Wei W. Characteristics and driving factors of ecosystem services changes in A typical county of the Loess Plateau[J]. Ecology and Environment, 2023,32(6):1140-1148.
- [38] 杨孟豪.黄土高原水-粮食-生态系统功能纽带关系及空间管理研究[D].陕西杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2023.
- Yang M H. Water-food-ecosystem function nexus and spatial management on the loess plateau[D]. Shaanxi yangling: University of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences),2023.9:100-108.