

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.045.

薛曾辉, 高驭洋, 卢坪达, 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.

Xue Zenghui, Gao Yuyang, Lu Pingda, 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.

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

薛曾辉^{1,2,3}, 高驭洋^{1,2,3}, 卢坪达^{1,2,3}, 周 静^{1,2,3},
王可琳^{1,2,3}, 张 斌^{1,2,3}, 马 玉^{1,2,3}, 刘梦云^{1,2,3}

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业农村部西北旱地农业绿色低碳重点实验室,
陕西 杨凌 712100; 3.农业农村部合阳农业环境与耕地保育科学观测实验站, 陕西 合阳 715300)

摘 要:[目的]生态系统退化问题日益突出,开展生态系统服务空间分布及其相关关系研究对区域生态文明建设具有重要意义。[方法]基于 InVEST 和 CASA 模型,在 10 m 空间分辨率下定量评估安塞区 2020 年土壤保持、固碳释氧、水源涵养和生境质量及其随地形和土地利用变化趋势,分析生态系统服务间权衡—协同—独立关系。[结果](1)林地和草地生态系统服务较强,未利用地和建设用地较弱;耕地、林地和草地生态系统服务间协同作用明显,而未利用地表现为权衡作用,水域表现为独立作用。(2)土壤保持量最高值在中低海拔、急斜坡和半阴坡,固碳释氧量最高值在中低海拔、陡峭坡和阴坡,涵养水源量最高值在低海拔和阳坡,生境质量最高值在高海拔、急斜坡和阳坡。(3)地形和土地利用视角下,生态系统服务整体表现为协同度>独立度>权衡度,协同作用常发生在土壤保持、固碳释氧和水源涵养之间,生境质量与其他生态系统服务权衡作用明显。(4)协同作用随着海拔升高和坡向向阳程度加强而提升,随着坡度增加呈先升高后降低变化趋势,权衡则与之相反。[结论]土地利用和地形对生态系统服务影响较大,应因地制宜开展土地规划和生态管理,基本证明了退耕还林还草生态恢复措施与其地形气候的适应性和决策的正确性。

关键词:安塞区;生态系统服务;权衡-协同-独立;InVEST 模型;CASA 模型;地形因子;土地利用

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2024)02-0240-12

Spatial Distribution and Tradeoff-Synergy-Independence Relationships of Ecosystem Services Based on Land Use and Topography — Taking the Ansai District as an Example

Xue Zenghui^{1,2,3}, Gao Yuyang^{1,2,3}, Lu Pingda^{1,2,3}, Zhou Jing^{1,2,3},
Wang Kelin^{1,2,3}, Zhang Bin^{1,2,3}, Ma Yu^{1,2,3}, Liu Mengyun^{1,2,3}

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,
Shaanxi 712100, China; 2.Northwest Key Laboratory of Low-Carbon Green Agriculture, Ministry of
Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Scientific Observing and Experimental Station
of Arable Land Conservation (Heyang), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Heyang, Shaanxi 715300, China)

Abstract:[Objective] Ecosystem degradation is becoming increasingly prominent, and it is of great significance to conduct research on the spatial distribution of ecosystem services and their related relationships for

收稿日期:2023-03-20

修回日期:2023-04-14

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0501703);陕西省自然科学基金研究计划项目(2017JZ008)

第一作者:薛曾辉(1998—),男,河南博爱人,硕士研究生,主要从事土地资源与空间信息技术研究。E-mail:xzhonor@nwfau.edu.cn

通信作者:刘梦云(1973—),女,陕西蒲城人,博士,教授,主要从事土地生态恢复及地理信息系统研究。E-mail:lmy471993@163.com

<http://stbcjy.paperonce.org>

the construction of regional ecological civilization. [Methods] InVEST and CASA models were used to quantitatively evaluate soil conservation, carbon sequestration and oxygen release, water harvesting and habitat quality in Ansai District in 2020 and their trends with topography and land use change at 10 m spatial resolution, and to analyze the tradeoff-synergy-independence relationships among ecosystem services. [Results] (1) Ecosystem services were stronger in forests and grasslands, but weaker in unused land and construction land. There were obvious synergies between arable land, forest land and grassland ecosystem services, while unused land showed a tradeoff role and water area shows an independent role. (2) The highest values of soil conservation were found at medium and low elevations, steep slopes and semi-shaded slopes. The highest values of carbon sequestration and oxygen release were found at middle and low elevations, steep slopes and shaded slopes. The highest values of water harvesting were at low elevations and sunny slopes. The highest values of habitat quality were found at high elevations, steep slopes and sunny slopes. (3) From the perspective of topography and land use, the overall performance of ecosystem services followed the order: synergism > independence > tradeoff. Synergies often occurred between soil conservation, carbon sequestration and oxygen release, and water harvesting, as well as the tradeoff between habitat quality and other ecosystem services was obvious. (4) The synergistic effect increased with elevation and slope orientation to the sun, and tended to increase and then decrease with slope elevation, while the tradeoff effect was the opposite. [Conclusion] Land use and topography have the great influence on ecosystem services. Land use planning and ecological management should be carried out according to the local conditions, which should basically prove not only the adaptability of the local ecological restoration measures for returning farmland to forest and grass with its topography and climate, but also the correctness of the decision.

Keywords: Ansai District; ecosystem services; tradeoff-synergy-independence; InVEST model; CASA model; terrain factor; land use

随着自然资源的开采,人类对生态系统产生了极大的影响,生态系统退化等问题日益突出^[1]。生态系统服务(Ecosystem Services,ES)是指人类通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务^[2],将人类福祉与自然环境联系在一起,支持人类生存和经济发展^[3]。各类ES随着地形和土地利用的变化出现明显空间分异,ES的空间异质性现象是生态评估的热点方向。不同ES间产生不同相互作用与联系^[4],一个ES增强而其他ES随之增强、减弱或无变化,即产生协同、权衡或独立作用^[5]。ES间通常是复杂且相关的^[6],国内外学者使用遥感和地理信息科学相关手段,在不同区域不同尺度下取得了众多成果^[5,7-11]。Hu等^[5]通过斯皮尔曼(Spearman)秩相关性发现北欧国家ES间相关关系因空间而异;陈相标等^[7]通过空间自相关等方法发现石林喀斯特岩溶区ES间权衡与协同关系空间异质性显著;张静静等^[8]采用空间叠置分析法确定了伏牛山地区森林生态系统的权衡协同区域;刘华超^[9]、汪仕美^[10]和武彦珍^[11]等分别探究了大兴安岭、子午岭区和慈利县的ES间相关关系,不过ES间权衡-协同-独立关系随地形和土地利用的变化机制有待进一步探究。

安塞区生态环境面临威胁,探究土地利用和地形下ES变化规律是精准开展生态治理的关键,亟需探究县域尺度下土地利用和地形对ES的影响。采用InVEST和CASA模型,定量评估安塞区2020年土壤保持(Soil Conservation,SC)、固碳释氧(Carbon Fixation and Oxygen Release,CO)、水源涵养(Water Harvesting,WH)和生境质量(Habitat Quality,HQ)4类ES,分析地形和土地利用下的各ES变化趋势,通过斯皮尔曼(Spearman)秩相关性系数计算ES间权衡-协同-独立关系,根据研究结果对安塞区土地综合利用规划及生态保护政策制定提供科学依据,并为县区尺度下生态文明建设提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

安塞区位于陕西省延安市北部,东经108°5′44″—109°26′18″,北纬36°30′45″—37°19′3″,西毗志丹县,北靠靖边县,东接子长市,南与甘泉县、宝塔区相连;属于典型的中国西北黄土高原河谷丘陵区 and 河谷平原沟壑区,地形地貌丰富,面积2 950 km²,平均海拔1 372 m,境内有延河、大理河和清涧河3条水系;气候特征为中温

带大陆性半干旱季风气候,四季长短不等,干湿分明,年平均气温 8.8℃,年平均降水量 505.3 mm,年日照时数 2 390 h;土地利用类型包括草地、林地、耕地和未利用地等,草地面积占比超过 50%,是安塞区最主要的土地利用方式之一,对生态环境质量有着极其重要的影响。研究安塞区土地利用和地形下各 ES 及其相关关系,对其他受土壤侵蚀和水分流失影响的县区尺度 ES 间权衡-协同-独立研究具有典型示范性。安塞区地形图如图 1 所示。

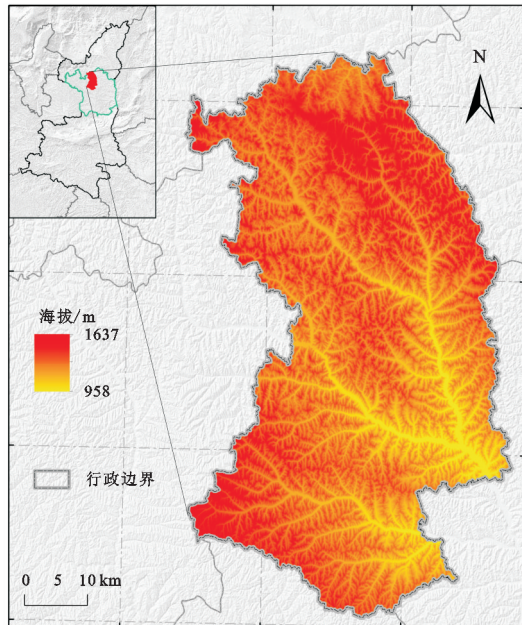


图 1 安塞区地形图

Fig. 1 Topographic map of Ansai District

1.2 数据来源与处理

数据主要包括:(1)土地利用数据,来源于欧洲航天局(ESA)WorldCover 10 m 空间分辨率 2020 年土地覆盖数据(<https://esa-worldcover.org/en>),根据一级分类划分为耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地。(2)归一化植被指数(NDVI)数据,来源于欧洲航天局(ESA)哨兵 2 号(Sentinel-2)影像(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>),在 Google earth engine 中下载和处理得到 2019 年 5 月、6 月、10 月、2020 年 2 月、3 月、4 月、7 月、8 月、11 月、12 月、2021 年 1 月、9 月的 10 m 空间分辨率 NDVI 数据。(3)土壤数据,来源于世界土壤数据库(HWSD)(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>),数据空间分辨率为 1 km,提取至点后插值。(4)气象数据,来源于国家气候中心(<http://data.cma.cn/>)提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),选取研究区周边 7 个气象站点插值获得栅格数据。(5)数字高程模型(DEM),来源于美国国家航空航天局(NASA)网站的 ALOS 12.5 m DEM 数据(<https://search.asf.alaska.edu/#/>)。

(6)行政边界数据,来源于国家基础信息中心(<http://www.ngcc.cn/ngcc/>)。以上数据使用 ArcMap 软件统一坐标投影,栅格数据重采样至 10 m 空间分辨率。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务计算 SC,WH 和 HQ 采用 InVEST 模型泥沙输移比(Sediment Delivery Ratio)、产水量(Annual Water Yield)、生境质量(Habitat Quality)3 个模块进行估算,具体计算公式参照刘华超^[9]和吴志俊^[12]等相关研究,降雨侵蚀力参照 Wischmeier 根据逐月平均降雨量提出的经验公式进行计算^[13],土壤可蚀性参照 EPIC(Erosion Productivity Impact Calculator)模型计算^[14],植被可利用含水率参照周文佐总结的经验公式^[15],InVEST 模型运行参数参考相关文献^[16-20]和模型手册,并根据研究区实际情况进行取值。

植被净初级生产力(NPP)是植物单位时间单位面积上光合作用产生的净有机物量,表征植被对大气中二氧化碳的吸收能力^[21],在 ES 测算中用 CASA 模型估算 NPP 以表征 CO₂,具体公式参照薛晓玉^[22]和 Jiang^[23]等相关研究中 NPP 的计算。

1.3.2 生态系统服务权衡与协同关系分析 以各类 ES 评估结果为基础,使用 SPSS 进行 Spearman 秩相关系数分析,计算公式如下:

$$R(a, b) = 1 - \frac{6 \sum d_{ab}^2}{n^3 - n} \quad (1)$$

$$t = R \times \sqrt{\frac{n-2}{1-R^2}} \quad (2)$$

式中: a 和 b 代表不同类别 ES; $R(a, b)$ 代表 a 和 b 的相关系数; d_{ab} 表示 a 和 b 的等级差值; n 为样本个数; t 为检验值。当 $R(a, b) > 0$ 时,代表 a 和 b 具有正相关,即 ES 间的协同,且数值越大代表协同越强;当 $R(a, b) < 0$ 时,代表 a 和 b 具有负相关,即 ES 间的权衡,且数值越小代表权衡越强。 t 检验方法可判断 a 和 b 相关的显著性 p 。

根据相关系数 R 及其显著性 p 进行权衡协同等级划分(表 1),分析 ES 间的权衡-协同-独立关系,正值越大代表协同关系越强,负值越小代表权衡关系越强,0 值则代表独立关系。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务空间分布特征

2020 年安塞区 ES 空间分布如图 2 所示。SC 分布整体均匀,低海拔区域数值较低,平均值根据土地利用排序为林地>草地>水域>建设用地>耕地>未利用

地;CO 分布为南高北低,低海拔区域数值较低,高值集中在南部林地,平均值排序为林地>草地>耕地>未利用地>建设用地>水域;WH 分布为南高北低,水域明显低于其他区域,高值集中在低海拔区域,平均值排序为林地>建设用地>耕地>草地>未利用地>水域;HQ 分布中建设用地和耕地周围明显低于其他区域,平均值排序为林地>草地>水域>未利用地>耕地>建设用地。安塞区 ES 受地形和土地利用影响较大,呈现出明显的空间异质性。

表 1 权衡协同关系赋值表

Table 1 Tradeoff and synergy assignment table			
相关系数 R 值	显著性 p 值	R 为正值时赋值	R 为负值时赋值
$ R < 0.1$	p 任意值	0	0
$0.1 \geq R < 0.3$	$p > 0.1$	0	0
$0.1 \geq R < 0.3$	$0.1 \geq p > 0.05$	1	-1
$0.1 \geq R < 0.3$	$0.05 \geq p > 0.01$	2	-2
$0.1 \geq R < 0.3$	$0.01 \geq p$	3	-3
$0.3 \geq R < 0.5$	$p > 0.1$	0	0
$0.3 \geq R < 0.5$	$0.1 \geq p > 0.05$	2	-2
$0.3 \geq R < 0.5$	$0.05 \geq p > 0.01$	3	-3
$0.3 \geq R < 0.5$	$0.01 \geq p$	4	-4
$0.5 \geq R < 0.8$	$p > 0.1$	0	0
$0.5 \geq R < 0.8$	$0.1 \geq p > 0.05$	3	-3
$0.5 \geq R < 0.8$	$0.05 \geq p > 0.01$	4	-4
$0.5 \geq R < 0.8$	$0.01 \geq p$	5	-5
$0.8 \geq R \leq 1.0$	$p > 0.1$	0	0
$0.8 \geq R \leq 1.0$	$0.1 \geq p > 0.05$	4	-4
$0.8 \geq R \leq 1.0$	$0.05 \geq p > 0.01$	5	-5
$0.8 \geq R \leq 1.0$	$0.01 \geq p$	6	-6

2.2 生态系统服务随土地利用和地形变化趋势

分析安塞区各 ES 随海拔、坡度和坡向等地形变

化趋势(图 3),结合自然间断法将海拔分级为低海拔区 958~1 172 m、中低海拔区 1 172~1 274 m、中高海拔区 1 274~1 369 m 和高海拔区 1 369~1 637 m,将坡度分级为平缓坡 0°~12°、倾斜坡 12°~24°、陡峭坡 24°~36°和急悬坡 36°~72°,将坡向分级为半阴坡 50°~140°、阳坡 140°~230°、半阳坡 230°~320°和阴坡 320°~50°。同时分析在安塞区不同土地利用下 ES 随海拔、坡度和坡向等地形变化趋势(图 4)。

分析图 3 和图 4 可知,随着海拔升高,SC 先升高后降低,在水域呈上升趋势,未利用地呈下降趋势;CO 先升高后降低再升高,在中低海拔区达到最高值,林地、建设用地和未利用地先上升再下降,水域先上升后下降;WH 呈下降趋势,耕地在高海拔区域略有上升,林地呈波浪形下降趋势,水域变化幅度较大;HQ 呈上升趋势,在林地和草地的数值明显高于其他地类,耕地和未利用地低值平缓波动,水域先下降后上升。随着坡度增加,SC 先升高后降低,在急悬坡上升趋势放缓,在未利用地呈下降趋势,水域呈递上升趋势;CO 先上升后降低,在未利用地呈波浪上升趋势,林地呈高位下降趋势,耕地先降低后升高趋势,建设用地和水域呈上升趋势;WH 平缓上升后下降,在水域和建设用地先下降后上升,林、耕地和未利用地呈上升趋势;HQ 上升后平缓下降,在各土地利用上变化平缓但数值差异明显。随着坡向变化,SC 在半阴坡达到最大值,半阳坡达到最小值,在建设用地呈相反趋势;CO 在阳坡达到最小值,阴坡达到最大值,在林地呈相反趋势,其他地类低水平波动;WH 在阳坡达到最大值,阴坡达到最小值,在耕地呈相反趋势;HQ 随坡度变化同 CO 基本一致,变化幅度较小。

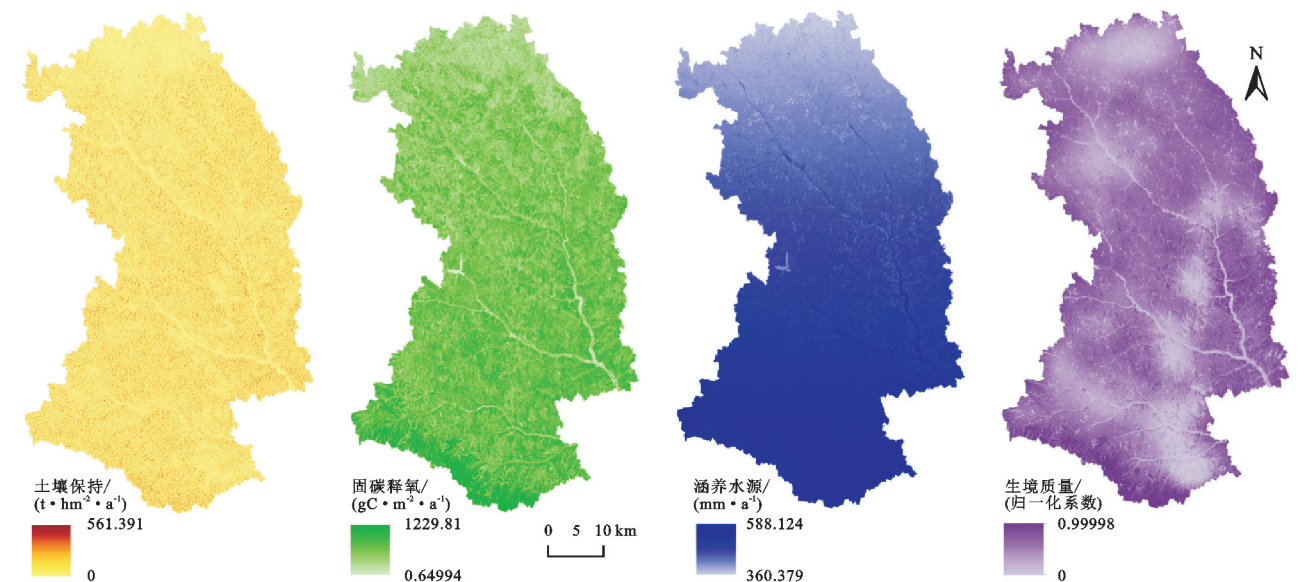


图 2 安塞区生态系统服务功能分布

Fig. 2 Distribution of ecosystem services in Ansai District

各土地利用上 ES 空间分布规律差异明显,林、草和耕地 ES 值较高,且与整体一致性较高,对安塞区 ES 有着较强贡献,占据主导地位;建设用地、未利用地和水域受到自然条件约束,在高海拔和急悬坡分布较少,且各类 ES 值较低,与其他地类表现较大的差异。ES 在低海拔和高海拔、平缓坡和急悬坡、阴坡

和阳坡均有明显波动,以上区域存在较多的人类活动和自然条件限制,进而影响了 ES 的空间分布,通过政策法规和生态治理,受影响区域有较大的 ES 提升潜力。ES 随海拔和坡度的变化幅度明显大于坡向,SC 对于地形变化的敏感程度最强,HQ 对地形变化的敏感程度最弱。

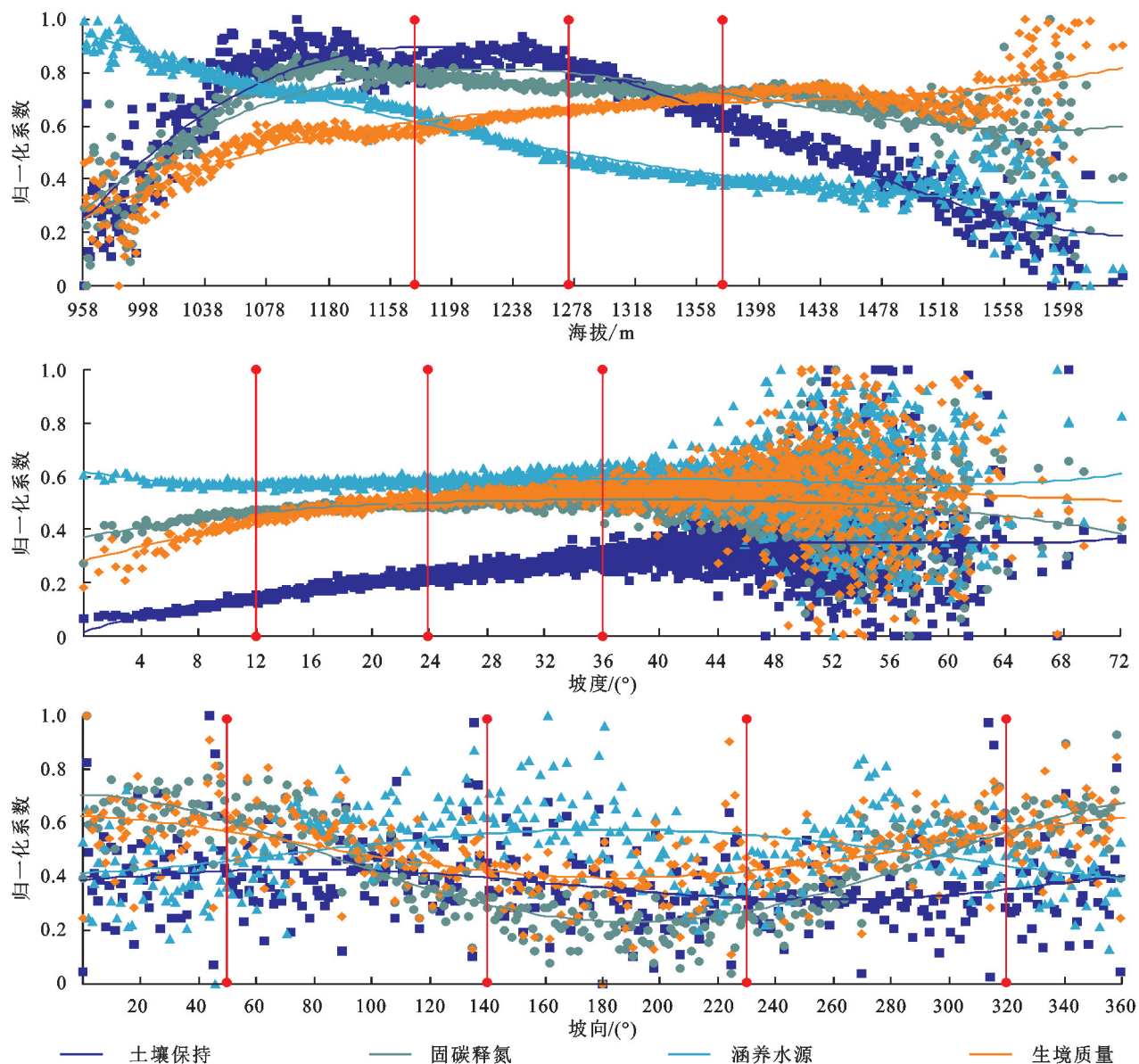


图 3 安塞区生态系统服务随地形变化趋势

Fig. 3 The change trend of ecosystem services in Ansai District with topography

2.3 地形和土地利用作用下的生态系统服务权衡-协同-独立分析

通过表 1 赋值,计算各分类下 SC-CO 等 6 种关系的权衡-协同-独立值,正值相加为 ES 间协同度,负值相加取绝对值为 ES 间权衡度,为便于数据对比,将 0 值个数乘以 4 为 ES 间独立度,得到不同土地利用(图 5)和地形(图 6)ES 间权衡-协同-独立关系和地形作用下 ES 间权衡-协同-独立度(表 2)。

2.3.1 土地利用作用下的生态系统服务权衡-协同-独立分析 从土地利用来看(图 5),协同度排序为不区分地类(258)>耕地(214)>草地(175)>林地(169)>水域(60)>未利用地(59)>建设用地(52);权衡度排序为未利用地(135)>不区分地类(91)>草地(67)>林地(24)>耕地(12)>建设用地(10)>水域(9);独立度排序为水域(236)>林地(144)>耕地(128)>草地(124)>未利用地(120)>建设用地

(92)>不区分地类(48);累计值排序为耕地(202)>不区分地类(167)>林地(145)>草地(108)>水域(51)>建设用地(42)>未利用地(-76)。耕、草地和林地协同度明显高于其他地类,未利用地权衡度最高,水域独立度最高,不区分地类分析的相关关系结果与各土地利用有明显差异;耕地协同度和相关关系

累计值最高,紧接着是林地和草地,表明了《耕地保护法》和退耕还林还草政策的实施成效;水域的权衡度和协同度均较低,但独立度最高,展示了水域生态的相对独立性;草地的协同和权衡能力均较强,展现了相关关系的复杂性,同时展现了草地对于安塞区 ES 的重要意义。

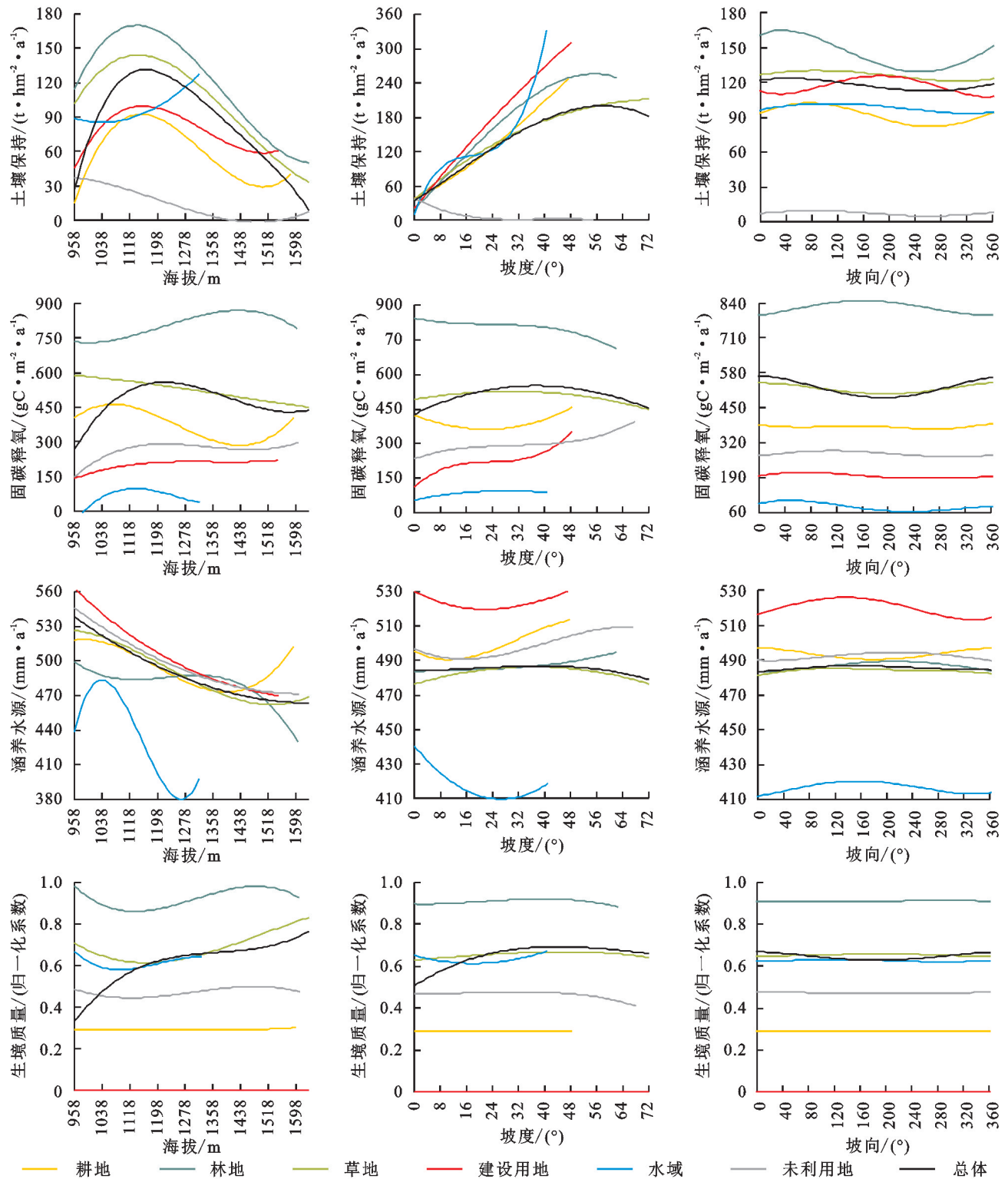


图 4 安塞区不同土地利用生态系统服务随地形变化趋势

Fig. 4 The change trend of ecosystem services for different land use in Ansai District with topography

2.3.2 海拔作用下的生态系统服务权衡—协同—独立分析 在土地利用和海拔视角下(表 2 海拔部分),安塞区 ES 间以协同为主。协同度最高值为 CO-WH(90),权衡度最高值为 WH-HQ(60),独立度最高值为 SC-WH

(48), 累计值排序为 CO-WH(68) > SC-CO(54) > SC-WH(52) > CO-HQ(10) > WH-HQ(-7) > SC-HQ(-27)。CO, WH 和 SC 两两有较强的协同, HQ 与其他 ES 的相关关系以权衡为主。

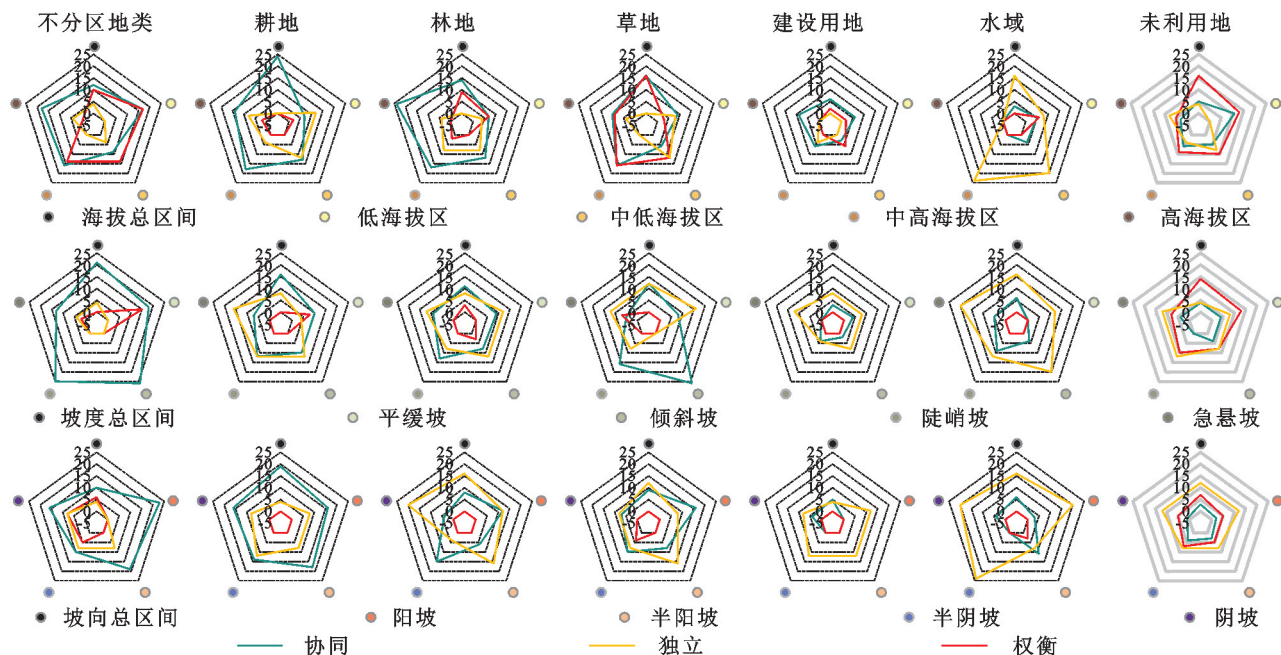


图 5 安塞区不同土地利用生态系统服务权衡—协同—独立关系雷达图

Fig. 5 Tradeoff-synergy-independence relationship of ecosystem services for different land use in Ansai District

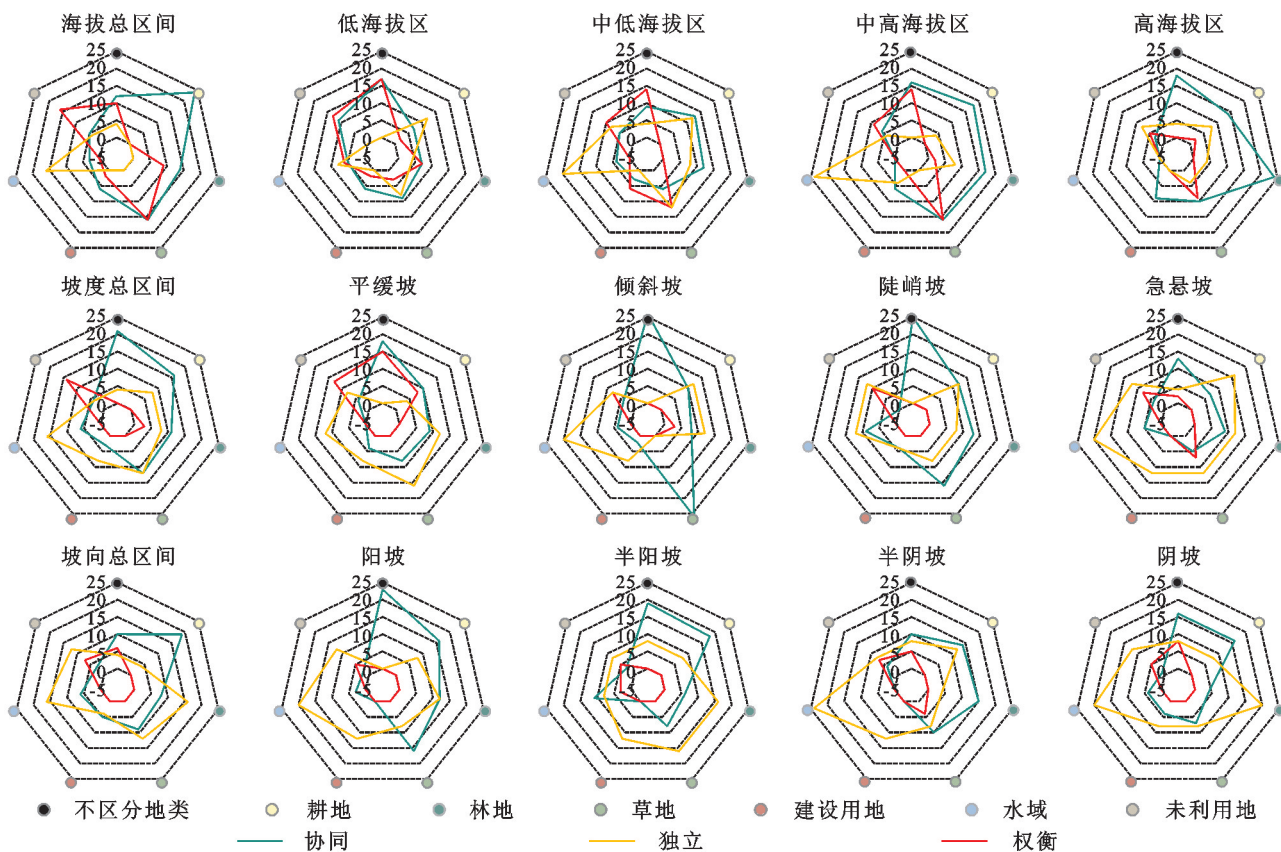


图 6 安塞区不同地形生态系统服务权衡—协同—独立关系雷达图

Fig. 6 Tradeoff-synergy-independence relationship of ecosystem services at different terrain in Ansai District

从海拔区间来看(图 6),协同度排序为海拔总区 间(79) > 中高海拔区(79) > 高海拔区(78) > 低海拔

区(62) > 中低海拔区(52); 权衡度排序为海拔总区间(53) > 低海拔区(50) > 中低海拔区(42) > 中高海拔区(41) > 高海拔区(16); 独立度排序为中低海拔区(64) > 中高海拔区(44) > 低海拔区(32) > 高海拔区(28) > 海拔总区间(24); 累计值排序为高海拔区(62) > 中高海拔区(38) > 海拔总区间(27) > 低海拔区(12) > 中低海拔区(10)。海拔总区间与海拔分级区间下的 ES 相关关系表现出差异性, 且随着海拔升高, ES 间权衡作用减弱, 协同作用加强, 相关生态治理应侧重于人类活动强烈的低海拔区域。

表 2 安塞区地形作用下各生态系统服务间权衡—协同—独立度

Table 2 Tradeoff-synergy-independence of ecosystem services under the influence of topography in Ansai District								
地形因子	关系类别	SC-CO	SC-WH	CO-WH	SC-HQ	CO-HQ	WH-HQ	ES 累计值
海拔/m	协同度	68	66	90	27	47	53	351
	权衡度	14	14	22	54	37	60	187
	独立度	40	48	24	28	36	20	196
	累计值	54	52	68	-27	10	-7	164
坡度/(°)	协同度	49	44	102	60	36	43	334
	权衡度	26	15	9	3	9	29	91
	独立度	60	72	40	14	68	40	294
	累计值	23	29	93	57	27	14	243
坡向/(°)	协同度	25	40	85	66	50	41	307
	权衡度	11	4	5	10	0	25	55
	独立度	96	92	44	32	68	52	384
	累计值	14	36	80	56	50	16	252

2.3.3 坡度作用下的生态系统服务权衡—协同—独立分析 在土地利用和坡度视角下(表 2 坡度部分), 安塞区 ES 间以协同为主。协同度最高值为 CO-WH(102), 权衡度最高值为 WH-HQ(29), 独立度最高值为 SC-WH(72), 累计值排序为 CO-WH(93) > SC-HQ(57) > SC-WH(29) > CO-HQ(27) > SC-CO(23) > WH-HQ(14)。CO 和 WH 在 ES 间相关关系上起主导作用, HQ 与其他 ES 间相关关系较为薄弱。

从坡度区间来看(图 6), 协同度排序为倾斜坡(86) > 陡峭坡(79) > 坡度总区间(73) > 平缓坡(53) > 急悬坡(43); 权衡度排序为平缓坡(36) > 急悬坡(17) = 坡度总区间(17) > 倾斜坡(11) > 陡峭坡(10); 独立度排序为急悬坡(88) > 坡度总区间(60) = 倾斜坡(60) = 平缓坡(60) > 陡峭坡(56); 累计值排序为倾斜坡(75) > 陡峭坡(69) > 坡度总区间(56) > 急悬坡(26) > 平缓坡(17)。坡度总区间与坡度分级区间下的 ES 相关关系表现出差异性, 且随着坡度升高, ES 间协同作用呈现先上升后下降变化趋势, 权衡作用反之, 相关生态治理应侧重于人类活动强烈的平缓坡和自然环境恶劣的急悬坡区域。

2.3.4 坡向作用下的生态系统服务间权衡—协同—独立分析 在土地利用和坡向视角下(表 2 坡向部分), 安塞区 ES 间以独立为主。协同度最高值为 CO-WH(85), 权衡度最高值为 WH-HQ(25), 独立度最高值为 SC-CO(96), 累计值排序为 CO-WH

(80) > SC-HQ(56) > SC-WH(36) > CO-HQ(50) > WH-HQ(16) > SC-CO(14)。CO 和 WH 主导 ES 间相关关系。

从坡向区间来看(图 6), 协同度排序为阳坡(72) > 半阳坡(65) > 坡向总区间(60) > 半阴坡(53) > 阴坡(52); 权衡度排序为半阴坡(16) > 阴坡(13) = 坡向总区间(13) > 半阳坡(8) > 阳坡(5); 独立度排序为阴坡(84) > 半阴坡(76) = 半阳坡(76) > 坡向总区间(72) > 阳坡(76); 累计值排序为阳坡(67) > 半阳坡(57) > 坡向总区间(47) > 阴坡(39) > 半阴坡(37), 坡向总区间与坡向分级区间下的 ES 相关关系表现出了差异性, 坡向的变换对 ES 间相关关系产生了极大的影响, 随着坡向向阳程度的加强, ES 间协同能力随之提高, 权衡能力随之降低, 相关生态治理应侧重于阴坡区域。

3 讨论

3.1 土地利用和地形作用下的生态系统服务空间分布特征与权衡—协同—独立关系

土地利用和地形是影响 ES 分布、结构及功能的重要因素^[24]。WH 随地形因子和土地利用变化情况与其他 ES 有着较明显的差异, 参考胡砚霞^[25]和高江波等^[26]的相关研究可知, 降水量为 WH 最优解释力, 通过降水量在地形和土地利用的分布间接影响了 WH, 人类活动和政策制定等对提升 WH 值只能起到辅助作用; SC, CO 和 HQ 在林地和草地较高, 在耕

地和未利用地较低,这与退耕还林还草的工作理念一致^[27],表明了相关政策的合理性;SC、CO 和 HQ 随海拔和坡度增加呈先增后减趋势,这与徐彩仙^[24]和郜红娟等^[28]研究结论一致,低海拔和平缓坡有强烈的人类活动,高海拔和急悬坡未利用地较多,导致 ES 平均值较低,应加快未利用地向其他土地利用方式转化;坡向变化影响热量差异^[29],CO 和 HQ 最高值在阴坡处,最低值在阳坡处,与陈奕竹等^[30]研究结论一致,SC 最高值在半阴坡,阳坡和半阳坡各类 ES 值较低,说明土壤水分和温度等对 SC 驱动作用超过了太阳辐射。

国内外学者 ES 间权衡—协同—独立研究集中于各类 ES 间的相互作用、自然人文系统的分析以及尺度异质性上,对于在地形和土地利用变化下的研究分析较少^[31]。相关学者在全流域和二级流域^[32]和县域尺度与区域尺度^[33]ES 相关关系等均发现空间异质性在 ES 间相关性分析中表现明显,段宝玲等^[34]在 ES 间相关关系研究中涉及地形部分也有类似结果。同 Zhang^[35]和 Wu^[36]等结论一致,ES 间的协同能力远大于权衡,各类 ES 整体上呈协同作用,WH-HQ 在各地形因素下权衡程度均强于其他 ES 间权衡度。ES 间协同作用随海拔升高而增强,随坡度增加呈先升高后降低变化趋势,与孙艺杰等^[31]在延安市 ES 间相关关系研究结论基本一致,不同之处在于急悬坡处,原因可能在于 ES 选取和研究尺度不同。ES 间协同作用随坡向向阳程度加强而增强,与张静静等^[8]研究得到的南坡优于北坡结论一致,太阳辐射对人类活动与自然条件均产生了较大的影响,对于 ES 间协同作用有促进效应。地形和土地利用变化下,气象条件、人类活动和植被类型等均发生了相应变化,对 ES 的空间分布和 ES 间相关关系产生了较大影响。

3.2 土地利用和地形视角下的生态建议

经过 1999 年和 2014 年两轮退耕还林还草政策的实施,安塞区 ES 持续向好发展,研究发现安塞区 2020 年生态系统服务整体表现为协同度>独立度>权衡度,各 ES 间随地形因素变化下协同—独立—权衡关系并存,协同作用常发生在 SC、CO 和 WH 之间,HQ 与其他 ES 易发生权衡作用。退耕还林还草方案要求,将陡坡耕地和梯田、重要水源地 15°~25°坡耕地、严重沙化耕地进行退耕还林还草,实现了土地利用由耕地向草地和林地的转化,在改善植被的同时减少了土壤流失。林地和草地 ES 值高于耕地,随坡度等地形因子的升高,耕地 SC 值降低,故在地形与土地利用角度下,退耕还林还草政策实现了 SC 与

CO 协同发展,王芸等^[27]在陕北地区 ES 研究亦有类似结论。林地和草地的蒸散发量高于耕地,进而影响 WH,WH 另一主要驱动因素为降水量^[25-26],退耕还林还草背景下为提升 WH 值及 WH 与其他 ES 间的协同作用,应结合地形梯度变化,从减少蒸散发量和增强降水量等方面开展 WH 生态治理工作。HQ 评估中生境威胁因子为建设用地、未利用地和耕地,随着经济社会发展,建设用地呈扩张趋势;随着退耕还林还草政策的继续实行,非平缓坡的未利用地和耕地呈缩减趋势,安塞区 2020 年 HQ 与其他 ES 权衡作用明显,说明了建设用地扩张趋势对 HQ 驱动作用大于退耕还林还草的生境影响,尤其在地形平缓区域。后续应平衡城市扩张与生态治理的平衡关系,在坚守耕地红线的基础上,继续大力开展退耕还林还草政策,力争 SC、CO、WH 和 HQ 等 ES 均朝协同方向发展,在地形和土地利用视角下实现县域尺度 ES 良性向好发展。

分析县域尺度下 ES 空间分布有助于提供科学依据支持政策制定,管理和优化人类活动。为提升安塞区 ES 水平及 ES 间协同能力,应根据区域生态提升潜力程度,因地制宜地实施不同强度的生态治理,加快未利用地向林地和草地等 ES 水平较高的土地利用转化,重视人类活动、生态治理和资源环境的和谐发展,在低海拔、高海拔、低坡度、阴坡、未利用地、建设用地和耕地等 ES 较弱或 ES 间权衡较强的区域开展相关生态治理,向提升 ES 值及减弱 ES 间权衡的方向进行政策制定和方案实施。ES 低于区间中值和 ES 间为权衡作用的区域被定义为生态提升潜力区域,如表 3 所示。海拔视角下的生态提升潜力区域远多于坡度和坡向视角,安塞区地形起伏较大,生态治理中应着重注意地形对 ES 的相关影响。

3.3 研究不足与进一步展望

安塞区 ES 研究亦存在些许不足,研究区附近气象站点数量较少,无法使用 Anusplin 等专业气象插值软件,克里金插值结果相对来说精度有限,影响 ES 结果精度;同时因分析侧重点等原因,本研究未对 SC-CO、SC-WH、CO-WH、SC-HQ、CO-HQ、WH-HQ 等 ES 间权衡—协同—独立关系分别随地形和土地利用变化情况进行深入研究;ES 间权衡—协同—独立关系中土地利用和地形因子的驱动机制研究不足。下一步可从 SC-CO 等各类 ES 间相关关系随地形和土地利用变化、驱动力因素等进行深入探讨,为促进县域尺度下生态环境协调发展提出更加精准的土地管理建议及生态环境方案。

表 3 安塞区土地利用和地形视角下的生态提升潜力区域

Table 3 Ecological improvement potential area from the perspective of land use and topography in Ansai District

地形因子	ES	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
海拔/m	SC	958~1010 *	1400~1600	1360~1540	958~980 *	958~1230	958~1637 *
		1010~1360	1600~1637 *	1540~1637 *	980~1637		
		1360~1637 *					
	CO	958~1637		1360~1637	958~1637 *	958~1637 *	958~1080 *
							1080~1637
	WH	1280~1500	1080~1200	1280~1637	1350~1637	958~1170	1350~1637
			1400~1637			1170~1637 *	
	HQ	958~1637 *			958~1637 *	1030~1160	958~1637 *
	SC-CO		958~1172				958~1274
	SC-WH	958~1172			1172~1274 *		
	CO-WH				958~1274	958~1172	958~1172 *
	SC-HQ	1369~1637	1274~1369	958~1172			1172~1369,1369~1637 *
				1274~1637 *			
	CO-HQ			1172~1637 *			958~1172 *,1274~1369
	WH-HQ			1172~1369 *		958~1172 *	1172~1274 *,1274~1637
坡度/(°)	SC	0~5 *,5~20	0~6 *,6~15	0~5 *,5~16	0~5 *,5~13	0~3 *,3~12	0~72 *
	CO	0~72		0~12,48~72	0~40 *,40~72	0~72 *	0~6 *
	WH		0~12	0~18,54~72		0~9,9~72 *	40~72
	HQ	0~72 *			0~72 *		0~72
	SC-CO	0~12 *	12~24				0~12 *,12~36
	SC-WH						12~24,24~36 *
	CO-WH						0~12 *
	SC-HQ						
	CO-HQ	0~12		36~72			36~72
	WH-HQ			36~72 *			0~12 *,12~36,36~72 *
	SC	0~360				0~360	0~360 *
	CO	0~360		95~275 *	0~360 *	0~360 *	0~360
	WH		345~75	0~360		0~360 *	
	HQ	0~360 *			0~360 *		0~360
	SC-CO			50~140 *		230~320	50~140,230~320
坡向/(°)	SC-HQ						0~360
	WH-HQ						140~230,320~140 *

注: * 为区域 ES 值极低(低于区间中值与最小值的中值)和 ES 间强权衡(表 1 赋值-4,-5 和-6);表格已剔除不存在生态提升潜力区域的 ES 类别。

4 结 论

(1) 安塞区林地和草地生态系统服务及其协同能力较强,未利用地和建设用地则较弱。地形和土地利用变化下,对生态系统服务空间分布及其相关关系产生了较大影响。

(2) 安塞区生态系统服务以协同为主,土壤保持、固碳释氧和涵养水源生态系统服务均以协同为主,生境质量与其他生态系统服务权衡作用明显,退耕还林还草政策一定意义上促进了生态系统服务的协同作用。

(3) 安塞区土地利用和地形因子总区间与分级

区间下生态系统服务有较大差异,且随着海拔升高和坡向向阳程度的加强,生态系统服务协同作用加强,权衡作用减弱;随着坡度增加,协同作用呈先上升后下降趋势,权衡作用反之。生态系统服务权衡—协同—独立关系对土地利用与地形变化响应敏感,应根据生态提升潜力因地制宜开展生态治理。

参考文献(References):

[1] Carugati L, Gatto B, Rastelli E, et al. Impact of man-grove forests degradation on biodiversity and ecosystem functioning [J]. Scientific Reports, 2018,8(1):13298.

[2] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因

- 子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报, 2015,30(8):1243-1254.
- Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the Evaluation Method for Ecosystem Service Value Based on Per Unit Area [J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(8):1243-1254.
- [3] Costanza R, de Groot R, Farber S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics, 1998,25(1):3-15.
- [4] 申嘉澍,李双成,梁泽,等.生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望[J].自然资源学报,2021,36(8):1909-1922.
- Sheng J P, Li S C, Liang Z, et al. Research progress and prospect for the relationships between ecosystem services supplies and demands [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(8):1909-1922.
- [5] Hu X, Hou Y, Li D et al. Changes in multiple ecosystem services and their influencing factors in Nordic countries [J]. Ecological Indicators, 2023,146:109847.
- [6] Hou Y, Zhao W, Liu Y, et al. Relationships of multiple landscape services and their influencing factors on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Landscape Ecology, 2021,36(7):1987-2005.
- [7] 陈相标,丁文荣.石林喀斯特岩溶区生态系统服务时空演变及权衡协同关系[J].水土保持研究,2023,30(2):285-293.
- Chen X B, Ding W R. Spatial-temporal Evolution and Trade-off Synergy Relationships of Ecosystem Services in Karst Area of Shilin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(2):285-293.
- [8] 张静静,朱文博,朱连奇,等.伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析[J].地理学报,2020,75(5):975-988.
- Zhang J J, Zhu W B, Zhu L Q, et al. Multi-scale analysis of trade-off/synergy effects of forest ecosystem services in the Funiu Mountain Region [J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(5):975-988.
- [9] 刘华超,任春颖,王宗明,等.大兴安岭生态功能区生态系统服务功能动态及权衡协同关系研究[J].生态与农村环境学报,2022,38(5):587-598.
- Liu H C, Ren C Y, Wang Z M, et al. Dynamics of Ecosystem Service Functions and Their Tradeoff and Synergistic Relationships in Great Xing'an Mountains Ecological Function Zone [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022,38(5):587-598.
- [10] 汪仕美,靳甜甜,燕玲玲,等.子午岭区生态系统服务权衡与协同变化及其影响因素[J].应用生态学报,2022,33(11):3087-3096.
- Wang S M, Jin T T, Yan L L, et al. Trade-off and synergy among ecosystem services and the influencing factors in the Ziwuling Region, North-west China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(11): 3087-3096.
- [11] 武彦珍,王新闯,王顺忠.生态系统服务价值时空变化和权衡及其与人类活动强度关联性分析:以慈利县为例[J].水土保持研究,2022,29(6):311-321.
- Wu Y Z, Wang X C, Wang S Z. Spatio-Temporal Changes and Trade-offs of Ecosystem Service Value and Their Correlation with Human Activity Intensity: A Case Study of Cili County [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):311-321.
- [12] 吴志俊,王永强,鄢波,等.基于 InVEST 模型的鄂尔多斯市土壤侵蚀及土壤保持功能研究[J].水电能源科学,2021,39(8):31-34,98.
- Wu Z J, Wang Y Q, Yan B, et al. Research on Soil Erosion and Soil Conservation Function of Ordos City Based on InVEST Model [J]. Water Resources and Power, 2021,39(8):31-34,98.
- [13] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1976,26:189-193.
- [14] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 7(1):129-0144.
- [15] 周文佐,刘高焕,潘剑君.土壤有效含水量的经验估算研究:以东北黑土为例[J].干旱区资源与环境,2003(4):88-95.
- Zhou W Z, Liu G H, Pan J J. Soil available water capacity and it's empirical and statistical models: With special reference to black soils in Northeast China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003(4):88-95.
- [16] 胡丰,张艳,郭宇,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J].干旱区地理,2022,45(4):1125-1136.
- Hu F, Zhang Y, Guo Y, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions [J]. ARID LAND GEOGRAPHY, 2022,45(4):1125-1136.
- [17] 古圳威,刘京,陈怡,等.陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟[J].环境科学, <https://doi.org/10.13227/j. hjkx.202210107>.

- Gu Z W, Liu J, Chen Y, et al. Analysis and Simulation of the spatiotemporal evolution of habitat quality and carbon storage in the Weibei Dry Plateau Region of Shaanxi [J]. *Environmental Science*, <https://doi.org/10.13227/j. hjkx.202210107>.
- [18] 陈实,金云翔,黄银兰.长三角中心区生境质量时空变化及其影响机制[J].*生态学杂志*,2023,42(5):1175-1185.
- Chen S, Jin Y X, Huang Y L, et al. Spatio-temporal variation of habitat quality and its underlying mechanism in the central region of Yangtze River Delta [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023,42(5):1175-1185.
- [19] 苏艳丽,陈笑蝶,刘思余,等.2001—2100年黄土高原植被变化的土壤保持功能时空演变[J].*水土保持学报*,2022,36(6):55-62,81.
- Shu Y L, Chen X D, Liu S Y, et al. Spatiotemporal Evolution of Soil Conservation Function of Vegetation Change on the Loess Plateau from 2001 to 2100 [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(6):55-62,81.
- [20] 燕玲玲,巩杰,徐彩仙,等.子午岭地区土壤保持服务时空变化及其影响因素[J].*水土保持学报*,2021,35(1):188-197.
- Yan L L, Gong J, Xu C X, et al. Spatiotemporal Variations and Influencing Factors of Soil Conservation Service in Ziwuling Area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021,35(1):188-197.
- [21] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].*植物生态学报*,2007(3):413-424.
- Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S, et al. Estimation of net primary productivity of Chinese Terrestrial Vegetation based on remote sensing[J]. *Journal of Plant Ecology*,2007(3):413-424.
- [22] 薛晓玉,王晓云,段含明,等.北方农牧交错带植被 NPP 的时空变化及其驱动因子分析[J].*水土保持研究*,2021,28(2):190-197.
- Xue X Y, Wang X Y, Duan H M, et al. Temporal and spatial changes of npp and its causes in the agricultural pastoral ecotone of northern China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2021,28(2):190-197.
- [23] Jiang Y, Hou W, Gao J, et al. Refined revealing the chain path of multiple ecosystem services under diverse environmental factor gradients[J]. *Science of the Total Environment*, 2023,865:161187.
- [24] 徐彩仙,巩杰,李焱,等.基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J].*生态学报*,2020,40(13):4291-4301.
- Xu C X, Gong J, Li Y, et al. Spatial distribution characteristics of typical ecosystem services based on terragradients of Bailongjiang Watershed in Gansu [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(13):4291-4301.
- [25] 胡砚霞,于兴修,廖雯,等.汉江流域产水量时空格局及影响因素研究[J].*长江流域资源与环境*,2022,31(1):73-82.
- Hu Y X, Yu X X, Liao W, et al. Spatio-Temporal Patterns of Water Yield and Its Influencing Factors in the Han River Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022,31(1):73-82.
- [26] 高江波,张怡博,左丽媛.喀斯特山地土壤侵蚀和产水量的最优解释力[J].*地理学报*,2022,77(11):2920-2934.
- Gao J B, Zhang Y B, Zuo L Y. The optimal explanatory power of soil erosion and water yield in karst mountainous area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022,77(11):2920-2934.
- [27] 王芸,赵鹏祥,李治国,等.退耕还林还草背景下陕北地区生态系统服务动态及热点识别[J].*华北水利水电大学学报:自然科学版*,2022,43(5):92-100.
- Wang Y, Zhao P X, Li Z G, et al. Ecosystem Service Dynamics and Hotspot Identification under the Background of Grain to Green Program in Northern Shaanxi [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition)*, 2022,43(5):92-100.
- [28] 郇红娟,韩会庆,俞洪燕,等.乌江流域重要生态系统服务地形梯度分布特征分析[J].*生态科学*,2016,35(5):154-159.
- Gao H J, Han H Q, Yu H Y, et al. Distribution characteristic of important ecosystem services in terrain gradient in Wujiang River Basin [J]. *Ecological Science*, 2016,35(5):154-159.
- [29] 刘玉祯,刘文亭,冯斌,等.坡向和海拔对高寒山地草甸植被分布格局特征的影响[J].*草地学报*,2021,29(6):1166-1173.
- Liu Y Z, Liu W T, Feng B, et al. Effects of Slope Aspect and Elevation on Vegetation Distribution Pattern of Alpine Mountain Meadow [J]. *ACTAAGRESTIA SINICA*,2021,29(6):1166-1173.
- [30] 陈奕竹,肖轶,孙思琦,等.基于地形梯度的湘西地区生态系统服务价值时空变化[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2019,27(4):623-631.
- Chen Y Z, Xiao Y, Sun S Q, et al. Spatial-temporal changes of ecosystem service values in Xiangxi region based on terrain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019,27(4):623-631.

- [21] 周书贵,邵全琴,曹巍.近20年黄土高原土地利用/覆被变化特征分析[J].地球信息科学学报,2016,18(2):190-199.
Zhou S G, Shao Q Q, Cao W. Characteristics of land use and land cover change in the Loess Plateau over the past 20 years[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(2):190-199.
- [22] 汤青,徐勇,刘毅.黄土高原地区土地利用动态变化的空间差异分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(8):15-21.
Tang Q, Xu Y, Liu Y. Spatial difference of land use change in Loess Plateau region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010,24(8):15-21.
- [23] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
Liu G B, Shangguan Z P, Yao W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2017,32(1):11-19.
- [24] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015,209/210:87-99.
- [25] 赵宏飞,何洪鸣,白春昱,等.黄土高原土地利用变化特征及其环境效应[J].中国土地科学,2018,32(7):49-57.
Zhao H F, He H M, Bai C Y, et al. Spatial-temporal characteristics of land use change in the Loess Plateau and its environmental effects[J]. China Land Science, 2018,32(7):49-57.
- [26] Xiu L N, Yan C Z, Li X S, et al. Monitoring the response of vegetation dynamics to ecological engineering in the Mu Us Sandy Land of China from 1982 to 2014[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018,190(9):543.
- [27] 李妙宇,上官周平,邓蕾.黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J].生态学报,2021,41(17):6786-6799.
Li M Y, Shangguan Z P, Deng L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(17):6786-6799.
- [28] 周健.陆地生态系统碳储量的模拟不确定性及其成因溯源[D].上海:华东师范大学,2021.
Zhou J. The Uncertainty of Simulation of Carbon Storage in Terrestrial Ecosystem and Its Causes Traceability [D]. Shanghai: East China Normal University, 2021.
- [29] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: An analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau[J]. Scientific Reports, 2013, 3:2846.
- [30] 彭文英,张科利,杨勤科.退耕还林对黄土高原地区土壤有机碳影响预测[J].地域研究与开发,2006,25(3):94-99.
Peng W Y, Zhang K L, Yang Q K. Forecast of impact of the returning farms to forests on soil organic carbon of Loess Plateau[J]. Areal Research and Development, 2006,25(3):94-99.

(上接第251页)

- [31] 孙艺杰,任志远,郝梦雅,等.黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素:以延安市为例[J].生态学报,2019,39(10):3443-3454.
Sun Y J, Ren Z Y, Hao M Y, et al. Spatial and temporal changes in the synergy and trade-off between ecosystem services, and its influencing factors in Yanan, Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10):3443-3454.
- [32] 杨洁,谢保鹏,张德罡.黄河流域生态系统服务权衡协同关系时空异质性[J].中国沙漠,2021,41(6):78-87.
Yang J, Xie B P, Zhang D G. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem services trade-off synergy in the Yellow River Basin [J]. Journal of Desert Research, 2021,41(6):78-87.
- [33] 潘竞虎,李真.干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J].农业工程学报,2017,33(17):280-289.
Pan J H, Li Z. Analysis on trade-offs and synergies of ecosystem services in arid inland river basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(17):280-289.
- [34] 段宝玲,冯强,原燕燕,等.钱江源国家公园体制试点区生态系统服务权衡与协同分析[J].旅游科学,2021,35(5):11-31.
Duan B L, Feng Q, Yuan Y Y, et al. Ecosystem Services Trade-offs and Synergies in Qianjiangyuan National Park System Pilot [J]. Tourism Science, 2021,35(5):11-31.
- [35] Zhang Y, Lu X, Liu B, et al. Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region: A case study in the Yellow River Basin [J]. Science of the Total Environment, 2021,766:142480.
- [36] Wu F, Liang Y, Peng S, et al. Challenges in trade-off governance of ecosystem services: Evidence from the Loess Plateau in China [J]. Ecological Indicators, 2022,145:109686.