

SSP-RCP 情景下中国生态系统服务价值 评估及生态风险预测

王贺封, 刘书雅, 张安兵, 刘佳, 吴健达

(河北工程大学 矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: [目的] 定量评估中国生态系统服务价值并将其与不确定性整合实现区域生态风险动态预测, 为适应气候变化政策制定、国土空间规划、生态环境保护、经济转型发展及区域风险管理提供科学依据。[方法] 耦合 LUH2 数据和 PLUS 模型模拟可持续发展 (SSP119), 当前中等发展 (SSP245), 高速发展情景 (SSP585) 下 2030 年中国土地利用格局, 融入建设用地并利用修正的当量因子法估算生态系统服务价值 (ESV), 采用夏普比率预测区域生态风险。[结果] ① PLUS 模型具有较高的准确性, 其 kappa 系数为 0.90, 总体精度 (OA) 为 0.93。不同情景下各土地利用类型面积变化差异明显, 但空间分布较为相似; 各地类聚集效应明显, 由东南向西北逐渐变化。② 2030 年 3 种情景中国 ESV 分别为 2.188×10^{13} , 2.176×10^{13} , 2.170×10^{13} 元。受土地利用格局的影响, 单位面积上 ESV 空间上呈“东南高, 西北低”, 各项 ESV 空间分布呈“整体一致性, 局部差异性”的特点。③ 中国未来的生态风险以低、较低及中风险为主, 城市数量所占比例介于 84.47%~90.46%。3 种情景下, 可持续发展情景低和较低风险区域比例最大, 而高速发展情景高和较高风险区域所占比例最大。[结论] 走可持续发展道路是平衡经济发展和生态保护的最优选择, 可有效降低区域生态风险; 延续当前中等发展道路, 生态系统的稳定性处于中间水平; 以化石燃料为主的高速发展道路, 不利于生态系统的稳定性, 存在生态环境退化的风险。

关键词: PLUS 模型; 夏普比率; 生态系统服务价值; 区域生态风险; SSP-RCP 情景

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)03-0129-14

中图分类号: F301.24, X171.1

文献参数: 王贺封, 刘书雅, 张安兵, 等. SSP-RCP 情景下中国生态系统服务价值评估及生态风险预测 [J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 129-142. Wang Hefeng, Liu Shuya, Zhang Anbing, et al. Evaluation of ecosystem service value and prediction of ecological risk in China under SSP-RCP scenarios [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 129-142. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.016; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.016.

Evaluation of ecosystem service value and prediction of ecological risk in China under SSP-RCP scenarios

Wang Hefeng, Liu Shuya, Zhang Anbing, Liu Jia, Wu Jianda

(School of mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: [Objective] The value of ecosystem services in China was assessed quantitatively, and integrated with uncertainty to achieve dynamic prediction of regional ecological risks, in order to provide a scientific basis for climate change adaptation policy formulation, territorial spatial planning, ecological environmental protection, economic transformation, and regional risk management. [Methods] The LUH2 data and PLUS model were coupled to simulate China's land use patterns under sustainable development (SSP119), current moderate development (SSP245) pathway, and high-speed development (SSP585) scenarios in 2030. Construction land was incorporated, and the modified equivalent factor method was used to estimate the ecosystem service value (ESV). The Sharpe ratio was employed to predict regional ecological risks. [Results] ① The PLUS model demonstrated high accuracy, with a kappa coefficient of 0.90 and an overall accuracy (OA) of 0.93. Under

收稿日期: 2024-12-05

修回日期: 2025-01-24

采用日期: 2025-01-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“农业干旱时滞效应及时空分布干旱监测模型研究”(42071246); 河北省重大科技成果转化专项(22287401Z)

第一作者: 王贺封(1980—), 男(汉族), 江西省抚州市人, 博士, 教授, 主要从事 GIS 与遥感应用、生态环境监测方面的研究。Email: wanghefeng@hebeu.edu.cn。

different scenarios, the area changes in land use types varied significantly, but the spatial distribution was relatively similar. The aggregation effect of land types was evident, gradually changing from southeast to northwest. ② In 2030, ESV under the three scenarios were 2.188×10^{13} , 2.176×10^{13} , and 2.170×10^{13} yuan, respectively. Influenced by land use patterns, the ESV per unit area followed a spatial distribution of higher in the southeast and lower in the northwest, while individual ecosystem services exhibited an overall consistency with localized variations. ③ Future ecological risks in China are predominantly low to medium, with 84.47%—90.46% of cities classified within this range. Among the three scenarios, sustainable development had the highest proportion of low and relatively low-risk areas, whereas high-speed development had the largest proportion of high and relatively high-risk areas. [Conclusion] A sustainable development pathway is the optimal choice for balancing economic growth and ecological protection, effectively reducing regional ecological risks. The current moderate development pathway provides moderate ecosystem stability. In contrast, a high-speed development model reliant on fossil fuels threatens ecosystem stability and increases the risk of ecological degradation.

Keywords: PLUS model; sharpe ratio; ecosystem service value; regional ecological risks; SSP-RCP scenarios

经济社会快速发展与气候变化的加剧,导致土地利用结构、空间格局发生转变,直接或间接影响区域生态系统服务能力^[1]。生态系统服务是连接生态系统和人类社会的桥梁,关乎人类福祉和区域可持续发展^[2]。生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)作为衡量生态系统服务的重要指标,表征着土地利用与生态环境质量交互作用过程,也是生态保护政策制定的重要参考基础^[3]。同时,人类活动与气候变化交互作用对土地利用及生态系统内部等变化的影响具有不确定性^[4],扰动着生态系统稳定性,进而带来一定生态风险(ecological risk, ER)。因此,开展区域ESV和ER的研究是科学判定区域生态环境质量及分析区域生态风险演变规律的内在要求。

目前,国内外学者在生态系统服务价值(ESV)和生态风险(ER)方面开展了卓有成效的研究。在研究方法上,常用的ESV评估方法可分为基于单位服务功能价值法和基于单位面积价值当量因子法。基于单位功能价值法计算过程复杂、输入参数多、实施成本较大,限制了其评估结果的可比性^[5];当量因子法因数据需求少、结果可比性强被广泛应用于ESV研究^[6]。区域生态风险评价方法主要有基于多因子风险源的风险受体识别、基于景观生态的生态风险分析和基于ESV的生态风险分析。多因子风险源侧重于风险源、风险受体的识别,无法兼顾多种受体来考虑区域整体诉求^[7];景观生态风险主要以静态的形式反映生态风险,难于描述生态过程不确定性动态过程,且忽略人与自然的响应关系^[8];基于ESV的生态风险分析是以人类福祉为最终归宿,通过整合ESV、不稳定性构建区域生态风险评价的夏普指数^[9],能够很好顾及生态风险的评估终点和动态过程,极大改善了风险评价实用性。研究对象涉及流域^[10]、保护区^[11]、行政区域^[12]、城市群等^[13],并从过去

—现在—未来角度对ESV, ER的时空变化^[14]、驱动因素^[15]及两者相关性等^[16]进行研究。

生态系统服务价值(ESV)和生态风险(ER)研究已较为丰富,但在一些方面仍需进一步探讨:①目前ESV评估中多侧重于自然生态系统价值的评估,忽略了建设用地ESV,导致城市绿化及生态公园ESV被低估;②生态系统服务的稳定性和可持续性受多种因素影响,不确定性是一个重大挑战,现有研究对生态风险的评估多集中在景观实体和不同区域尺度上,而从全国尺度将ESV与不确定性综合实现ER动态评估,并探讨生态敏感性的研究还不多见。为此,本研究综合各组合情景应用广泛性、未来实现可能性及数据可获取性,选择可持续发展(SSP119)、当前中等发展(SSP245)和高速发展(SSP585)这3种情景,耦合LUH2数据和PLUS模型模拟中国2030年土地利用格局,并将建设用地纳入生态系统服务价值评估,利用修正的当量因子法估算ESV,采用夏普比率评估未来区域生态风险,以期为中国适应气候变化政策制定、国土空间规划、生态环境保护、经济转型发展及区域风险管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源及处理

数据主要包括土地利用、驱动因子、未来情景、统计年鉴及生态功能区划等数据(表1),其中土地利用数据来源于武汉大学黄昕团队CLCD数据集,空间分辨率为30 m,总体准确率达80%;气温、降水、GDP、人口及土壤类型等驱动因子数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,空间分辨率为1 km;河流、铁路、国道、省道、高速公路及城市一级道路数据来源于OpenStreetMap,通过欧式距离计算得到;DEM数据来自地理空间数据云,空间分辨率为

90 m,坡度由 DEM 数据提取得到;未来不同情景模拟气温、降水数据来源于时空三极环境大数据平台,空间分辨率为 1 km, GDP 数据来自 MURAKAMI 发布的 SSP1-5 全球 1/12° 网格化预测数据集,人口密度数据来源于 National Center for Atmospheric

Research,空间分辨率为 1 km。上述数据统一投影为 Albers_Conic_Equal_Area,重采样为 300 m。粮食产量及收购价格数据来源于《中国统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》。全国生态敏感性数据来源于《全国生态功能区划(2015年修订)》。

表 1 数据来源及其相关参数说明

Table 1 Data source and description of relevant parameters

数据类型	数据名称	年份	数据来源
土地利用数据	CLCD	2000,2010,2020	http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809
	气温、降水、GDP、人口	2020	http://www.resdc.cn/
	土壤类型	1995	
驱动因子数据	距河流距离、距铁路距离、距国道距离、距高速公路距离、距城市一级道路距离、距省道距离	2020	http://www.openstreetmap.org/
	DEM、坡度	—	http://www.gscloud.cn/
	气温、降水	2030	https://poles.tpdc.ac.cn/
未来情景数据	GDP	2030	MURAKAMI 发布的 SSP1-5 全球 1/12° 网格化 GDP 预测数据集
	人口	2030	http://www.cgd.ucar.edu/
限制因素	自然保护区	2021	http://gisrs.cn/
	水域	2020	限制区域为 0,非限制区为 1
统计年鉴数据	粮食产量	2010,2015,2020	《中国统计年鉴》
	粮食价格	2010,2015,2020	《全国农产品成本收益资料汇编》
生态功能区划	全国生态敏感性	2015	《全国生态功能区划(2015年修订)》

1.2 研究方法

1.2.1 未来土地利用需求修正方法 SSP-RCP 情景下土地利用需求量来源于土地利用协调数据集(land-use harmonization 2, LUH2)。LUH2 数据是基于不同 SSP-RCP 情景对全球 850—2100 年土地利用进行预测,数据分辨率是 0.25°×0.25°。考虑到 LUH2 数据空间分辨率较粗、分类精度不高的问题,基于 CLCD 数据,采用 LUH2 土地利用增长率修正未来土地利用需求量。为了解决其与 CLCD 数据集分类系统存在的差异性,将两者土地利用类型均处理为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地共 6 类。在假设未来水体面积不变状况下,用地类型 k 的需求面积计算公式为:

$$LA_{k,t} = CLLUCC_{k,2020} \times \frac{LLA_{k,t}}{LLA_{k,2020}} \quad (1)$$

式中:CLLUCC _{$k,2020$} 为 2020 年 CLCD 数据集中土地类型 k 的面积;LLA _{k,t} 为 LUH2 数据集中土地类型 k 在时间 t 时的需求面积。为确保时间 t 时用地面积总和不超过 CLCD 数据集中总陆地面积,进一步调整 LA _{k,t} ,计算公式为:

$$LA_{k,t}^{Adj} = \sum_{k=1}^6 CLLUCC_{k,2020} \times \frac{LA_{k,t}}{\sum_{k=1}^6 LA_{k,t}} \quad (2)$$

1.2.2 PLUS 模型 PLUS 模型是一个用于斑块尺度土地利用模拟模型,集成了土地扩张分析策略(land expansion analysis strategy, LEAS)和基于多类型随机种子的元胞自动机模型(CA based on multiple random seeds, CARS)。利用 LEAS 对两期土地利用数据进行叠加分析,提取发生变化的用地单元,参考现有研究^[17],选取 13 个驱动因子(表 1),通过随机森林分类算法获得驱动因素权重及用地类型发展概率,进而确定 GDP、人口、气温、降水及 DEM 是土地利用变化的主要影响因素;考虑到 DEM 变化相对较小,在未来不同情景模拟中使用不同情景下 GDP、人口、气温和降水数据以及当前 DEM 数据,获取相应用地类型发展概率。在此基础上,采用 CARS 模型,以土地利用需求量、发展概率为约束,设置邻域权重(表 2)、转移矩阵(表 3)等参数,对土地利用变化进行动态模拟。其中邻域权重根据各土地利用类型扩张面积比例确定^[18],转移矩阵根据每种情景各类用地的转移特点并参考现有研究成果设定^[19]。

表 2 土地利用类型邻域权重参数

Table 2 Realm weight parameters of various land use types

情景模式	土地利用类型					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
可持续发展	0.73	0.99	0.77	0	0.50	0.01
当前中等发展	0.15	0.55	0.55	0	0.36	0.50
高速发展	0.31	0.36	0.96	0	0.46	0.17

1.2.3 生态系统服务价值估算 参考谢高地等^[20]提出的当量因子法,对研究区 ESV 进行估算,计算过程见公式(3)—(4)。选取小麦、玉米、早、中、晚籼稻和粳稻为主要粮食作物,结合 2010—2020 年各省粮食平均产量及其平均价格,并根据 1 个 ESV 当量因子

的经济价值量约为区域粮食市场价值的 1/7^[21],对单位价值当量进行修正。

$$ESV = \sum_{i=1}^n A_i \cdot VC_i \quad (3)$$

$$VC_i = \sum_{j=1}^k EC_{ij} \cdot E_a \quad (4)$$

$$E_a = \frac{1}{7} \times Q \cdot P \quad (5)$$

式中: A_i 为土地类型 i 的面积(hm^2); VC_i, EC_{ij} 为土地类型 i 的单位面积 ESV($\text{元}/\text{hm}^2$)和 j 项 ESV 当量; E_a 为单位价值当量($\text{元}/\text{hm}^2$); Q, P 分别为单位面积粮食平均产量和粮食平均收购价格,求得研究区 E_a 为 2 025.38 $\text{元}/\text{hm}^2$ 。

表 3 多情景土地利用转移矩阵设置

Table 3 Matrix setup of multi-scenario land use transfer

地类	可持续发展						当前中等发展						高速发展					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
b	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1
c	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
d	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0
e	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注:a,b,c,d,e,f 分别表示耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。

此外,针对当前研究将建设用地 ESV 设定为 0,导致城市地区 ESV 估算存在误差的问题。根据《城市建设状况公报》,获得各省建成区绿地率,考虑到人工绿色空间通常由草地和林地组成,将建设用地融入 ESV 计算,计算公式为:

$$ESV_{CL} = \frac{(ESV_{wl} + ESV_{gl})A_t}{2} \quad (6)$$

式中: $ESV_{CL}, ESV_{wl}, ESV_{gl}$ 分别为建设用地、林地、草地的 ESV; A_t 为年均绿地率。

考虑到全国地理区域及不同情景下气候变化的差异性,为了更为准确估算 ESV,采用净初级生产力(NPP)代替生物量对当量因子表进行修正。由于未来 NPP 数据难以获取,利用 Thornthwaite Memorial 模型对 NPP 进行预测^[22],计算公式为:

$$NPP = 3000 \times \left[1 - e^{-0.0009659(V-20)} \right] \quad (7)$$

其中:

$$V = \frac{1.05R}{\sqrt{1 + (1 + 1.05R/L)^2}} \quad (8)$$

$$L = 3000 + 25t + 0.05t^3 \quad (9)$$

式中: NPP 为植被净初级生产力 [$\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; V 为年度实际蒸散量(mm); L 为年度平均蒸散量(mm);

t 为年平均气温($^{\circ}\text{C}$); R 为年降水量(mm)。

1.2.4 敏感性分析 采用敏感性指数(CS)揭示生态系统服务价值随时间变化对于价值系数的依赖程度,以评价估算结果的不确定性与可信度^[23]。当 $CS > 1$ 时,代表 ESV 对 EC 富有弹性,价值系数准确度差和可信度低;当 $CS < 1$ 时,则代表 ESV 对 EC 缺乏弹性,研究结果可信度高,计算公式为:

$$CS = \left| \frac{(ESV_f - ESV_e)/ESV_e}{(EC_{kf} - EC_{ke})/EC_{ke}} \right| \quad (10)$$

式中: ESV_e, ESV_f 分别为原始和修正后的生态系统服务价值; EC_{ke}, EC_{kf} 分别为原始和修正后的当量系数。

1.2.5 生态风险指数计算 为了将 ESV 和不确定性集成到区域生态风险中,本文采用夏普比率定量方法对生态风险进行评估^[24],将未来 ESV 视为预期生态回报,未来土地利用变化的不确定性视为风险,2020 年的 ESV 视为无风险生态回报,超额生态回报采用预期生态回报减去无风险回报计算。然而,当遇到负超额回报时,夏普比率出现异常,针对此问题,参照已有的研究成果^[25]做出相应改进,以此得到不同情景下市级尺度的生态风险水平,其计算公式为:

$$ERI_j = \frac{ESV_{t+1} - ESV_t}{\sigma} = \frac{EER}{\sigma} \quad (EER \geq 0) \quad (11)$$

$$ERI_j = \frac{ESV_{t+1} - ESV_t}{\sigma} = \frac{EER}{\sigma^{-1}} \quad (EER < 0) \quad (12)$$

式中:ERI_j为生态风险指数;EER为超额生态回报;ESV_{t+1}为预期生态回报;ESV_t为无风险生态回报;σ为EER的标准差。

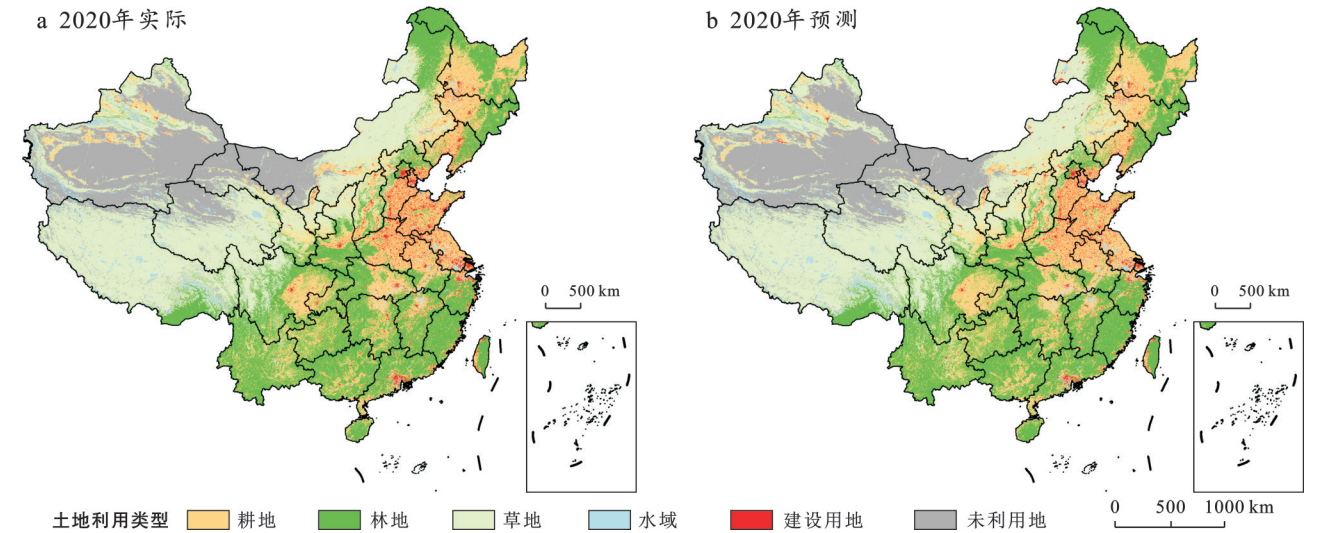
2 结果与分析

2.1 SSP-RCP情景下土地利用变化分析

基于2000和2010年土地利用数据,运用PLUS模型模拟中国2020年土地利用格局,对比分析模拟结果与实际土地利用(图1)。结果表明模拟结果与实际土地利用在空间上相似度较高,模拟总体精度(overall accuracy, OA)为0.93,kappa系数为0.90,说明PLUS模型具有较高可靠性和较好适用性,能够用

来模拟中国未来土地利用状况。

以2020年为基准,模拟2030年3种情景下中国土地利用空间分布,统计结果如图2所示。由图2可知,不同情景各用地类型面积变化存在差异性。可持续发展情景下,林地和建设用地分别增加94 844.74和47 605.95 km²,耕地和草地分别减少69 111.33和73 339.35 km²,生态用地面积整体呈增加趋势,表明该情景对生态保护和可持续土地利用的重视;当前中等发展情景下,耕地、林地、建设用地分别增加14 081.62,51 854.10和34 148.32 km²,草地减少52 172.57 km²,整体空间格局较为稳定;高速发展情景下,耕地、林地、建设用地分别增加29 270.40,34 334.47和43 899.47 km²,草地减少91 537.66 km²,这可能威胁到生态系统的稳定性和可持续发展。



注:基于国家地理信息公共服务平台(天地图)审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作,底图边界无修改(即首个官方权威中国矢量地图)。下同。

图1 中国2020年模拟与实际土地利用对比
Fig.1 Comparison of simulated and actual land use of China in 2020

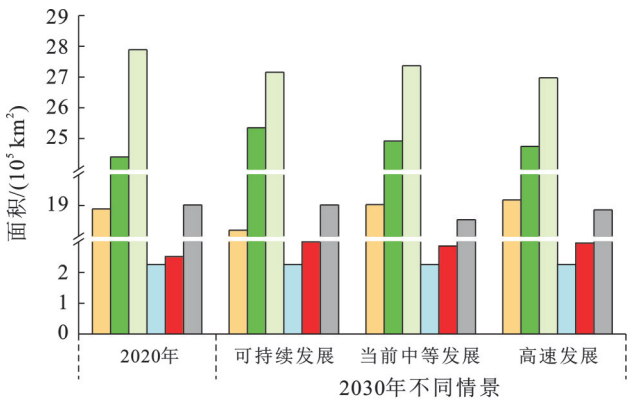


图2 中国2020,2030年不同情景土地利用类型面积

Fig.2 Area of land use types under different scenarios in China in 2020 and 2030

从空间分布来看(图3),土地利用具有明显聚集效应,由东南向西北逐渐变化。林地、耕地和建设用地主要分布于东南部,西北部向草地过渡,新疆和内蒙古自治区西部有大量未利用地。2030年土地利用空间分布与历史基本一致,不同情景耕地变化主要发生在华北平原、东北平原等农产品提供区,林地变化主要发生在云贵高原及其周边、东南丘陵、大小兴安岭、长白山脉及太行山脉等生态基础较好地区,建设用地增加主要沿城市群向周边地区扩散,草地减少主要发生在林地、建设用地扩张区及西藏、内蒙古自治区等草地覆盖度较高地区。

2.2 SSP-RCP情景下生态系统服务价值变化分析

2.2.1 生态系统服务价值变化及敏感性分析 基于

不同情景下各土地利用类型面积,结合单位面积ESV系数,计算得到中国各市不同情景下的ESV(港、澳、台地区除外)。2030年可持续发展、当前中等发展和高速发展情景的生态系统服务价值分别为 2.188×10^{13} 、 2.176×10^{13} 、 2.170×10^{13} 元。根据计算结果,将ESV划分为3个等级:低值区($ESV \leq 161.21$ 亿元)、中值区($161.21 \text{ 亿元} < ESV \leq 625.25$ 亿元)、高值区($ESV > 625.25$ 亿元),并统计2030年不同情景下生态系统服务价值不同等级城市的数量(表4)。由结果可知,可持续发展情景整体ESV值最

高,且低值区所占比例最低,而中值区和高值区比例最高,这与该情景对经济增长的重视逐渐转向对人类福祉的重视的情景设定理念相一致;当前中等发展情景下低、中、高值区均处于中间水平,分别为29.70%、39.78%和30.52%,这与该情景社会、经济不会明显偏离历史模式的情景设定理念相一致;高速发展情景下低值区比例最高,为30.79%,中值区和高值区比例最低,分别为39.51%和29.70%,这与该情景下对化石燃料依赖程度高,采用资源和能源密集型的生活方式相对应。

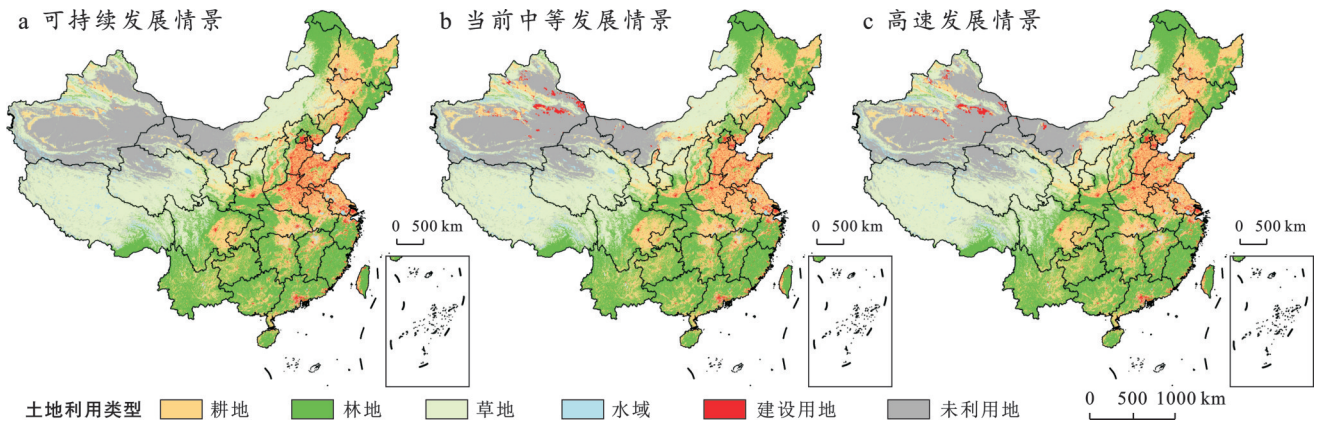


图3 中国2030年不同情景土地利用空间分布

Fig.3 Spatial distribution of land use under different scenarios in China in 2030

表4 中国2030年不同情景生态系统服务价值不同等级城市数量

Table 4 Number of cities with different levels of ecosystem service value under different scenarios in China in 2030

情景类型	城市数量		
	低值区	中值区	高值区
可持续发展	99	155	113
当前中等发展	109	146	112
高速发展	113	145	109

为定量分析ESV对当量系数(EC)的敏感程度,将各用地类型的生态服务价值系数调整50%,利用公式(10)对各地级市ESV进行敏感性分析检验,得到2020年及不同情景下2030年各用地类型的敏感性程度(图4)。总体而言,不同年份和情景下各用地类型的敏感性系数(CS)均小于1,表明ESV对当量系数(EC)缺乏弹性,可信度高,研究结果可靠。

2.2.2 单位面积生态系统服务价值空间变化分析

为更好体现生态系统服务价值估算结果空间分布差异,采用中国各市单位面积ESV进行空间分布对比分析(图5),并将单位面积ESV划分为3个等级:低值区($ESV \leq 182$ 万元/ km^2)、中值区($182 \text{ 万元}/\text{km}^2 < ESV \leq 347 \text{ 万元}/\text{km}^2$)、高值区($ESV > 347 \text{ 万元}/\text{km}^2$)。

中国ESV的空间分布差异较大,单位面积高值区主要分布于长江中下游平原、东南丘陵、云贵高原、东北小兴安岭及长白山山脉,区域植被生长茂盛,是中国重要的水源涵养、生物多样性保护、土壤保持及林产品提供区;单位面积中、低值区主要分布于西藏自治区草地面积比例大但冻融侵蚀程度高的地区、黄土高原水土流失、土壤沙漠化严重的地区、华北平原、东北平原、四川盆地等农产品提供区、京津冀、关中等城市群及新疆、内蒙古西部等未利用地比例大、气候干旱、沙漠化程度高的地区。具体来看,西北部地区人为活动较少,3种情景下ESV差异不大;而东南部地区是人类活动频繁及城市扩张的主要区域,复杂的社会生态系统相互作用使得该地区在3种情景下ESV存在局部差异性。

另外,可持续发展情景下环境保护成效卓越,生态用地面积高于当前中等发展和高速发展情景,致使其在云贵高原、太行山脉部分区域单位面积ESV值高于另外两种情景;而高速发展情景通过牺牲大量自然资源实现经济高速发展,导致建设用地侵占周边林地、草地且耕地需求量大,相应的华北平原部分区域及城市群周边单位面积ESV值低于另外两种情景。

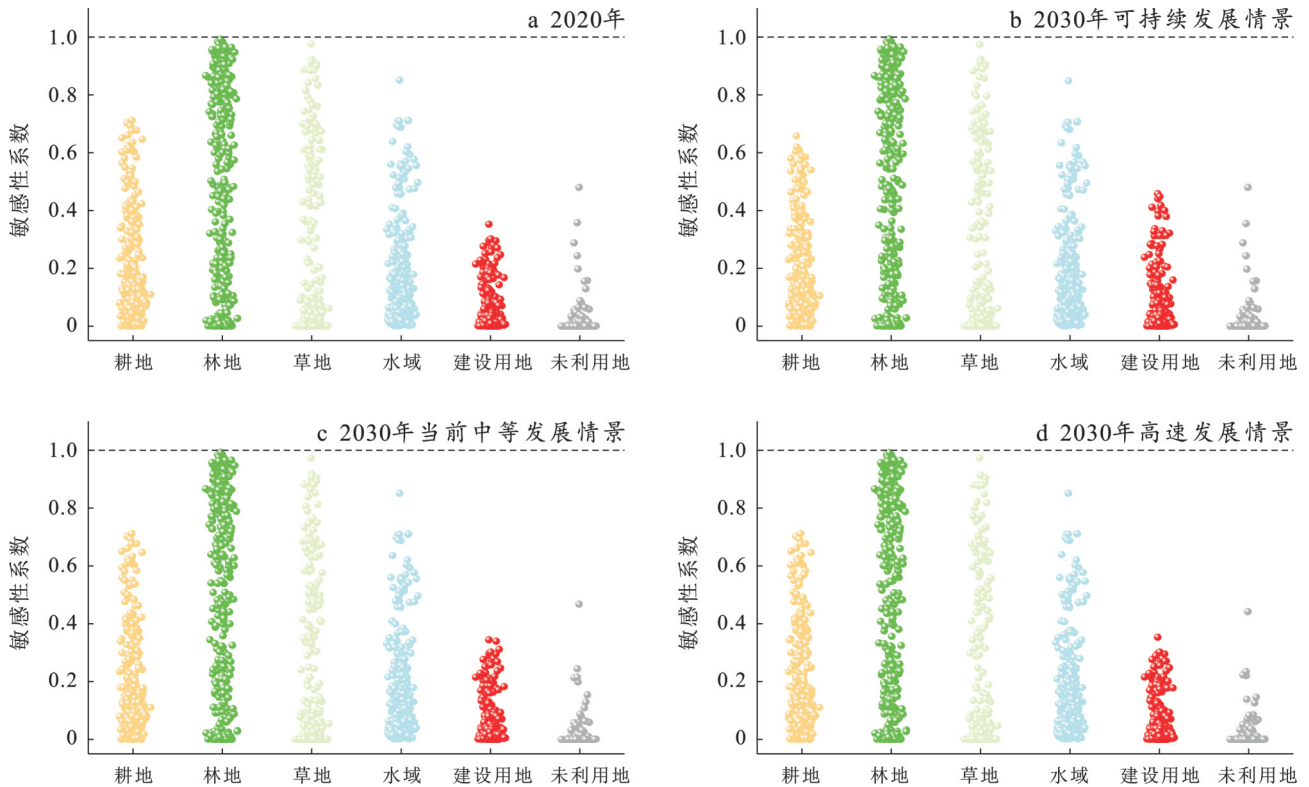


图4 不同用地类型生态系统服务价值敏感性

Fig.4 Sensitivities of ecosystem service value of different land use types

2.3 SSP-RCP情景下各项生态系统服务价值变化分析

通过对2030年不同情景各项生态系统服务价值测算(图6),发现调节服务所占比例最大,为68.20%~68.33%,支持服务次之,为21.51%~21.65%,而供给服务和文化服务相对比例较小,分别为5.72%~5.78%和4.38%~4.40%。3种情景供给、调节服务的ESV,总体呈现略微下降变化,支持和文化服务除可持续发展情景外其他情景呈略微下降变化,这主要是因为各服务所包含的服务类型顺应土地利用变化趋势。可持续发展情景林地面积的增幅最大,相应的各项ESV均高于另外两种情景,而高速发展情景建设用地广泛侵蚀了草地、林地,各项ESV值在3种情景中最低。

同样采用单位面积各项ESV来进行各市估算结果空间对比分析(图7),不同情景单位面积各项ESV空间分布呈现“整体一致性,局部差异性”特点。整体一致性主要表现在林地、草地面积比例较大,如云贵高原、东南丘陵、小兴安岭、长白山脉等ESV高值区及新疆、内蒙古西北部等未利用面积比例大的ESV低值区。局部差异性主要表现在受人为活动影响较大的农产品提供区(如松江平原、三江平原、四川盆地、华北平原等)和人居保障区(如京津冀、关中

等城市群)。

2.4 SSP-RCP情景下生态风险变化分析

以地级市为统计单元,利用夏普比率计算区域生态风险指数(港、澳、台地区除外),并将生态风险指数划分为5个等级:高风险($-\infty, -0.15]$ 、较高风险($-0.15, -0.01]$ 、中风险($-0.01, 0.15]$ 、较低风险($0.15, 0.4]$ 、低风险($0.4, +\infty$),结果如图8所示。可持续发展,当前中等发展和高速发展3种情景下高、较高风险所占比例分别为9.54%,14.44%和15.53%。在一定程度上说明以化石燃料为主的高速发展情景不利用生态系统的稳定性,可能引发中风险和低风险区域转化为高风险。整体来看,3种情景下中国生态风险的空间格局基本一致,呈现“西北高、东南低”的特点。东南部山区生态风险指数数值明显高于平原地区,以林地为主且呈现稳定的土地利用变化趋势的地区,主要表现为低生态风险,而平原地区主要表现为中生态风险,西北部地区受用地类型、自然因素的影响主要表现为高和较高风险。在可持续发展情景下,生态资源丰富、受人类活动干扰较小的长白山脉、太行山脉、云贵高原以及东南丘陵部分地区主要表现为低或较低风险,内蒙古、松嫩平原、华北平原及城市群等生态用地比例相对较少的平原地区主要表现为中风险;而当前中等发展,高速发展情景下未

进行严格的生态保护,快速的城市化进程加快了建设用地的扩张,侵蚀了周边林地和草地,使原本处于低或较低风险的区域转换为中或较高风险,特别是

在耕地、建设用地面积大且人类活动频繁的华北、华中、华东部分地区;华南地区建设用地面积比例小,以林地、草地为主,整体表现为低或较低风险。

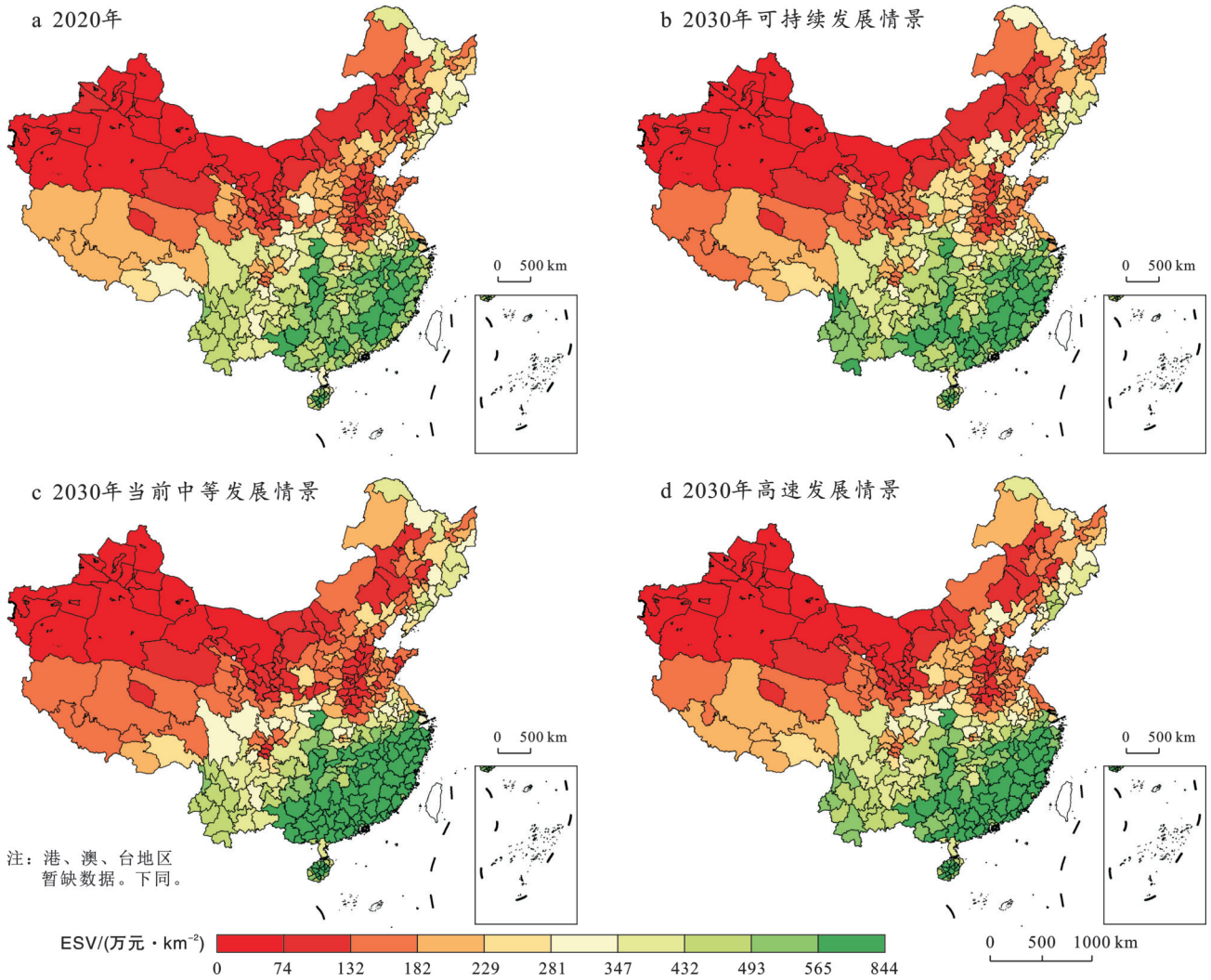


图5 中国2030年不同情景各市单位面积生态系统服务价值(ESV)空间分布
Fig.5 Spatial distribution of ecosystem service value (ESV) per unit area in different cities under different scenarios in China in 2030

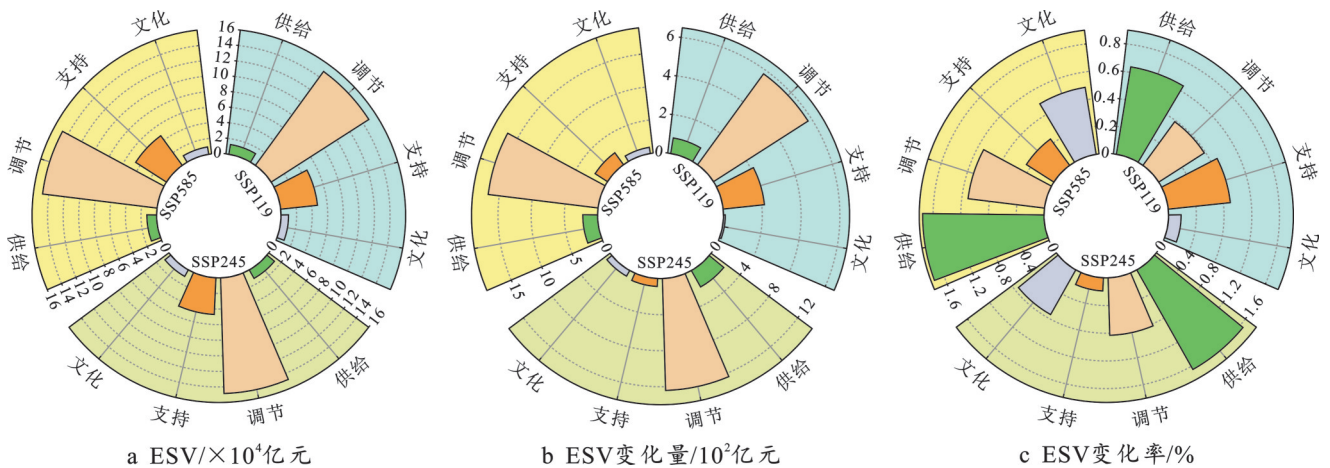


图6 中国2030年不同情景各生态系统服务价值及其变化

Fig.6 Values and its changes of ecosystem services under different scenarios in China in 2030

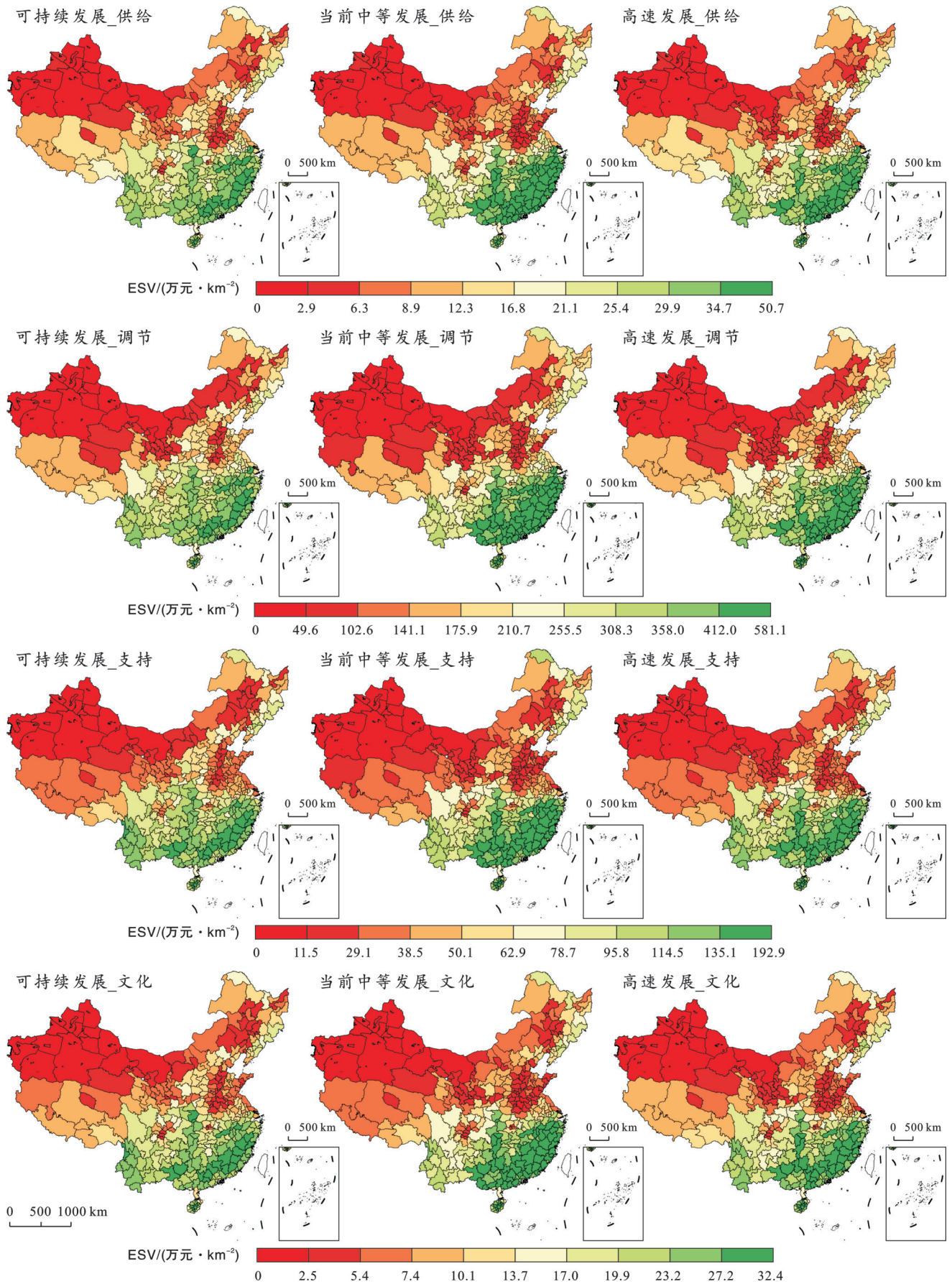


图 7 中国 2030 年不同情景各生态系统服务价值 (ESV) 单位面积空间分布

Fig.7 Spatial distribution of ecosystem service value (ESV) per unit area under different scenarios in China in 2030

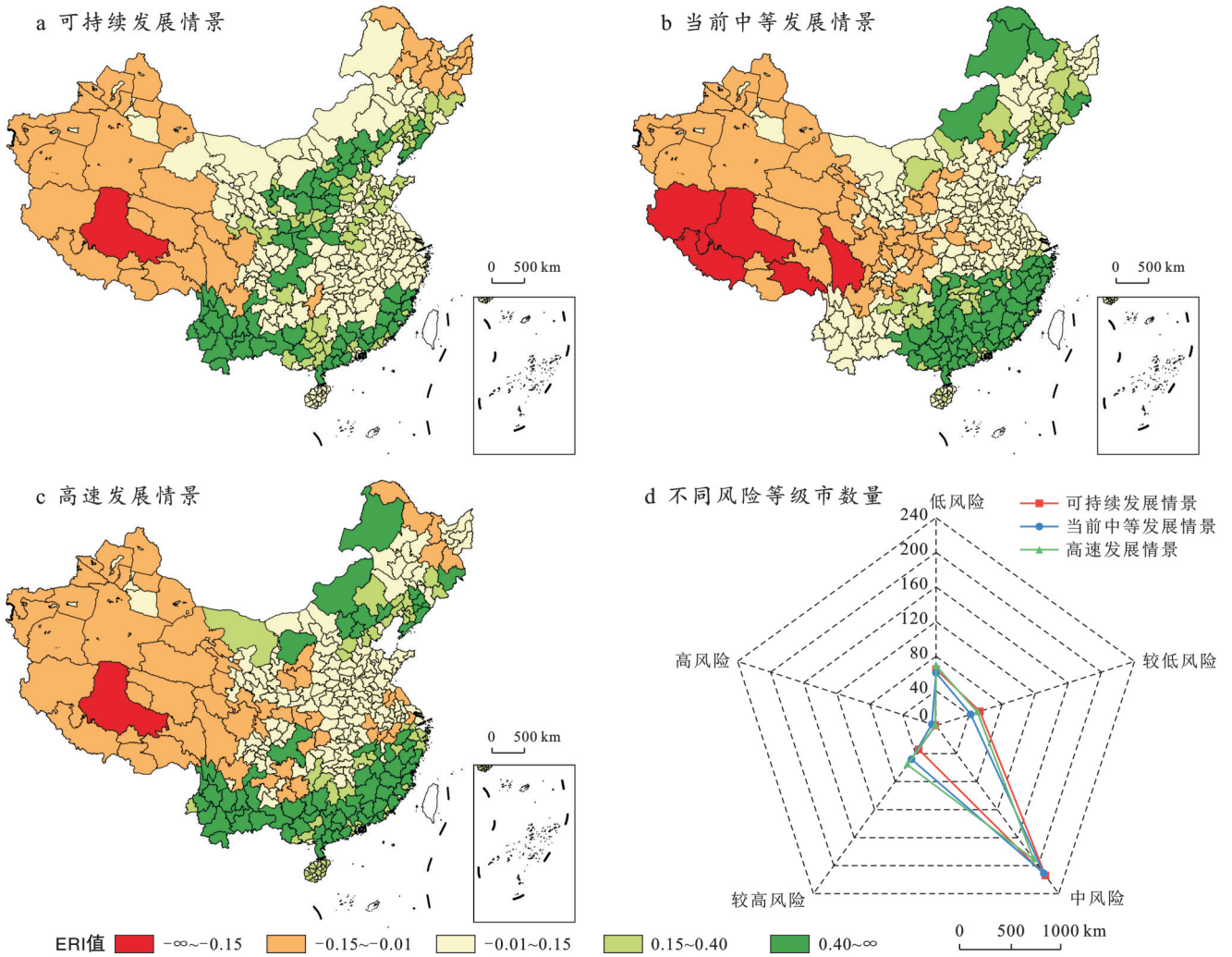


图 8 中国 2030 年不同情景生态风险指数 (ERI) 空间分布
 Fig.8 Spatial distribution of ecological risks index (ERI) under different scenarios in China in 2030

3 讨论

3.1 区域 ESV, ER 时空变化原因分析

ESV 和 ER 受自然和人为双重因素导致的地类转化影响,林地、草地等生态用地是 ESV 的主要来源,植被覆盖度高或草地覆盖面积大的区域,往往表现出高的 ESV 和相对低的 ER,以耕地为主的区域表现为中 ESV 和 ER,未利用地比例较大的区域表现为低 ESV 和高 ER,这与前人^[9]研究结果一致;同时研究结果表明(图 8—9),不同区域生态敏感性对 ESV 和 ER 的影响存在一定差异^[26],西藏阿里地区、那曲市及日喀则市等以草地为主,2030 年不同情景下区域 ESV 相比 2020 年略有下降并仍处于高位(图 10),然而由于区域海拔高、气候寒冷及土地沙漠化和冻融侵蚀敏感性高等原因,ER 却表现为较高或高风险。云南省临沧市、普洱市、西双版纳傣族自治州等地区植被覆盖度高,但由于水土流失严重且地质灾害敏感性程度高,当前中等发展情景下区域表现为

高 ESV 和中 ER。综上所述,未来发展过程中应明确全国不同区域生态系统服务功能分布特征、潜在生态风险及生态敏感性问题,有针对性构建生态空间,协调好生态保护与社会经济发展的关系。

3.2 未来不同情景 ESV, ER 对比分析

从未来不同情景视角探究 ESV, ER 的演变特征,可为中国及区域土地利用管理和生态可持续发展提供前瞻性的参考。从中国生态系统服务价值空间分布格局来看,本文与张莉金^[27]、陈俊成等^[28]研究成果相一致,较好地证明了研究结果的可靠性,但考虑到本研究加入了建设用地 ESV 并利用 NPP 代替生物量对生态系统服务当量因子表进行修正,致使价值量在数值上略有不同。目前,运用夏普指数评价区域生态风险大部分研究针对某一区域,如青藏高原^[25]、内蒙古^[27]、南方丘陵^[29],鲜有研究开展未来情景大尺度生态风险评估,而对比研究结果发现,本文生态风险分布规律与前人研究具有相似性,表明夏普指数能够用来评估中国未来不同情景下生态风险。

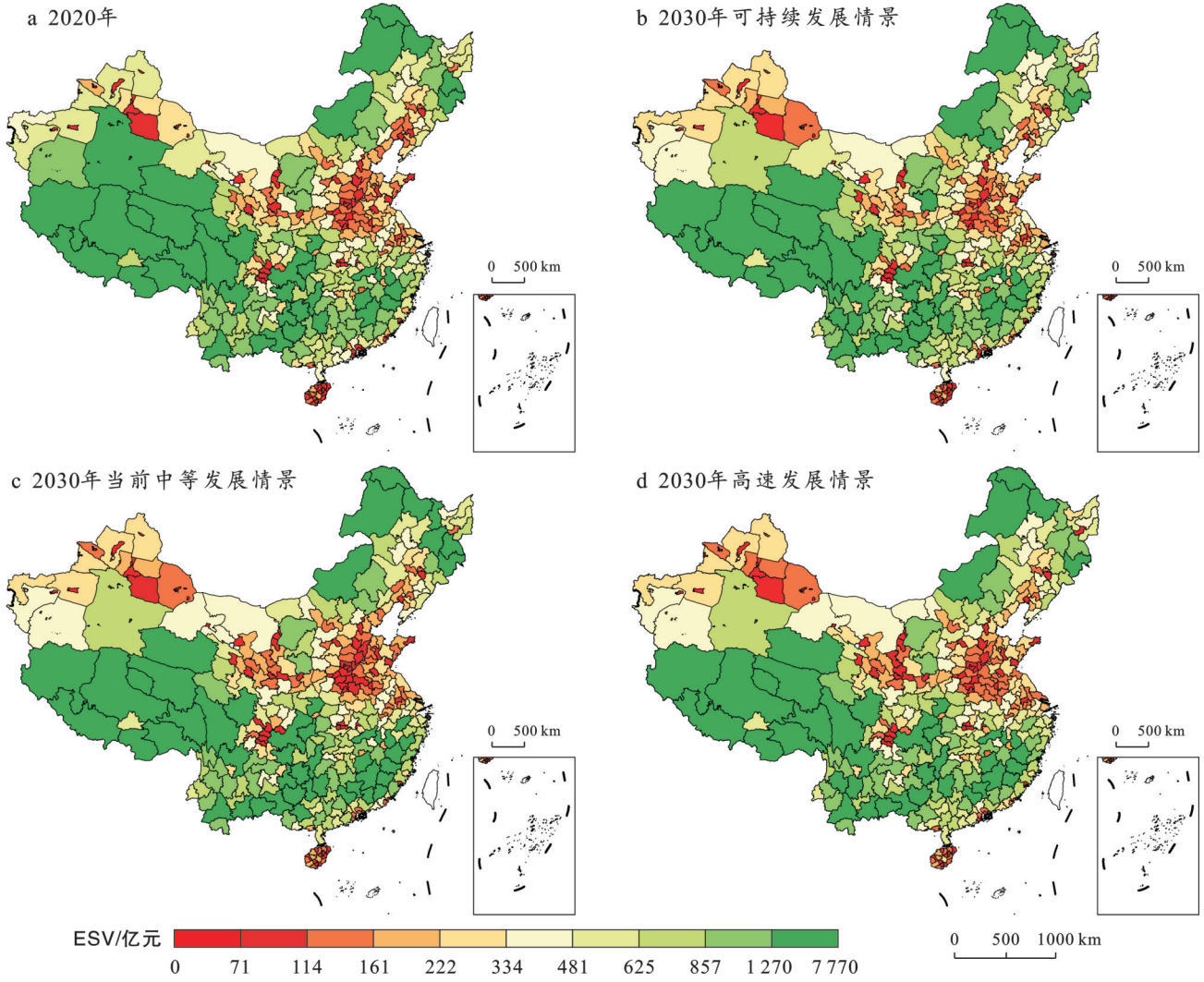


图9 2030年不同情景下中国各市生态系统服务价值空间分布

Fig.9 Spatial distribution of ecosystem service value in different cities under different scenarios in China in 2030

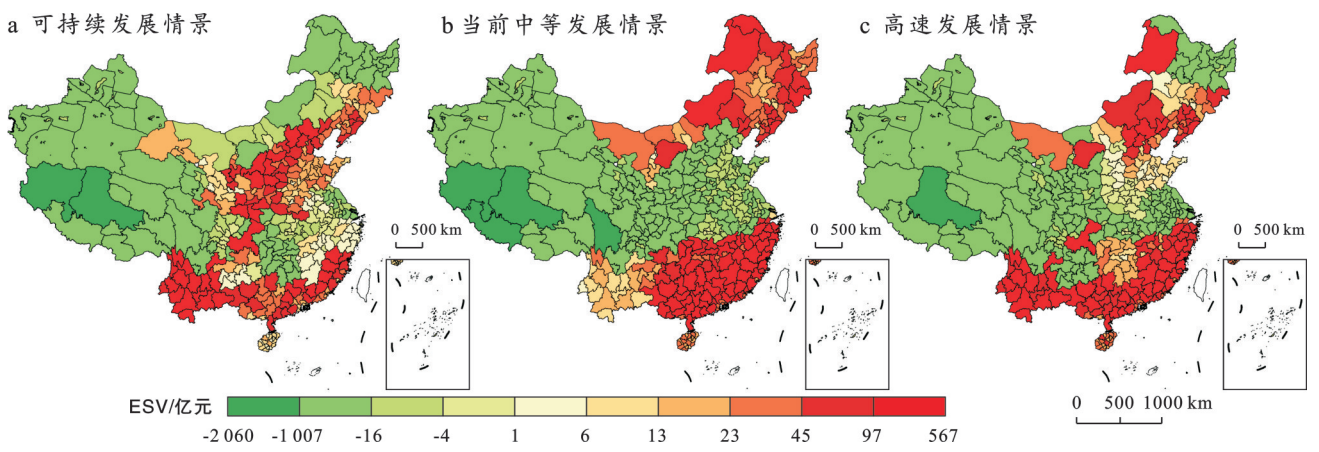


图10 中国2020—2030年不同情景生态系统服务价值变化量

Fig.10 Changes in ecosystem service value under different scenarios in China during 2020—2030

研究表明,可持续发展情景下ESV最高,处于低或较低风险的区域比例最高,也证实了可持续发展情景与“绿水青山就是金山银山”的发展理念高度契合,是平衡经济发展和生态保护的最优选择,同

时一些易发生冻融侵蚀、水土流失、沙漠化的高生态敏感性区域存在一定潜在生态风险。当前中等发展情景下经济增长放缓,人口处于中等水平,建设用地扩张侵占周边地类,部分中风险区转化为高风险或

较高风险。高速发展情景下经济高速发展的同时过度开发化石燃料资源,ESV最低,高、较高风险区域比例最大。因此,未来发展过程中应在保障经济发展的同时重视生态用地的保护,注重分区域生态保护与建设,合理开展资源开发与利用。

3.3 政策指导

由于各 SSP-RCP 情景矩阵下气候因素和社会经济因素各不相同,不同情景下 ESV 变化和区域生态风险程度不同,虽然研究结果的精度还需提高,但对国土空间规划和区域治理提供了一定的参考。研究表明单位面积 ESV 整体呈现“东南高、西北低”的空间分布特点,未来发展过程中应重视 ESV 高值区,充分发挥区域自然条件优势,在东南丘陵、云贵高原、东北小兴安岭及长白山山脉等植被覆盖度高的地区,加强水土保持与生态用地保护;同时提升 ESV 中值和低值区,在京津冀、关中等城市群划定城市扩张红线和生态范围,加强城市群生态整合和保护;西北部地区草地退化严重区域退牧还草,划定轮牧区和禁牧区,防止水土流失和土地沙漠化,提高生态系统稳定性。从 ER 来看,长白山脉、太行山脉、云贵高原以及东南丘陵部分地区植被覆盖度高,生态系统较为稳定,主要表现为低和较低风险,但部分地区存在水土流失严重、地质灾害敏感性高等生态问题,如云南省临沧市、普洱市、西双版纳傣族自治州等,应严格控制开发强度,减少人为活动的干扰;中风险区域主要是农产品提供区和人居保障区,应解决城市扩张引起的 ER 变化,加强国土空间规划与管理,确保土地利用与生态系统的平衡性;高风险区域主要位于西藏土地沙漠化和冻融侵蚀敏感性程度高以及新疆、内蒙古西北部等未利用地比例大、气候干旱、沙漠化程度高的地区,应加大自然保护区管理力度,实施生态移民、退牧还草工程。

4 结论

(1) PLUS 模型具有较高可靠性和较好适用性,3 种情景下,土地利用类型面积变化存在差异,但空间分布具有相似性。可持续发展情景下林地、草地面积均有一定的增长,而高速发展情景下,草地减少速率最快;土地利用具有明显的空间聚集效应,林地、耕地和建设用地区主要分布于东南部地区,西北部向草地过渡,新疆和内蒙古西部有大量未利用地。

(2) 2030 年 ESV 表现为:可持续发展情景 > 当前中等发展情景 > 高速发展情景。受土地利用格局影响,单位面积 ESV 空间上呈“东南高,西北低”的特点,这与中国植被的地带性分布梯度基本一致;东南

部地区由于人类活动频繁,不同情景下单位面积 ESV 高低值分布差异明显。从各项生态系统服务价值来看,调节服务 ESV 变化最大,供给、支持服务次之,文化服务变化最小,不同情景下单位面积各项 ESV 空间分布呈现“整体一致性,局部差异性”特点。

(3) 2030 年 3 种情景下中国生态风险以低、较低及中风险为主。低和较低风险区主要位于东南部林地覆盖度高且土地利用呈现稳定趋势的地区,高和较高风险区主要位于西北部未利用地比例大的新疆及草地面积比例大但生态敏感性高的西藏部分市区;相较于可持续发展情景,当前中等发展、高速发展情景在耕地、建设用地面积大且人类活动频繁的华北、华中、华东部分地区低或较低风险转换为中或较高风险。

(4) 整体来看,可持续发展情景较为可取,在保持较高经济和城市化发展的基础上,整体 ESV 最高,处于低或较低风险的区域比例最大;当前中等发展情景下 ESV 及 ERI 均处于中间水平;高速发展情景下经济高速发展,过度依赖化石燃料资源,整体 ESV 最低,相应的高、较高风险区域比例也最大。

另外,本文考虑到地理区域及不同情景下气候的差异性,采用 NPP 代替生物量对当量因子表进行修正,并计算了建设用地 ESV,弥补了当期研究中将其设置为 0 导致的城市绿化及生态公园 ESV 被低估的不足;但同时应注意到土地利用受国家及地方政策等多因素影响,如何进一步提高预测结果的精度和分析 ESV 空间分布特征尺度效应仍需深入探讨。

参考文献 (References)

- [1] Wang Jiali, Zhou Weiqi, Pickett S T A, et al. A multi-scale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 662: 824-833.
- [2] Gong Jie, Liu Dongqing, Zhang Jinxi, et al. Tradeoffs/synergies of multiple ecosystem services based on land use simulation in a mountain-basin area, western China [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 283-293.
- [3] Wu Kaisheng, Wang Dong, Lu Haiyan, et al. Temporal and spatial heterogeneity of land use, urbanization, and ecosystem service value in China: A national-scale analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 418: 137911.
- [4] 张静,秦公伟,成升魁,等. 汉江生态经济带景观生态风险与生态系统服务价值的时空变化及关联性[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(4): 294-306.
Zhang Jing, Qin Gongwei, Cheng Shengkui, et al. Spatiotemporal changes and correlation between landscape ecological risk and ecological service value in Hanjiang

- eco-economic belt [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(4):294-306.
- [5] 景晓栋, 田贵良, 班晴晴, 等. 基于文献计量的21世纪以来我国生态系统服务研究现状及发展趋势[J]. *生态学报*, 2023, 43(17):7341-7351.
Jing Xiaodong, Tian Guiliang, Ban Qingqing, et al. Research status and development trend of ecosystem services in China since the 21st century based on bibliometrics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(17):7341-7351.
- [6] Wang Zongming, Mao Dehua, Li Lin, et al. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 1992—2012 in the Sanjiang Plain of China [J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 514:119-130.
- [7] 周婷, 蒙吉军. 区域生态风险评价方法研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(4):762-767.
Zhou Ting, Meng Jijun. Research progress in regional ecological risk assessment methods [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(4):762-767.
- [8] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 等. 景观生态风险评价研究进展与展望[J]. *地理学报*, 2015, 70(4):664-677.
Peng Jian, Dang Weixiong, Liu Yanxu, et al. Review on landscape ecological risk assessment [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(4):664-677.
- [9] Wu Yuzhe, Gu Chenzhuo, Zhang Yingnan. Towards sustainable management of urban ecological space: A zoning approach hybridized by ecosystem service value and ecological risk assessment [J]. *Land*, 2022, 11(8):1220.
- [10] 李思荣, 苏同向. 基于保护政策影响的抚仙湖流域景观格局变化及生态系统服务价值响应[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(3):145-154.
Li Sirong, Su Tongxiang. Protection policy impacts on landscape pattern changes and ecosystem service value responses in Fuxian Lake basin [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2024, 48(3):145-154.
- [11] 乔斌, 曹晓云, 孙玮婕, 等. 基于生态系统服务价值和景观生态风险的生态分区识别与优化策略: 以祁连山国家公园青海片区为例[J]. *生态学报*, 2023, 43(3):986-1004.
Qiao Bin, Cao Xiaoyun, Sun Weijie, et al. Ecological zoning identification and optimization strategies based on ecosystem service value and landscape ecological risk: Taking Qinghai area of Qilian Mountain National Park as an example [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3):986-1004.
- [12] Zhang Yuying, Yang Rongjin, Li Xiuhong, et al. Designing a sustainable development path based on landscape ecological risk and ecosystem service value in southwest China [J]. *Sustainability*, 2023, 15(4):3648.
- [13] 陈曦, 叶可陌, 李坤, 等. 资源型城市“三生空间”土地利用变化及其风险和价值研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, 40(5):1111-1120.
Chen Xi, Ye Kemo, Li Kun, et al. Research on land use change and risk-value of “production-living-ecological space” in a resource-based city [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2023, 40(5):1111-1120.
- [14] 王茹, 张先平, 张晓玲, 等. 2000—2020年山西省宁武县生态系统服务价值时空动态研究[J]. *西北林学院学报*, 2024, 39(1):264-272.
Wang Ru, Zhang Xianping, Zhang Xiaoling, et al. Spatiotemporal dynamics of ecosystem service value in Ningwu County, Shanxi Province from 2000 to 2020 [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024, 39(1):264-272.
- [15] 谈旭, 王承武. 伊犁河谷生态系统服务价值时空演变及其驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(10):2747-2756.
Tan Xu, Wang Chengwu. Temporal and spatial evolution of ecosystem service value in Ili Valley and its driving factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(10):2747-2756.
- [16] 冯婧文, 丁雪, 易邦进. 基于GEE的昆明市生态系统服务价值与生态风险变化[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(1):335-345.
Feng Jingwen, Ding Xue, Yi Bangjin. Changes of ecosystem service value and ecological risk in Kunming City based on GEE [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(1):335-345.
- [17] 金一诺, 黄银洲, 尤凤, 等. 基于Markov-PLUS模型的石羊河流域土地利用及生态系统服务价值模拟[J]. *干旱区资源与环境*, 2024, 38(5):130-139.
Jin Yinuo, Huang Yinzhou, You Feng, et al. Simulation of land use and ecosystem service value in Shiyang River basin based on Markov-PLUS model [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024, 38(5):130-139.
- [18] 如克亚·热合曼, 阿里木江·卡斯木, 希丽娜依·多来提, 等. 天山北坡城市群碳储量时空变化及预测研究[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(12):5905-5917.
Reheman·Rukeya, Kasimu·Alimujiang, Duolat·Xilinayi, et al. Temporal and spatial variation and prediction of carbon storage in urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(12):5905-5917.
- [19] 刘志勇, 方朝阳, 蔡振饶, 等. 多情景下鄱阳湖滨湖区生态系统服务价值预测[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(7):218-227.
Liu Zhiyong, Fang Chaoyang, Cai Zhenrao, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ESV for Poyang Lake lakeside area [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(7):218-227.

- [20] 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 Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, 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.
- [21] 谢高地,鲁春霞,肖玉,等.青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J].山地学报,2003,21(1):50-55.
Xie Gaodi, Lu Chunxia, Xiao Yu, et al. The economic evaluation of grassland ecosystem services in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Mountain Research, 2003, 21(1):50-55.
- [22] 王宗明,梁银丽.植被净第一性生产力模型研究进展[J].干旱地区农业研究,2002,20(2):104-107.
Wang Zongming, Liang Yinli. Progress in vegetation NPP model research [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002,20(2):104-107.
- [23] 徐丽芬,许学工,罗涛,等.基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法:以渤海湾沿岸为例[J].地理研究,2012,31(10):1775-1784.
Xu Lifan, Xu Xuegong, Luo Tao, et al. Services based on land use: A case study of Bohai rim [J]. Geographical Research, 2012,31(10):1775-1784.
- [24] Xing Lu, Hu Mingsheng, Wang Yi. Integrating ecosystem services value and uncertainty into regional ecological risk assessment: A case study of Hubei Province, central China [J]. Science of The Total Environment, 2020,740:140126.
- [25] Zhang Shidong, Wu Tong, Guo Luo, et al. Assessing ecological risk on the Qinghai-Tibet Plateau based on future land use scenarios and ecosystem service values [J]. Ecological Indicators, 2023,154:110769.
- [26] Na Li, Zhao Yangling, Feng C C, et al. Regional ecological risk assessment based on multi-scenario simulation of land use changes and ecosystem service values in Inner Mongolia, China [J]. Ecological Indicators, 2023,155:111013.
- [27] 张莉金,白羽萍,胡业翠,等.不同SSP-RCP情景下中国生态系统服务价值评估[J].生态学报,2023,43(2):510-521.
Zhang Lijin, Bai Yuping, Hu Yecui, et al. Valuation of ecosystem services in China under different SSP-RCP scenarios [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (2) : 510-521.
- [28] 陈俊成,李天宏.中国生态系统服务功能价值空间差异变化分析[J].北京大学学报(自然科学版),2019,55(5):951-960.
Chen Juncheng, Li Tianhong. Changes of spatial variations in ecosystem service value in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019,55(5):951-960.
- [29] You Chang, Qu Hongjiao, Zhang Shidong, et al. Assessment of uncertainties in ecological risk based on the prediction of land use change and ecosystem service evolution [J]. Land, 2024,13(4):535.

(上接第 128 页)

- [29] 董焕焕,赵红,邓俊双,等.植被恢复方式对红壤丘陵区弃土场植被生长指标与土壤理化性质的影响[J].环境工程技术学报,2022,12(1):145-152.
Dong Huanhuan, Zhao Hong, Deng Junshuang, et al. Effects of vegetation restoration methods on vegetation growth indexes and soil physical and chemical properties of spoil ground in red-soil hilly region [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1) : 145-152.
- [30] Li Jianming, Li Li, Wang Wenlong, et al. Hydrological and erosion responses of steep spoil heaps to taproot and fibrous root grasses under simulated rainfalls [J]. Journal of Hydrology, 2023,618:129169.
- [31] 周杰,田培,吴宜进,等.大别山区不同水土保持措施配置模式的效益评价[J].水土保持学报,2024,38(6):61-69,78.
Zhou Jie, Tian Pei, Wu Yijin, et al. Benefit evaluation of different allocation modes of soil and water conservation measures in Ta-pieh Mountains area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6) : 61-69,78.