

基于GEE的昆明市生态系统服务价值与生态风险变化

冯婧文¹, 丁雪^{2,3,4}, 易邦进⁵

(1.云南师范大学 信息学院, 云南 昆明 650500; 2.云南师范大学 地理学部,

云南 昆明 650500; 3.云南省高校资源与环境遥感重点实验室, 云南 昆明 650500;

4.云南省地理空间信息技术工程技术研究中心, 云南 昆明 650500; 5.云南省地质科学研究所, 云南 昆明 650051)

摘要: [目的] 研究区域生态系统服务价值和生态风险变化及影响, 为土地资源合理利用及国土空间生态修复提供决策支持。[方法] 以Landsat遥感影像为数据源, 使用GEE(Google Earth Engine)平台随机森林分类方法对云南省昆明市1990—2020年的土地利用变化信息进行提取, 基于解译结果进行空间动态变化分析, 采用当量因子法估算生态系统服务价值, 运用生态风险模型揭示生态风险变化趋势, 并借助双变量空间自相关模型计算二者的相关性。[结果] ①1990—2020年, 昆明市土地利用类型中林地和草地占地面积最大, 建设用地面积明显增加, 耕地、草地和林地面积减少。②昆明市生态系统服务价值总体呈逐年上升趋势, 共上升 3.08×10^8 元, 生态保护政策的有效实施对生态系统服务价值的提升有积极作用; 研究期间生态风险以中、低风险为主, 占总面积的79%, 生态风险总体均值下降了0.12, 城市经济发展与环境保护向良性态势发展。③生态风险对生态系统服务价值变化具有一定的影响。随着时间的推移, 高价值—高风险区面积逐渐减少, 低价值—低风险区面积逐渐增加, 无明显极值。[结论] 将区域生态系统服务价值和生态风险结合, 能够较好地刻画昆明市人类活动所引起的生态环境状况的改变, 为环境保护和高质量的可持续发展提供决策管理参考, 有效防范生态风险, 使昆明市经济发展与环境保护向良性态势发展。

关键词: 土地利用; 土地覆盖; 生态系统服务价值; 生态风险; 相关性; 昆明市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0335-11

中图分类号: F301, X24

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.033; 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.

Changes of Ecosystem Service Value and Ecological Risk in Kunming City Based on GEE

Feng Jingwen¹, Ding Xue^{2,3,4}, Yi Bangjin⁵

(1. School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan

650500, China; 2. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China;

3. Yunnan Provincial Key Laboratory on Resources and Environment Remote Sensing of University, Kunming,

Yunnan 650500, China; 4. Geospatial Information Technology Engineering Research Center of Yunnan Province,

Kunming, Yunnan 650500, China; 5. Yunnan Institute of Geological Sciences, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract: [Objective] The changes and impact of regional ecosystem services and ecological risks were studied in order to provide decision-making support for the rational utilization of land resources and ecological restoration of territorial space. [Methods] Landsat remote sensing images were used with the random forest classification method of the GEE (Google Earth Engine) platform to extract land use change information for Kunming City, Yunnan Province from 1990 to 2020. A spatial dynamic change analysis was carried out based on the interpretation results. The equivalent factor method was used to estimate ecosystem service values. An

收稿日期: 2023-03-19

修回日期: 2023-09-06

资助项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项“利用地理空间技术监测和评估土地利用/土地覆被变化对区域生态安全的影响”(2018YFE0184300); 云南省自然科学基金资助项目“生态文明建设排头兵引领下的云南省三线协调与优化研究”(202101AT070052); 云南省教育厅项目“基于深度学习的滇中城市群LULC遥感信息提取”(2022J0139)

第一作者: 冯婧文(1998—), 女(汉族), 甘肃省华亭市人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境遥感智能信息提取。Email: 2387478740@qq.com.

通信作者: 丁雪(1983—), 男(汉族), 云南省陆良县人, 副研究员, 主要从事资源环境遥感、遥感智能信息处理等方面的研究。Email: dingxue_1983@163.com.

ecological risk model was used to determine the change in ecological risk over time. The correlation between ecosystem service value and ecological risk was calculated with a bivariate spatial autocorrelation model. [Results] ① Among the land use types in Kunming City from 1990 to 2020, forest land and grassland occupied the largest area, the area of construction land increased significantly, and the area of cultivated land, grassland, and forest land decreased. ② The value of ecosystem services in Kunming City showed an overall upward trend over time, with a total increase of 3.08×10^8 yuan. The effective implementation of ecological protection policies increased the value of ecosystem services. Ecological risks during the study period were mainly classified as medium and low risks, and accounted for 79% of the total area. The overall average ecosystem service value decreased by 0.12, indicating that urban economic development had developed with little impact on the environment. ③ Ecological risk had a certain impact on the change of ecosystem service value, and with the passage of time, the area of high-value and high-risk areas gradually decreased, and the area of low-value and low-risk areas gradually increased, without obvious extremes. [Conclusion] The combination of regional ecosystem service value and ecological risk can better characterize changes in ecological environment of Kunming City caused by human activities, and provide decision-making and management references for environmental protection and high-quality sustainable development. effectively prevent ecological risks, and make the economic development and environmental protection of Kunming City develop to a benign situation.

Keywords: land use land cover (LULC); ecological service value; ecological risk; relevance; Kunming City

土地资源承载着人类社会经济发展^[1],与人类生存发展息息相关^[2],土地利用变化作为人类活动与自然演变的重要纽带^[3],影响了生态系统的结构和功能转变^[4],进而影响了其服务价值和风险程度,需要指出的是,不合理的土地利用会导致生态系统结构恶化和生态风险加剧^[5],同时给生态环境的可持续发展带来极大挑战。

生态系统服务价值(ecosystem service value, ESV)是人们对于土地进行开发利用过程中的经济价值和环境价值总称,是生态系统服务内容的市场化表现形式。Costanza R.等^[6]较早地提出了ESV的原理和计算方法。近年来,Haque M. N.等^[7]对孟加拉国达卡都市区土地利用和ESV的关系进行了研究,发现水体、植被和农业用地覆盖面积的下降会导致ESV下降。谢高地等^[8]根据中国实际情况对ESV进行了更全面、更客观的模型构建。许多学者在此基础上展开了研究,Jiang Wei等^[9]对青藏高原ESV的研究表明,河流、湖泊和裸露冰川的减少导致ESV降低,气候变化和人类活动对其也有一定影响。Yuan Keyue等^[10]发现陕西省商洛市商州区土地利用类型中林地对当地ESV的贡献率最高。严长安等^[11]通过探究滇池流域土地利用变化与ESV的定量响应关系对区域生态环境保护提供重要借鉴。上述研究表明,生态系统服务价值评价已形成相对完善的研究范式。

生态风险(ecological risk, ER)是指自然因素及人类活动对生态系统结构的稳定性所产生负面影响

的可能程度^[12],用来评价生态安全情况。Das M.等^[13]利用ER对印度加尔各答城市区域进行研究,结果表明过去20 a间加尔各答及周边城市的ER都大幅增加;Nematollahi S.等^[14]研究发现伊朗中部和东部大约10%~25%研究区域属于高风险和中风险类别;Shen Jianxiu等^[15]指出虽然退耕还林政策实施使得甘肃省正宁县东、中、西部的ER均减小,但是ER防范仍然是研究的重点方向。重视生态风险评价对于化解潜在生态危害,建设生态文明具有现实意义^[16]。

国内外学者已经对ESV和ER展开了大量研究,多数学者把二者作为两个独立的主题开展研究,并取得丰富成果,为ESV和ER相关性的研究奠定了扎实基础。蒋伟峰等^[17]以淮河流域安徽段的土地利用数据为基础,探讨ESV与ER时空演化过程中的异质性和相关性。李辉等^[18]核算近30 a三峡库区ESV和ER的时空分布特征及二者相关性,属于为数不多进行ESV和ER相关性研究的文献。现有研究中,针对生态系统服务价值和生态风险的评估主要表现为将生态系统服务价值引入到生态风险中对其进行应用实践,虽极大程度地提高了评价的时效性,但缺乏两者评价的整体性,对二者的关系影响尚不明确,同时大多数传统评价框架停留在探讨阶段,针对长时期同一区域的相互作用机理研究较少^[19-20]。ESV和ER的相关性研究是两门独立学科走进融合的综合性的研究,两者相结合可以将生态系统服务价值的供需关系融合在一起,及时监测生态环境的变化情

况,精准地对生态风险区开展生态资源保护和国土空间修复,减少生态环境恶化的概率,提高生态系统服务价值,进一步通过构建有效的生态保护模式找寻两者的整体联系^[21]。目前针对长时序生态系统服务价值和生态风险的相关性研究还相对较少,二者的融合可以推动区域生态经济协调发展,是实现关联生态过程和风险评估的重要途径。

土地利用数据是 ESV 和 ER 核算的基础,谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)的出现为准确快速地提取土地利用信息提供可能^[22]。昆明市作为云南省省会城市,过去 30 a 来经济快速发展,人口急剧增长,城市不断扩张,及时掌握该区域土地覆被变化引起的生态系统服务价值和生态风险变化,对土地资源的可持续利用与生态环境保护具有至关重要的现实意义,因研究区地处高原城市,不仅对高原相对发达城市具有借鉴意义,更可为具有相似环境背景的大中城市提供新的研究思路。基于此,本文以 GEE 为依托平台,使用随机森林分类算法(RF)提取了昆明市 1990—2020 年的土地利用信息,并对其 30 a 来生态系统服务价值、生态风险及其空间动态变化进行分析,旨在可为昆明市乃至全国未来经济国土空间规划提供决策支持^[23]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

云南省昆明市位于东经 102°10′—103°40′,北纬 24°23′—26°22′(图 1),地处中国西南、云贵高原中部,是云南省省会、滇中城市群中心,属于亚热带高原气候,四季如春,素有春城之美誉,总面积为 21 012.54 km²,全市下辖 7 个区,3 个县,并且代管 1 个县级市和 3 个自治县,常住人口为 8.46×10⁶ 人,占全省人口的 17.92%,年平均气温 17.0℃,年降水量 522.8 mm(降水、气温数据来源于国家气象科学数据共享服务平台,其他数据来源于 2021,2022 年云南省统计年鉴和昆明市政府网)。

1.2 数据来源

本文研究使用的遥感数据来源于 Google Earth Engine 平台的 1990—2020 年的 Landsat 系列影像数据,其中 1990—2012 年使用的是空间分辨率为 30 m 的 Landsat 5 遥感影像,2013—2020 年使用的是空间分辨率为 30 m 的 Landsat 8 遥感影像,除 2012 年遥感数据采用 1—4 月均值合成数据外,其余年份均采用 1—12 月均值合成数据。行政区边界数据来源于地理国情监测平台(<http://www.dsac.cn/>),计算单位面积生态系统服务价值均值包含的玉米、小麦和水

稻等主要作物的单位面积粮食产量来源于国家统计局(www.stats.gov.cn)和云南省统计年鉴(www.stats.yn.gov.cn)。其中生态系统服务价值核算模型和生态风险核算模型是在 ArcGIS 10.4 软件中将研究区域按 500 m×500 m 进行格网化得到 85 551 个评价单元来核算。

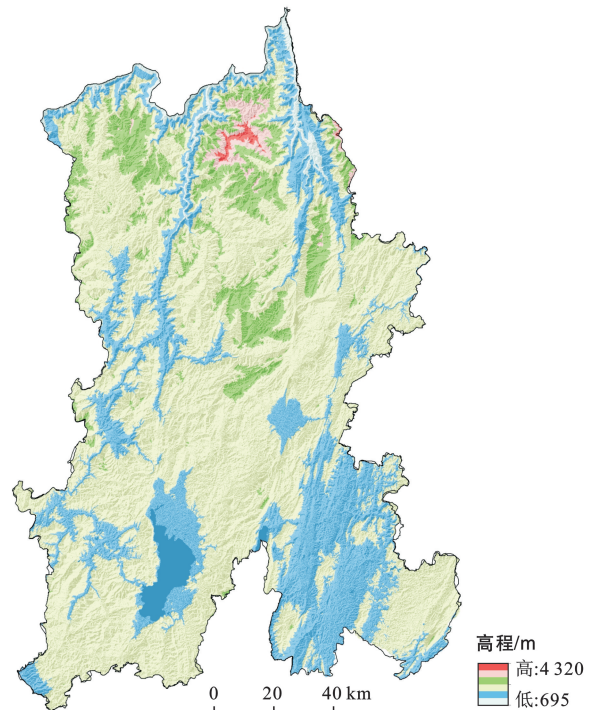


图 1 昆明市地形

Fig.1 Topography of Kunming City

1.3 研究方法

1.3.1 随机森林分类 随机森林分类算法(random forest, RF)是由 Breiman^[24]于 2001 年提出的结合决策树、Bagging 法和随机子空间理论^[25]的一种基于多颗决策树依赖独立采样随机向量值的监督学习算法,是对传统决策树的算法改进。其利用 bootstrap 方法抽取多个样本构造多颗决策树^[26],通过多颗决策树对样本进行训练依靠训练模型对样本类别进行预测^[27],即通过投票产生结果〔式(1)〕。

$$C(x) = a_j, \arg \max_{i=1}^m b_i^j(x) \quad (1)$$

式中: $C(x)$ 表示随机森林模型; b_i 表示第 i 个决策树; a_j 为类别标记。

与单颗决策树相比较,RF 训练样本的随机性很好地避免了过拟合的缺点;与其他机器学习算法相比,RF 具有较强的稳定性,每颗决策树和树中结点特征属性的选择随机性亦使 RF 具有泛化能力强、精度高和速度快等优点。

根据昆明市的实际情况,参考国家标准《土地

利用现状分类》(GB/T 21010—2017),将研究区的土地利用类型分为 6 类,分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地,为保证样本点的数据精度,采用 Google Earth Pro 软件对 1990—2020 年昆明市地物类型进行目视解译,样本点满足均匀分布原则^[28]。基于 Google earth engine 云平台进行 API

编程,为提升分类精度,加入了光谱指数、植被指数、地形特征进行训练,并对训练样本点和验证样本点按照 7:3 的比例采用 RF 算法进行土地利用分类,得到各个年份分类总体精度和 kappa 系数(表 1)。实验结果表明分类结果良好,分类数据能满足后续研究需要。

表 1 昆明市土地利用分类精度

Table 1 Land use classification accuracy in Kunming City

年份	总体精度/%	kappa 系数	年份	总体精度/%	kappa 系数	年份	总体精度/%	kappa 系数
1990	80.04	0.81	2001	83.56	0.80	2012	85.93	0.83
1991	80.65	0.80	2002	85.77	0.82	2013	83.02	0.80
1992	80.40	0.81	2003	83.69	0.80	2014	85.11	0.82
1993	82.12	0.82	2004	84.53	0.81	2015	86.05	0.83
1994	81.96	0.81	2005	84.15	0.80	2016	87.72	0.85
1995	80.20	0.85	2006	84.80	0.81	2017	85.10	0.82
1996	80.05	0.82	2007	84.40	0.80	2018	88.14	0.86
1997	81.14	0.82	2008	84.18	0.80	2019	87.04	0.84
1998	82.93	0.83	2009	86.67	0.84	2020	87.75	0.85
1999	82.78	0.82	2010	85.50	0.82			
2000	83.01	0.80	2011	83.76	0.80			

1.3.2 生态系统服务价值核算模型 目前,ESV 的计算方法主要有基于单位价值的价值功能法和基于单位面积的当量因子法两种,昆明市耕地以水田和旱地为主。本文研究尺度较小,属性近似,自然地理特征表现一致,可以直接采用当量赋值的方法进行核算。根据谢高地等^[8]于 2007 年提出的生态系统服务价值当量表[式(2)],根据徐丽芬等^[29]地区修正公式[式(3,4)],对研究区生态系统服务价值进行修正,计算结果见表 2。

$$E_a = 1/7 \sum_{i=1}^n \frac{m_i p_i q_i}{M} \quad (i=1, 2 \dots n) \quad (2)$$

式中: E_a 表示单位经济价值; i 表示农作物类型;

m_i, p_i, q_i 表示对应粮食类型的面积、均价、单产; M 表示对应粮食的总面积。

$$\varphi = \frac{Q}{Q_0}, E_n = \varphi \times E_{n_0} \quad (3)$$

式中: φ 表示修正因子; Q 和 Q_0 分别表示昆明市和全国单位面积的平均产量; E_n 表示第 n 类地类修正后的当量因子; E_{n_0} 表示谢高地等^[8]已经确定的同种地类当量因子。

$$ESV = \sum_{m=1}^n (A_m \times VC_m) \quad (4)$$

式中:ESV 表示生态系统服务价值; A_m 表示地类 m 所占的面积; VC_m 表示生态系统服务价值的系数。

表 2 昆明市单位面积生态系统服务价值均值

Table 2 Average ecosystem service value per unit area in Kunming City

10⁴ yuan/km²

生态服务类型	单位面积生态系统服务价值					
	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
食物生产	18.31	6.04	7.87	0.00	9.70	4.21
原材料生产	7.14	54.56	6.59	0.00	6.41	3.66
气体调节	13.18	79.10	27.47	0.00	9.34	14.28
气候调节	17.76	74.52	28.56	0.00	37.72	15.56
水文调节	14.10	74.89	27.83	0.00	343.68	14.65
废物处理	25.45	31.49	24.17	0.00	271.90	14.46
保持土壤	26.92	73.61	41.01	0.00	7.51	22.16
维持生物多样性	18.68	82.58	34.24	0.00	62.80	20.87
提供美学景观	3.11	38.08	15.93	6.77	81.30	10.25
合计	144.65	514.88	213.68	6.77	830.36	120.11

1.3.3 土地利用生态风险核算模型 土地利用生态风险用于描述土地结构和风险程度的关系,不同的土地利用类型拥有不同的价值和功能,计算公式为:

$$ER = \sum_{m=1}^n \frac{C_m D_m}{C} \quad (5)$$

式中:ER 表示生态风险;C 表示土地总面积;D 表示土地生态风险强度,根据文献[18],将耕地赋值为 0.36,林地赋值为 0.17,草地赋值为 0.05,水域赋值为 0.05,建设用地赋值为 0.04,未利用土地赋值为 0.02。

运用空间插值法中指数克里金(Kriging)插值法对研究区网格进行插值可得到土地利用生态风险分布情况,基于等间隔分类法(equal interval)将 1990—2020 年研究区生态风险划分为 I(低生态风险)、II(较低生态风险)、III(中等生态风险)、IV(较高生态风险)和 V(高生态风险)5 种模式。

1.3.4 双变量空间自相关模型 空间自相关模型反映各个地类在空间中的聚集性、随机性等相关程度,分为局部自相关和全局自相关^[30]。本文通过 Geoda 软件使用双变量空间分析模型,利用 Moran's I 指数反映土地利用类型的空间关联性,Moran's I < 0,表示空间关联程度为负相关,Moran's I = 0,表示空间关联程度为不相关,Moran's I > 0,表示空间关联程度正相关,计算公式为:

$$I_{ij} = \frac{k \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^k L_{mn} [(x_{m,i} - y_i) / \gamma_i] [(x_{m,j} - y_j) / \gamma_j]}{(n-1) \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^k L_{mn}} \quad (6)$$

式中: I_{ij} 为单位面积的双变量全局自相关系数; L_{mn} 表示地理单元相互邻接关系的权重矩阵,空间权重能根据邻接标准和距离标准度量,邻接标准将空间单元定义为 1,不连接的定义为 0,距离标准将一定范围内定义为 1,距离之外定义为 0; i 表示生态系统服务价值; j 表示生态风险; $x_{m,i}$ 和 $x_{m,j}$ 分别表示第 m 个单元内的生态系统服务价值和生态风险; γ 表示方差。

运用斯皮尔曼(Spearman)相关分析 ESV 与 ER 间的相关关系,参考文献[18],显著性系数定为 0.01,

依据空间分布关系具体分为不显著和显著两种模式,显著又细分为高价值—高风险、低价值—低风险、低价值—高风险和高价值—低风险 4 种模式。

2 结果与分析

2.1 昆明市土地利用类型变化分析

1990—2020 年,林地和草地均为昆明市土地利用占比最大的部分,截至 2020 年林地和草地分别占全市总面积的 44.96%,27.64%(表 3—4)。30 a 间,昆明市耕地面积不断减少,减少了 8.78%,建设用地大幅度增加,增加了 195.79%,水域和未利用地分别增加了 44.85,2.5 km²。由于受气候变化和人类活动影响,1990—2020 年昆明市各用地类型变化明显,草地主要转换为林地,转换面积为 263.48 km²,对应的转移率为 4.29%,林地大面积增加的原因在于积极响应国家植树造林、生态修复政策,将草地逐步转换为更适宜当地发展的土地类型;耕地主要转换为建设用地,转换面积为 442.95 km²,对应的转移率 10.16%,林地主要转换为建设用地和耕地,转换面积为 116.47,118.48 km²,对应的转移率为 1.22% 和 1.24%,主要与森林退化、毁林开荒有关;水域和未利用地变化不明显。

2.2 生态系统服务价值空间分布特征

1990—2020 年,昆明市 ESV 在空间分布上基本是相似的,但局部存在差异(图 2)。1990—2020 年,昆明市 ESV 总体呈上升趋势,由 1990 年的 7.21 × 10¹⁰ 元上升至 2020 年的 7.68 × 10¹⁰ 元,上升了 4.70 × 10⁹ 元。生态服务价值增长速率逐年加快,增幅为 6.8%。从空间分布来看,昆明市 ESV 高值区以滇池、阳宗海等水域周围为主,禄劝县北部 ESV 也较高,云龙水库处 ESV 上升最为明显;低值区主要位于建设用地密集区、昆明市主城区及东川植被覆盖较低区域,从土地利用的角度来看,昆明市有效地实施了生态保护政策,使得土地结构分配更加合理,生态得到改善,为城市可持续规划提供了科学参考。

表 3 1990—2020 年昆明市土地利用面积及土地利用动态变化度

Table 3 Land use area and dynamic changes degree of land use in Kunming City from 1990 to 2020

土地类型	面积/km ²				土地变化动态度/%		
	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2020 年
耕地	4 360.14	4 254.87	4 223.45	3 977.78	-0.50	-0.15	-1.17
林地	9 552.71	9 580.94	9 560.83	9 441.03	0.13	-0.10	-0.57
草地	6 146.71	6 137.79	5 967.23	5 803.68	-0.04	-0.81	-0.78
水域	466.90	471.30	486.17	511.75	0.02	0.07	0.12
建设用地	403.37	484.81	688.84	1193.11	0.39	0.97	2.40
未利用地	68.73	68.74	72.19	71.23	0.00	0.02	0.00

表 4 1990—2020 年昆明市土地利用转移矩阵
Table 4 Land use transfer matrix of Kunming City from 1990 to 2020

km²

项目	2020 年面积						总计
	草地	耕地	建设用地	林地	水域	未利用地	
1990 年面积							
草地	5 427.82	194.06	236.51	263.48	19.17	4.46	6 145.50
耕地	118.11	3 636.92	442.95	136.91	24.39	0.48	4 359.75
建设用地	7.25	14.11	376.13	2.02	3.66	0.19	403.37
林地	244.01	118.48	116.47	9 033.28	36.56	1.13	9 549.93
水域	3.38	13.07	20.87	2.84	426.47	0.14	466.77
未利用地	2.11	0.77	0.13	0.49	0.47	64.75	68.72
总计	5 802.67	3 977.42	1 193.06	9 439.02	510.72	71.15	20 994.04

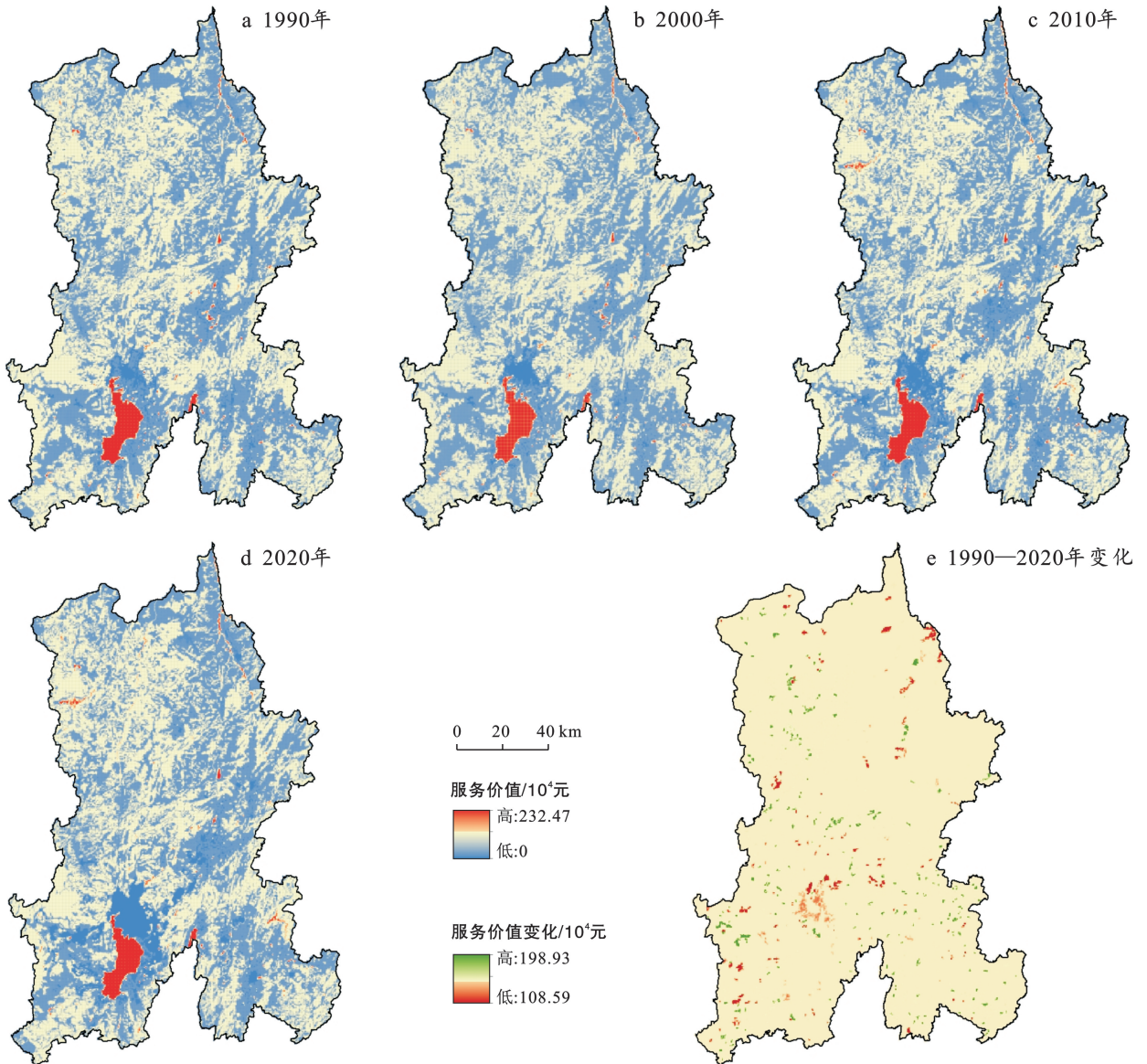


图 2 1990—2020 年昆明市生态系统服务价值空间分异及其变化

Fig.2 Spatial differentiation and changes of ecosystem service value in Kunming City from 1990 to 2020

研究期间,耕地是昆明市生态系统服务价值构成的主体结构(表 5),所占的比例最重,其次为水域和建设用地,草地和林地的 ESV 比例相当,未利用地比例最少。水域的 ESV 呈逐年上升趋势,这主要得益

于昆明市水环境治理取得的显著成效;草地、耕地建设用地 ESV 逐年下降,这是由于森林退化以及昆明市经济快速发展,人口急剧增长和城市不断扩张所导致的。

表 5 1990—2020 年昆明市土地利用类型生态系统服务价值变化

Table 5 Changes in ecosystem service value of land use types in Kunming City from 1990 to 2020

土地利用类型	1990 年		2000 年		2010 年		2020 年	
	ESV/元	比例/%	ESV/元	比例/%	ESV/元	比例/%	ESV/元	比例/%
草地	6.31×10^9	8.75	6.16×10^9	8.46	6.11×10^9	8.26	5.75×10^9	7.49
耕地	4.92×10^{10}	68.23	4.93×10^{10}	67.82	4.92×10^{10}	66.59	4.86×10^{10}	63.30
建设用地	1.31×10^{10}	18.22	1.31×10^{10}	18.03	1.28×10^{10}	17.25	1.24×10^{10}	16.15
林地	3.20×10^7	0.04	3.20×10^7	0.04	3.30×10^7	0.04	3.50×10^7	0.05
水域	3.35×10^9	4.65	4.03×10^9	5.53	5.72×10^9	7.74	9.91×10^9	12.90
未利用地	8.30×10^7	0.11	8.30×10^7	0.11	8.70×10^7	0.12	8.60×10^7	0.11
总计	7.21×10^{10}	100.00	7.27×10^{10}	100.00	7.39×10^{10}	100.00	7.68×10^{10}	100.00

2.3 生态风险变化分析

1990—2020 年昆明市生态风险整体以低风险、较低风险和中等风险区为主(表 6),其所占比例分别 19%,22%和 38%,30 a 来生态风险值持续降低,总体下降 0.12,研究区生态安全状况有所改善。

从空间分布来看,1990—2020 年昆明市生态风险降低区域主要分布在滇池周围,生态风险升高区域较为分散,生态风险降低区域面积占比明显高于生态风险升高区域(图 3)。低生态风险区主要分布在滇池周围和研究区北部及中东部地区,研究期内低生态风险区面积呈上升趋势,主要表现为昆明市主城区城市化较其他区域更快,建设用地聚集成片,稳定

性强,人为及外界干预较少,此外,人们环境保护意识增强,早年间违法砍伐山林破坏山体的现象有所抑制,生态风险得到有效改善,较低风险区面积逐渐上升。中等生态风险区主要分布于研究区植被覆盖密集区,多分布于耕地和林地地带,研究期内面积变化整体稳定。较高生态风险区分布较为分散,多位于中等风险区和高风险区的过渡地带,面积占比趋于稳定。高生态风险区主要分布在城市边缘地带,人为景观和生态景观的交错阻断了生态系统的完整性,一定程度上加大了生态风险,随着时间的推移,高生态风险区面积逐步降低,城市经济发展与环境保护向良性态势发展。

表 6 1990—2020 年昆明市生态风险等级所占比例

Table 6 Proportion of ecological risk levels in Kunming City from 1990—2020 years

等级	ER	各等级 ER 在不同年份所占比例/%				
		1990 年	2000 年	2010 年	2020 年	1990—2020 平均值
I	[0.00,0.20)	0.20	0.21	0.21	0.23	0.19
II	[0.20,0.40)	0.20	0.19	0.20	0.20	0.22
III	[0.40,0.60)	0.38	0.39	0.38	0.37	0.38
IV	[0.60,0.80)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
V	[0.80,1.00]	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10

2.4 生态系统服务价值与生态风险相关性分析

1990—2020 年昆明市 ESV-ER 自相关性以不显著为主,不显著区域面积大于显著区域面积,且在研究期内 ESV-ER 自相关性不显著区与显著区变化幅度都不大,不显著区域面积所占比例在 58.14%~58.83%之间,显著区域所占比例均在 41.17%~

41.86%。显著区域面积以低价值—低风险区、低价值—高风险区为主,但这 4 种模式的变化特点不一样。高价值—高风险区所占面积呈持续缓慢增加,低价值—低风险区呈波浪式微幅增加,低价值—高风险区所占面积持续缓慢减少,高价值—低风险区呈先减少后增加再减少趋势(表 7)。

表 7 1990—2020 年昆明市 ESV-ER 自相关性各类型面积及所占比例

Table 7 Area and proportion of various types of ESV-ER autocorrelation in Kunming City from 1990 to 2020

ESV-ER 自相关性	1990 年		2000 年		2010 年		2020 年		
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	
不显著	12 517.50	58.53	12 434.50	58.14	12 582.00	58.83	12 501.75	58.45	
显著	高价值—高风险	1 046.25	4.89	1 125.50	5.26	1 147.25	5.36	1 305.00	6.10
	低价值—低风险	3 601.00	16.84	3 732.25	17.45	3 599.25	16.83	3 747.25	17.52
	低价值—高风险	3 022.75	14.13	2 951.25	13.80	2 901.25	13.57	2 784.25	13.02
	高价值—低风险	1 200.25	5.61	1 144.25	5.35	1 158.00	5.41	1 049.50	4.91

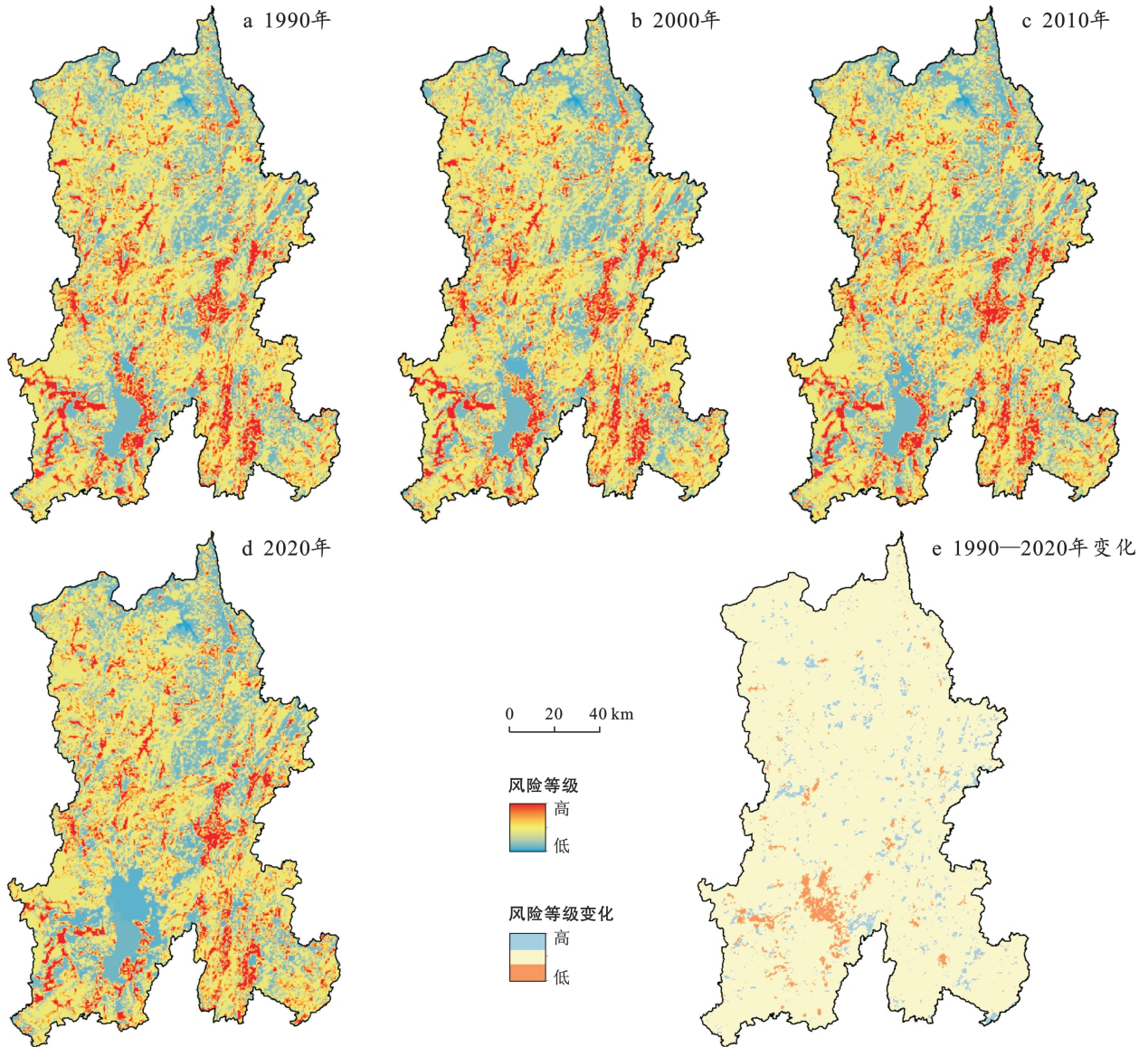


图 3 1990—2020 昆明市生态风险空间分异及其变化

Fig.3 Spatial differentiation and changes of ecological risks in Kunming City from 1990 to 2020

自相关性区域离散分布于研究区整个区域(图4),高价值—高风险区主要零星分布在昆明市西南部和中部地区,由于昆明市积极响应植树造林、生态修复政策,该区域面积逐渐减少。高价值—低风险区主要分布于低价值—低风险区和不显著区的过渡地带,主要表现在滇池和阳宗海等水域区域,由于昆明市生态环境质量有所提高,该区域面积逐渐增加。低价值—高风险区期初主要分布于高价值—高风险区毗邻区域,由于高风险地类的聚类效应,该模式面积逐年减少。低价值—低风险区以林地和草地为主,主要分布在东川区人类活动干扰较低的区域,其ESV主要受生态环境影响,处于相对稳定的状态。不显著区主要分布在研究区北部,土地覆盖以大面积林地和草地为主,土地利用无明显波动。4种类型的ESV-ER

自相关性可以用于反映其空间聚集差异,分析整体空间关联性与差异性,在区域整体生态评估中呈现实践价值。高价值—高风险区的生态质量改善对区域综合治理开发有明显积极作用,应注意保护,减少人为干扰;高价值—低风险及低价值—高风险区受城市土地利用开发影响,在带来较好社会效益的同时,也会导致ESV退化,应增加人造自然景观面积,坚持生态保护和修复,提升部分耕地向林草地转化的概率,维持人口密度较低现状;低价值—低风险区生态系统结构稳定,分布均衡无明显聚集中心。

3 讨论

昆明市是云南省的省会城市,作为云南省唯一的特大城市,过去30a来发展迅速。随着城镇化的快

速推进,城镇化率不断提高,城市扩张显著,土地利用变化剧烈,土地资源比较紧张,资源环境承受着较大压力,土地利用生态风险加剧,城市生态系统服务价值和生态风险受着不同程度的影响,其中高等级生态风险区面积增长则需要引起特别关注,伴随着新发展理念贯彻,土地资源的可持续利用与生态环境保护

的协同发展能力将日渐增强,对昆明市今后的发展而言,避免出现不合理的土地利用,不断提高城市土地利用效率,降低土地利用生态风险,减少土地利用高风险区覆盖的面积,实现高质量可持续发展;在此基础上,本文研究结果将为高原相对发达城市提供借鉴意义,为具有相似环境背景的大中城市提供新的研究思路。

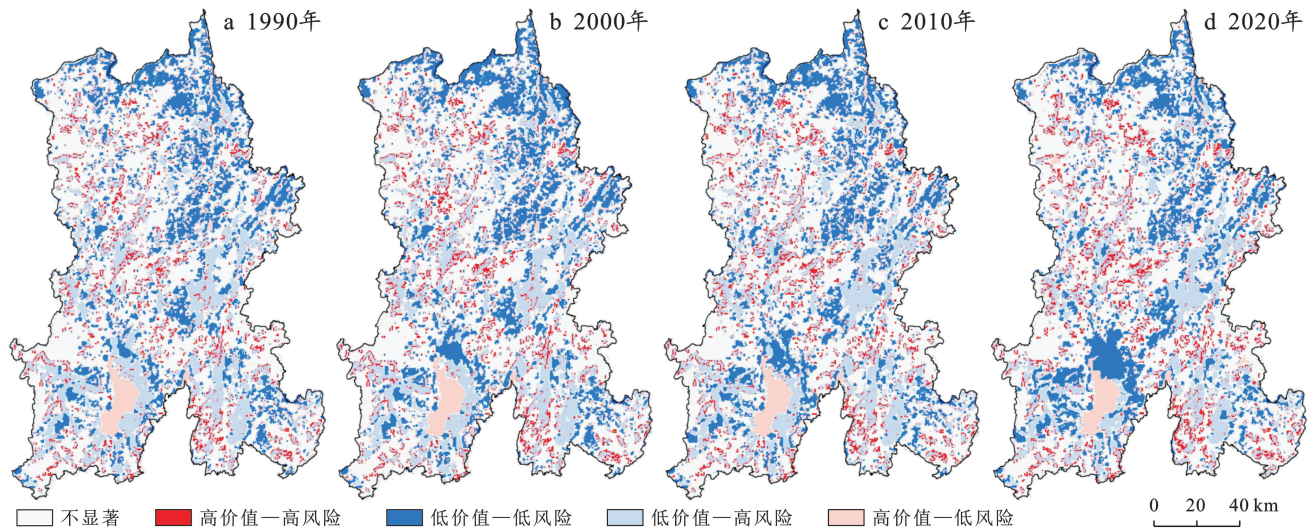


图 4 1990—2020 年昆明市单位面积生态系统服务价值与生态风险自相关分布

Fig.4 Autocorrelation distribution of ecosystem service value per unit area and ecological risk in Kunming City from 1990 to 2020

生态系统服务价值高低是生态环境质量好坏的主要依据,高生态系统服务价值也是生态环境保护的重要方向,昆明市应注重滇池和阳宗海“两湖”生态保育,强化高原湖泊保护治理。生态风险是生态可持续发展的重要评价指标,本研究中昆明市生态风险整体以低、中生态风险为主,生态安全相对整体稳定,与已有研究相契合^[31-32],侧面验证了昆明市生态保护措施实施有效。可以看出,生态系统服务价值和生态风险都与生态环境密不可分,现有研究主要运用已有模型对二者进行独立研究或者将生态系统服务价值引入到生态风险中进行应用实践,双变量空间自相关模型为生态系统服务价值和生态风险二者的整体联系提供了具体量化标准,对于建立完善的生态评价体系具有重要价值。将生态系统服务价值和生态风险有机结合并分析其相关性,可以较好地刻画生态环境变化区域,分析生态功能和风险变化,为区域生态保护和可持续发展提供决策依据,考虑现有研究成果多基于简单的货币量化修正当量因子,未涉及对社会需求、经济发展等变化因素的综合考量,对研究成果有一定影响,针对自然本底脆弱的高原地区生态风险存在的空间复杂性导致二者的空间相关性难以明确其关联机理;同时生态系统服务价值和生态风险均通过土地利用进行评估,两者评价针对各个地物类型缺乏明显

独立性和稳定性,虽有研究表明将二者相关性融入某一固定识别框架对区域生态安全的识别精度有所提升,但其整体影响尚不明确,怎样准确评估还需进一步摸索。目前,从生态系统服务价值—生态风险相关性角度开展研究在研究深度和方法上还处于不断探索阶段,本文侧重于二者研究结果的相互关系研究,厘清两者的内在影响因素同时开展交叉性研究是今后的重点研究方向。

4 结论

(1) 1990—2020 年昆明市土地利用变化显著,耕地大幅退化为草地,减少了 8.77%;建设用地占用耕地现象大幅增加,增幅为 195.79%;草地逐步转换为更适宜当地发展的土地类型,主要流向为林地,转移率为 4.29%。

(2) 昆明市生态系统服务价值和生态风险分布各异。生态系统服务价值呈上升,生态风险呈下降趋势,其中生态系统服务价值上升了 4.70×10^9 元,生态风险总体均值下降 0.12;低生态系统服务价值和高风险生态风险呈局部聚集但聚集程度逐年下降趋势;生态质量整体向好,研究区生态安全状况有所改善。

(3) 生态风险和生态系统服务价值变化具有一定关联。由双变量空间自相关模型分析可知,研究期

间昆明市低价值—低风险区域分布最广且所占比例不断增加,高价值—高风险比例不断减少,自相关性离散分布于研究区整个区域。

[参 考 文 献]

- [1] 张丽,杨国范,刘吉平.1986—2012年抚顺市土地利用动态变化及热点分析[J].地理科学,2014,34(2):185-191.
Zhang Li, Yang Guofan, Liu Jiping. The dynamic changes and hot spots of land use in Fushun City from 1986 to 2012 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014,34(2):185-191.
- [2] 张超,杨艳昭,封志明,等.基于人粮关系的“一带一路”沿线国家土地资源承载力时空格局研究[J].自然资源学报,2022,37(3):616-626.
Zhang Chao, Yang Yanzhao, Feng Zhiming, et al. Spatio-temporal patterns of the land carrying capacity in the Belt and Road region based on human-cereals relationship [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(3):616-626.
- [3] 万炜,魏伟,钱大文,等.土地利用/覆被变化的环境效应研究进展[J].福建农林大学学报(自然科学版),2017,46(4):361-372.
Wan Wei, Wei Wei, Qian Dawen, et al. Progress on the environmental effects of land use and land cover change [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2017,46(4):361-372.
- [4] 吴翠霞,冯永忠,赵浩,等.基于土地利用变化的甘肃省黄河流域生态系统服务价值研究[J].中国沙漠,2022,42(6):304-316.
Wu Cuixia, Feng Yongzhong, Zhao Hao, et al. Study on ecosystem service value of the Yellow River basin in Gansu Province based on land use change [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(6):304-316.
- [5] 江晓波,孙燕,周万村,等.基于遥感与GIS的土地利用动态变化研究[J].长江流域资源与环境,2003,12(2):130-135.
Jiang Xiaobo, Sun Yan, Zhou Wancun, et al. A study on the land use dynamic changes based on remote sensing and GIS [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003,12(2):130-135.
- [6] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.
- [7] Haque M N, Mahi M M, Sharif M S, et al. Changes in the economic value of ecosystem services in rapidly growing urban areas: The case of Dhaka, Bangladesh [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30(18):52321-52339.
- [8] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2003,18(2):189-196.
- [9] Jiang Wei, Lü Yihe, Liu Yuanxin, et al. Ecosystem service value of the Qinghai-Tibet Plateau significantly increased during 25 years [J]. Ecosystem Services, 2020,44:101146.
- [10] Yuan Keyue, Li Fei, Yang Haijuan, et al. The influence of land use change on ecosystem service value in Shangzhou District [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019,16(8):1321.
- [11] 严长安,杨汝兰,付潇华,等.土地利用变化对滇池流域生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2023,43(15):6194-6202.
Yan Changan, Yang Rulan, Fu Xiaohua, et al. Impact of land-use change on ecosystem services value in Dianchi Lake Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15):6194-6202.
- [12] 曹祺文,张曦文,马洪坤,等.景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架:ESRISK[J].地理学报,2018,73(5):843-855.
Cao Qiwen, Zhang Xiwen, Ma Hongkun, et al. Review of landscape ecological risk and an assessment framework based on ecological services: ESRISK [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(5):843-855.
- [13] Das M, Das A, Mandal A. Exploring the factors affecting urban ecological risk: A case from an Indian mega metropolitan region [J]. Geoscience Frontiers, 2023,14(1):101488.
- [14] Nematollahi S, Fakheran S, Jafari A, et al. Applying a systematic conservation planning tool and ecological risk index for spatial prioritization and optimization of protected area networks in Iran [J]. Journal for Nature Conservation, 2022,66:126144.
- [15] Shen Jianxiu, Wang Xiuhong. Spatial-temporal changes in ecological risk of land use before and after grain-for-green policy in Zhengning County, Gansu Province [J]. Journal of Resources and Ecology, 2013,4(1):36-42.
- [16] 李琛,高彬斌,吴映梅,等.基于PLUS模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J].浙江农林大学学报,2022,39(1):84-94.
Li Chen, Gao Binpin, Wu Yingmei, et al. Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS model [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2022,39(1):84-94.
- [17] 蒋伟峰,许艳,李冬花,等.流域生态系统服务价值、生态风险过程及其关联性:以淮河流域安徽段为例[J].水土保持通报,2022,42(3):120-130.
Jiang Weifeng, Xu Yan, Li Donghua, et al. Process and correlation between ecosystem services value and

- ecological risk in river basin: A case study at Huaihe River Basin in Anhui Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(3):120-130.
- [18] 李辉,周启刚,李斌,等.近 30 年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(3):654-666.
- Li Hui, Zhou Qigang, Li Bin, et al. Spatiotemporal change and correlation analysis of ecosystem service values and ecological risk in Three Gorges reservoir area in the past 30 years [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021,30(3):654-666.
- [19] 李俊翰,高明秀.滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J].*生态学报*,2019,39(21):7815-7828.
- Li Junhan, Gao Mingxiu. Spatiotemporal evolution and correlation analysis of ecosystem service values and ecological risk in Binzhou [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(21):7815-7828.
- [20] 康鹏,陈卫平,王美娥.基于生态系统服务的生态风险评价研究进展[J].*生态学报*,2016,36(5):1192-1203.
- Kang Peng, Chen Weiping, Wang Meie. Advances in ecosystem service-based ecological risk assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016,36(5):1192-1203.
- [21] 陆乃静,杨光,张天琪,等.托克托县生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性[J].*西北林学院学报*,2023,38(4):286-294.
- Lu Naijing, Yang Guang, Zhang Tianqi, et al. Spatial and temporal variation of ecosystem service values and correlations of landscape ecological risks in Tokoto County [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023,38(4):286-294.
- [22] 王小娜,田金炎,李小娟,等.Google Earth Engine 云平台对遥感发展的改变[J].*遥感学报*,2022,26(2):299-309.
- Wang Xiaona, Tian Jinyan, Li Xiaojuan, et al. Benefits of Google Earth Engine in remote sensing [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022,26(2):299-309.
- [23] 孙云华,郭涛,崔希民.昆明市土地利用变化的强度分析与稳定性研究[J].*地理科学进展*,2016,35(2):245-254.
- Sun Yunhua, Guo Tao, Cui Ximin. Intensity analysis and stationarity of land use change in Kunming City [J]. *Progress in Geography*, 2016,35(2):245-254.
- [24] Breiman L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001,45(1):5-32.
- [25] 蒲东川,王桂周,张兆明,等.基于独立成分分析和随机森林算法的城镇用地提取研究[J].*地球信息科学学报*,2020,22(8):1597-1606.
- Pu Dongchuan, Wang Guizhou, Zhang Zhaoming, et al. Urban area extraction based on independent component analysis and random forest algorithm [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020,22(8):1597-1606.
- [26] 王笑影,周玉科,温日红.基于 Landsat-8 影像和随机森林方法的土地分类研究[J].*测绘与空间地理信息*,2020,43(11):1-3.
- Wang Xiaoying, Zhou Yuke, Wen Rihong. Study on land cover classification using Landsat-8 images and random forest method [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020,43(11):1-3.
- [27] 陈海洋,孟令奎,周元.基于随机森林的遥感影像雪冰云信息检测方法[J].*测绘地理信息*,2022,47(2):105-110.
- Chen Haiyang, Meng Lingkuai, Zhou Yuan. Ice snow and cloud detection in remote sensing images based on random forest [J]. *Journal of Geomatics*, 2022,47(2):105-110.
- [28] 胡云锋,商令杰,张千力,等.基于 GEE 平台的 1990 年以来北京市土地变化格局及驱动机制分析[J].*遥感技术与应用*,2018,33(4):573-583.
- Hu Yunfeng, Shang Lingjie, Zhang Qianli, et al. Land change patterns and driving mechanism in Beijing since 1990 based on GEE platform [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018,33(4):573-583.
- [29] 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 Lifen, 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.
- [30] 田绍鸿,张显峰.采用随机森林法的天绘数据干旱区城市土地覆盖分类[J].*国土资源遥感*,2016,28(01):43-49.
- Tian Shaohong, Zhang Xianfeng. Random forest classification of land cover information of urban areas in arid regions based on TH-1 data [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016,28(1):43-49.
- [31] 冉玉菊,雷冬梅,刘林,等.滇中城市群 2000—2020 年土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].*水土保持通报*,2021,41(4):310-322.
- Ran Yuju, Lei Dongmei, Liu Lin, et al. Impact of land use change on ecosystem service value in urban agglomeration of central Yunnan Province during 2000—2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(4):310-322.
- [32] 李志英,李媛媛,薛梦柯,等.昆明市景观格局变化及其生态环境效应研究[J].*西南林业大学学报(自然科学)*,2023,43(4):152-163.
- Li Zhiying, Li Yuanyuan, Xue Mengke, et al. The change of landscape pattern and its ecological environment effect in Kunming [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2023,43(4):152-163.