

## 基于土地利用变化的长江上游生态系统服务价值核算 及预测模拟

滕 皎,李 慧,赵彩云,殷晓洁\*,陈 智,高伟杰,李 干

(西南林业大学 林学院,云南 昆明 650224)

**摘 要:**为研究长江上游地区土地利用变化对生态系统服务价值(ESV)的影响,基于 GIS 网格空间可视化表达技术,以土地利用和社会经济为数据源,采用土地利用动态度、ESV 评估模型和空间自相关模型等方法,对研究区土地利用动态度和 ESV 时空变化特征及二者的相关性进行研究。结果表明,1)长江上游地区林地和草地是最主要土地利用类型,2000—2020 年,林地、水域、建设用地、未利用地面积呈现增加趋势,其中建设用地面积在 2020 年较 2000 年增加 148.66%,耕地和草地的面积呈现减少的趋势;2)在 2050 年未来气候情景下各类型土地利用变化差异较为显著,耕地、水域、建设用地和未利用地面积均减少,变化速度最快的是水域,而林地和草地面积呈增大趋势,未来 2 个不同气候情景下的土地利用综合变化速度稳定在 0.80%~0.92%;3)长江上游地区土地利用存在很大开发潜力,2000—2020 年及 2050 年未来气候情景下土地开发以中低强度为主,而高强度等级土地利用聚集分布于四川和重庆,特别在 2050 年未来 2 个气候情景下区域极核分布更为显著,需引起高度重视;4)研究区单位面积 ESV 以中和较高等级为主,总 ESV 稳定在 80 000 亿元以上,呈先增后减的趋势,但空间分异较为显著,其中长江上游中部山地以及青藏高原部分区域单位面积生态系统服务价值较高,而四川、重庆主城区是较低和低级生态系统服务的集中分布区域,在未来气候变化下 ESV 呈下降趋势,中等排放情景 ESV 小于低排放情景 ESV;5)ESV 与综合土地利用强度呈正相关性,空间上主要以高-高聚集、高-低聚集和低-低聚集分布为主,高-高型主要分布于青藏高原和横断山脉的部分地区,高-低型集中分布于经济发展较快的四川、重庆地区,低-低型分布于草地广泛、经济发展较为落后的青藏西北地区。研究结果揭示了长江上游地区 2000—2020 年及未来气候变化下 ESV 与土地利用动态的时空演变规律及其相关性,可为制定科学合理的地区生态保护政策、建立生态保护修复的长效机制提供科学依据。

**关键词:**生态系统服务价值;土地利用动态;GIS;时空特征;长江上游地区

**中图分类号:**S718.56

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2024)02-0274-11

Accounting and Predicting Simulation of the Ecosystem Service Value in the Upper Reaches  
of the Yangtze River Based on Land Use Change

TENG Jiao, LI Hui, ZHAO Cai-yun, YIN Xiao-jie\*, CHEN Zhi, GAO Wei-jie, LI Gan

(College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** To explore the influence of land use change on ecosystem service value (ESV) in the upper reaches of the Yangtze River, the spatial and temporal change characteristics of land use dynamics and ESV in the study area and the correlation between them were investigated based on GIS grid spatial visual representation technology, using land use and socio-economy as data sources, and using land use dynamics, ESV assessment model and spatial autocorrelation model. The results showed that 1) forest and grass lands

收稿日期:2022-12-28 修回日期:2023-05-29

基金项目:国家自然科学基金(31700467);西南林业大学博士科研启动基金(112003)。

第一作者:滕 皎。研究方向:3S 技术在林业中的应用。E-mail:tengj2020@163.com

\* 通信作者:殷晓洁,副教授,硕士生导师。研究方向:全球变化下植被的适应性、脆弱性和地理分布响应。E-mail:xjyinnan@163.com

were the major land use types in the upper reaches of the Yangtze River, and the area of forest land, water area, construction land and unused land showed an increasing trend from 2000 to 2020, among which the area of construction land increased by 148.66% in 2020 compared with 2000, and the area of arable land and grassland showed a decreasing trend. 2) Under the future climate scenario in 2050, the differences of land use changes of each type would be more significant, the area of cropland, water area, construction land and unused land all would decrease, and the fastest change would be in water area, while the area of forest and grass lands would present an increasing trend, and the comprehensive change rate of land use under two different climate scenarios in the future would be stable at 0.80%–0.92%. 3) The land use in the study area had great development potential. The land development during 2000–2020 was mainly in low to medium intensity, so would be in the future climate scenarios of 2050, while the high intensity land use would be concentrated in Sichuan and Chongqing, especially in the future two climate scenarios of 2050, the regional extreme core distribution would be more significant, which needs to pay great attention. 4) The ESV per unit area in the study area was mainly in medium and high levels, and the total ESV was stable above 8 trillion yuan, with a trend of increasing and then decreasing, but the spatial divergence was significant, among them, the value of ecosystem services per unit area was higher in the central mountainous areas in the upper reaches of the Yangtze River and some areas in the Qinghai-Tibet Plateau, while the main urban areas in Sichuan and Chongqing were the concentrated distribution areas with low and medium level ecosystem services, and the ESV would be decreasing under future climate change. 5) ESV was positively correlated with integrated land use intensity, and spatially it was mainly distributed in high-high aggregation, high-low aggregation and low-low aggregation, high-high type mainly distributed in the Qinghai-Tibet Plateau and parts of the Hengduan Mountains, high-low type concentrated in the urban areas of Chongqing, Sichuan, where economic developed highly. The study reveals the spatial and temporal evolution patterns of ESV and land use dynamics in the upper reaches of the Yangtze River in 2000–2020 and under future climate change, which can provide scientific basis for formulating scientific and reasonable regional ecological protection policies and establishing long-term mechanisms for ecological protection and restoration.

**Key words:** ecosystem service value; land use dynamic degree; GIS; spatiotemporal characteristics; the Yangtze River upper reaches

土地资源是人类生存与发展的保障<sup>[1]</sup>。在全球气候变化下,全球地表覆盖正发生快速的变化,对陆地生态系统产生了极大的影响<sup>[2-3]</sup>。土地利用/覆被变化(land use and land cover change, LUCC)是人类活动与自然环境相互作用的结果<sup>[4-8]</sup>。在全球变暖趋势下,森林面积减少且边界向北移动,冰川和冰盖缩小,沿海植被覆盖持续退化,草原和荒漠分布范围向高纬度、高海拔扩张<sup>[9-10]</sup>。同时,人类活动已改变了全球多达一半的陆地表面<sup>[11-12]</sup>,主要表现为,建设用地不断侵占耕地和生态用地,耕地占用生态用地,导致土地利用结构严重失衡<sup>[13-14]</sup>。土地利用的剧烈变化加剧了区域和国家层面可持续发展的压力,严重干扰了生态系统服务功能、地表能量平衡和生物多样性等<sup>[12]</sup>。此外,自 20 世纪中期以来,我国人口数量和社会经济呈现出双增模式,而人口增长和经济发展通常伴随着城镇化扩张,进一步引起景观格局的调整、重组与优化,影响整个生态系统的质量与演变过程,导致生态系统服务价值受损并加剧

了生态风险,严重威胁人类社会可持续发展<sup>[15-16]</sup>。生态系统服务(ecological services, ES)主要分为 4 种类型,包括供给、调节、文化以及支持,指生态系统与生态过程直接或间接产生人类赖以生存不可缺少的生命支持产品和服务<sup>[17]</sup>。自 20 世纪末以来,已有学者对不同尺度的生态系统服务与自然资本价值估算展开了研究,谢高地等<sup>[18-20]</sup>根据中国的基本情况对 ESV 的评估方法进行了多次修正,制定出适合中国国情的 ESV 的基础当量表,为我国区域 ESV 的研究工作提供了计算基础,并在国内得到了广泛应用<sup>[21-24]</sup>。

长江上游地区是我国重要的生态屏障,对中下游的发展以及全流域的生态及水资源安全都至关重要<sup>[25]</sup>。由于长江上游地区土地景观复杂、生态环境脆弱,如何应对人类活动的强烈干扰造成的景观破碎化问题,是该区域当前面临的重要发展问题<sup>[26]</sup>。因此,本研究基于土地利用数据,运用 GIS 空间统计技术,通过构建 ESV 评估模型与土地利用动态评

估模型等,探讨长江上游地区 2000—2020 年及未来气候变化下生态系统服务价值和土地利用动态的时空变化规律和特征,旨在社会经济快速发展的背景下,为实现经济提升和生态保护提出针对性优化管理策略,减轻区域生态系统服务退化,对协调人与自然可持续发展及促进生态环境建设具有重要意义。

## 1 研究区概况

长江上游地区(21°8′—39°20′N,78°25′—110°11′E)包括青海省、西藏自治区、四川省、云南省、贵州省、和重庆市共 6 省(自治区、直辖市),以西高东低之势横跨我国第一、二级阶梯,地貌复杂多样,平均海拔 3 000~5 000 m。长江上游作为我国主要的水源地,立体气候突出,同时存在亚热带湿润季风气候、寒带气候等气候条件,年均温 8~10 °C,年平均降水量 800~1 200 mm。西部地区生物气候垂直差异大,植被类型以常绿阔叶林和常绿落叶阔叶混交林为主,中部地区盆地和山地较多,植被类型以针叶林和常绿阔叶林为主<sup>[23-24]</sup>。长江上游地区拥有丰富的自然资源和人文资源。根据研究区 2000—2020 年的相关统计年鉴,2020 年,第一、二、三产业的比重分别为 11.57%、36.41%、52.02%。2000—2020 年长江上游地区生产总值从 8 929.26 亿元增至 120 858.67 亿元,其中 2010—2020 年生产总值增长迅速,20 a 间人均生产总值从 4 481 元增至 56 283.67 元。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据源

以长江上游地区 2000—2050 年土地利用/覆被为数据源,分别选取 2000、2010、2020 年以及 IPCC SRES 中 2050 年的 2 类情景——A1B、B1,共 5 期土地利用数据,其中 2050 年土地利用/覆被数据选取以下 2 个典型浓度路径情景为数据源:低排放情景(SRES-B1)和中等排放情景(SRES-A1B)。土地利用数据分别来源于资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)和 Li 等<sup>[25]</sup>构建的 2010—2100 年全球 1 km 土地覆被变化数据集整理而得,土地利用类型通过重分类整理为 6 种一级地类形式呈现,6 期土地利用数据通过 ArcGIS 软件按照长江上游地区矢量边界进行裁剪,坐标统一为 WGS\_1984,分辨率为 1 km。研究所涉及的矢量地图来源于标准地图服务系统(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)。

社会经济数据来源于《中国统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》以及长江上游地区 6 个省(自治区、直辖市)的统计年鉴。

### 2.2 研究方法

2.2.1 评价结构单元构建 基于 ArcGIS 平台构建 10 km×10 km 的评价单元网格对长江上游地区 LUCC 类型进行格网化重采样,得到 31 179 个评价单元。基于单元格网分析研究区 2000—2050 年的土地利用动态及 ESV,并采取中心点赋值法进行空间插值,分析其时空分布特征。

2.2.2 土地利用动态变化 引入单一/综合土地利用动态度,并运用土地利用动态指数模型,分别对研究区各类土地利用类型的数量及速度变化进行分析,土地利用动态指数模型<sup>[29]</sup>如下

1)单一土地利用动态模型

$$K = \frac{u_b - u_a}{u_a} \times T^{-1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $K$  为某一种土地利用类型在研究年限内的动态度; $U_a$  和  $U_b$  分别表示研究起始期和研究结束期土地利用类型的面积( $\text{km}^2$ ); $T$  为研究时段。

2)综合土地利用动态模型

$$L_c = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_{u(i-j)}}{2 \sum_{i=1}^n L_{ui}} \right] \times T^{-1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $L_{ui}$  为起始期第  $i$  类土地利用类型的面积; $\Delta L_{u(i-j)}$  为研究期内第  $i$  类土地利用类型转化为非  $i$  类土地利用类型面积的绝对值; $T$  为研究的时间跨度; $L_c$  为整个研究区的土地利用综合变化速率。

2.2.3 土地利用程度指数模型 由于土地利用的变化涉及因素繁多,过程复杂,简化各种抽象模型对于理解和预测土地利用的格局有着不可替代的作用<sup>[30]</sup>。因此,引用土地利用程度指数模型可直接反映自然条件和人类活动对土地利用变化的综合水平和变化趋势<sup>[31]</sup>,参考刘纪远<sup>[32]</sup>土地利用程度的综合分析方法。根据研究区的实际状况,通过 ArcGIS 平台将计算出每个格网单元的土地利用程度指数进行空间克里金插值,将土地利用程度指数由弱到强划分为 5 个等级,即:低( $100 \leq I \leq 150$ )、较低( $150 < II \leq 200$ )、中( $200 < III \leq 250$ )、较高( $250 < IV \leq 300$ )、高( $300 < V \leq 400$ )<sup>[27]</sup>。其计算模型如下

$$L = \sum_{i=1}^n (A_i \times C_i) \quad (3)$$

$$\Delta L_{b-a} = |L_b - L_a| = \left[ \sum_{j=1}^n (A_j \times C_{jb}) - \sum_{j=1}^n (A_j \times C_{ja}) \right] \times 100 \quad (4)$$

式中: $L$  为整个研究区的土地利用程度指数; $A_i$  为研究区内第  $i$  级土地的土地利用程度分级指数; $C_i$

为研究区内第  $i$  级土地面积占整个研究区面积的百分比; $n$  为土地利用程度的分级数; $\Delta L_{b-a}$  为土地利

用变化程度; $L_a$ 、 $L_b$  分别为研究初始期及研究终止期的土地利用程度指数; $A_i$  为第  $i$  级土地利用程度分级指数,其中未利用地为 1,林、草、水域用地级为 2,耕地级为 3,建设用地级为 4; $C_{ib}$ 、 $C_{ia}$  分别为研究初、末时段第  $i$  级土地利用程度的面积比例。

2.2.4 生态系统服务价值核算模型 参照 Costanza 等<sup>[33]</sup>提出的 ESV 评估方法,考虑到中国尺度区域上的差异以及长江上游地区的真实状况,借鉴谢高地等<sup>[18-19]</sup>的相关研究成果,修正了研究区各类型的 ESV 系数,一个 ESV 当量的经济价值为单位面积粮食产值的  $1/7$ <sup>[20]</sup>。为了避免不同年份粮食售价差异引起生态当量因子的波动,因此以 2018 年全国水稻、小麦最低收购的平均价格为研究区 ESV 当量计算的基础数据,其计算公式<sup>[34]</sup>如下

$$E_i = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{O_i P_i Q_i}{M} \tag{5}$$

$$E_{vsi} = \sum A_i \times E_i \tag{6}$$

$$E_{sv} = \sum_i E_{vsi} \tag{7}$$

式中: $E_i$  为价值当量系数(代表第  $i$  类型单位面积 ESV 当量系数的经济价值); $Q_i$  为第  $i$  种粮食作物的面积( $\text{hm}^2$ ); $P_i$  为研究区第  $i$  种粮食作物的平均单产( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ); $Q_i$  为第  $i$  种粮食作物的平均价格; $M$  为粮食作物的总种植面积( $\text{hm}^2$ ); $E_{vsi}$  为第  $i$  类型的服务价值; $A_i$  为第  $i$  类型的土地面积; $E_{sv}$  为总服务价值。本研究粮食平均价格( $2.403 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ )参考危小建等<sup>[23]</sup>的研究结果,利用式(5)核算出长江上游地区价值系数( $1\,531.41 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),利用式(6)、式(7)计算得到长江上游地区生态系统单位面积生态服务价值的平均价值(表 1)。

为计算研究长江上游地区单位格网面积的 ESV,运用 ArcGIS 空间插值分析,根据研究区的实际状况,采用自然断点法将单位面积的 ESV 进行几何间隔分类,共分为 5 级,即低 ESV( $0, 10\,000$ )、较低 ESV( $10\,000, 20\,000$ )、中 ESV( $20\,000, 30\,000$ )、较高 ESV( $30\,000, 40\,000$ )、高 ESV( $40\,000, \infty$ )共 5 个价值等级<sup>[24]</sup>。

表 1 长江上游地区生态系统单位面积生态服务价值平均值

Table 1 Average value of ecosystem services per unit area in the upper reaches of the Yangtze River 元 · hm<sup>-2</sup>

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	1 301.72	444.11	581.94	1 225.14	0	15.31
	原料生产	612.57	1 010.74	857.60	352.23	0	45.94
	水资源供给	30.63	520.69	122.51	12 695.55	0	30.63
调节服务	气体调节	1 026.06	3 323.20	3 016.92	1 179.20	0	168.46
	气候调节	551.31	9 954.30	7 978.75	3 506.97	0	153.14
	净化环境	153.14	2 955.66	2 634.06	8 499.44	0	474.74
	水文调节	413.49	7 258.98	5 850.06	156 573.40	0	321.60
支持服务	土壤保持	1 577.37	4 058.29	3 675.43	1 424.23	0	199.09
	维持养分循环	183.77	306.29	275.66	107.20	0	15.31
	生物多样性	199.09	3 690.75	3 338.52	3 905.15	0	183.77
文化服务	美学景观	91.89	1 623.32	1 470.17	2 894.40	0	76.57

2.2.5 空间自相关模型 运用双变量空间自相关分析模型来分析 ESV 与土地利用程度的空间相关性特征。首先利用全局自相关系数 Moran's  $I$  指数反映其整体空间关联度与差异状况,为了全面、具体地反映研究区各部分之间的空间关联性;其次基于 Geoda 软件构建空间权重矩阵,采用 LISA(local indicators of spatial association)进行局部空间自相关分析,以表述局部集聚和离散效应。根据空间分布关系将空间关联性划分为高-高聚集、高-低聚集、低-高聚集以及低-低聚集 4 种集聚类型。计算公式<sup>[24]</sup>如下

$$I_{vl} = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (\frac{y_{i,v} - \bar{y}_v}{\sigma_v}) (\frac{y_{j,l} - \bar{y}_l}{\sigma_l})}{(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \tag{8}$$

式中: $I_{vl}$  为单位面积生态系统服务价值  $v$  和土地利

用强度指数  $l$  的双变量全局自相关系数; $y_{i,v}$  和  $y_{i,l}$  为第  $i$  个评价单元单位面积生态系统服务价值和土地利用强度指数; $\sigma_v$  和  $\sigma_l$  为方差; $W_{ij}$  为基于空间相邻关系建立的权重矩阵; $n$  为评价单元数量。

3 结果与分析

3.1 长江上游地区土地利用动态变化分析

3.1.1 土地利用类型时空变化分析 由图 1 和表 2 可得,长江上游地区各研究期的土地利用类型面积总体排序为草地>林地>未利用地>耕地>水域>城乡居民用地。其中,草地面积约占全面积的 50%,主要分布于青藏高原高海拔地带,是我国天然草地较大的区域之一;林地主要分布于云南、贵州、四川以及西藏的部分地区;未利用地分布于西藏和青海西北部的高寒地带;而耕地和城乡居民用地分



布于东南部省市,尤其在重庆和四川呈集中分布。

2000—2020 年,林地、水域、建设用地呈现逐年递增的趋势,其中建设用地的变化幅度最大,面积由  $7.2 \times 10^9 \text{ km}^2$  增加至  $1.8 \times 10^{10} \text{ km}^2$ ,增加了 148.66%;而林地和水域分别增长了 7.09% 和 37.62%。由此可得,在长江上游地区居民城镇化快速扩张的同时,各项环境保护措施及政策的实施在

长江上游地区初见成效。耕地和草地的面积呈现出减少的趋势,分别减少了 1.5% 和 18.3%。而未利用地的面积 2010—2020 年由  $4.7 \times 10^{11} \text{ km}^2$  增加至  $6.7 \times 10^{11} \text{ km}^2$ ,增幅 40.93%,增加区域主要位于青藏高原北部。已有研究表明,在全球气候变化下,一些高寒物种的生境丧失会导致其他生态用地向未利用地转变<sup>[7]</sup>。

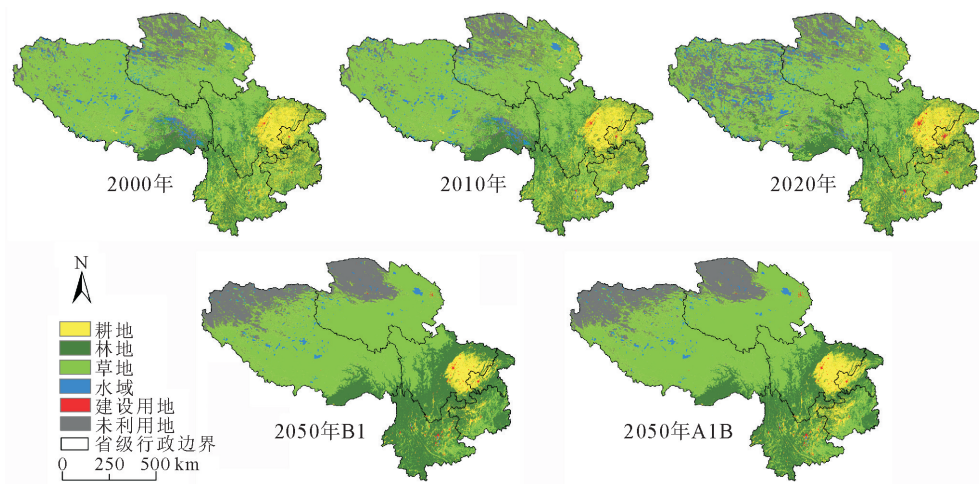


图 1 长江上游地区土地利用类型分布

Fig. 1 Land use type distribution in the upper reaches of the Yangtze River area

表 2 长江上游地区各土地利用类型面积占比

Table 2 The proportion of land use types in the upper reaches of the Yangtze River

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000	9.57	21.72	50.06	2.96	0.24	15.45
2010	9.48	21.79	49.99	3.00	0.30	15.45
2020	9.43	23.25	40.89	4.08	0.59	21.77
2050B1	4.58	27.89	50.10	1.10	0.37	15.95
2050A1B	6.07	24.28	51.78	1.10	0.37	16.39

在 2050 年不同气候情景下,各类型土地利用变化整体表现一致。其中,耕地、水域、建设用地和未利用地面积较 2020 年呈现不同程度的缩减趋势,减少 26.69%~73%;而林地和草地面积呈现出增加趋势,在 2020—2050A1B 和 2020—2050B1 时段,林地分别增加了 4.44% 和 19.96%,草地分别增加 26.62% 和 22.52%。

3.1.2 土地利用类型动态度分析 由单一土地利用动态度可知(表 3),2000—2050 年林地的面积在逐年递增,变化幅度较小,动态度均 $<1\%$ 。耕地动态度为负值,即面积在各时期均有减少,2000—2020 年面积减少速度为  $0.06\% \sim 0.09\%$ ,在未来 2050 年 2 个气候情景下,面积减少速度增至 1.18% 和 1.71%。草地动态度在 2000—2020 年为负值,即呈现为小幅度的减少趋势,而在未来 2050 年 2 个气候情景下均呈小幅度增加趋势。水域、建设用地和未

利用地动态度变化趋势一致,均表现为先增后减,在 2010—2020 年面积增加幅度最大,分别为 3.61%、9.64% 和 4.09%。长江上游地区 2000—2020 年土地利用综合动态度呈增大趋势,2010—2020 年达到 1.83%,表明这 10 a 间人类活动对土地利用的影响最为强烈;2050 年未来气候低、中排放情景下,土地利用综合动态度下降至 0.92% 和 0.80%。

3.1.3 土地利用强度时空变化分析 由表 4 可知,2000—2050 年长江上游地区土地利用强度综合指数总体偏低,介于 188.84~194.63,已有研究表明土地利用强度综合指数 400 为最大值<sup>[35]</sup>,因此长江上游地区土地开发存在很大的潜力。除 2010—2020 年外,长江上游地区各时期的土地利用强度综合指数变化量均为正值,分别为 0.04、1.59 和 0.535 9,即处于发展阶段。2010—2020 年的土地利用强度综合指数下降了一 5.79,表明该时期为调

整期,由于天然草地退化、水域和未利用地扩张、耕地向林地转变等因素造成。

由图 2 可得,长江上游地区的较低土地利用强度面积最大,中等强度次之,高强度所占的面积最少,2000—2020 年高强度面积比例保持稳定增长,因此长江上游地区的土地开发利用为中等偏下水平。5 期土地利用强度空间分布特征具有相似性,土地利用强度等级呈区域化集聚分布,且未来 2 个不同气候情景下空间集聚效应更为明显。其中,高

强度土地利用主要集中分布于四川和重庆,该区域人类开发利用强度大,建设用地分布广,加之建设用地土地利用强度等级指数最高,在未来气候下呈稳定趋势。较低强度土地利用面积占比最大,分布于长江上游大部,2050 年 2 个未来气候情景下与 2020 年相比分别增长了 34.96%和 24.55%,主要因为较低和较高 2 个土地利用强度等级的持续转入;低强度土地利用集中分布于长江上游西北部,在未来气候下明显缩减。

表 3 2000—2050 年长江上游地区各类土地利用动态度

Table 3 Land use dynamic in the upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2050

%

时段	单一土地利用动态度						综合动态度
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2000—2010	—0.09	0.03	—0.02	0.11	2.66	0.00	0.03
2010—2020	—0.06	0.67	—1.82	3.61	9.64	4.09	1.83
2020—2050B1	—1.71	0.67	0.75	—2.43	—1.23	—0.89	0.92
2020—2050A1B	—1.18	0.15	0.89	—2.43	—1.24	—0.82	0.80

表 4 长江上游地区 2000—2050 年各类土地利用强度综合指数

Table 4 The land use degree comprehensive index in the upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2050

年份	2000	2010	2020	2050A1B	2050B1
土地利用强度综合指数	194.593 4	194.634 0	188.840 3	190.424 9	189.376 2
土地利用强度变化量	—	0.040 6	—5.793 7	1.584 6	0.535 9

3.2 长江上游地区生态服务价值时空变化分析

由表 5 可见,2000—2020 年及 2050 年未来气候情景下,长江上游地区总 ESV 稳定在 8 000 亿元以上,并呈先增后减的趋势,在 2010 年 ESV 达到最大(88 694.38 亿元),在 2050 年 A1B 情景下 ESV

最小(81 394.41 亿元)。各类土地利用的 ESV 占比整体表现为草地>林地>耕地>水域>未利用地>建设用地。其中,耕地的 ESV 持续减少,林地的则与之相反;草地的 ESV 呈现出先减后增的趋势,而水域和未利用地的 ESV 表现出先增后减的趋势。

表 5 2000—2050 年长江上游地区各地类生态系统服务价值结构及变化

Table 5 Value structure and change of ecosystem services in the upper reaches of the Yangtze from 2000 to 2050

土地利用类型	价值量划分	ESV/亿元					生态服务价值变化率			
		2000	2010	2020	2050A1B	2050B1	2000—2010	2010—2020	2020—2050A1B	2020—2050B1
耕地	价值量	1 787.67	1 770.79	1 760.89	1 135.82	857.17				
	比例(%)	2.02	2.00	1.99	1.40	1.03	—0.02	—0.01	—0.59	—0.96
林地	价值量	23 213.83	23 293.01	24 858.50	25 984.27	29 844.99				
	比例(%)	26.23	26.26	28.04	31.92	35.77	0.03	1.77	3.89	7.74
草地	价值量	45 378.31	45 310.01	37 075.19	46 986.71	45 461.88				
	比例(%)	51.27	51.09	41.81	57.73	54.49	—0.19	—9.27	15.91	12.68
水域	价值量	17 335.55	17 529.07	23 855.89	6 446.85	6 446.85				
	比例(%)	19.59	19.76	26.91	7.92	7.73	0.18	7.14	—18.98	—19.18
建设用地	价值量	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	比例(%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地	价值量	791.73	791.50	1 115.44	840.76	818.27				
	比例(%)	0.89	0.89	1.26	1.03	0.98	0.00	0.37	—0.23	—0.28
合计	总价值	88 507.09	88 694.38	88 665.91	81 394.41	83 429.16				
	比例(%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00

由图 3 可见,2000—2020 年长江上游地区 ESV 分布较高区域主要位于西北的昆仑山脉和祁连山脉

附近,主要因为该区域分布着大面积的高山草地、寒温性针叶林和湖泊等。青海地区的 ESV 整体偏低,

存在两极分化的现象,这是由于一方面青海湖水系位于柴达木盆地附近,另一方面该区域分布着大量的沙地、高寒山地和裸岩戈壁等。青海北部和四川盆地低的 ESV 水平,主要因为青海北部高寒高海拔地带分布有大量未利用地,而四川盆地主要为城镇居民用地。云南和四川大部以及西藏南部的 ESV 呈较高水平。2050 年 2 个气候情景下的 ESV 总体

空间分布格局基本一致,与 2000—2020 年 ESV 分布相比,未来气候下 ESV 各等级分布更为集中。随着全球气候变暖和社会经济的快速发展,未来气候下四川盆地居民用地的扩张、青藏西北部未利用地的扩张和大面积草原退化等,促使青藏高原北部和四川东部总体 ESV 水平较低。

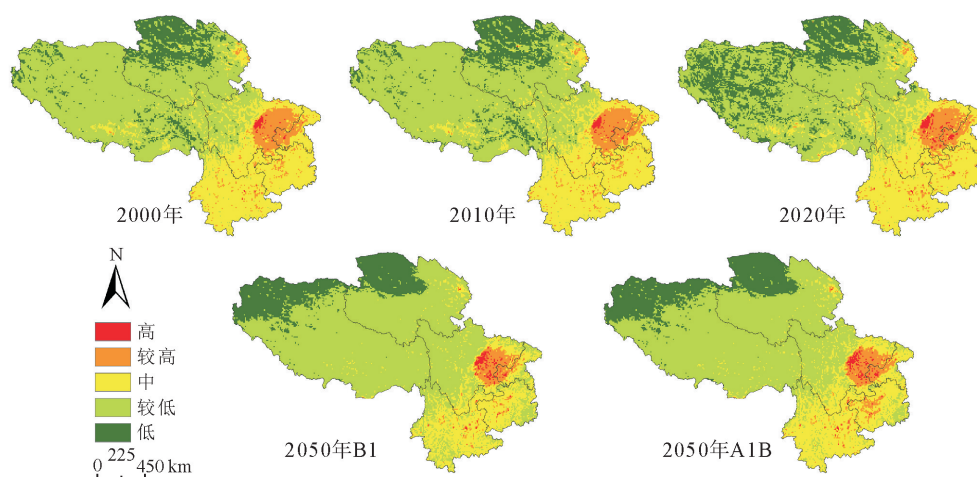


图 2 长江上游地区土地利用强度综合指数

Fig. 2 Comprehensive index of land use intensity in the upper reaches of the Yangtze River

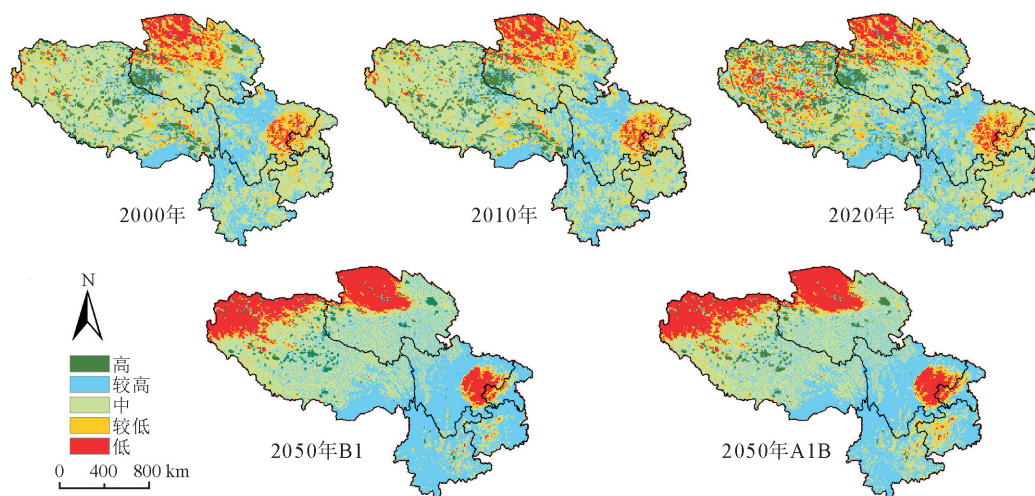


图 3 2000—2050 年长江上游地区单位面积生态系统服务价值时空分布

Fig. 3 Spatiotemporal distribution of ecosystem service value per unit area in the upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2050

### 3.3 长江上游地区生态服务价值与土地利用强度空间自相关分析

通过 Geoda 软件构建空间权重矩阵,得到长江上游地区 2000—2020 年及 2050 年未来气候下的 ESV 与综合土地利用动态度的全局 Moran's  $I$  值(图 4),其结果为 0.039 5、0.037 0、0.040 3、0.370 9、0.340 9,均 $>0$ ,即各时期 ESV 与土地利用综合强度指数均呈正相关。研究区 2000—2020 年的全局 Moran's  $I$  值均较低且变化小,而 2050 年 2 个未来气候情景下的 Moran's  $I$  值增至 0.370 9

和 0.340 9,表明在 2000—2020 年研究区 ESV 与土地利用强度在空间上整体表现较为分散、小范围集聚的特点,这与长江上游地区近年来的城市发展模式及城市扩张方向有一定关系,中心城区由于交通区位优势、地价优势,主要以建设用地为主;而在未来气候变化下 ESV 与土地利用强度的空间自相关性持续增强,由于长江上游地区的建设用地持续扩张与区域生态环境的不协调发展等因素促使空间聚集性持续加强。

根据  $z$  检验结果,绘制 5 个时期 ESV 与综合土



地利用变化动态度的双变量局部空间自相关 LISA 聚集图(图 5)。在空间上呈现出显著空间聚集性,主要表现为高-高型区、高-低型区以及低-低型聚集较为显著。高-高型主要分布于青藏高原和横断山脉的局部地区,其土地利用强度高,ESV 也较高,由于空间分布与长江上游地区高原湖泊水系分布大体一致,当单元网格地类由大面积的水域与建设用地混合组成时,可能出现高-高型分布情况;高-低型聚集广泛分布于四川、重庆地区,2000—2050 年斑块

整体数量处于稳定状态,2050 年 SRES-B1 气候情景有明显下降;低-高型零星分布于西藏地区,多出现于湖泊、湿地等区域,在 2000—2020 年斑块数量较为稳定,但在 2050 年未来气候情景下大幅下降;低-低型集聚分布特征较为突出,特别在未来 2 个不同气候情景下青海、西藏西北部呈现大量斑块集聚分布,主要由于该区域处于高纬度高海拔区域,人类活动强度较小,加之全球气候变暖的影响,大量林地、草地退化致使 ESV 较低。

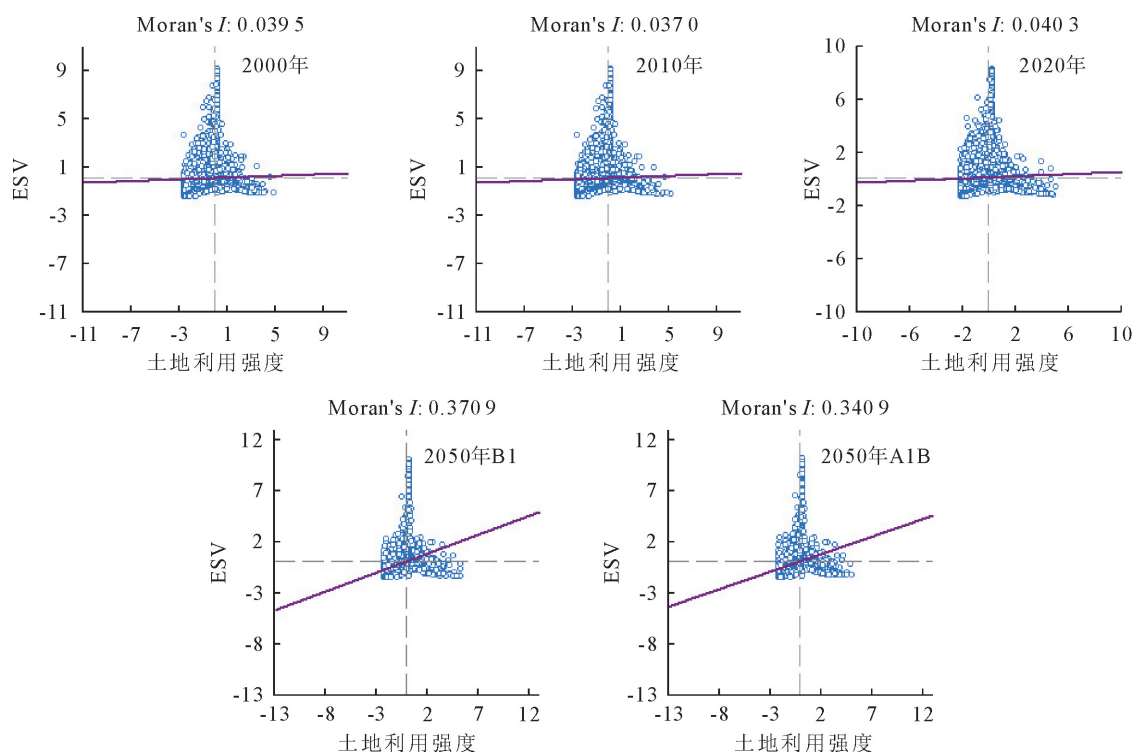


图 4 长江上游地区土地利用强度水平与生态系统服务价值全局相关性

Fig. 4 Global spatial correlation map of land use degree level and ecosystem service value in the upper reaches of the Yangtze River

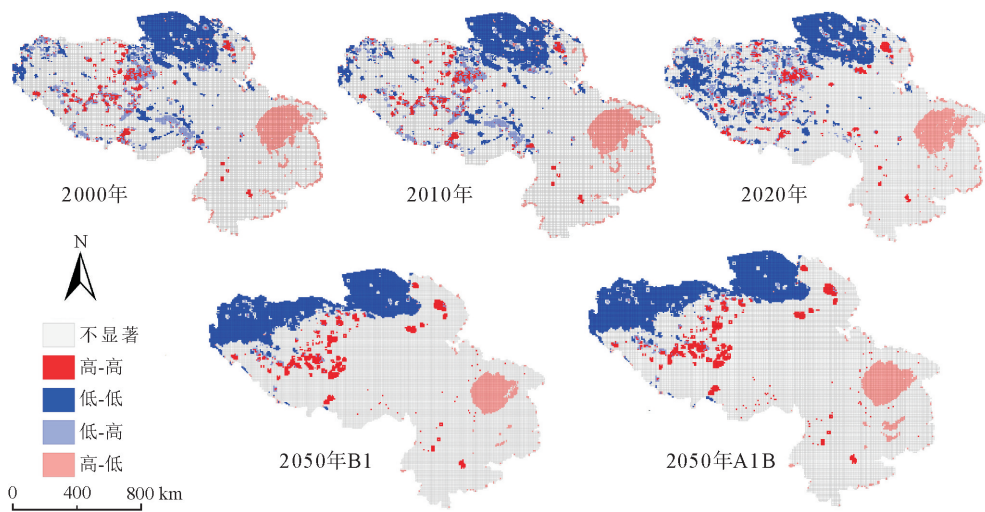


图 5 长江上游地区土地利用强度与生态系统服务价值双变量 LISA 聚集图

Fig. 5 Local spatial autocorrelation LISA results of land use degree level and ecosystem service value in the upper reaches of the Yangtze River



## 4 讨论

基于单元格网法与空间自相关分析确定土地利用动态变化对 ESV 空间分布格局特征,在厘清二者相关性上具有重要的作用<sup>[36]</sup>。在以往研究中,研究尺度上多以网格法(1 km×1 km、3 km×3 km、4 km×4 km、5 km×5 km、10 km×10 km、35 km×35 km)、流域、县域等为主<sup>[23-24,30,36-38]</sup>,网格单元评价法相比流域及行政区等尺度更为精细<sup>[36]</sup>,考虑到研究区的实际情况以及参考已有研究成果<sup>[38]</sup>,本研究基于 10 km×10 km 单元网格将长江上游(6 个省、自治区、直辖市)大尺度区域的土地利用动态评估和 ESV 评价进行有机结合,虽然已有学者对长江流域 ESV 进行了多方位、多角度的研究<sup>[39-40]</sup>,但基于未来气候变化下土地利用变化对 ESV 响应的相关研究鲜有报道,在一定程度上能够较好地反映出人类活动所引起土地利用变化导致生态环境状况的响应特征,对生态保护以及人居环境高质量可持续发展规划可提供理论决策和管理参考。

综上,本研究仍存在一些不足,中国陆地生态系统单位面积生态服务价值表<sup>[18-20]</sup>测算长江上游地区 ESV,未根据研究区实际粮食平均价格制定出适用于长江上游地区的陆地生态系统单位面积生态服务价值表,导致测算有所误差,在今后的研究中仍需进一步加强。此外,土地利用数据来源于已有的产品数据,空间分辨率为 1 km,而川西滇北藏东南的山区存在特殊的地形地貌,造就了复杂多样的生态景观,这也对后续研究中土地利用数据的分辨率提出了更高要求<sup>[38]</sup>。而未来气候情景下的土地利用数据空间聚集性更为显著,导致未来气候情景下的 ESV 和土地利用强度与土地利用空间格局表现出一致性,一方面由于未充分考虑到与其他环境模型的紧密耦合,另一方面未来土地利用数据是模拟全球未来气候情景下的变化,用于局部相关研究可能影响精度<sup>[28]</sup>。

## 5 结论

长江上游地区主要以草地和林地为主,占比约 70%。2000—2020 年,林地、水域、建设用地呈现出逐年递增的趋势,其中建设用地面积增幅达 148.66%,其动态度为 9.64%;耕地和草地的面积呈现递减的趋势;未利用地面积表现为先稳后增。特别在 2010—2020 年长江上游地区土地利用综合动态度增至 1.83%,其中水域、建设用地和未利用地单一土地利用动态度均表现为先增后减,在 2010—2020 年面积增加幅度最大,分别为 3.61%、9.64%和

4.09%,各种地类演变处于较为复杂的状态。

2050 年 2 个气候情景土地利用变化整体表现一致,较 2020 年,耕地、水域、建设用地和未利用地均有减少,其中,水域面积变化速度最快,动态度为-2.43%。林地和草地呈小幅增长,土地利用综合动态度稳定于 0.80%~0.92%,但各类土地利用类型动态度存在明显差异,因此需要引起相关部门的重视,及时因地施策以缓解气候变化下生态用地与经济发展间的矛盾。

长江上游地区土地利用存在很大的开发潜力,2000—2020 年及 2050 年未来气候情景下土地强度以中低等级为主,但土地利用强度等级呈区域化聚集分布,高强度土地利用主要集中分布于四川和重庆,特别在 2050 年未来气候情景下区域极核分布更为显著,需引起高度重视。

2000—2050 年长江上游地区单位面积 ESV 主要以中和较高等级为主,空间分异特征比较明显,其中长江上游中部山地以及青藏高原部分区域单位面积 ESV 较高,而四川、重庆大部是较低和低级 ESV 的集中分布区域。

长江上游地区 ESV 与综合土地利用强度整体上呈正相关,5 个时期 Moran's *I* 值为 0.039 5、0.037 0、0.040 3、0.370 9、0.340 9。空间分布格局上主要呈现高-高聚集、高-低聚集和低-低聚集,高-高型主要分布于青藏高原和横断山脉的局部地区,高-低型集中分布于经济发展较快的四川、重庆地区;低-低型则分布于草地广泛经济发展较为落后的青藏西北地区。这表明社会经济的发展、土地利用格局的变化一定程度上影响着生态系统结构和功能的转变。当地政府部门应结合实际情况,通过加大对生态系统的保护力度,采取有效措施保证土地合理规划,统筹好社会、经济、生态三者的和谐发展。

## 参考文献:

- [1] 汪芳,苗长虹,刘峰贵,等.黄河流域人居环境的地方性与适应性:挑战和机遇[J].自然资源学报,2021,36(1):1-26.  
WANG F, MIAO C H, LIU F G, *et al.* The locality and adaptability of human settlements in the Yellow River basin: challenges and opportunities[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 1-26. (in Chinese)
- [2] GARDNER A S, MOHOLDT G, WOUTERS B, *et al.* Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago[J]. Nature, 2011, 473(7347): 357-360.
- [3] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, *et al.* Global change and the ecology of cities[J]. Science, 2008, 319(5864): 756-760.
- [4] LIU J, ZHANG Z, XU X, *et al.* Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century

- [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(4): 483-494.
- [5] ZHAO H F, HE H M, WANG J J, *et al.* Vegetation restoration and its environmental effects on the Loess Plateau[J]. Sustainability, 2018, 10: 4676.
- [6] 程腾辉, 范文义, 吴国明. 多时相 PolInSAR 数据土地覆盖类型分类研究[J]. 森林工程, 2022, 38(5): 10-17.
- [7] 毛靓, 贾京默. 黑龙江县域农林用地景观格局变化特征[J]. 森林工程, 2022, 38(2): 44-53.
- [8] 陈媛媛, 雷鸣, 王泽远, 等. 基于 Sentinel 卫星影像的土地利用类型提取——以丽水市莲都区为例[J]. 森林工程, 2022, 38(2): 54-61.
- [9] RAPER S C B, BRAITHWAITE R J. Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming[J]. Nature, 2006, 439(7074): 311-313.
- [10] 陈发虎, 汪亚峰, 甄晓林, 等. 全球变化下的青藏高原环境影响及应对策略研究[J]. 中国藏学, 2021(4): 21-28.
- [11] VINA A, MCCONNELL W J, YANG H B, *et al.* Effects of conservation policy on China's forest recovery[J]. Science Advances, 2016, 2(3): 1500965.
- [12] FOLEY J A, DEFRIE R, ASNER G P, *et al.* Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309(5734): 570-574.
- [13] VLIET J V. Direct and indirect loss of natural area from urban expansion[J]. Nature Sustainability, 2019, 2: 755-763.
- [14] VLIET J V, EITELBERG D A, VERBURG P H. A global analysis of land take in cropland areas and production displacement from urbanization[J]. Global Environmental Change, 2017, 43: 107-115.
- [15] XIE H L, HE Y F, CHOI Y R, *et al.* Warning of negative effects of land-use changes on ecological security based on GIS[J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: 135427.
- [16] LI Z, JIANG W G, WANG W J, *et al.* Ecological risk assessment of the wetlands in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106677.
- [17] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [18] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008(5): 911-919.
- XIE G D, ZHEN L, LU C X, *et al.* Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919. (in Chinese)
- [19] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, *et al.* The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746. (in Chinese)
- [20] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3): 10-13.
- XIE G D, XIAO Y, ZHEN L, *et al.* Study on ecosystem services value of food production in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 10-13. (in Chinese)
- [21] 陈兵飞, 廖铁军, 张莉坤. 生态红线约束下万州区土地利用情景模拟及生态价值评估[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 349-357, 364.
- CHEN B F, LIAO T J, ZHANG L K. Simulation of land use situation and ecological value assessment in Wanzhou district under the constraints of ecological red line[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 349-357, 364. (in Chinese)
- [22] 李曼, 郭俊莉, 刘焕才. 乌鲁木齐河流域中下游生态系统服务价值动态变化[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3): 48-54.
- LI M, GUO J L, LIU H C. Dynamic changes of a ecosystem service values of in the middle and lower reaches of the Urumqi River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(3): 48-54. (in Chinese)
- [23] 危小建, 赵莉, 程朋根, 等. 中国土地利用与生态服务价值空间动态研究——以地级及以上城市为例[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 370-376.
- WEI X J, ZHAO L, CHENG P G, *et al.* Research on the spatial dynamics of land use and ecological service value in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 370-376. (in Chinese)
- [24] 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 H, ZHOU Q G, LI B, *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. (in Chinese)
- [25] 方一平, 朱冉. 推进长江经济带上游地区高质量发展的战略思考[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(8): 988-999.
- [26] 程根伟, 石培礼. 长江上游森林涵养水源效益及其经济价值评估[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(4): 17-20.
- [27] 黄真理, 王毅, 张丛林, 等. 长江上游生态保护与经济发展综合改革方略研究[J]. 湖泊科学, 2017, 29(2): 257-265.
- [28] LI X, CHEN G Z, LIU X P, *et al.* A new global land-use and land-cover change product at a 1-km resolution for 2010 to 2100 based on human-environment interactions[J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017, 107: 1040-1059.
- [29] 黄钰清, 李骁尧, 于强, 等. 1995—2018 年黄河流域土地利用变化及驱动力分析[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(6): 113-121.
- HUANG Y Q, LI X Y, YU Q, *et al.* An analysis of land use change and driving forces in the Yellow River basin from 1995 to 2018[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(6): 113-121. (in Chinese)
- [30] 何改丽, 李加林, 刘永超, 等. 1985—2015 年美国坦帕湾流域土地开发利用强度时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(1): 66-79.
- HE G L, LI J L, LIU Y C, *et al.* Spatio-temporal analysis of land development and utilization intensity in Tampa Bay watershed from 1985 to 2015[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(1): 66-79. (in Chinese)
- [31] LAMBIN E F, TURNER B L, GEIST H J, *et al.* The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths[J]. Global Environmental Change, 2001, 11(4): 261-269.
- [32] 刘纪远. 国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J]. 遥感学报, 1997(3): 225-230.
- LIU J Y. Study on national resources & environment survey and dynamic monitoring using remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 1997(3): 225-230. (in Chinese)

- [33] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [34] 王颖慧, 丁建丽, 李晓航, 等. 伊犁河流域土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响——基于强度分析模型[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3106-3118.  
WANG Y H, DING J L, LI X H, *et al.* Impact of LUCC on ecosystem services values in the Yili River basin based on an intensity analysis model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(8): 3106-3118. (in Chinese)
- [35] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. *自然资源学报*, 1997(2): 105-111.  
ZHUANG D F, LIU J Y. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2): 105-111. (in Chinese)
- [36] 杨光宗, 吕凯, 李峰. 基于格网尺度的南昌市土地利用变化及生态系统服务价值时空相关性分析[J]. *中国土地科学*, 2022, 36(8): 121-130.  
YANG G Z, LÜ K, LI F. Spatial and temporal correlation analysis of land use change and ecosystem service value in Nanchang City based on grid scale[J]. *China Land Science*, 2022, 36(8): 121-130. (in Chinese)
- [37] 马国强, 李秋洁, 张蓉, 等. 抚仙湖流域景观格局及生态系统服务价值的动态变化[J]. *西北林学院学报*, 2023, 38(2): 265-272.
- MA G Q, LI Q J, ZHANG R, *et al.* Dynamic changes of landscape pattern and ecosystem service value in the Fuxian Lake basin[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(2): 265-272. (in Chinese)
- [38] 路中, 雷国平, 郭一洋, 等. 不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(5): 1894-1906.  
LU Z, LEI G P, GUO Y Y, *et al.* Changes of land use intensity in the Songnen Plain of different spatial scales and their effects on climatic factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5): 1894-1906. (in Chinese)
- [39] 龙凤. 长江中上游地区土地利用变化及其生态系统服务价值研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2015.
- [40] 陈万旭, 李江凤, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 325-337.  
CHEN W X, LI J F, ZHU L J. Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the middle Yangtze River region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2): 325-337. (in Chinese)
- [41] 滕蛟, 李慧, 陆双飞, 等. 西南地区寒温性针叶林乔木对气候变化的响应[J]. *西北林学院学报*, 2023, 38(2): 33-44.  
TENG J, LI H, LU S F, *et al.* Responses of cold-temperate coniferous forest to climate change in southwestern China[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(2): 33-44. (in Chinese)

(上接第 236 页)

- [17] 张卓然, 唐晓岚, 贾艳艳. 保护地空间分布特征与影响因素分析——以长江中下游为例[J]. *安徽农业大学学报*, 2017, 44(3): 439-447.  
ZHANG Z R, TANG X L, JIA Y Y. Spatial distribution characteristics and influencing factors of protected areas—a case of middle and lower reaches[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, 44(3): 439-447. (in Chinese)
- [18] 刘凯, 聂格格, 张森. 中国 1951—2018 年气温和降水的时空演变特征研究[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(11): 1113-1126.
- [19] 樊涵, 杨朝辉, 王丞, 等. 贵州省自然保护地时空演变特征及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 1005-1014.  
FAN H, YANG Z H, WANG C, *et al.* Temporal-spatial variation and the affecting factors of protected areas in Guizhou, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(3): 1005-1014. (in Chinese)
- [20] 周婷, 洗丽君, 徐颂军. 珠江三角洲湿地公园的空间分布特征及其影响因素分析[J]. *湿地科学*, 2018, 16(6): 707-716.  
ZHOU T, XIAN L J, XU S J. Spatial distribution of wetland parks and its influence factors in Pearl River Delta [J]. *Wetland Science*, 2018, 16(6): 707-716. (in Chinese)
- [21] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.  
WANG J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese)
- [22] 贾艳艳, 唐晓岚, 张卓然. 长江中下游流域自然保护地空间分布及其与人类活动强度关系研究[J]. *世界地理研究*, 2020, 29(4): 845-855.
- [23] 张建国, 徐晔. 浙江省森林公园空间布局与旅游发展研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(5): 1124-1132.  
ZHANG J G, XU X. Research on the spatial distribution of forest parks and tourism development in Zhejiang Province [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(5): 1124-1132. (in Chinese)
- [24] 周李, 吴殿廷, 李泽红, 等. 中蒙俄经济走廊自然旅游资源格局及影响因素研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(11): 2168-2176.  
ZHOU L, WU D T, LI Z H, *et al.* Study on spatial distribution and its influencing factors of natural tourism resource in China-Mongolia-Russia Economic Corridor[J]. *Resources Science*, 2018, 40(11): 2168-2176. (in Chinese)
- [25] 孙金欣, 韩美, 孔祥伦, 等. 黄河下游自然保护地时空分布特征与高质量发展建议——以山东省为例[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 395-402, 412.  
SUN J X, HAN M, KONG X L, *et al.* Spatio-temporal characteristics and suggestions for high-quality development of nature protected areas in the lower reaches of the Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3): 395-402, 412. (in Chinese)
- [26] 谢绍锋, 肖化顺, 储蓉, 等. 基于泰森多边形的广州市林火空间分布规律研究[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(3): 178-185.  
XIE S F, XIAO H S, CHU R, *et al.* Spatial distribution of forest fire based on the voronoi in Guangzhou[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(3): 178-185. (in Chinese)