

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

冉玉菊, 雷冬梅, 刘林, 高丽萍

(云南财经大学 城市与环境学院, 云南 昆明 650221)

摘要: [目的] 以高原喀斯特地貌区滇中城市群为例, 引入地形梯度, 探究快速城镇化过程中滇中城市群的土地利用/覆被变化(LUCC)对生态系统服务价值(ESV)的影响, 为其他相似地区的生态系统服务价值提升和土地利用规划提供理论指导。[方法] 基于 2000, 2010 和 2020 年 3 期土地利用数据, 结合地形位指数、修正的 ESV 当量和热点分析等技术手段定量探讨滇中城市群 2000—2020 年的土地利用和 ESV 在地形梯度上的时空变化特征, 并通过 ESV 损益流向表分析滇中城市群 LUCC 对 ESV 的影响。[结果] ①2000—2020 年, 滇中城市群耕地和林地分别减少了 $1.21 \times 10^5 \text{ hm}^2$, $1.19 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 而建设用地面积增加了 $2.16 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。耕地、水域和建设用地主要集中分布在低地形梯度上, 林地主要集中分布在高地形梯度上。②ESV 总体呈下降趋势, 价值量从 2000 年的 1 196.41 亿元减少到 2020 年的 1 137.50 亿元, 共减少 58.91 亿元。ESV 在地形梯度上的空间分异特征显著, ESV 高值区主要分布在海拔高且坡度大的西部和北部区域, ESV 低值区则与之相反。③林地和水域的流失以及建设用地对耕地的侵占导致 ESV 损失惨重, 损失区主要分布于昆明市中部和红河州北部的城镇区。2010—2020 年, 由于退耕还林、还草、还湖等政策的实施使红河州北部和曲靖市北部区域的林地和水域面积增加并出现 ESV 增值区。[结论] 研究期内 LUCC 对 ESV 产生了较大影响, 并在地形梯度上表现出了较明显的空间差异。可以通过对现有林草地和湖滨湿地进行改善和保护, 并严格控制 ESV 损失冷点区等措施来提升滇中城市群生态系统服务价值和促进区域土地可持续利用。

关键词: 土地利用变化; 生态系统服务价值; 地形梯度; 热点分析; 滇中城市群

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)04-0310-13

中图分类号: F301.2, X171.1

文献参数: 冉玉菊, 雷冬梅, 刘林. 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.041; Ran Yuju, Lei Dongmei, Liu Lin. 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.

Impact of Land Use Change on Ecosystem Service Value in Urban Agglomeration of Central Yunnan Province During 2000—2020

Ran Yuju, Lei Dongmei, Liu Lin, Gao Liping

(School of City and Environment, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming, Yunnan 650221, China)

Abstract: [Objective] Taking the urban agglomeration of Central Yunnan Province in the plateau karst area as an example, the terrain gradient was introduced to explore the impact of land use/cover change (LUCC) on ecosystem service value (ESV) in the process of rapid urbanization, in order to provide theoretical guidance for the improvement of ecosystem service value and land use planning of other similar areas. [Methods] Based on the land use data from 2000 to 2020, combined with the topographic index, modified ESV equivalent and hotspot analysis method, the spatial and temporal variation characteristics of LUCC and ESV on the terrain gradient the study area from 2000 to 2020 was quantitatively discussed, and the impact of LUCC on ESV was analyzed through the ESV profit and loss flow table. [Results] ① From 2000 to 2020, the cultivated land and forest land in the study area decreased by $1.21 \times 10^5 \text{ hm}^2$ and $1.19 \times 10^5 \text{ hm}^2$, respectively, while the

收稿日期: 2021-03-16

修回日期: 2021-04-23

资助项目: 教育部人文社科资助项目“新型城镇化背景下滇中城市群生态用地重要性识别与格局优化研究”(20XJAZH005)

第一作者: 冉玉菊(1996—), 女(汉族), 重庆市人, 硕士研究生, 研究方向为土地生态与土地可持续利用。Email: 1197198840@qq.com。

通讯作者: 雷冬梅(1979—), 女(畲族), 福建省三明市人, 博士, 副教授, 主要从事土地生态学研究。Email: dmlei@ynufe.edu.cn。

construction land increased by $2.16 \times 10^5 \text{ hm}^2$. Cultivated land, water land and construction land were mainly concentrated on low terrain gradient, and forest land was mainly concentrated on high terrain gradient. ② The value of ESV decreased from 119.64 billion yuan to 113.75 billion yuan from 2000 to 2020, with a total decrease of 5.89 billion yuan. ESV had significant spatial differentiation characteristics on the terrain gradient. ESV high-value areas were mainly distributed in the western and northern regions with high altitudes and steep slopes, while ESV low-value areas were on the contrary. ③ The loss of forest land and water land and the occupation of construction land on cultivated land led to heavy loss of ESV. The loss areas were mainly distributed in urban areas in the central part of Kunming City and the northern part of Honghe Prefecture. From 2010 to 2020, due to the implementation of the policy of returning cultivated land to forest land, grassland, and water land, the area of forest land and water land in the northern part of Honghe Prefecture and the northern part of Qujing City increased, and the ESV value-added areas appeared. [Conclusion] During the study period, LUCC had a great impact on ESV and showed obvious spatial differences on the terrain gradient. Measures such as improving and protecting the existing forests, grasslands and lakeside wetlands, and strict control of ESV loss cold spots can effectively improve the ecosystem service value and promote regional sustainable land use of the study area.

Keywords: land use change; ecosystem service value; terrain gradient; hotspot analysis; urban agglomeration in Central Yunnan Province

生态系统服务为人类提供其生存和发展所需的环境条件及效用,一方面包括食物、水资源和原材料等有形的物质产品供给,另一方面包括气候调节、空气净化和美学景观等无形的服务供给,生态系统服务能否有效提供关系着全人类福祉^[1-2]。土地利用/覆被变化(land use/cover change, LUCC)是人类社会与自然界长期相互作用、相互影响的结果,在全球环境变化中起关键作用^[3]。研究表明,LUCC除了会引起地球表层结构发生重大变化,还会通过改变区域的气候、水文、土壤、地质地貌和生物地球化学循环过程来影响区域生态系统服务的供给能力^[4-5],带动生态系统服务价值(ecosystem services value, ESV)作出各种正面或负面的响应^[6-8]。因此,定量评估区域 LUCC 对 ESV 的影响对于促进区域土地可持续利用和改善生态系统服务功能具有重要意义^[9]。

目前,国内外学者关于 LUCC 与 ESV 的研究主要集中在数量和空间两个方面的研究。数量方面的研究主要包括土地利用及 ESV 的时空演化特征^[10-12]、ESV 对 LUCC 的响应^[13-15]以及 LUCC 对 ESV 的影响^[16-20]等方面,该部分研究虽考虑了土地利用和 ESV 的数量关系以及它们的变化情况,但忽略了 LUCC 与 ESV 的空间作用关系。空间方面的研究主要是结合一些空间统计工具探寻 LUCC 和 ESV 变化的空间分异特征以及两者之间的空间作用关系^[21-23],但大多仅单独考虑 ESV 的空间变化,未深入分析土地利用类型之间的空间转换对 ESV 变化的影响,且鲜少结合研究区域的自然地理条件分析 LUCC 对 ESV 的影响。地形作为自然地理环境的重

要组成要素,很大程度上决定了土地利用格局以及 ESV 的空间分布,目前基于地形视角开展的 LUCC 与 ESV 的已有研究中,多从坡度、高程、地形位指数和地形起伏度等方面论述土地利用或者 ESV 在地形梯度上的分布特征^[24-26],基于地形梯度从空间上解析 LUCC 对 ESV 影响的相关研究鲜有报道。土地利用变化图谱能够映射土地利用类型之间的转换方式以及发生转换的空间位置,热点分析工具能够有效识别 ESV 在空间上的变化特征并对其进行可视化表达。因此,在考虑地形梯度的基础上结合土地利用变化图谱和热点分析能从空间上更好地探究区域 LUCC 对 ESV 的影响。滇中城市群作为国家重点培育的 19 个城市群之一,位于中国的西南部,是典型的喀斯特地貌区,其山地多,地形起伏大,地形条件对于区域的土地利用格局和生态系统服务功能的发挥影响显著。它不仅是促进云南发展的强大引擎,同时也承载着极重要的生态功能。

随着近些年滇中城市群城镇化加快,社会经济发展对自然资源需求不断增长,导致土地利用方式转变频繁,生态系统服务供给能力不断弱化。因此,本研究基于地形梯度分析滇中城市群 LUCC 和 ESV 变化特征,结合热点分析工具对 ESV 的变化进行可视化表达,并利用土地利用变化图谱和 ESV 损益表探究 LUCC 对 ESV 的影响,以期改善区域生态环境和促进土地可持续利用提供理论借鉴和科学参考。

1 研究区概况

滇中城市群是位于云南省中部最发达区域的城

市集群,涵盖昆明、曲靖、玉溪、楚雄 4 个州市及红河州北部 7 个县市,共 49 个县(市、区),总面积约 $1.11 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占云南省总面积的 28.3%(见封 2 附图 2)。滇中城市群是典型的喀斯特地貌区,属于低纬度高海拔地区,境内地形差异较大,立体气候特征明显,生物资源丰富,森林覆盖率超过 50%,河流水系发达,是区域重要的生态屏障。2019 年末常住人口 2 143.76 万人,地区生产总值 1.41 万亿元,分别占全省的 44.1%,60.7%,城镇化率 58.94%,比全省平均水平高 10%,乃云南省最重要、最具发展活力的区域。近些年随着社会经济对自然资源需求不断增长,生态用地与建设需求的矛盾愈发突显,区域正面临城镇化快速发展和生态保护的双重压力。

2 研究数据与方法

2.1 数据来源及预处理

本研究涉及的土地利用数据来源于国家基础地理信息中心和自然资源部研制的 2000、2010 年和 2020 年 3 个时期的 30 m 空间分辨率全球地表覆盖数据 GlobeLand30 (<http://www.globallandcover.com/>),所使用的分类影像主要包括美国 Landsat 的 TM5,ETM⁺,OLI 多光谱影像和中国 HJ-1 多光谱影像,2020 年的数据还使用了 16 m 分辨率的 GF-1 多光谱影像,其中 2000 年和 2010 年数据总体精度为 83.50%,kappa 系数 0.78,2020 年数据总体精度为 85.72%,kappa 系数 0.82。DEM 数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。通过镶嵌和裁剪等预处理获得研究区的土地利用数据,为了便于后期 ESV 分析,将滇中城市群土地利用类型重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 大类。其他数据来源于《云南省统计年鉴(2000—2020 年)》《全国农产品成本收益统计资料汇编(2000—2020 年)》。

2.2 研究方法

2.2.1 地形梯度测算方法 采用地形位指数来度量滇中城市群的地形梯度。地形位指数是在提取研究区的高程和坡度数据的基础上由 ArcGIS 软件中的栅格计算器计算所得,利用自裂法将计算得到的结果从低到高划分为 5 个梯度(见封 2 附图 2),依次为 0.07~0.85(梯度 1),0.85~1.18(梯度 2),1.18~1.45(梯度 3),1.45~1.69(梯度 4)和 1.69~2.87(梯度 5),从而定量分析不同地形梯度下土地利用和 ESV 的分布特征^[24],计算公式为:

$$T = \ln \left[\left(\frac{E}{\bar{E}} + 1 \right) \times \left(\frac{S}{\bar{S}} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

式中: T 为地形位指数; E, S 分别为研究区某处的高程和坡度; \bar{E}, \bar{S} 分别为研究区的平均高程和平均坡度。

2.2.2 土地利用变化测算方法

(1) 土地利用动态度。土地利用动态度能有效反映各土地类型面积在一定时期内发生变化的幅度^[27]。本研究通过测算各地类的单一土地利用动态度来分析研究区 LUCC 特征,公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: K 为某土地类型的单一土地利用动态度(%); U_a, U_b 分别为某土地类型在研究期开始和结束时的面积(hm^2); T 为研究时段。

(2) 土地利用转移矩阵。土地利用转移矩阵是分析某区域各土地类型在研究期间相互转化情况的有效方法。本研究通过 ArcGIS 软件中的栅格计算器得到研究区 2000—2010 年和 2010—2020 年两期土地利用转移矩阵^[28],从而探究地类的转移情况。

2.2.3 生态系统服务价值测算方法 本研究以生态系统服务功能衡量相应土地利用类型的 ESV,建立 LUCC 与 ESV 之间的关联。谢高地结合中国国情对 Costanza 等^[29]提出的全球 ESV 评估模型进行改进,提出了当量因子法——中国目前应用范围最广的 ESV 评估方法,本文采用 2015 年最新改进的单位面积 ESV 当量表^[30],并结合滇中城市群单位面积农田粮食生产的经济价值量^[31]和云南省生物量因子(0.64)^[32]对 ESV 当量表进行修正得到研究区 ESV 系数表。此外,由于谢高地等并未对建设用地进行 ESV 当量赋值,但人类活动可能会对生态系统服务功能及其价值产生各种正面或负面的影响,为更好地表征研究区城市化的快速发展对生态系统服务价值的影响,本研究参考邓舒洪^[33]对建设用地价值当量的赋值来修正研究区 ESV 当量表。

1 个 ESV 当量因子的经济价值等同于研究区本年度平均粮食单产市场价值的 $1/7$ ^[31],鉴于本研究探讨的是土地利用变化对生态系统服务价值的影响,为方便不同时期的对比研究,要避免农作物价格波动对总价值量的影响,因此选取研究区 2000—2018 年 3 种主要农作物(稻谷、小麦和玉米)的播种面积、产量以及近 20 a 间 3 种作物的平均价格作为基础数据,由下列公式计算出研究区单位面积农作物生产的经济价值为 1 214.87(元/ hm^2)。

$$E_n = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^m \frac{o_i p_i q_i}{M} \quad (m=1,2,3) \quad (3)$$

式中: E_n 为研究区单位面积农作物生产的经济价值(元/ hm^2); i 为农作物种类; o_i, p_i 和 q_i 分别为 i 种

农作物的播种面积(hm^2)、单产(kg/hm^2)和平均价格(元/kg); M 为 3 种农作物(稻谷、小麦和玉米)的总面积。

根据经济价值量和云南省生物量因子得到研究区生态系统服务价值系数表(表 1)。其中,结合研究

区土地资源现状和已有研究^[34],耕地取旱地和水田的均值;林地取针叶林、针阔混交林、阔叶林和灌木四者均值;草地取草原、灌草丛、草甸三者均值;水域对应水系;未利用地取荒漠和裸地二者均值;建设用地当量赋值参考邓舒洪^[33]的研究。

表 1 滇中城市群生态系统服务价值系数

元/($hm^2 \cdot a$)

一级分类	二级分类	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	859.16	196.32	181.42	622.01	12.15	3.89
	原料生产	190.49	450.96	266.95	178.83	0.00	11.66
	水资源供给	-1 014.66	233.26	147.73	6 445.61	-9 123.67	7.78
调节服务	气体调节	691.99	1 483.11	938.20	598.69	-2 939.99	50.54
	气候调节	361.55	4 437.68	2 480.28	1 780.51	0.00	38.88
	净化环境	104.96	1 300.40	818.98	4 315.22	-2 988.58	159.39
	水文调节	1 162.39	2 904.03	1 816.80	79 493.32	0.00	93.30
支持服务	土壤保持	404.31	1 805.78	1 142.95	723.09	24.30	58.31
	维持养分循环	120.52	138.01	88.12	54.43	0.00	3.89
	生物多样性	132.18	1 644.45	1 039.28	1 982.67	413.06	54.43
文化服务	美学景观	58.31	721.15	458.73	1 469.51	12.15	23.33
总计		3 071.19	15 315.14	9 379.44	97 663.89	-14 590.59	505.39

生态系统服务价值计算公式如下:

$$ESV = \sum (A_i \cdot VC_i) \quad (4)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值; A_i 是第 i 种土地类型的面积; VC_i 是第 i 种土地类型的 ESV 系数。

2.2.4 生态系统服务价值热点分析 热点分析工具能够用来观测研究区 ESV 变化在空间上形成的高值聚类(热点)和低值聚类(冷点)的分布格局^[23], 公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} X_j - \bar{X} \sum_{i=1}^n W_{ij}}{\sqrt{[n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n W_{ij})^2] / (n-1)}} \quad (5)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\bar{X})^2} \quad (7)$$

式中: G_i^* 为 z 得分, z 得分是统计显著性的度量; X_j 是要素 j 的属性值; W_{ij} 是要素 i 和 j 之间的空间权重; n 为要素总和。 G_i^* 的值越高或越低,聚集越紧密。当 ESV 变化值远大于邻近区域,将形成具有显著统计学意义的热点(ESV 增值热点区),意味着该区域的 ESV 涨幅较大;当 ESV 变化值远小于邻近区域,则会形成具有显著统计学意义的冷点(ESV 损失冷点区),意味着该区域的 ESV 减幅较大。

2.2.5 土地利用变化对生态系统服务价值的影响测算 结合土地利用转移矩阵测算不同地类之间的转化带来的 ESV 损益,由此分析 LUCC 对 ESV 的影

响。ESV 损益计算公式为^[35]:

$$PL_{ij} = (VC_j - VC_i) \times A_{ij} \quad (8)$$

式中: PL_{ij} 为 i 种地类转为 j 种地类导致的 ESV 损益; VC_i, VC_j 分别为第 i, j 种地类的 ESV 系数; A_{ij} 为 i 种地类转为 j 种地类的面积。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

3.1.1 土地利用数量变化 对 3 期土地利用数据进行统计和计算,得到滇中城市群研究期内各地类的面积和土地利用动态度(表 2)。从面积变化来看,耕地、林地和建设用地变化显著,耕地先增后减,2000—2020 年共减少 $1.21 \times 10^5 hm^2$;林地持续递减,但减少幅度放缓,2000—2010 年减少 $9.50 \times 10^4 hm^2$,2010—2020 年减少 $2.43 \times 10^4 hm^2$;建设用地大幅增加,共增加 $2.16 \times 10^5 hm^2$ 。从地类结构来看,研究区内林地分布最为广泛,其次是耕地和草地,三者占比总和超过 95%。从动态度来看,变化最剧烈的是建设用地,其动态度由 1.58% 变为 17.32%。发生上述变化的主要原因有:2000—2010 年,红河州实施土地整治项目,导致耕地增加;2010—2020 年,由于建设用地的侵占又导致耕地减少。近年来政府加大对旅游基础设施建设方面的投资,鼓励建设小集镇,导致建制镇、村庄居民点等建设用地面积增加;研究期正处于国家积极推行退耕还林还草政策时期,受政策影响林地减少速度有所放缓但依然处于减少趋势,主要是由于云

南省将 80% 退耕还林还草任务分配给贫困区县用来助力地区增收, 研究区并非退耕还林还草项目实施的

重点区域, 受政策影响增加的林地面积还不足以平衡因建设用地扩张侵占的林地面积。

表 2 2000—2020 年滇中城市群土地利用变化

土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年		2000—2010 年		2010—2020 年	
	面积/ 10 ⁴ hm ²	比例/ %	面积/ 10 ⁴ hm ²	比例/ %	面积/ 10 ⁴ hm ²	比例/ %	变化面积/ 10 ⁴ hm ²	动态度/ %	变化面积/ 10 ⁴ hm ²	动态度/ %
耕地	373.35	33.42	378.00	33.84	361.29	32.42	4.65	0.12	-16.71	-0.44
林地	489.42	43.82	479.93	42.97	477.50	42.85	-9.50	-0.19	-2.43	-0.05
草地	230.89	20.67	236.11	21.14	231.22	20.75	5.22	0.23	-4.89	-0.21
水域	13.33	1.19	11.39	1.02	12.74	1.14	-1.94	-1.45	1.35	1.19
建设用地	9.98	0.89	11.56	1.04	31.59	2.84	1.58	1.58	20.03	17.32
未利用地	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.01	-0.01	-10.00	0.06	—
合计	1 116.99	100.00	1 116.99	100.00	1 114.40	100.00				

3.1.2 土地利用的地形梯度分异 滇中城市群不同土地利用类型在地形梯度上的分布有所差异(图 1)。①耕地、水域和建设用地的面积随地形梯度增大而减少, 主要是因为海拔低、坡度小的区域有利于农业的发展, 这直接决定了耕地的分布格局, 耕地的分布状况往往代表了人口的集聚程度, 人口的集聚程度又决定了建设用地的分布, 水域更宜在低地形梯度

积聚, 地形梯度越低, 水域面积越大; ②林地面积随着地形梯度增大而增大, 主要是因为海拔高、坡度大的区域由于气候条件限制和人为干扰较少, 侧面保护了林地的生长环境; ③草地面积在各梯度上分布较均匀, 主要是因为草地的生长对地形梯度的适宜性较强; ④未利用地面积所占比重过小, 无明显变化。

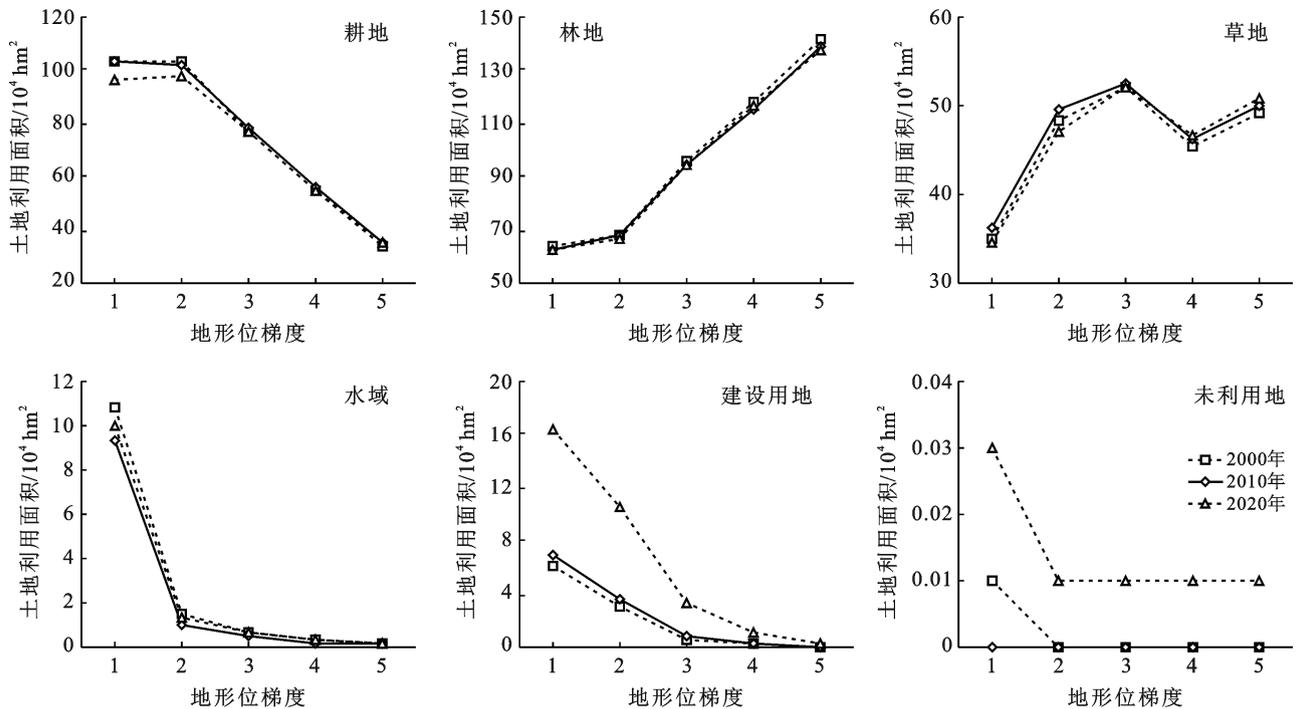


图 1 滇中城市群土地利用的地形梯度分异

3.2 生态系统服务价值变化分析

3.2.1 生态系统服务价值时间变化 根据滇中城市群 ESV 系数(表 1)和各地类面积(表 2), 计算得到滇中城市群不同服务类型(表 3)和不同地类的 ESV(表 4)及 49 个区县各地类的 ESV 分布(表 5)。可以

看出, 研究期内 ESV 总量呈持续下降趋势, 2000—2010 年下降 29.48 亿元, 2010—2020 年下降 29.43 亿元。①从服务类型来看(表 3), 各项服务的 ESV 从高到低依次为: 调节服务 > 支持服务 > 供给服务 > 文化服务, 其中调节服务在研究区整个生态系统中处于优

势地位,贡献最大的为水文调节和气候调节,两者价值量总占比超过 50%。主要原因是调节服务的主要供给源为林地和水域,研究区内林地为主要地类,且还有“三江六湖”等丰富的水资源。但值得注意的是,调节服务的 ESV 减少幅度也很明显,2000—2020 年共减少 32.53 亿元。为了区域的可持续发展,应重点保护在提供 ESV 中占重要地位的林地、草地和水域等土地利用类型。②从土地类型来看(表 4),各地类的 ESV 总量从高到低依次为:林地>草地>水域>

耕地>未利用地>建设用地,其中林地和建设用地的 ESV 持续减少,且建设用地是唯一一种对生态系统产生负面影响的地类,减少的原因主要是因为建设用地扩张侵占了其他土地利用类型,且建设用地依然有持续增加的态势,应严格控制建设用地的无节制扩张。③从各行政区土地类型的 ESV 来看(表 5),耕地、林地、草地和水域价值量最高的区域分别是宣威市、楚雄市、会泽县、澄江市,建设用地产生负价值最多的区域是官渡区,这与各行政区内的地类面积大小相关。

表 3 滇中城市群不同服务类型的生态系统服务价值变化

一级分类	二级分类	2000 年		2010 年		2020 年		2000—2010 年	2010—2020 年
		ESV/亿元	比例/%	ESV/亿元	比例/%	ESV/亿元	比例/%	ΔESV/亿元	ΔESV/亿元
供给服务	食物生产	46.72	3.91	46.90	4.02	45.44	3.99	0.18	-1.46
	原料生产	35.59	2.97	35.35	3.03	34.82	3.06	-0.24	-0.53
	水资源供给	-23.57	-1.97	-26.88	-2.30	-42.72	-3.76	-3.31	-15.84
调节服务	气体调节	117.95	9.86	116.77	10.01	108.99	9.58	-1.18	-7.78
	气候调节	290.33	24.27	287.23	24.61	284.58	25.02	-3.1	-2.65
	净化环境	89.24	7.46	87.17	7.47	80.88	7.11	-2.07	-6.29
	水文调节	333.44	27.87	316.76	27.14	323.98	28.48	-16.68	7.22
支持服务	土壤保持	130.85	10.94	129.79	11.12	128.26	11.28	-1.06	-1.53
	维持养分循环	13.36	1.12	13.32	1.14	13.05	1.15	-0.04	-0.27
	生物多样性	112.47	9.40	111.19	9.53	111.16	9.77	-1.28	-0.03
文化服务	美学景观	50.03	4.18	49.33	4.23	49.06	4.31	-0.7	-0.27
总计		1 196.41	100.00	1 166.93	100.00	1 137.50	100.00	-29.48	-29.43

表 4 滇中城市群不同土地利用类型的生态系统服务价值变化

土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年		2000—2010 年	2010—2020 年
	ESV/亿元	比例/%	ESV/亿元	比例/%	ESV/亿元	比例/%	ΔESV/亿元	ΔESV/亿元
耕地	114.66	9.58	116.09	9.95	110.96	9.75	1.43	-5.13
林地	749.56	62.65	735.01	62.99	731.30	64.29	-14.55	-3.71
草地	216.57	18.10	221.46	18.98	216.87	19.07	4.89	-4.59
水域	130.19	10.88	111.25	9.53	124.47	10.94	-18.94	13.22
建设用地	-14.57	-1.22	-16.87	-1.45	-46.10	-4.05	-2.30	-29.23
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总计	1 196.41	100.00	1 166.93	100.00	1 137.50	100.00	-29.48	-29.43

3.2.2 生态系统服务价值时间变化的地形梯度分异
滇中城市群各服务类型和各地类的 ESV 在地形梯度上的分布如图 2—3 所示。

由图 2—3 可知:①从服务类型来看(图 2),水文调节和气候调节服务的 ESV 处于领先地位,2000—2010 年变化最明显的服务类型是水文调节,其 ESV 减少量主要分布在低地形梯度;2010—2020 年 ESV 发生变化的服务类型数量增多,其中水文调节是唯一一种 ESV 呈正向变化的服务类型,其 ESV 变化量随地形梯度增大而减少。总的来看,各服务类型的 ESV 变化量均呈负向变化,且 ESV 减少量随地形梯

度增大而减少。②从土地类型来看(图 3),林地、水域和建设用地的 ESV 在地形梯度上的变化显著,林地的 ESV 随地形梯度增大而增大,水域随地形梯度增大而减小,林地的变化主要集中在高地形梯度,水域和建设用地的变化主要集中在低地形梯度。2000—2020 年 ESV 总量变化呈负向变化,变化量随地形梯度增大而减小,水域和建设用地的 ESV 减少是导致 ESV 总量呈负向变化的主要源头,表明低地形梯度区域的 ESV 更易遭到人类活动的干扰,因此严格控制建设用地增量的同时还应最大程度地保护江河湖泊等水域不被破坏。

表 5 滇中城市群各行政区不同土地利用类型的生态系统服务价值

亿元

行政区	耕地			林地			草地			水域			建设用地			未利用地		
	2000年	2010年	2020年															
五华区	0.29	0.23	0.23	1.76	1.83	1.73	0.81	0.88	0.79	0.15	0.24	0.13	-0.71	-0.82	-1.08	0.00	0.00	0.00
盘龙区	0.28	0.22	0.18	2.11	2.20	2.05	0.52	0.56	0.47	0.50	0.25	0.50	-0.55	-0.71	-1.15	0.00	0.00	0.00
官渡区	0.82	0.66	0.38	2.59	2.75	2.42	1.07	1.15	0.82	3.55	3.24	3.17	-0.95	-1.50	-3.63	0.00	0.00	0.00
西山区	0.63	0.51	0.44	5.81	6.02	5.77	1.53	1.67	1.47	11.28	10.86	11.06	-0.73	-0.95	-1.80	0.00	0.00	0.00
东川区	1.48	1.45	1.38	4.23	4.21	4.19	10.03	10.48	10.37	4.12	0.59	0.70	-0.09	-0.09	-0.52	0.00	0.00	0.00
呈贡区	0.82	0.76	0.45	1.18	1.33	1.16	0.73	0.84	0.78	6.92	6.57	6.65	-0.25	-0.28	-1.99	0.00	0.00	0.00
晋宁区	1.44	1.35	1.21	7.00	7.17	7.02	2.65	2.88	2.65	10.82	10.24	10.52	-0.27	-0.27	-1.33	0.00	0.00	0.00
富民县	1.29	1.26	1.05	4.86	4.84	4.77	2.41	2.50	2.94	0.18	0.10	0.18	-0.06	-0.07	-0.40	0.00	0.00	0.00
宜良县	2.83	2.75	2.69	8.82	9.16	9.03	3.53	3.62	3.43	2.82	2.35	2.65	-0.23	-0.24	-0.78	0.00	0.00	0.00
石林彝族自治县	2.76	2.74	2.66	5.32	5.41	5.27	3.89	3.99	3.81	1.75	0.71	1.19	-0.15	-0.15	-0.74	0.00	0.00	0.00
嵩明县	1.78	1.66	1.55	5.96	6.19	6.08	3.18	3.40	3.21	1.80	1.74	1.08	-0.40	-0.41	-1.36	0.00	0.00	0.00
禄劝彝族苗族自治县	4.04	3.99	3.89	28.54	28.33	28.20	9.61	9.91	9.79	3.55	3.05	3.98	-0.07	-0.12	-0.65	0.00	0.00	0.00
寻甸回族彝族自治县	5.19	4.99	4.77	10.80	10.73	10.71	11.02	11.68	11.42	1.29	1.25	1.51	-0.21	-0.21	-1.48	0.00	0.00	0.00
安宁市	1.16	1.14	1.00	9.45	9.52	9.26	2.45	2.48	2.27	0.98	0.64	0.82	-0.60	-0.64	-1.84	0.00	0.00	0.00
麒麟区	2.41	2.35	2.12	6.23	6.24	6.18	2.75	2.89	2.86	1.68	1.80	1.54	-0.71	-0.78	-1.86	0.00	0.00	0.00
沾益区	3.48	3.34	3.41	9.38	9.34	9.21	9.81	10.14	9.51	1.98	2.71	3.00	-0.29	-0.35	-0.85	0.00	0.00	0.00
马龙区	1.97	1.97	1.95	5.06	5.05	5.02	5.79	5.76	5.63	0.92	1.10	1.12	-0.13	-0.13	-0.36	0.00	0.00	0.00
陆良县	3.29	3.20	3.17	6.24	6.59	6.37	4.28	4.47	4.02	2.60	0.99	1.77	-0.58	-0.60	-1.39	0.00	0.00	0.00
师宗县	3.55	3.59	3.41	20.75	21.14	21.53	2.36	2.00	1.78	1.01	1.11	1.19	-0.16	-0.16	-0.72	0.00	0.00	0.00
罗平县	3.92	3.92	4.08	21.89	22.10	21.12	2.59	2.42	2.14	1.44	1.91	1.60	-0.52	-0.51	-0.84	0.00	0.00	0.00
富源县	4.71	4.70	4.57	18.77	18.70	18.78	4.59	4.58	4.49	0.76	1.03	1.09	-0.30	-0.39	-0.71	0.00	0.00	0.00
会泽县	6.32	5.93	5.38	22.75	22.94	21.82	21.79	22.96	24.54	3.15	1.61	2.62	-0.18	-0.22	-0.93	0.00	0.00	0.00
宣威市	8.23	7.91	7.61	31.88	32.19	31.91	11.94	12.65	12.86	1.72	1.69	2.18	-0.48	-0.61	-1.33	0.00	0.00	0.00
红塔区	0.94	0.87	0.72	7.14	7.36	7.16	1.25	1.38	1.27	0.74	0.42	0.65	-0.53	-0.53	-1.51	0.00	0.00	0.00
江川区	0.94	0.93	0.88	2.89	2.99	2.84	1.83	1.87	1.77	10.66	10.13	10.39	-0.17	-0.17	-0.63	0.00	0.00	0.00
通海县	0.68	0.68	0.71	4.59	4.67	4.55	1.49	1.51	1.29	3.93	3.32	3.60	-0.30	-0.30	-0.53	0.00	0.00	0.00
华宁县	1.96	1.95	1.95	5.72	5.78	5.65	1.96	1.98	1.83	2.52	2.27	2.29	-0.06	-0.06	-0.36	0.00	0.00	0.00
易门县	1.08	1.08	1.07	16.45	16.15	16.08	0.81	1.00	0.97	0.47	0.41	0.41	-0.19	-0.21	-0.36	0.00	0.00	0.00
峨山彝族自治县	1.09	1.06	1.05	20.39	19.36	19.27	2.20	2.91	2.82	0.48	0.43	0.49	-0.10	-0.12	-0.39	0.00	0.00	0.00
新平彝族傣族自治县	2.89	3.02	2.99	48.22	46.68	46.71	1.49	1.93	1.91	1.39	1.68	1.77	-0.11	-0.25	-0.42	0.00	0.00	0.00
元江哈尼族彝族傣族自治县	1.75	1.93	1.82	29.69	29.39	29.30	1.82	1.50	1.79	1.07	1.03	1.08	-0.10	-0.08	-0.22	0.00	0.00	0.00
澄江市	0.90	0.86	0.78	2.53	2.64	2.57	1.42	1.49	1.53	13.96	13.74	13.70	-0.08	-0.09	-0.48	0.00	0.00	0.00
楚雄市	2.70	2.85	2.81	49.15	45.78	45.67	2.74	4.28	4.16	1.77	1.31	1.95	-0.53	-0.71	-1.22	0.00	0.00	0.00
双柏县	1.89	1.95	1.94	47.18	45.60	45.70	1.75	2.51	2.50	0.76	0.72	0.86	-0.06	-0.10	-0.11	0.00	0.00	0.00
牟定县	1.25	1.27	1.30	11.48	11.43	11.35	2.63	2.61	2.50	0.90	0.46	0.70	-0.13	-0.16	-0.27	0.00	0.00	0.00
南华县	1.76	1.82	1.84	22.57	21.86	21.82	1.88	2.13	2.08	0.87	0.77	0.79	-0.13	-0.17	-0.29	0.00	0.00	0.00
姚安县	1.17	1.20	1.26	15.89	15.82	15.56	2.43	2.42	2.36	1.05	0.66	0.81	-0.16	-0.15	-0.29	0.00	0.00	0.00
大姚县	2.22	2.28	2.54	39.95	39.82	38.68	6.40	6.32	6.07	1.10	0.73	1.79	-0.04	-0.09	-0.32	0.00	0.00	0.00
永仁县	1.21	1.24	1.33	18.64	18.62	18.26	4.92	4.90	4.59	1.27	0.67	2.02	-0.04	-0.05	-0.27	0.00	0.00	0.00
元谋县	1.38	1.39	1.68	10.02	10.08	9.84	8.27	8.28	7.33	2.63	1.34	2.48	-0.21	-0.28	-0.46	0.00	0.00	0.00
武定县	2.47	2.44	2.42	24.53	24.39	24.23	4.96	5.15	5.03	1.10	0.73	1.04	-0.09	-0.13	-0.49	0.00	0.00	0.00
禄丰县	2.46	2.48	2.48	35.74	35.27	35.15	3.51	3.71	3.59	1.59	1.35	1.46	-0.37	-0.45	-0.72	0.00	0.00	0.00
个旧市	1.47	2.15	1.74	8.90	8.09	8.78	4.26	2.69	2.83	1.69	1.38	1.73	-0.50	-0.49	-1.41	0.00	0.00	0.00
开远市	2.56	2.86	2.51	6.95	6.03	6.44	5.78	5.50	5.83	1.10	0.85	0.84	-0.47	-0.42	-1.07	0.00	0.00	0.00
蒙自市	2.74	3.51	3.13	10.18	9.06	9.81	5.22	3.59	3.42	3.32	2.59	2.80	-0.50	-0.58	-1.74	0.00	0.00	0.00
弥勒市	4.65	4.66	4.63	17.59	17.76	17.20	11.45	11.43	10.81	2.66	1.31	2.10	-0.27	-0.27	-1.54	0.00	0.00	0.00
建水县	5.03	5.75	4.80	21.42	16.64	19.31	6.66	7.42	7.79	2.08	1.66	2.08	-0.39	-0.41	-1.59	0.00	0.00	0.00
石屏县	2.07	2.57	3.72	24.04	23.35	40.90	7.02	5.91	10.31	4.44	4.57	5.47	-0.16	-0.16	-1.14	0.00	0.00	0.00
泸西县	2.71	2.70	2.61	6.31	6.42	6.13	3.05	3.10	2.94	1.69	0.96	1.80	-0.25	-0.24	-0.89	0.00	0.00	0.00

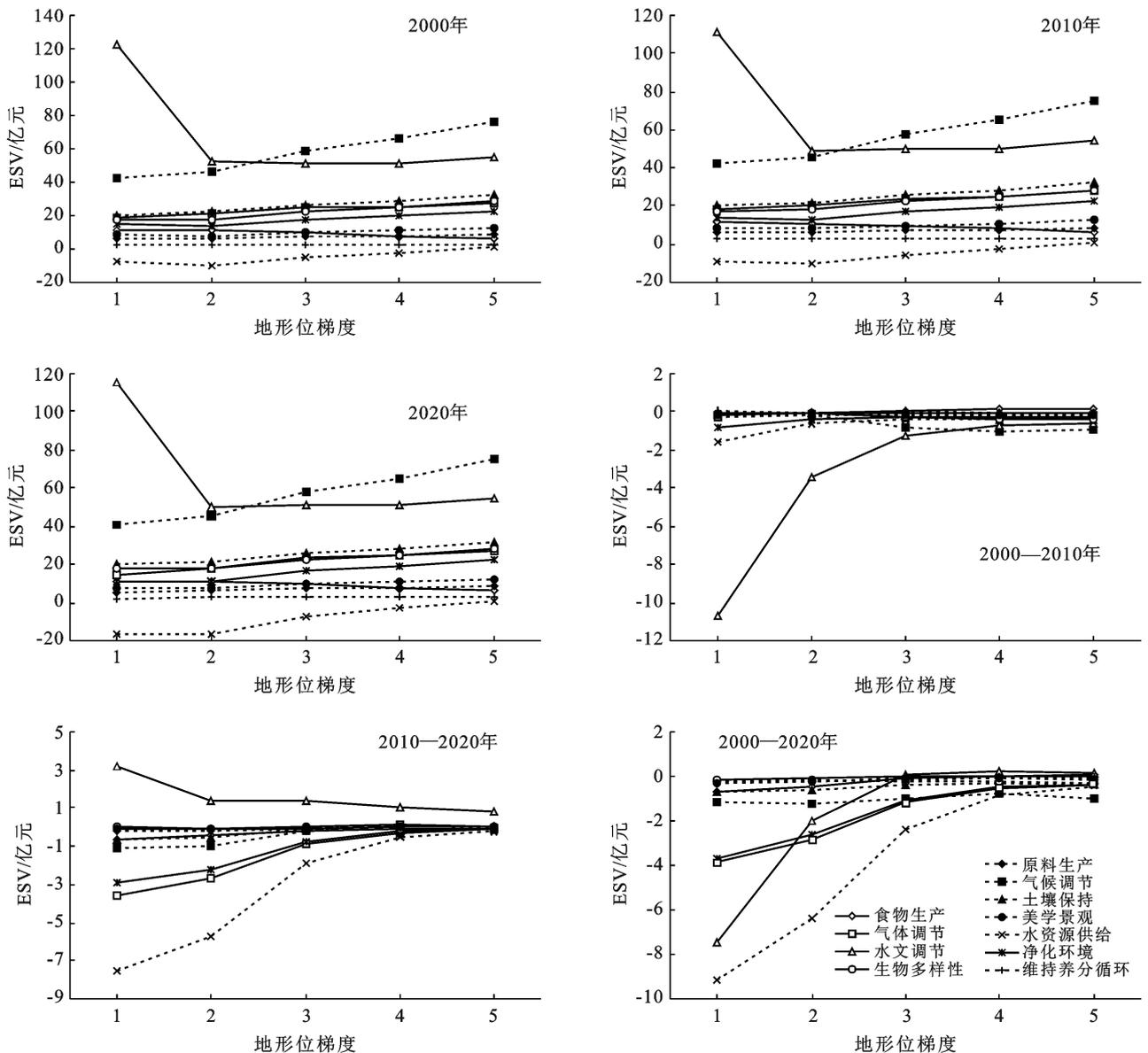


图 2 滇中城市群不同服务类型的生态系统服务价值地形梯度分异

3.2.3 生态系统服务价值空间变化的地形梯度分异

将 ESV 分布图和地形梯度图叠加分析,得到滇中城市群 49 个区县 ESV 的地形梯度分异图(图 4)。从 ESV 总量分布来看,研究区 ESV 空间分异特征较显著,中部和南部区域的 ESV 相对较低,生态重心逐渐向楚雄市和曲靖市等西部和北部区域转移,这与区县的地形梯度分布相吻合,高地形梯度区域拥有较高 ESV,低地形梯度区域则与之相反,由此可见 ESV 一定程度上受地形梯度的影响。主要是因为 ESV 高值区域本身就处于海拔高,坡度大的地段,森林覆盖率高,具有良好的自然生态本底,人类活动干扰小,平衡了其人造地表扩张所带来的价值量的损失,而 ESV 低值区海拔低、坡度小、易开发,人口密集导致城市开发强度相对也较高、较密。

3.2.4 生态系统服务价值的热点分析

将 ESV 变化热点分析图与地形梯度图叠加分析,得到滇中城市群 ESV 变化冷热点区的空间分布图(图 5)。图 5 显示,2000—2010 年,ESV 变化的热点和冷点区域数量相对较少,说明该时间段内 ESV 变化不剧烈,增值热点区主要分布在曲靖市的马龙区和沾益区,冷点区主要分布在红河州的建水县、开远市、个旧市和蒙自市;2010—2020 年,研究区 ESV 冷热点区分布范围变广,增值热点区主要分布在石屏县、建水县、通海县、峨山彝族自治县和元江哈尼族彝族傣族自治县,损失冷点区主要分布在昆明市中部的部分区县。值得注意的是,ESV 变化的冷热点区主要集中在低地形梯度区域,西部和北部等高地形梯度区域未发现冷热点区,主要原因是低地形梯度区域人口和经济资源集

聚,城镇扩张不断侵占其他生态用地,导致大量 ESV 较高的地类逐渐流失。因此有必要严格控制滇中城

市群冷点区域范围,结合地形梯度分异规律对生态系统展开监测、保护和修复等工作。

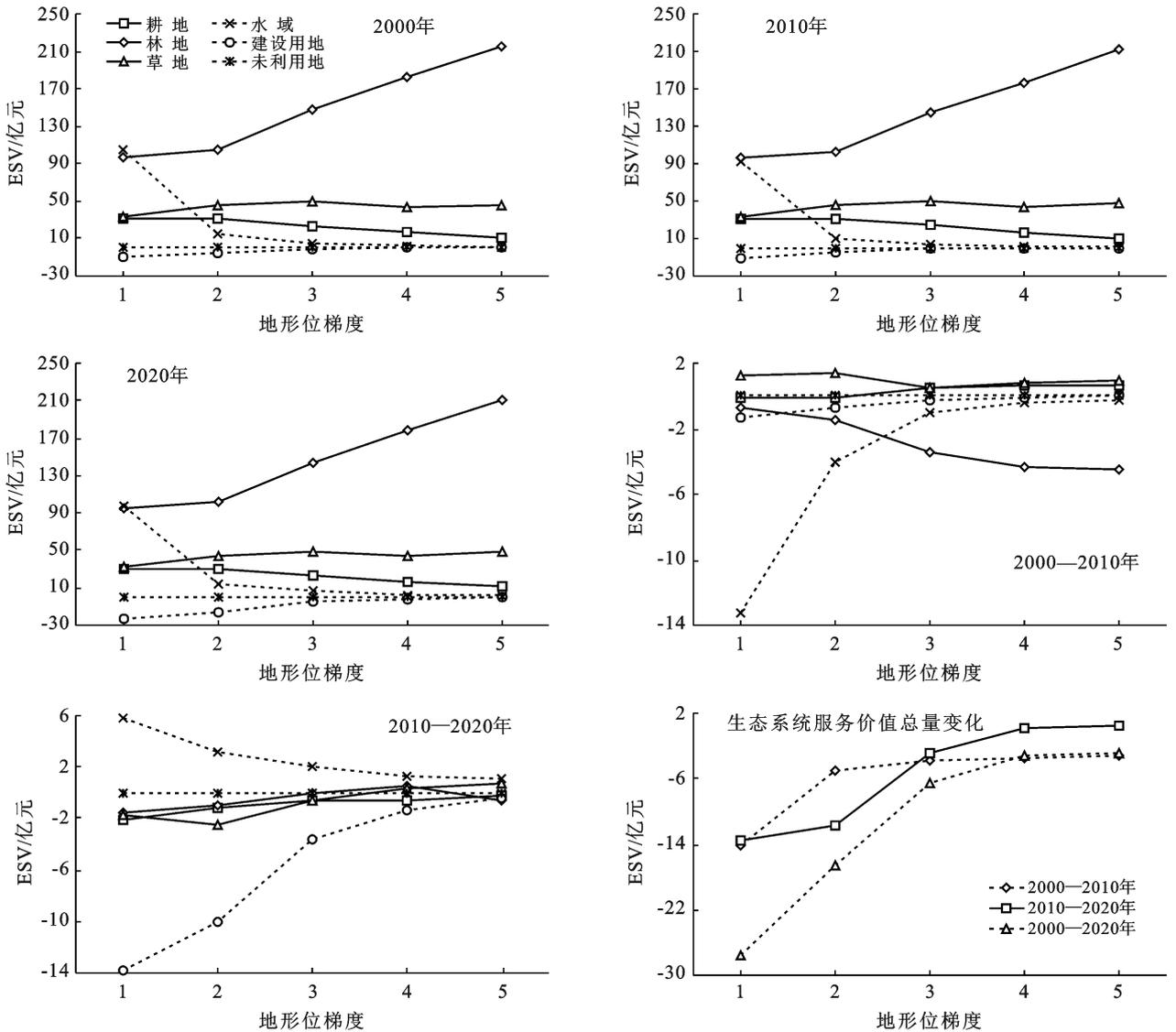


图 3 滇中城市群不同土地利用类型的生态系统服务价值及总值的地形梯度分异

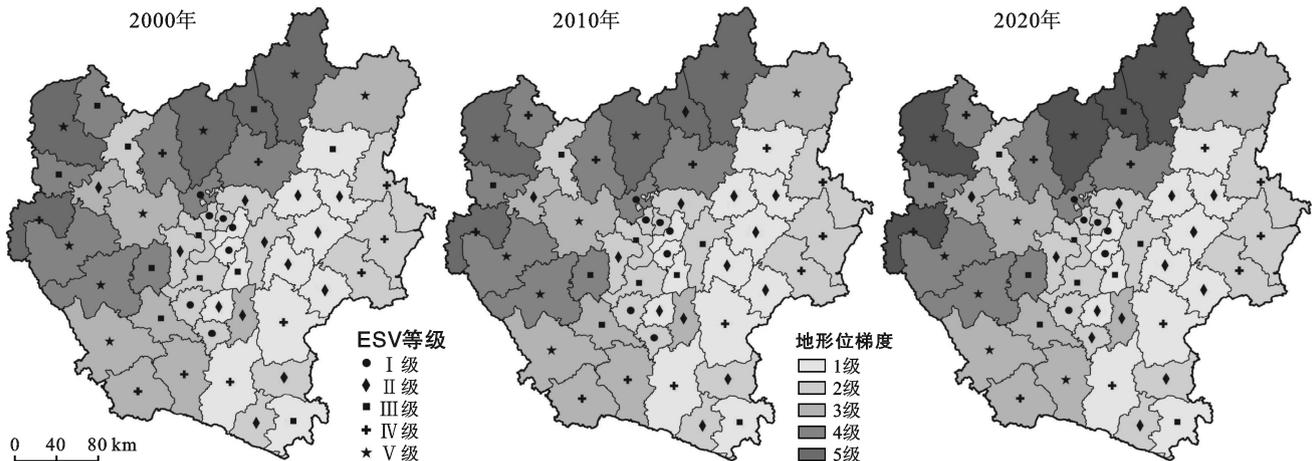


图 4 滇中城市群生态系统服务价值的地形梯度分异

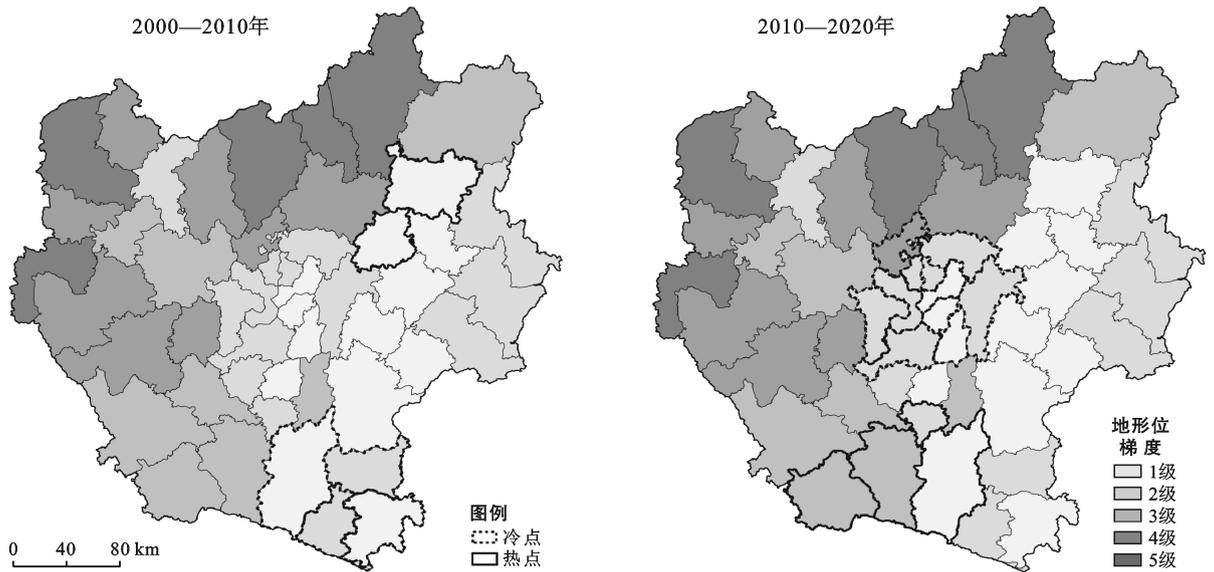


图 5 滇中城市群生态系统服务价值变化冷热点区的空间分布格局

3.3 土地利用变化对生态系统服务价值的影响

通过土地利用转移矩阵得到 ESV 损益表(表 6—7)。结果表明:2000—2010 年,耕地转林地、草地和水域以及草地转林地是导致 ESV 增值的主要类型,林地转耕地和草地以及水域转耕地、林地和草地是导致 ESV 损失的主要类型;2010—2020 年,耕地和草地转林地是导致 ESV 增值的主要类型,耕地转建设用地以及林地转耕地和草地是导致 ESV 损失的主要类型。其中耕地转林地对 ESV 增值贡献最大,

2000—2010 年和 2010—2020 年分别使 ESV 增值 13.48 亿元和 18.28 亿元,林地转耕地对 ESV 损失贡献最大,2000—2010 年和 2010—2020 年分别使 ESV 损失 17.08 和 18.18 亿元,此外,各地类向建设用地转移导致的 ESV 损失也不容忽视,尤其在 2010—2020 年造成 ESV 共损失 43.85 亿元。由此可见,林地和水域的转出以及耕地和建设用地的转入是造成研究区 ESV 损失的主要原因,相反林地和水域等生态价值系数较高的地类的转入则会导致研究区 ESV 增值。

表 6 2000—2010 年滇中城市群土地利用转移和 ESV 损益矩阵

土地利用类型	项目	2010 年				
		耕地	林地	草地	水域	建设用地
耕地	转移面积/ 10^4 hm^2	—	11.01	16.20	0.73	1.91
	ESV 损益/亿元	—	13.48	10.22	6.87	-3.38
林地	转移面积/ 10^4 hm^2	13.95	—	28.48	0.25	0.11
	ESV 损益/亿元	-17.08	—	-16.90	2.08	-0.33
草地	转移面积/ 10^4 hm^2	18.69	21.03	—	0.46	0.52
	ESV 损益/亿元	-11.79	12.48	—	4.03	-1.25
水域	转移面积/ 10^4 hm^2	1.10	1.16	1.11	—	0.03
	ESV 损益/亿元	-10.41	-9.55	-9.78	—	-0.33
建设用地	转移面积/ 10^4 hm^2	0.74	0.10	0.13	0.01	—
	ESV 损益/亿元	1.31	0.31	0.31	0.15	—
未利用地	转移面积/ 10^4 hm^2	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	ESV 损益/亿元	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00

选取对研究区 ESV 损益贡献最大的几种土地利用转移类型制成土地利用变化图谱,将其与地形梯度图叠加,得到滇中城市群 ESV 损益的空间分布图(图 6)。

从图 6 可以看出,2000—2010 年,ESV 增值区主要分布在师宗县和元江哈尼族彝族傣族自治县,得益

于区域内各地类向水域和林地的转移。ESV 损失区主要分布在麒麟区、昆明市中部和红河州北部的部分区县,损失的原因主要是建设用地的占用;2010—2020 年,ESV 增值区范围变大,主要分布在会泽县、宣威市、富民县、师宗县和红河州北部,主要是受益于退耕还林还草政策的实施。昆明市中部区域由于城

镇化的快速发展对 ESV 产生了一系列负面影响, 依然是 ESV 损失区。分析可知, 近 20 a 来, 中部区域由于海拔低、坡度小, 人口密集且建设用地迅速扩张导致 ESV 受损严重, 为有效改善滇中城市群生态环境,

可以采取相应的人工措施或限制性政策, 如通过改造低效林草地、优化林相结构、复绿裸地或难利用地以及深入推进新一轮退耕还林还草政策等来提升研究区的生态系统服务价值。

表 7 2010—2020 年滇中城市群土地利用转移和 ESV 损益矩阵

土地利用类型	项目	2020 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地	转移面积/ 10^4 hm^2	—	14.93	18.55	0.74	13.95	0.03
	ESV 损益/亿元	—	18.28	11.70	6.96	-24.63	-0.01
林地	转移面积/ 10^4 hm^2	14.85	—	29.89	0.86	2.30	0.00
	ESV 损益/亿元	-18.18	—	-17.74	7.06	-6.89	-0.01
草地	转移面积/ 10^4 hm^2	16.43	30.92	—	0.93	4.75	0.02
	ESV 损益/亿元	-10.36	18.35	—	8.18	-11.39	-0.02
水域	转移面积/ 10^4 hm^2	0.56	0.25	0.26	—	0.08	0.00
	ESV 损益/亿元	-5.30	-2.05	-2.32	—	-0.94	-0.00
建设用地	转移面积/ 10^4 hm^2	0.75	0.08	0.12	0.01	—	0.00
	ESV 损益/亿元	1.33	0.23	0.29	0.13	—	0.00

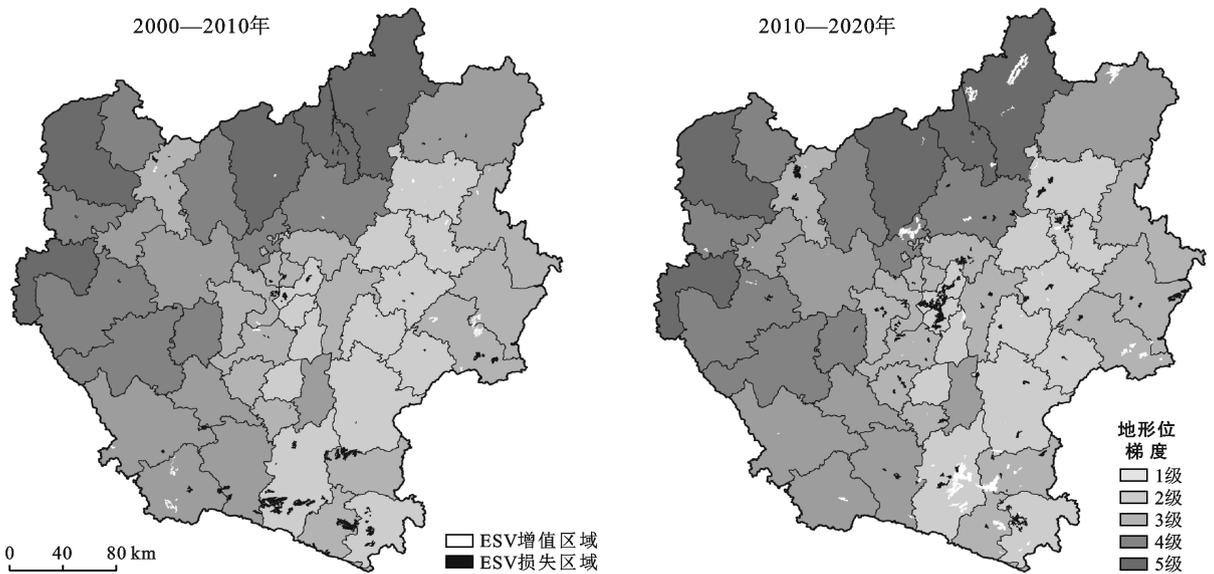


图 6 滇中城市群生态系统服务价值损益空间分布格局

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究以位于典型高原喀斯特地貌区的滇中城市群为例, 结合其特殊的地域背景引入地形位指数, 探讨 2000—2020 年期间研究区土地利用和 ESV 在地形梯度上的分布特征及 LUCC 对 ESV 的影响。研究结果显示: ①土地利用和 ESV 在地形梯度上的分布差异显著。这种差异分布是由自然、社会经济和相关政策共同影响的结果。自然因素主要体现为地形初步决定了研究区的土地利用方式和 ESV 水平, 高地形梯度区域植被类型丰富, 导致 ESV 较高, 这与杨锁华等^[26]研究结论类似; 社会经济因素主要是通过

人口分布和城市发展逐渐改变区域土地利用状况进而直接或间接地影响 ESV 水平, 表现为低地形梯度区域由于人类活动干扰大, 逐步演变成农业和城镇发展的重点区域, 导致 ESV 较低, 这与陈奕竹等^[24]研究结论相类似; 政策因素主要体现为地方政府以生态保护为目标采取了一系列的退耕还林、还草、还湖等相关措施。值得注意的是, 相关政策虽然对林草地和水域等 ESV 系数较高的地类起到了一定的保护作用, 但滇中城市群作为城镇化快速发展中的区域, 受政策影响增加或保护的生态用地面积不足以平衡建设扩张侵占的面积。因此, 今后在制定生态保护政策时应遵循研究区地形的层级性分布规律因地制宜地实施相关措施。低地形梯度区域不仅是城镇发展区,

更是研究区耕地和“三江六湖”等水域的重点分布区,在经济发展的同时要重点保护耕地和水域。高地形梯度区域林地和草地分布较为广泛,但因自然条件限制,生态环境较敏感脆弱,要严格限制人类活动对生态环境的破坏。②滇中城市群 LUCC 对 ESV 影响显著。随着城镇化进程的推进,研究区土地利用结构不断发生变化,直接影响区域生态系统服务功能。林地、草地和水域作为研究区构成 ESV 的主体,对气候调节、水文调节以及生物多样性保护等生态系统服务具有关键作用,它们的下降将导致研究区 ESV 损失,从而对区域生态安全和可持续发展造成不良影响。因此,林地、草地和水域对于维护研究区生态系统的稳定具有十分重要的作用,今后在土地利用规划中需重点保护林地、草地和水域。还需注意的是,应重点关注研究区 ESV 变化的冷点区和热点区。就 ESV 增值热点区而言,要尽可能地维持和提升其 ESV,充分利用生态保护政策进一步提升其生态系统服务的供给能力;就 ESV 损失冷点区而言,主要任务为协调经济发展和生态保护的矛盾,严格控制建设用地规模,提高建设用地的集约利用程度,并继续深入推进农村居民点整治和城乡建设用地增减挂钩工作。本研究从数量和空间两个角度度量 LUCC 对 ESV 的影响,不仅能够从宏观上掌握区域 ESV 对 LUCC 的响应情况,还能够为有关部门进行土地利用空间调控,因地制宜地提升区域 ESV 提供决策依据^[23]。

本研究采用谢高地等^[30]提出的基于单位面积价值当量因子的方法计算研究区内的 ESV,并在此基础上结合滇中城市群快速城镇化的背景,引入建设用地价值当量^[33],对研究区的生态系统服务价值系数表进行了修正。与其他方法相比,该方法计算简单且评估较全面,是目前中国适用范围最广的方法,研究结果客观,具有很好的代表性,可为滇中城市群土地利用与生态文明建设提供理论参考和借鉴。但需指出的是,本研究在对单位面积生态系统服务价值当量赋值时,仅对一级地类进行赋值,今后的研究可以考虑进一步细分到二级地类,将每一种地类赋予与其生态功能相一致的价值系数,从而提高 ESV 测算结果的精确度。

4.2 结论

(1) LUCC 方面,滇中城市群 2000—2020 年期间各土地利用类型均有不同程度的变化且在地形梯度上呈差异分布。从数量上来看,耕地、林地和水域减少,草地、建设用地和未利用地增加,建设用地面积变化最为剧烈,增加了 $2.16 \times 10^5 \text{ hm}^2$;从转移上来看,2000—2020 年,地类之间的转移主要发生在耕地、

林地和草地之间,其次是耕地、林地和草地向建设用地的转移,其中建设用地总转入面积由 $2.57 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到 $21.08 \times 10^4 \text{ hm}^2$;从地形梯度来看,耕地、水域和建设用地主要分布在低地形梯度区域,林地主要分布在高地形梯度,草地在各地形梯度均有分布。

(2) ESV 方面,滇中城市群 ESV 空间分异特征较显著,ESV 高值区主要位于海拔高且坡度大的西部和北部区域,ESV 低值区则主要位于低海拔、坡度小的中部和南部区域。2000—2010 年,马龙区和沾益区为主要的 ESV 增值热点区,红河州的建水县、开远市、个旧市和蒙自市为主要损失冷点区;2010—2020 年冷热点区域发生变化,ESV 增值热点区主要分布在红河州和玉溪市交界处的部分区县,损失冷点区主要分布昆明市中部。总的来看,ESV 变化区域主要位于低地形梯度。

(3) LUCC 对 ESV 的影响方面,其他地类向林地和水域的转移是导致滇中城市群 ESV 增值的主要原因,而林地和水域的流失以及建设用地对耕地的侵占则导致滇中城市群 ESV 损失巨大。林地和水域作为滇中城市群主要的生态用地,生态价值系数最高,应重点保护,还要严格控制建设用地规模,加强对建设用地的动态监测与预警。

[参 考 文 献]

- [1] 王军,顿耀龙.土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述[J].长江流域资源与环境,2015,24(5):798-808.
- [2] 李子君,刘金玉,姜爱霞,等.基于土地利用的沱河流域生态系统服务价值动态变化[J].水土保持研究,2020,27(2):269-275,283.
- [3] Meyfroidt P, Lambin E F, Erb K H, et al. Globalization of land use: Distant drivers of land change and geographic displacement of land use [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013,5(5):438-444.
- [4] Sterling S M, Ducharne A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle [J]. Nature Climate Change, 2013,3(4):385-390.
- [5] Sala O E, Chapin F S, Armesto J J, et al. Biodiversity-Global biodiversity scenarios for the year 2100 [J]. Science, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [6] Trimble S W, Crosson P. US soil erosion rates-myth and reality[J]. Science, 2000, 289(5477): 248-250.
- [7] Hassan R, Scholes R, Ash N. Ecosystems and human well-being: current state and trends [J]. Journal of Bacteriology, 2005, 1(5): 1387-1404.
- [8] 王晓东,蒙古军.土地利用变化的环境生态效应研究进展[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(6):1133-1140.

- [9] 肖建设, 乔斌, 陈国茜, 等. 黄河源区玛多县土地利用和生态系统服务价值的演变[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 510-521.
- [10] 王大菊, 卫海燕, 贺敏, 等. 基于土地利用的三峡库区生态系统服务价值时空格局分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(1): 90-100.
- [11] 徐胜利. 江西省农村土地利用变化及生态系统服务价值研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(7): 113-120.
- [12] Song Wei, Deng Xiangzheng. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 705-719.
- [13] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 等. 近 30 年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2973-2985.
- [14] Egarter Vigl L, Tasser E, Schirpke U, et al. Using land use/land cover trajectories to uncover ecosystem service patterns across the Alps [J]. *Regional Environmental Change*, 2017, 17(8): 2237-2250.
- [15] Arowolo A O, Deng X, Olatunji O A, et al. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 597-609.
- [16] Li Fei, Zhang Suwen, Yang Jiuchun, et al. Effects of land use change on ecosystem services value in West Jilin since the reform and opening of China [J]. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 12-20.
- [17] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3311-3319.
- [18] 雷军成, 王莎, 汪金梅, 等. 土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 74-84.
- [19] 李明, 吕芳, 吴怡璇. 城市边缘区土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究: 以大连市甘井子区为例[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(5): 36-42.
- [20] 盛晓雯, 曹银贵, 周伟, 等. 京津冀地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(6): 79-86.
- [21] 张艳芳, 李云. 1995—2015 年关中平原城市群生态系统服务价值(ESV)及其时空差异[J]. 浙江大学学报(理学版), 2020, 47(5): 615-623, 629.
- [22] 涂小松, 龙花楼. 2000—2010 年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化[J]. 资源科学, 2015, 37(12): 2451-2460.
- [23] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 等. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3482-3493.
- [24] 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.
- [25] 徐媛银, 孙思琦, 薛达元, 等. 基于地形梯度的赣南地区生态系统服务价值对人为干扰的空间响应[J]. 生态学报, 2019, 39(1): 97-107.
- [26] 杨锁华, 胡守庚, 瞿诗进. 长江中游地区生态系统服务价值的地形梯度效应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 976-986.
- [27] 王宁, 杨光, 韩雪莹, 等. 内蒙古 1990—2018 年土地利用变化及生态系统服务价值[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 244-250.
- [28] 董会忠, 姚孟超. 成渝经济区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, 2020, 40(1): 213-220.
- [29] Costanza R, Arge, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(15): 253-260.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 中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.
- [33] 邓舒洪. 区域土地利用变化与生态系统服务价值动态变化研究[D]. 浙江 杭州: 浙江大学, 2012.
- [34] 彭文甫, 周介铭, 杨存建, 等. 基于 LUC 的四川省 ESV 研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1053-1062.
- [35] 史慧慧, 程久苗, 费罗成, 等. 1990—2015 年长三角城市群土地利用转型与生态系统服务功能变化[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 301-307.