

滇中城市群土地利用转型及生态系统服务价值交叉敏感性分析

陈相标¹, 丁文荣¹, 李孝川²

(1.云南师范大学 地理学部, 昆明 650500; 2.云南师范大学 教育学部, 昆明 650500)

摘 要:为探清滇中城市群土地利用转型对生态系统服务功能的影响,基于 2000 年、2010 年、2020 年 3 期 Landsat TM/OLI 遥感土地利用解译数据,运用土地利用动态变化模型、生态系统服务价值计算模型和土地利用转型生态贡献度研究了不同土地利用转型过程和生态系统服务价值的时空演变特征,并结合交叉敏感性系数模型定量评估了土地利用转型对生态系统服务价值的响应程度并划定敏感性分区。结果表明:(1) 滇中城市群土地利用类型以林地、草地、耕地为主,建设用地持续扩张及耕地、水域、未利用地面积不断减少,草地和林地经历了“先减少后增加”的变化过程;(2) 研究期间生态系统服务价值呈“先减少后增加”的趋势,地均生态系统服务价值高值区主要分布在滇池、抚仙湖和星云湖三大高原湖泊流域;(3) 近 20 年来,退耕还林、还草、还湖对生态系统服务功能改善的贡献度达 49.10%,毁林开荒、围湖造田对林地、草地和水域的占用导致生态系统服务价值减少约 2.65 亿元;(4) 耕地、林地、草地和水域向其他地类转型对生态服务价值的响应较为敏感,耕地、林地和草地与建设用地间转型的高生态敏感区集中在曲靖和楚雄,耕地与林地间转型的高生态敏感区分布较小,林地向草地和水域转型的低生态敏感区空间分布范围最广。综上,该区不同土地利用转型对生态系统服务功能影响显著。

关键词:土地利用转型; 生态系统服务价值; 交叉敏感性; 滇中城市群

中图分类号:F301.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0233-09

Analysis of Cross-Sensitivity of Land Use Transition and Ecosystem Service Value of Urban Agglomeration in Central Yunnan

CHEN Xiangbiao¹, DING Wenrong¹, LI Xiaochuan²

(1.Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2.Faculty of Education, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to reveal the impact of land use transition on the ecosystem service function of urban agglomeration, central Yunnan was the focus of research. Based on the three-phase Landsat TM/OLI remote sensing interpretation data in 2000, 2010 and 2020, the dynamic change model of land use, the ecosystem service value calculation model and the ecological contribution of land use transformation explores the temporal and spatial evolution characteristics of different land use transformation processes and ecosystem service value. It also combines the cross-sensitivity coefficient model to quantitatively evaluate the response degree and direction of land use transformation to ecosystem service value and delineate the sensitivity partition. The results show that: (1) the land use types of urban agglomerations in central Yunnan are mainly forestland, grassland and cultivated land. While the construction land continues to expand, the area of cultivated land, water area and unused land continues to decrease, the grassland and forest land have also experienced a process of change, first decreasing and then increasing; (2) during the study period, the ecosystem service value showed a trend of first decreasing and then increasing, the high value areas of average ecosystem service value were mainly distributed in the three plateau lake basins of Dianchi Lake, Fuxian Lake and Xingyun Lake; (3) in the past 20 years, returning farmland to forests, grasses, and lakes have contributed

收稿日期:2021-08-27

修回日期:2021-09-17

资助项目:国家自然科学基金“亚热带高原岩溶区陆地植被-湖泊湿地间的水文协同效应观测研究”(41761105)

第一作者:陈相标(1997—),男,云南曲靖人,硕士研究生,研究方向为生态系统服务功能。E-mail:cx6271@163.com

通信作者:丁文荣(1979—),男,云南昆明人,博士,副教授,主要从事水文水资源研究。E-mail:dingwenrong@163.com

49.10% to the improvement of ecosystem services, deforestation and reclamation of land and reclaiming land from lakes have taken up woodland, grassland and waters, resulting in a reduction of the ecosystem service value by approximately 265 million yuan; (4) the transformation of cultivated land, forest land, grassland and water area to other land types is sensitive to the value of ecological services. The highly ecologically sensitive areas of transformation between cultivated land, forest land, grassland and construction land are concentrated in Qujing and Chuxiong, the highly ecologically sensitive areas of transformation between cultivated land and forest land are less distributed, and the lower ecologically sensitive areas of transformation from forest land to grassland and water area are the most widely distributed. Different land use transitions in the study area were significant on ecosystem service function.

Keywords: land use transformation; ecosystem service value; cross-sensitivity; urban agglomeration in central Yunnan

土地是人类最基本的社会经济活动和生态环境建设的空间载体^[1],对维持生态系统的结构、过程和功能起着决定作用^[2]。随着新型工业化和新型城镇化发展持续推进,社会经济发展进入深度转型时期^[3],区域土地利用在深度与广度上均发生激烈的动态转型。土地利用转型是土地利用变化综合研究的新途径^[4],指在经济社会变化和革新的驱动下,一段时期内与经济和社会发展阶段转型相对应的区域土地利用形态发生动态转变的过程^[5]。土地利用变化作为生态系统服务功能的主要驱动力^[6],引起了学术界的广泛关注^[7]。生态系统服务是指人类直接或间接从生态系统中获得的各种惠益^[8],包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务等^[9]。而生态系统服务价值(Ecosystem Services Value,ESV)作为生态系统服务功能的重要评估指标,其价值量变化在一定程度上表征人类活动对生态系统的影响程度^[3],生态系统服务价值的研究也成为国际地理学、生态学及相关学科研究的前沿和热点^[10-11]。

生态敏感性是指生态系统对各种自然和人类活动干扰的敏感程度,能有效反映区域生态系统遇到干扰时出现生态环境问题的可能性大小^[12-13],也是研究区域土地利用转型与生态系统服务的重要手段^[14]。但传统的敏感性分析方法直接把 Kreuter 等^[15]提出的敏感性系数作为判定当量因子系数的主要方法,忽略了各土地利用类型转型的双向性,不能完全表征土地利用净转型对生态系统服务价值的响应程度^[13]。因此,有学者^[16]提出了生态系统服务交叉敏感性的概念和计算模型,该研究仍处于基础阶段^[17],缺乏实例验证研究。进入 21 世纪初期城市群成为国家参与全球竞争与国际分工的全新地域单元^[18],也是生态环境问题及生态系统服务冲突的高发区^[19]。目前,对于城市群土地利用转型与生态系统服务价值评估研究相对较多^[20-21],但很少有对城市群地区的生态系

统服务功能进行敏感性分区研究。

滇中城市群是国家重点培育的 19 个城市群之一^[22],也是西部地区重要经济增长极。近年来,随着人类活动干扰进一步加剧,永久耕地和生态保护面临的压力持续增长。当前,对于滇中城市群的生态系统服务价值测算及生态敏感性分区鲜有研究,这在一定程度上阻碍滇中城市群的发展推进。因此,本文以滇中城市群为研究对象,基于遥感监测数据,对该区近 20 a 以来的土地利用转型过程、生态系统服务价值时空演变特征及土地利用转型对 ESV 的贡献度进行测算评估,定量分析土地利用转型对 ESV 的响应程度并划定敏感性分区。以期优化滇中城市群国土空间格局、保护生态环境提供科学依据和现实参考。

1 研究区概况

滇中城市群地处云贵高原中部(100°43′—104°49′E, 24°58′—25°09′N)。为典型的高原山区城市,由昆明市、曲靖市、玉溪市、楚雄州和红河州北部的 7 县市(蒙自市、开远市、弥勒市、个旧市、建水县、泸西县、石屏县)组成,共 49 个县(市)区,总面积 111 402 km²^[22],常住人口约为 2 195 万人(2020 年底)。地形以山地和山间盆地为主,年平均气温 17.20℃,年均降水量约 1 000.63 mm,属低纬度高原山地季风气候,植被以亚热带常绿阔叶林和灌丛草地为主。该区作为全国“两横三纵”城镇化战略格局的重要组成部分,在国家开发开放格局和生态文明建设中具有重要的战略地位。近 20 年来,由于人类活动干扰加强,土地利用景观格局发生了剧烈变化,经济建设与生态保护、永久耕地的冲突日益突出。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文所选用的 3 期土地利用遥感数据来源于地理

空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 30 m×30 m。基于 ENVI 5.3 软件对获取的土地利用影像数据进行辐射校正、大气校正、波段合成、影像拼接和裁剪等预处理, 并按照《全国遥感监测土地利用/覆盖分类体系》分类标准, 采用最大似然法, 并结合高分辨率历史影像和人工目视判读的方式, 将该区土地利用类型划分为: 耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 种类型; 粮食单产数据来源于 2000—2020 年《云南省统计年鉴》; 各行政单元界线、政府驻地、河流等数据均来自云南省地理信息公共服务平台标准地图 (<https://yunnan.tianditu.gov.cn>) 矢量化获得。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用动态变化模型 土地利用动态度是定量评价土地利用数量和面积变化最常用的方法之一^[23]。利用单一土地利用动态度(K)来表示滇中城市群在一定时间内不同土地利用类型数量的变化速度^[24], 表达式为:

$$K = [(U_{i2} - U_{i1}) / U_{i1}] / T \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为 i 类土地利用类型在 t_1 — t_2 时段内的动态度; U_{i1} 和 U_{i2} 分别为 t_1 和 t_2 时段 i 类土地利用类型的数量; T 为研究时长。

利用综合土地利用动态度(LC)来刻画滇中城市

群在一定研究时段内综合土地利用类型数量的速度变化^[7]。表达式为:

$$LC = (\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j} / 2 \sum_{i=1}^n LU_i) / T \times 100\% \quad (2)$$

式中: ΔLU_{i-j} 为研究时段地类 i 转为地类 j 面积的绝对值; LU_i 为 i 类土地利用类型的面积; n 为不同土地利用类型数量。

2.2.2 生态系统服务价值计算模型 基于 Costanza 等^[9]提出的全球生态系统服务价值估算体系模型, 以谢高地等^[25]建立的中国陆地生态系统服务价值当量表为基础, 根据滇中城市群地区的社会经济发展状况, 对单位面积农田粮食产量的经济价值进行修正, 通过云南省统计年鉴计算得出该区 2000—2020 年的年均粮食产量为 4 629.70 kg/hm², 为消除货币通货膨胀和粮食价格波动对评估结果的影响, 统一与 2020 年的粮食平均单价(2.52 元/kg)^[26]为基价进行计算, 依据“1 个生态服务价值当量的经济价值量等于当年全国平均粮食当产市场价值的 1/7”^[25]得到滇中城市群地区 1 个生态系统服务价值当量因子的经济价值为 1 666.69 元/hm², 建设用地的价值系数参考前人研究结果^[23]进行计算。根据上述信息计算得出滇中城市群地区各土地利用类型所对应的生态系统价值修正系数(表 1)。

表 1 滇中城市群单位面积生态系统服务价值修正系数 元/hm²

服务类型	功能类型	生态系统服务价值					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	1841.69	841.68	633.34	1333.35	0.00	16.67
	原材料生产	408.34	1933.36	933.35	383.34	0.00	50.00
	水资源供给	−2175.03	1000.01	516.67	13816.86	0.00	33.33
调节服务	气体调节	1483.35	6358.42	3283.38	1283.35	33.33	183.34
	气候调节	775.01	18650.26	8683.45	3816.72	0.00	166.67
	净化环境	225.00	5575.08	2866.71	9250.13	166.67	516.67
	水文调节	2491.70	12450.17	6366.76	170402.39	50.00	350.00
支持服务	土壤保持	866.68	7741.78	4000.06	1550.02	33.33	216.67
	维持养分循环	258.34	591.67	300.00	116.67	0.00	16.67
	生物多样性	283.34	7050.10	3633.38	4250.06	33.33	200.00
文化服务	美学景观	125.00	3091.71	1600.02	3150.04	16.67	83.33
合计		6583.43	65284.25	32817.13	209352.93	333.34	1833.36

滇中城市群生态系统服务价值计算模型公式如下^[27]:

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

$$AESV = \sum_{i=1}^n (LUC_i \times VC_i) / \sum_{i=1}^n LUC_i \quad (4)$$

$$C = \frac{AESV_{i2} - AESV_{i1}}{AESV_{i1}} \times 100\% \quad (5)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值总量; LUC_i 为土地利用类型 i 的面积; VC_i 为土地利用类型 i 的生态系统服务价值修正系数;AESV 为地均生态系统服务价

值; $AESV_{i1}$ 和 $AESV_{i2}$ 分别为 t_1 和 t_2 时地均生态系统服务价值; C 是地均生态系统服务价值变化率。

2.2.3 土地利用转型的生态贡献度 土地利用转型对生态系统服务价值的贡献度是指 i 类土地利用类型转型为 j 类土地利用类型所引起的生态系统服务价值的变化率^[28]。其表达式为:

$$EL_{i-j} = \frac{(VC_j - VC_i) \times LUC_{i-j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(VC_j - VC_i) \times LUC_{i-j}]} \times 100\% \quad (6)$$

式中: EL_{i-j} 为土地利用转型对生态系统服务价值的

贡献度;VC_j和 VC_i分别为土地利用类型 *j* 和 *i* 的生态系统服务价值当量修正系数;LUC_{*i*-*j*}为研究期间 *i* 类土地利用类型转为 *j* 类土地利用类型的面积。

2.2.4 交叉敏感性系数 交叉敏感性系数(Coefficient of Cross-Sensitivity, CCS)是指当某土地利用类型向另一土地类型转换时的单位面积变化率所引起的生态服务价值变化率^[16]。交叉敏感性系数是不同土地利用类型的净转型状态,并将相互转型的两个土地利用类型基期面积的平均值作为转型率的基数。该系数需满足:两个地类发生净转型的同时,其余地类未发生地类转型^[2]。表达式为:

$$\begin{aligned} CCS(j)_{kl} &= \left| \frac{\Delta ES_{(j-1,j)}}{\Delta CCL_{(k,I)}} \right| \\ &= \left| \frac{(ES_j - ES_{j-1})/ES_{j-1}}{(IR_{(k,I)} - TR_{(k,I)})/(A_k + A_I)/2} \right| \end{aligned} \tag{7}$$

式中:CCS(*j*)_{*kl*}为第 *j* 年 *k* 土地利用类型与 *I* 土地利用类型相互转型的交叉敏感性系数;ΔES_(*j*-1,*j*)为第(*j*-1)年至第 *j* 年 ESV 变化率;ΔCCL_(*k*,*I*)为土地利用类型 *k* 和 *I* 的净转型率;IR_(*k*,*I*)为 *k* 土地利用类型向 *I* 土地利用类型转型的面积;TR_(*k*,*I*)为 *I* 土地利用类型向 *k* 土地利用类型转型的面积;A_{*k*}和 A_{*I*}分别为 *k* 类和 *I* 类土地利用类型的基期面积。若 CCS(*j*)_{*kl*}>0 表明 ESV 增减变化与不同土地利用类型的净转型同方向变化;若 CCS(*j*)_{*kl*}<0 表明 ESV 增减变化与不同土地利用类型的净转型反方向变化;|CCS(*j*)_{*kl*}|越大,表明 ESV 对某两类土地利用类型的净转型越敏感;反之,越不敏感。

表 2 2000—2020 年滇中城市群各土地利用变化情况

时期	项目	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000 年	面积/km ²	23039.92	54925.87	30634.66	1361.89	1284.22	155.45
	比例/%	20.68	49.30	27.50	1.22	1.15	0.14
2010 年	面积/km ²	22976.72	54847.03	30342.68	1353.26	1780.98	101.33
	比例/%	20.63	49.23	27.24	1.21	1.60	0.09
2020 年	面积/km ²	12209.43	59418.63	35437.98	1133.55	3134.89	67.51
	比例/%	10.96	53.34	31.81	1.02	2.81	0.06
2000—2010 年	单一动态度/%	−0.03	−0.01	−0.10	−0.06	3.87	−3.48
	综合土地利用动态度/%	0.04					
2010—2020 年	单一动态度/%	−4.69	0.83	1.68	−1.62	7.60	−3.34
	综合土地利用动态度/%	0.99					
2000—2020 年	单一动态度/%	−2.35	0.41	0.78	−0.84	7.21	−2.83
	综合土地利用动态度/%	0.50					

3.2 生态系统服务价值时空变化特征

根据公式(3)的计算结果,滇中城市群生态系统服务功能总体呈现出“先减少后增加”的趋势。从时间尺度看,2000 年、2010 年、2020 年滇中城市群生态系统服务价值分别为 5 028.81 亿元、5 011.60 亿元、

3 结果与分析

3.1 土地利用变化过程

基于土地利用遥感解译数据的统计分析,得到滇中城市群各土地利用类型的面积变化情况(表 2)。近 20 a 以来,滇中城市群土地利用变化较为明显,林地、草地、耕地是该区主要的土地利用类型,占总面积的 96%以上。建设用地规模不断扩张,整个研究期间面积增加了 1 850.67 km²,耕地、水域、未利用地持续减少,2000—2020 年分别减少了 10 830.49,228.34,87.93 km²;草地和林地呈“先减少后增加”的演变过程,前期(2000—2010 年)面积分别减少了 78.83,291.98 km²,后期(2010—2020 年)由于退耕还林还草政策的大力推进以及耕地撂荒等^[29]影响,二者面积分别增加了 4 571.60,5 095.30 km²。

由公式(1)和(2)计算出研究区单一土地利用动态度和综合土地利用动态度(表 2)。从单一土地利用动态度来看,前期耕地、林地、草地、水域和未利用地均呈现出减少趋势,其中未利用地的减少速度最快为 3.48%,其次是草地减少速度为 0.10%;建设用地面积持续增加,变化最为激烈,前期增速为 3.87%,后期增速达 7.60%。后期耕地、水域、未利用地面积均有所减少,减速分别为 4.69%,1.62%,3.34%;林地、草地和建设用地增速分别为 0.83%,1.68%,7.60%。从综合土地利用动态度来看,前期土地利用变化相对迟缓,综合动态度仅为 0.04%,后期土地利用变化较为活跃,综合土地利用动态度高达 0.99%。

5 360.93 亿元。前期,ESV 减少了 17.21 亿元,年均减少量为 1.72 亿元;后期,ESV 增加了 349.34 亿元,主要由于退耕还林还草以及耕地撂荒等对该区生态系统的改善作用。近 20 a 以来,生态系统功能各项子系统中,食物生产呈现出持续减少的趋势,主要由

于该区新型城镇化的不断深入推进,建设用地大规模扩张占用耕地,导致食物生产功能持续下降;气候调节价值量最高,3 个时期的价值量分别为 1 313.48 亿元、1 309.38 亿元、1 429.70 亿元,均占总价值的 26% 以上;维持养分循环功能价值最低,3 个时期的价值量分别为 47.80 亿元、47.65 亿元、49.08 亿元。

从空间尺度看,由公式(4)计算得到:2000—2020 年滇中城市群县域尺度地均生态系统服务价值空间分布(图 1)。在整个研究时段,滇中城市群地均 ESV 空间差异明显,高值区[(5.50~7.50)万元/hm²]主要

分布在滇池、抚仙湖和星云湖三大高原湖泊流域,生态系统功能受湖泊调节影响较大;2000 年,48.98% 的县(市)区地均 ESV 处于低值区[(2.50~4.50)万元/hm²],主要集中在曲靖市和昆明市,2010 年低值区进一步向南扩大到 57.14% 的县(市)区,特别是麒麟区、陆良县和罗平县最为突出,主要是由于该区属于滇东喀斯特石漠化的典型区域,生态系统较为脆弱;2020 年,低值区范围明显缩小至 32.65% 的县(市)区,高值区的范围有所扩大,生态系统服务功能明显改善,元谋县和官渡区出现局部退化。

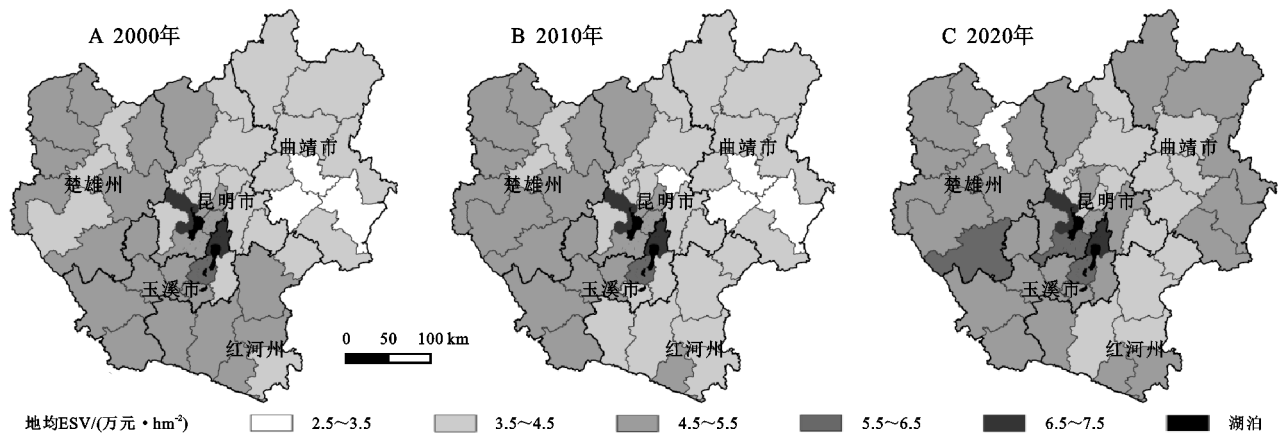


图 1 2000—2020 年滇中城市群地均 ESV 空间分布

由公式(5)计算得出该区地均生态系统服务价值变化率(图 2),从图中可以看出前期有 69.39% 的县(市)区地均生态系统服务价值处于减少趋势,其中石屏、建水、嵩明 3 个县的减少幅度均超过了 10%;后期地均 ESV 增加的县(市)区高达 85.71%,其中师宗县、罗平县、富源

县和华宁县增幅均大于 20%,永仁县和官渡区降幅超过 10%,这一时段增加的县区数量较前期增加了 30 个;在整个研究期内,地均 ESV 增加幅度较大的区域主要集中分布于曲靖市,地均 ESV 变化率在 0~10% 的区域主要集中连片分布于玉溪市。

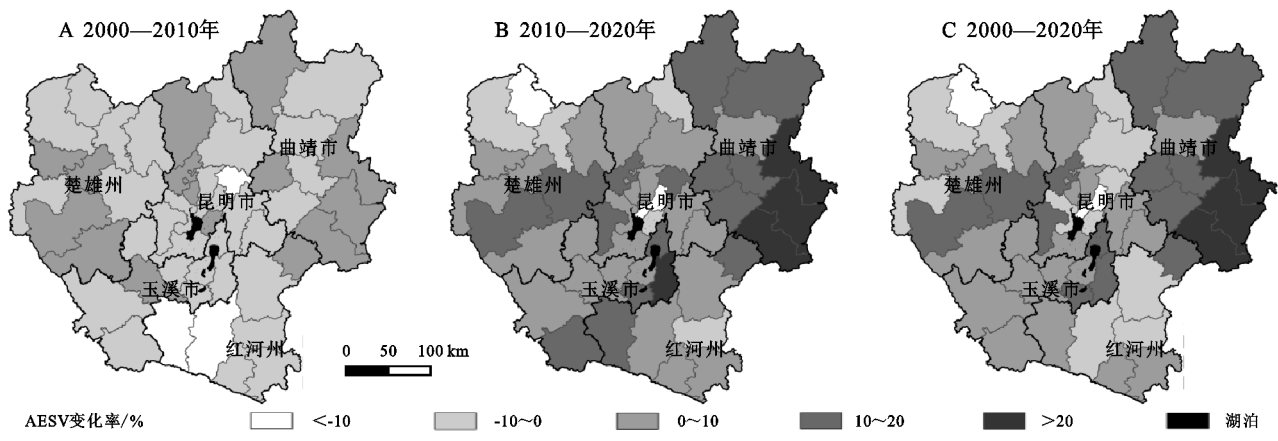


图 2 2000—2020 年滇中城市群地均 ESV 变化率空间分布

3.3 土地利用转型对生态系统服务价值的贡献度

由公式(6)计算得出 2000—2020 年滇中城市群各土地利用转型对生态系统服务价值的贡献度(表 3)。前期,草地转型为林地和耕地转为林地、草地、水域对滇中城市群生态系统服务功能改善的贡献度分别为 21.31%,28.32%,表明植树造林和退耕还林、还草、还湖对该区生态系统服务功能起到了改善作

用,毁林开荒、围湖造田是导致滇中城市群生态系统服务功能退化的重要影响因素,占到了 53.06% 的贡献度。后期,草地转为林地和耕地转为林地、草地、水域对研究区生态系统服务功能改善的贡献度分别为 33.69%,50.12%,林地向草地、耕地的转型和草地向耕地的转型导致生态系统服务功能降低,贡献度分别为 42.93%,5.87%。近 20 a 来,草地转为林地和耕地

转为林地、草地、水域对生态系统服务功能的贡献度分别为 32.02%，49.10%，林地向草地、耕地的转型和草地、水域向耕地的转型导致生态系统服务功能恶化的贡献度分别为 41.32%，7.69%。

表 3 2000—2020 年滇中城市群各土地利用转型对生态系统服务价值的贡献度

生态服务功能	2000—2010 年			2010—2020 年			2000—2020 年		
	土地利用	ESV 变化量/	贡献度/	土地利用	ESV 变化量/	贡献度/	土地利用	ESV 变化量/	贡献度/
	转变类型	10 ⁶ 元	%	转变类型	10 ⁶ 元	%	转变类型	10 ⁶ 元	%
生态系统服务 功能改善	3→2	39.09	21.31	3→2	406.33	33.69	3→2	405.14	32.02
	1→2	29.51	16.08	1→2	344.37	28.55	1→2	352.06	27.82
	1→3	15.98	8.71	1→3	241.25	20.00	1→3	235.77	19.63
	1→4	6.47	3.53	1→4	18.98	1.57	1→4	20.90	1.65
	3→4	4.99	2.72	3→4	15.27	1.27	3→4	15.76	1.25
	2→4	4.88	2.66	2→4	11.93	1.25	2→4	14.44	1.14
	合计	100.92	55.01	合计	1038.14	86.33	合计	1044.07	83.51
生态系统服务 功能恶化	2→3	−38.48	20.97	2→3	−356.24	29.54	2→3	−358.70	28.35
	2→1	−31.41	17.12	2→1	−161.49	13.39	2→1	−164.13	12.97
	3→1	−20.14	10.98	3→1	−70.85	5.87	3→1	−71.77	5.67
	4→1	−7.33	3.99	4→3	−32.34	2.68	4→3	−31.70	2.50
	2→5	−4.28	2.34	2→5	−17.66	1.46	4→1	−28.98	2.29
	3→5	−4.07	2.22	4→2	−15.74	1.31	2→5	−17.90	1.41
	合计	−105.71	57.62	合计	−654.32	54.25	总计	−673.17	53.19

注：表中 1—6 分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地；3→2 代表草地转型为林地，其他代码以此类推。

3.4 生态系统服务交叉敏感性分析

3.4.1 生态服务价值对土地利用转型的交叉敏感性响应 由公式(7)计算滇中城市群前后两个时段 6 种地类 15 种土地利用转型对 ESV 变化的交叉敏感性响应矩阵(表 4)。分析表明，耕地、林地、草地、水域向其他土地利用类型转型较为敏感，其中林地向草地、水域、建设用地的转型以及耕地向水域、草地向水域、水域向建设用地等 6 种土地利用类型间的转型最为敏感，耕地向草地和建设用地的转型缺乏敏感性。

表 4 滇中城市群生态服务价值对土地利用转型的交叉敏感性响应矩阵

2010—2020 年		2000—2010 年				
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
耕地		耕地↗、林地↘,林地向耕地 1%转型率引起 ESV 4.12%的增加	耕地↗、草地↘,草地向耕地 1%转型率引起 ESV 0.58%的增加	耕地↗、水域↘,水域向耕地 1%转型率引起 ESV 9.85%的增加	耕地↘、建设用地↗,耕地向建设用地 1%转型率引起 ESV 0.14%的减少	耕地↗、未利用地↘,未利用地向耕地 1%转型率引起 ESV 3.5%的增加
林地	耕地↘、林地↗,耕地向林地 1%转型率引起 ESV 0.87%的减少		林地↗、草地↘,草地向林地 1%转型率引起 ESV 7.76%的增加	林地↘、水域↗,林地向水域 1%转型率引起 ESV 3.63%的减少	林地↘、建设用地↗,林地向建设用地 1%转型率引起 ESV 2.04%的减少	林地↗、未利用地↘,未利用地向林地 1%转型率引起 ESV 11.80%的增加
草地	耕地↘、草地↗,耕地向草地 1%转型率引起 ESV 0.29%的减少	林地↗、草地↘,草地向林地 1%转型率引起 ESV 1.92%的增加		草地↘、水域↗,草地向水域 1%转型率引起 ESV 4.46%的减少	草地↘、建设用地↗,草地向建设用地 1%转型率引起 ESV 0.49%的减少	草地↗、未利用地↘,未利用地向草地 1%转型率引起 ESV 13.99%的增加
水域	耕地↗、水域↘,水域向耕地 1%转型率引起 ESV 21.65%的增加	林地↗、水域↘,水域向林地 1%转型率引起 ESV 74.03%的增加	草地↗、水域↘,水域向草地 1%转型率引起 ESV 11.43%的增加		水域↘、建设用地↗,水域向建设用地 1%转型率引起 ESV 3.04%的减少	水域↗、未利用地↘,未利用地向水域 1%转型率引起 ESV 1.64%的增加
建设用地	耕地↘、建设用地↗,耕地向建设用地 1%转型率引起 ESV 0.74%的减少	林地↘、建设用地↗,林地向建设用地 1%转型率引起 ESV 11.90%的减少	草地↘、建设用地↗,草地向建设用地 1%转型率引起 ESV 20.26%的减少	水域↘、建设用地↗,水域向建设用地 1%转型率引起 ESV 3.25%的减少		建设用地↗、未利用地↘,未利用地向建设用地 1%转型率引起 ESV 0.18%的增加
未利用地	耕地↗、未利用地↘,未利用地向耕地 1%转型率引起 ESV 78.88%的增加	林地↗、未利用地↘,未利用地向林地 1%转型率引起 ESV 53.58%的增加	草地↗、未利用地↘,未利用地向草地 1%转型率引起 ESV 9.99%的增加	水域↗、未利用地↘,未利用地向水域 1%转型率引起 ESV 33.60%的增加	建设用地↗、未利用地↘,未利用地向建设用地 1%转型率引起 ESV 2.44%的增加	

注：表中“↗”表示地类面积增加，“↘”表示地类面积减少。

(1) 耕地与其他地类转型的交叉敏感性:耕地与林地、草地的净转型,前期均呈现耕地减少,林地和草地增加,引起 ESV 增加,后期不同地类的净转型出现逆转,且敏感性降低,表明 ESV 的变化与该地类转型方向相反;耕地与水域的转型前后两期均表现为耕地增加水域减少,敏感性显著增强;耕地与建设用地间的转型,前后两期均表现为耕地向建设用地的净转入,导致 ESV 减少,ESV 变化方向与该地类转型方向相反,后期较前期敏感性增强。

(2) 林地向其他地类转型的交叉敏感性:前期林地向水域和建设用地净转入,导致林地减少,水域和建设用地增加,引起 ESV 减少,较后期敏感性均有明显增强;林地向草地净转入,均导致前后两期草地减少林地增加,引起 ESV 增加,但敏感性系数由前期的 7.76%下降至后期的 1.92%。

(3) 草地向其他地类转型的交叉敏感性:前期草地向水域、建设用地净转入,导致草地减少,相应地类增加,草地向水域和建设用地净转型引起 ESV 减少,后期敏感性增加,建设用地敏感性变化最为明显,敏感

性系数由前期的 0.49%增加到后期的 20.26%。

(4) 水域向其他地类转型的交叉敏感性:前后两个时段水域向建设用地净转入,均导致水域减少,建设用地增加,引起 ESV 减少;水域向未利用地净转入均导致水域面积增加,未利用地减少,引起 ESV 增加,敏感性系数由前期的 1.64%增加到后期的 33.60%。

(5) 建设用地与其他地类转型的交叉敏感性:建设用地向未利用地净转型,导致未利用地减少,引起 ESV0.18%的增加,建设用地与耕地、林地、草地和水域的转型,均引起 ESV 减少,后期各地类的敏感系数均大于前期,表明建设用地不断扩张占用其他土地导致态系统服务功能不断减弱。

3.4.2 生态系统服务功能交叉敏感性分区 基于上文 ESV 与土地利用转型的交叉敏感性响应分析和各地类在县域尺度的转型面积,选取交叉敏感性较高和面积分布较广的 6 种土地利用类型,利用 ArcGIS 10.2 中的自然断点法将敏感性等级划分为 5 级,从而得出该区不同土地利用转型的交叉敏感性空间等级分布图(图 3)和各分级面积(表 5)。

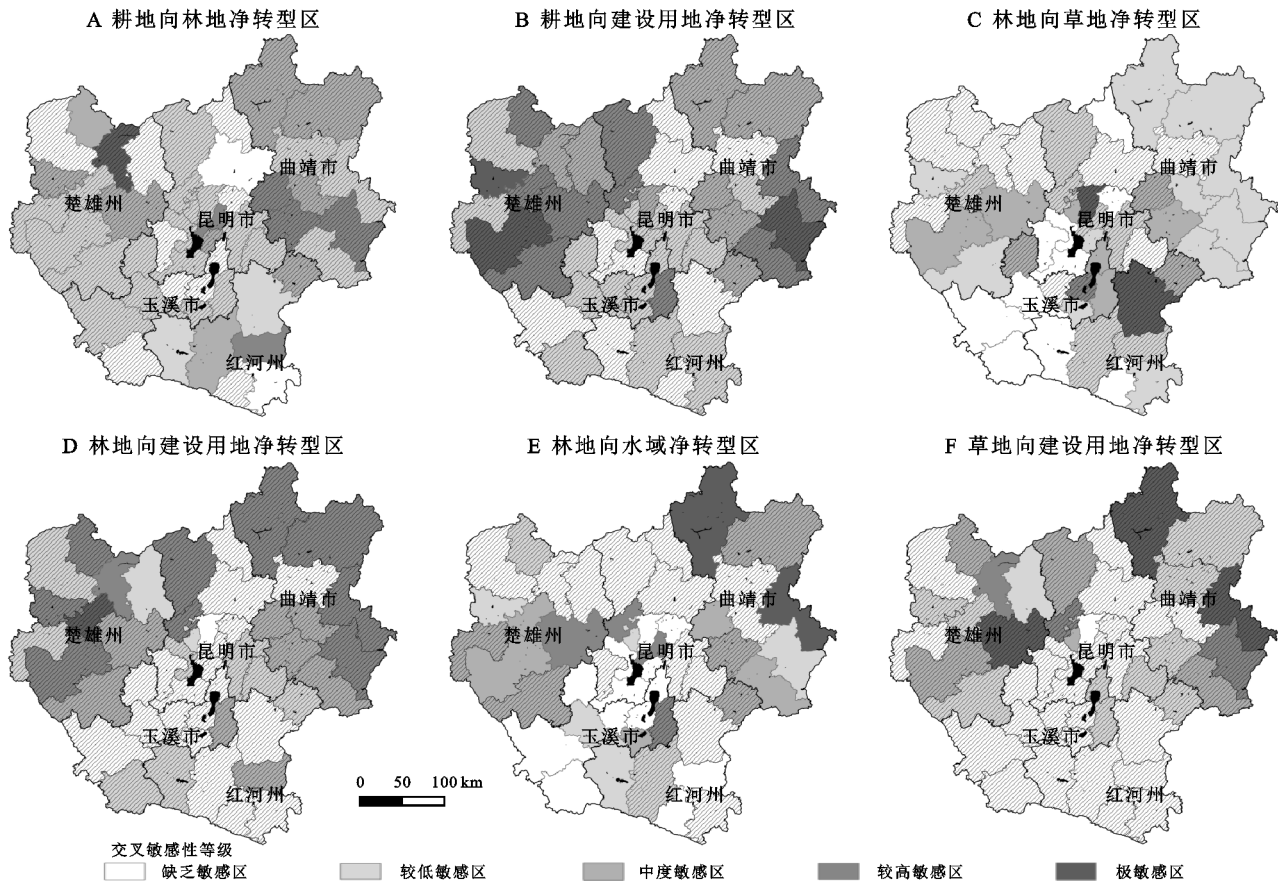


图 3 滇中城市群土地利用转型的交叉敏感性等级分区

(1) 耕地与林地的相互转型主要表现为耕地向林地的净转型,耕地与林地转型的较低敏感区和缺乏敏感区分布最广,分别占总面积的 58.06%,15.95%,两者范围占比达 74.01%,主要分布于楚雄、玉溪、昆

明和曲靖等海拔相对较高的山区,较高敏感区和极敏感区占总面积的 6.29%,主要分布于耕地面积较集中的马龙、陆良、罗平和元谋等坝区。

(2) 耕地与建设用地转型的缺乏敏感区和较低敏

感区分布范围最大,分别占总面积的 46.70%,26.01%,主要分布于以昆明为核心的城市建成区以及南部地区,因建成区形成人工生态系统后,土地利用方式较为稳

定,成为较低敏感区;中度敏感区、高度敏感区和极高敏感区三者占总面积的 27.29%,主要集中分布于曲靖、楚雄以及昆明的禄劝和富民县等。

表 5 滇中城市群土地利用转型交叉敏感性等级分区面积

地类	交叉敏感性 分区	林地		草地		水域		建设用地	
		面积/10 ³ hm ²	比例/%	面积/10 ³ hm ²	比例/%	面积/10 ³ hm ²	比例/%	面积/10 ³ hm ²	比例/%
耕地	极敏感区	1.03	0.30					6.32	4.57
	较高敏感区	20.65	5.99					13.03	9.42
	中度敏感区	67.91	19.70					18.39	13.30
	较低敏感区	200.15	58.06					64.59	46.70
	缺乏敏感区	54.98	15.95					35.96	26.01
林地	极敏感区			0.68	0.09	0.13	1.60	0.75	3.92
	较高敏感区			0.83	0.10	0.19	2.36	1.06	5.54
	中度敏感区			44.82	5.63	0.64	7.96	2.18	11.33
	较低敏感区			370.02	46.52	1.27	15.76	2.30	11.96
	缺乏敏感区			379.13	47.66	5.81	72.33	12.92	67.25
草地	极敏感区							4.18	10.40
	较高敏感区							2.45	6.09
	中度敏感区							3.48	8.65
	较低敏感区							5.43	13.50
	缺乏敏感区							24.67	61.35

(3) 林地与草地的转型主要表现为草地向林地净转型,占总县的 44.90%,主要分布于曲靖、玉溪和楚雄南部等地区;有 27 个县(市)区表现为林地向草地净转型,林地与草地相互转型缺乏敏感性的面积占到了 47.66%,其次是较低敏感区,占总面积的 46.52%,主要分布于曲靖;极敏感区所占面积较小,主要是分布在弥勒和官渡。

(4) 林地与建设用地主要表现为林地向建设用地的净转型,仅有元谋、武定、盘龙和五华表现为建设用地向林地转型,林地向建设用地转型缺乏敏感区面积最大,占总面积的 67.25%,主要从东北向西南呈条带状分布,城市建成区人工生态系统对林地向建设用地的转型缺乏敏感;较低敏感区和中度敏感区分别占总面积的 11.96%,11.33%,极敏感区所占面积最小,仅为 3.92%,主要分布在牟定县。

(5) 林地与水域的转型主要是以水域向林地的净转型,有 21 个县(市)区呈现出林地向水域净转型,主要呈“T”字形分布,林地向水域的转型缺乏敏感区的分布范围最广,占总面积的 72.33%,其次是较低敏感区,占总面积的 15.76%,极敏感区面积仅为 1 600 hm²,主要分布于会泽和富源。

(6) 草地与建设用地相互转型缺乏敏感区面积最大,占总面积的 61.35%,主要集中连片分布于昆明、玉溪和红河,其次为较低敏感区,较高敏感区和极高敏感区占总面积的 16.49%,极高敏感区主要分布在富源、会泽和禄丰。

4 结 论

(1) 2000—2020 年滇中城市群土地利用类型主要以林地、草地、耕地为主,比重约占总面积的 96%以上,耕地、水域、未利用地呈现出持续减少的趋势,年均减少量速率分别为 2.35%,0.84%,2.83%,建设用地扩张较为明显,20 a 间面积增加了 1 850.67 km²,草地和林地均呈现出先减少后增加的趋势;整个研究时段的综合变化率维持在 0.50%。

(2) 滇中城市群生态系统服务价值总体呈现出“先减少后增加”的趋势,2000 年、2010 年、2020 年 ESV 分别为 5 028.81 亿元、5 011.60 亿元、5 360.93 亿元;近 20 a 来,各子系统中食物生产呈现出持续减少的趋势,气候调节功能最高,占总价值的 26%以上;研究区地均 ESV 高值区主要分布在滇池、抚仙湖和星云湖三大高原湖泊流域,生态系统功能受湖泊调节影响较大。2000—2010 年有 75.51%的县(市)区地均 ESV 处于减少趋势,2010—2020 年地均 ESV 增加的县(市)区高达 85.71%。

(3) 草地转为林地对该区生态系统服务价值增加的贡献度均超过 32%。2000—2010 年和 2010—2020 年,耕地转为林地、草地和水域对生态系统服务功能改善的贡献度分别为 28.32%,50.12%,林地、草地和水域转为耕地是导致该区生态系统服务功能恶

化的重要原因,在整个研究时段内,毁林开荒、围湖造田对林地、草地和水域的占用导致生态系统服务价值减少约 2.65 亿元。

(4) 耕地、林地、草地、水域地向其他土地利用类型转型较为敏感,其中水域向其他地类的转型前后两期敏感系数均大于 1,耕地向草地、建设用地的转型缺乏敏感性。耕地与林地转型的较低敏感区和缺乏敏感区分布最广,分别占总面积的 58.06%,15.95%,主要分布于楚雄、玉溪、昆明和曲靖等海拔相对较高的山区,耕地、林地、草地与建设用地间转型的较高和极高生态敏感区集中在曲靖市和楚雄州,林地向草地和水域转型主要与缺乏敏感区和较低敏感区为主。

参考文献:

- [1] 龙花楼.论土地利用转型与土地资源管理[J].地理研究,2015,34(9):1607-1618.
- [2] 刘永强,龙花楼,李加林.长江中游经济带土地利用转型及其生态服务功能交叉敏感性研究[J].地理研究,2018,37(5):1009-1022.
- [3] 刘永强,龙花楼.长江中游经济带土地利用转型时空格局及其生态服务功能影响[J].经济地理,2017,37(11):161-170.
- [4] 刘永强,廖柳文,龙花楼,等.土地利用转型的生态系统服务价值效应分析:以湖南省为例[J].地理研究,2015,34(4):691-700.
- [5] 龙花楼,屠爽爽.土地利用转型与乡村振兴[J].中国土地科学,2018,32(7):1-6.
- [6] 娄佩卿,付波霖,林星辰,等.基于 GEE 的 1998—2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].环境科学,2019,40(12):5473-5483.
- [7] 张鹏岩,耿文亮,杨丹,等.黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变[J].农业工程学报,2020,36(11):277-288.
- [8] Costanza R, Darge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.
- [9] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
- [10] 彭建,胡晓旭,赵明月,等.生态系统服务权衡研究进展:从认知到决策[J].地理学报,2017,72(6):960-973.
- [11] 邓楚雄,钟小龙,谢炳庚,等.洞庭湖区土地生态系统的服务价值时空变化[J].地理研究,2019,38(4):844-855.
- [12] 丁振民,姚顺波.生态系统服务弹性敏感性系数的合理性与决策属性探讨[J].地理科学,2019,39(10):1672-1679.
- [13] 路昌,韩笑,韩会芹.山东省土地利用转型与生态服务功能交叉敏感性研究[J].农业机械学报,2020,51(10):223-231.
- [14] 石龙宇,崔胜辉,尹锴,等.厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响[J].地理学报,2010,65(6):708-714.
- [15] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D, et al. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas[J]. Ecological Economics,2001,39(3):333-346.
- [16] 普拉提·莫合塔尔,海米提·依米提.土地利用变化下的生态系统服务敏感性研究:以克里雅绿洲为例[J].自然资源学报,2014,29(11):1849-1858.
- [17] 关瑜,陈影,潘肖燕,等.基于土地利用转型的生态服务交叉敏感性分析:以雄安新区为例[J].生态经济,2021,37(3):153-160.
- [18] 方创琳.中国城市群研究取得的重要进展与未来发展方向[J].地理学报,2014,69(8):1130-1144.
- [19] 陈田田,彭立,王强.基于生态系统服务权衡的生态安全多情景决策[J].中国环境科学,2021,41(8):3956-3968.
- [20] 陈万旭,刘志玲,李江风,等.长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究[J].生态学报,2020,40(15):5137-5150.
- [21] 于媛,韩玲,李明玉,等.哈长城市群生态系统服务时空特征及其权衡/协同关系研究[J].水土保持研究,2021,28(2):293-300.
- [22] 云南省人民政府办公厅.滇中城市群发展规划[EB/OL]. (2020-08-26) [2021-08-24]. http://www.yn.gov.cn/zwgk/zfxxgkpt/fdzdgknr/zcwj/zdglwjyjf/202008/t20200826_209715.html.
- [23] Hou J, Qin T L, Liu S S, et al. Analysis and prediction of ecosystem service values based on land use/cover change in the Yiluo River Basin [J]. Sustainability, 2021,13(11):6432.
- [24] 郭亚红,阿布都热合曼·哈力克,魏天宝,等.基于土地利用变化的和田地区生态系统服务价值分析[J].生态学报,2021,41(16):6363-6372.
- [25] 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.
- [26] 国家发展改革委.关于公布 2020 年稻谷最低收购价格的通知[EB/OL]. (2020-02-28) [2021-08-24]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/jgs/sjdt/202002/t20200228_1221748.html.
- [27] 陈万旭,李江风,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.
- [28] Wang Z Y, Cao J S, Zhu C Y, et al. The impact of land use change on ecosystem service value in the upstream of Xiong'an new area [J]. Sustainability, 2020,12(14):5707.
- [29] 张学珍,赵彩杉,董金玮,等.1992—2017 年基于荟萃分析的中国耕地撂荒时空特征[J].地理学报,2019,74(3):411-420.