

滇中高原湖泊流域土地利用变化及生态系统服务功能

陈相标, 丁文荣

(云南师范大学 地理学部, 昆明 650500)

摘 要: 探明区域土地利用与生态系统服务价值的动态变化, 对优化国土空间格局和生态建设与保护具有重要推动作用。以滇中五大高原湖泊流域(滇池、抚仙湖、星云湖、杞麓湖、阳宗海)为研究单元, 根据 2000 年、2010 年、2020 年三期 Landsat TM/OLI 遥感土地利用数据, 运用单一土地利用动态度、土地利用程度综合指数模型和土地利用转移矩阵分析土地利用结构及变化过程, 基于修正后的生态系统服务价值当量和生态系统服务价值计算模型, 分析了湖泊流域 2000—2020 年生态系统服务功能价值的变化特征。结果表明: (1) 滇中高原湖泊流域的土地利用类型主要以农田、森林、草地和建设用地为主, 建设用地面积持续增加, 农田面积不断减少, 年均减少速度为 1.44%; (2) 近 20 a 来, 湖泊流域的土地利用处于发展阶段, 土地利用程度变化率高达 0.82, 建设用地的面积净转入远大于净转出, 导致农田面积急剧减少; (3) 研究期内生态系统服务价值总体呈减少趋势, 从 2000 年的 224.94 亿元减至 2020 年的 209.58 亿元, 平均减少率为 5.20%, 水域、森林、草地是生态系统服务功能价值的主体部分, 其生态系统服务价值占整个服务价值的 94% 以上; (4) 单项生态系统服务价值中水文调节的生态服务价值贡献最大, 除水资源供给的生态服务价值呈稳步上升趋势外, 其余生态系统服务价值均呈减少的趋势, 粮食生产服务功能价值损失最为显著, 从 2000 年的 4.8763×10^8 元下降至 2020 年 3.8945×10^8 元。该区土地利用变化显著, 总生态系统服务价值下降。

关键词: 土地利用变化; 生态系统服务功能; 价值估算; 湖泊流域; 滇中高原

中图分类号: F301.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)03-0205-08

Land Use Change and Ecosystem Service Function in Lake Basin of Central Yunnan Plateau

CHEN Xiangbiao, DING Wenrong

(Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Exploring the dynamic changes of regional land use and ecosystem service value plays an important role in optimizing the spatial pattern of land and ecological construction and protection. Taking five plateau lake basins in central Yunnan (Dianchi Lake, Fuxian Lake, Xingyun Lake, Qilu Lake and Yangzong Lake) as research units, according to the Landsat TM/OLI remote sensing land use interpretation data in 2000, 2010 and 2020, we analyzed the land use structure and change process by using single land use dynamic attitude, comprehensive index model of land use degree and land use transfer matrix. The results show that: (1) the land use types in the lake basin of Central Yunnan Plateau were mainly farmland, forest, grassland and construction land, with the construction land area increasing continuously and the farmland area decreasing continuously, with an average annual reduction rate of 1.44%; (2) during the past 20 years, the land use in lake basin was in a rapid development stage, and the change rate of land use degree was 0.82; the net transfer-in of construction land area was far greater than the net transfer-out, resulting in a sharp decrease in farmland area; (3) during the study period, the value of ecosystem services generally showed a decreasing trend, from 22.494 billion yuan in 2000 to 20.958 billion yuan in 2020, with an average reduction rate of 5.20%; water, forests and grasslands were the main parts of the value of ecosystem services, accounting for more than 94% of the total value of ecosystem services; (4) among individual ecosystem service values, hydrological regulation contributed the most; except for the steady increase of water supply, the other eco-

收稿日期: 2021-04-21

修回日期: 2021-05-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“亚热带高原岩溶区陆植被—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, 主要从事生态系统服务功能研究。E-mail: cxb6271@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方面的研究工作。E-mail: dingwenrong@163.com

system service values showed a small trend, and the loss of food production service value was the most significant, from 4.8763×10^8 yuan in 2000 to 3.8945×10^8 yuan in 2020. Land use changes in the study area were significant, and the total value of ecosystem services declined.

Keywords:land-use change; ecosystem service value; value estimation; lake basin; Central Yunnan Plateau

土地利用是人类对土地自然属性的利用方式和状况^[1-2],也是人类活动与自然生态环境相互作用最直接的表现形式^[3],随着城镇化的快速发展变化,区域土地利用类型也发生激烈的动态转型^[4-5],土地利用类型及形态变化会对生态系统的结构与过程产生影响^[6-7],从而引起生态系统服务功能的变化^[8]。生态系统服务功能指的是生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效应^[9-10]。而生态系统服务价值作为生态系统服务功能的重要评估方法之一,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^[11]。定量评估土地利用与生态系统服务功能的价值变化关系成为了当前的研究热点^[12-13]。

目前,国内外学者关于生态系统服务功能价值的研究取得了丰硕的成果。1997 年,Daily 主编的《Nature's Service: Societal Dependence on Natural Ecosystem》出版和 Costanza 等^[10]在《Nature》上发表的文章《The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital》拉开了生态系统服务价值评估研究的序幕,2005 年联合国发布了《千年生态系统评估报告》(Millennium Ecosystem Assessment, MA)^[14],把生态系统服务功能的研究进一步推向热潮。国内对生态系统服务功能的研究相对较晚,1999 年,欧阳志云等^[15]首次对中国陆地生态系统服务功能价值展开评估,2003 年,谢高地等^[16]通过对 200 多位生态学家进行问卷调查,并结合中国的生态系统实际情况,对 Costanza 等人的研究成果进行修正,构建了中国生态系统服务当量因子表^[17]。此后许多学者使用多种评估方法^[18]对不同尺度^[19-21]的生态系统服务功能进行了大量研究,但对湖泊流域尺度的生态系统服务功能价值研究相对较少,生态系统服务功能的形成依赖于一定时空尺度上的生态系统结构和过程^[22],湖泊一流域是一个完整且相互联系的整体^[23],加强对湖泊流域生态系统服务功能研究在一定程度保护了湖泊生态环境与流域整体的生态系统服务功能。

滇中五大高原湖泊流域是云南省滇中城市群建设的核心区^[24],也是滇中工农业、生态、旅游等发展极为重要的区域,人为活动较为频繁。近年来,随着人类活动干扰进一步加剧,改变湖泊流域内的生态环境和土地利用结构,且生态环境问题也日益突出^[25]。

目前,对于该区的土地利用变化和生态系统服务价值鲜有研究,这在一定程度上阻碍湖泊一流域整体的可持续发展规划。因此,本文以滇中五大高原湖泊流域为研究对象,基于遥感土地利用解译数据和修正后的生态系统服务价值当量,对该区 2000—2020 年的土地利用变化和生态系统服务功能价值进行定量评估、揭示近 20 a 以来五大湖泊流域土地利用与生态系统服务价值的变化特征及相互关系,对该区土地利用结构优化、水土资源开发利用和生态系统可持续管理提供科学依据。

1 研究区概况

滇中五大高原湖流域位于云南省中心腹地(24.07° — 25.45° N, 102.48° — 103.11° E)(图 1),主要包括昆明市和玉溪市,是云南省重要的人口聚集区和经济核心区,流域面积 $4\,722\text{ km}^2$ 。地形以山地和山间盆地为主,地势起伏和缓。属亚热带季风气候,植被主要以亚热带常绿阔叶林和灌丛草地为主,年平均气温 15.35°C ,年平均降雨量 883.68 mm ,多年平均蒸发量 $1\,572.80\text{ mm}$,该区在云南省经济社会发展中占有非常重要的经济地位。进 20 a 来,由于人口增加,城镇化进程不断加快,土地利用格局发生了剧烈变化,经济建设与生态保护、粮食安全的冲突日益突显。

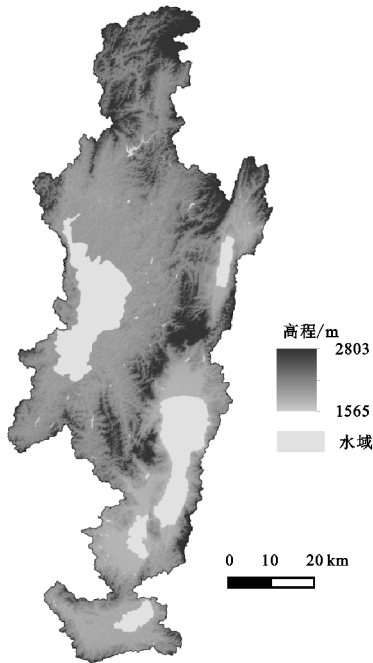


图 1 滇中五大高原湖泊流域位置

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文所用的 DEM 数据、土地利变化遥感数据均来自地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/home>),空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。通过 ArcGIS 10.2 中的 ArcSWAT 模型对处理后的 DEM 数据进行流域提取,并进行矢量数据转换,得到滇中五大高原湖泊流域的矢量边界。选取 3 期土地利用遥感影像数据分别为 2000 年 2 月 12 日(TM),2010 年 2 月 7 日(TM)和 2020 年 1 月 18 日(OLI),云量分别为 0.02% 、 0.02% 、 0.03% 。用 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、影像拼接和裁剪等处理,并参考谢高地等^[6]提出的土地覆被类型生态系统分类标准,将研究区的二级地类重分类为农田、森林、草地、建设用地、湿地、水域、荒漠等 7 种类型,通过野外验证和 Google Earth 高分辨率历史影像进行精度验证,2000 年、2010 年、2020 年 3 期土地利用数据分类结果检验 Kappa 指数分别为 0.96、0.95、0.94。粮食作物播种面积及产量数据来源于《云南省统计年鉴》,粮食平均价格数据来源于国家发展和改革委员会公布的《关于公布 2020 年稻谷最低收购价格的通知》。

2.2 研究方法

2.2.1 单一土地利用动态度 单一土地利用动态度能定量表征人类活动对研究区不同土地利用类型在一定时间范围内的数量变化。其表达式为^[2]

$$K=[(U_{it2}-U_{it1})/U_{it1}]/T\times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为 i 类土地利用类型在 t_1 到 t_2 时段内的动态度; U_{it1} 、 U_{it2} 分别表示 t_1 、 t_2 时段内 i 类土地利用类型的数量; T 为研究的时段长,当 T 的研究时段设为年时, K 就表示研究区 i 种土地利用类型的年变化率。

2.2.2 土地利用程度综合指数模型 土地利用程度综合指数模型能有效刻画土地利用程度,体现出人类活动对湖泊流域土地开发利用的深度和广度。参考以往研究^[26],将该区土地利用类型的程度等级划分为 4 级(表 1)。土地利用强度等级越高,表明该土地利用类型受到人为活动干扰的程度越高。

表 1 土地利用程度分级赋值

类型	未利用 土地级	林、草、 水用地级	农业 用地级	城镇聚落 用地级
土地利用类型	荒漠	林地、草地、水域、湿地	农田	建设用地
分级指数	1	2	3	4

其计算模型为^[2]

$$I=\sum_{i=1}^n(A_i\times C_i)\times 100\% \quad (2)$$

式中: I 为研究区土地利用程度综合指数; A_i 为第 i 类土地利用程度分级指数; C_i 为第 i 等级的土地利用程度面积所占总面积的比重。土地利用程度变化量和变化率的数学模型为^[27]:

$$\begin{aligned}\Delta L_{t_2-t_1}&=L_{t_2}-L_{t_1} \\&=100\times\left[\sum_{i=1}^n(A_i\times C_{it_2})-\sum_{i=1}^n(A_i\times C_{it_1})\right] \quad (3) \\R&=\frac{\sum_{i=1}^n(A_i\times C_{it_2})-\sum_{i=1}^n(A_i\times C_{it_1})}{\sum_{i=1}^n(A_i\times C_{it_1})} \quad (4)\end{aligned}$$

式中: $\Delta L_{t_2-t_1}$ 为研究初期 t_1 和研究末期 t_2 的土地利用程度变化量; L_{t_1} 、 L_{t_2} 分别表示初期和末期的土地利用程度综合指数; C_{it_1} 、 C_{it_2} 分别为第 i 类土地利用在初期和末期所占面积的比重; A_i 为第 i 类土地利用类型的分级指数; R 为土地利用程度变化率。若 $R<0$ 或 $\Delta L_{t_2-t_1}<0$,研究区的土地利用则处于衰退期,若 $R=0$ 或 $\Delta L_{t_2-t_1}=0$,研究区的土地利用则处于稳定期,若 $R>0$ 或 $\Delta L_{t_2-t_1}>0$,研究区的土地利用则处于发展期。

2.2.3 土地利用转移矩阵 转移矩阵是用来分析研究系统中状态与状况转移的定量描述,转移矩阵可以更加清晰的研究区域土地利用变化过程中各地类的转入和转出方向以及研究时段期末各土地利用类型的来源与构成情况。其数学表达式为^[28]:

$$S_{ij}=\begin{bmatrix}S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\\vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm}\end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: S_{ij} 代表面积; n 代表不同土地利用的类型; i 、 j 分别代表研究初期与末期的土地利用类型。

2.2.4 生态系统服务价值计算模型 本文基于 Costanza 等^[10]提出的全球生态系统服务价值估算体系模型,以谢高地等^[6]修订的中国陆地生态系统单位面积生态系统服务价值当量表为基础,结合滇中五大高原湖泊流域的实际情况进行调整修正。根据研究,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 $1/7$ ^[16],由于滇中五大高原湖泊流域为非行政区划范围,无法直接计算研究区生态系统提供的食物生产服务功能的经济价值。因此,利用昆明市、玉溪市以及在流域中所占面积比例,单独计算出昆明市和玉溪市提供食物服务功能的经济价值,再乘以各自所占研究区面积的百分比(昆明市 66.84%、玉溪市 33.16%),通过云南省统计年鉴^[29],计算得出 2000—2020 年昆明市、玉溪市的年均粮食产量分别为 $4\,261.43\text{ kg/hm}^2$ 、 $5\,315.30\text{ kg/hm}^2$,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 年的粮食平均价格(2.52 元/kg)^[30],为基价进行计算,得到滇中五大高原湖泊流域 1 个生态系统服

务价值当量因子的经济价值为 1 659.92 元/hm²。根据上述信息计算得出滇中五大高原湖泊流域各土地利用类型所对应的生态系统价值系数(表 2)。

表 2 滇中五大高原湖泊流域各土地利用类型的生态系统服务价值系数 元/hm²

一级类型	二级类型	森林	草地	农田	湿地	水域	荒漠	建设用地
供给服务	食物生产	481.38	630.77	1834.21	846.56	1327.94	0.00	0.00
	原材料生产	1095.55	929.56	406.68	829.96	381.78	0.00	0.00
	水资源供给	564.37	514.58	−2166.20	4299.19	13760.74	0.00	0.00
调节服务	气体调节	3602.03	3270.04	1477.33	3153.85	1278.14	33.20	0.00
	气候调节	10789.48	8648.18	771.86	5975.71	3801.22	0.00	0.00
	净化环境	3203.65	2855.06	224.09	5975.71	9212.56	165.99	0.00
	水文调节	7868.02	6340.89	2481.58	40219.86	169710.22	49.80	0.00
支持服务	土壤保持	4398.79	3983.81	863.16	3834.42	1543.73	33.20	0.00
	维持养分循环	331.98	298.79	257.29	298.79	116.19	0.00	0.00
	生物多样性	4000.41	3618.63	282.19	13063.57	4232.80	33.20	0.00
文化服务	美学景观	1759.52	1593.52	124.49	7851.42	3137.25	16.60	0.00
	合计	38095.16	32683.82	6556.68	86349.04	208502.55	331.98	0.00

滇中五大高原湖泊流域生态系统服务价值计算公式为:

$$ESV = \sum (S_k \times VC_k)$$
 (6)

式中:ESV 为生态系统服务价值(元);S_k 为 k 种土地利用类型的面积(hm²);VC_k 为修正后 k 类土地生态系统服务价值系数[元/(hm²·a)]。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化过程

3.1.1 土地利用空间分布格局及面积结构 根据 ENVI5.3 软件处理及精度验证后的土地利用遥感数据,利用 ArcGIS 10.2 对研究区 2000 年、2010 年、2020 年 3 期遥感土地利用现状数据进行分类统计,进而得到 3 个时段所对应的各类土地利用类型面积和比例(表 3);通过 ArcGIS 10.2 制图工具得到研究区 3 期的土地利用类型时空格局演变图(图 2)。从土地利用的总体类型来看,滇中五大高原湖泊流域的土地利用类型主要以农田、森林、草地和建设用地为主,荒漠、湿地面积较小,呈零星分布。从不同土地利用类型的变化特征来看,随着城镇化的快速推进,建设用地规模随时间变化持续扩张,20 a 间面积增加了 672.60 km²;农田面积持续减少,从 2000 年的 1 549.76 km²减少到 2020 年 1 103.29 km²,减少了 446.47 km²;林地和草地均呈现出“先增加后减少”的趋势,林地和草地前期(2000—2010 年)分别增加了 46.70 km²,89.00 km²,后期(2010—2020 年)分别减少了 36.25 km²,286.98 km²,草地相对于林地总体变化较大;水域面积较为稳定,变化较小;湿地和荒漠面积比例本身比较小,变化不明显,但在总量上有一定的减幅。

3.1.2 土地利用动态度 从整个研究时段不同土地利用类型的变化幅度看(表 3),近 20 a 以来,农田、水域、荒漠、草地和湿地的面积均呈减少趋势,其中农田面积减少量最明显,其次是草地,面积减少量为 198.59 km²;水域、湿地、荒漠面积减少的幅度较小,减少量分别为 27.24 km²,7.58 km²,3.15 km²;建设用地和森林呈增加的趋势,建设用地的面积增加量最为显著,森林的增加量为 10.45 km²。从各研究时段看,各类土地利用类型的总体变化幅度和年均变化幅度与近 20 a 的研究变化幅度具有一致性,农田和建设用地的变化量具有单调性特征,农田呈单调递减趋势,整个研究时段年均减少量为 22.32 km²,相反建设用地呈单调递增趋势,整个研究时段年均增加量为 33.63 km²。

从 2000—2020 年单一土地利用动态度来看(表 3),农田面积减少的速度有所放缓,前期,农田面积减少速度为 1.81%,而后期减少速度为 1.31%,在整个研究时段内,农田的年平均减少速度为 1.44%;建设用地面积持续增加,变化最为激烈,前期增速为 4.68%,后期增速达 9.30%;水域和湿地在前期面积减少,减少的速度分别为 0.44%和 5.13%,后期湿地增加的速度达 4.78%,水域略有所增加,增速为 0.03%;草地和荒漠前期面积增加,增速分别为 1.05%和 10.78%,后期草地和荒漠面积均减少,减少的速度分别为 3.09%和 6.16%。

3.1.3 土地利用程度 根据土地利用程度等级划分(表 1)和公式(2—4)计算得到研究区土地利用程度综合指数及变化率(表 4),近 20 a 来,研究区土地利用程度综合指数呈持续增大的趋势,前期,土地利用程度综合指数从 2000 年的 248.03 增加到了 2010 年的 249.01,土地利用程度的变化量为 0.98,土地利用

程度的变化率为 0.01,表明这一时期土地利用正处于发展起步期;后期,土地利用程度综合指数快速增加,从 2010 年的 249.00 增加到了 2020 年的 267.13,土地利用程度变化量为 18.12,土地利用程度变化率达

到了 0.82,表明这一时段人为因素对土地开发利用的程度加剧,土地开发利用水平持续提高,这主要是由于区域人口增加,城镇化进程不断加快,导致研究区土地利用程度大幅提高。

表 3 滇中五大高原湖泊流域 2000—2020 年各种土地利用类型变化情况

年份	项目	农田	水域	森林	建设用地	荒漠	草地	湿地
2000	面积/km ²	1549.76	655.73	1265.19	366.84	15.6	841.77	27.08
	比例/%	32.82	13.89	26.79	7.77	0.33	17.83	0.57
2010	面积/km ²	1269.03	626.64	1311.89	538.65	32.46	930.14	13.19
	比例/%	26.87	13.27	27.78	11.41	0.69	19.70	0.28
2020	面积/km ²	1103.29	628.48	1275.64	1039.44	12.47	643.19	19.50
	比例/%	23.36	13.31	27.01	22.01	0.26	13.62	0.41
2000—2010	面积变化幅度/km ²	−280.73	−29.09	46.69	171.81	16.84	88.36	−13.89
	年均变化幅度	−28.07	−2.91	4.67	17.18	1.68	8.84	−1.39
	单一动态度/%	−1.81	−0.44	0.37	4.68	10.78	1.05	−5.13
2010—2020	面积变化幅度/km ²	−165.74	1.85	−36.24	500.78	−19.99	−286.95	6.30
	年均变化幅度	−16.57	0.18	−3.62	50.08	−2.00	−28.70	0.63
	单一动态度/%	−1.31	0.03	−0.28	9.30	−6.16	−3.09	4.78
2000—2020	面积变化幅度/km ²	−446.48	−27.24	10.45	672.60	−3.15	−198.59	−7.58
	年均变化幅度	−22.32	−1.36	0.52	33.63	−0.16	−9.93	−0.38
	单一动态度/%	−1.44	−0.21	0.04	9.17	−1.01	−1.18	−1.40

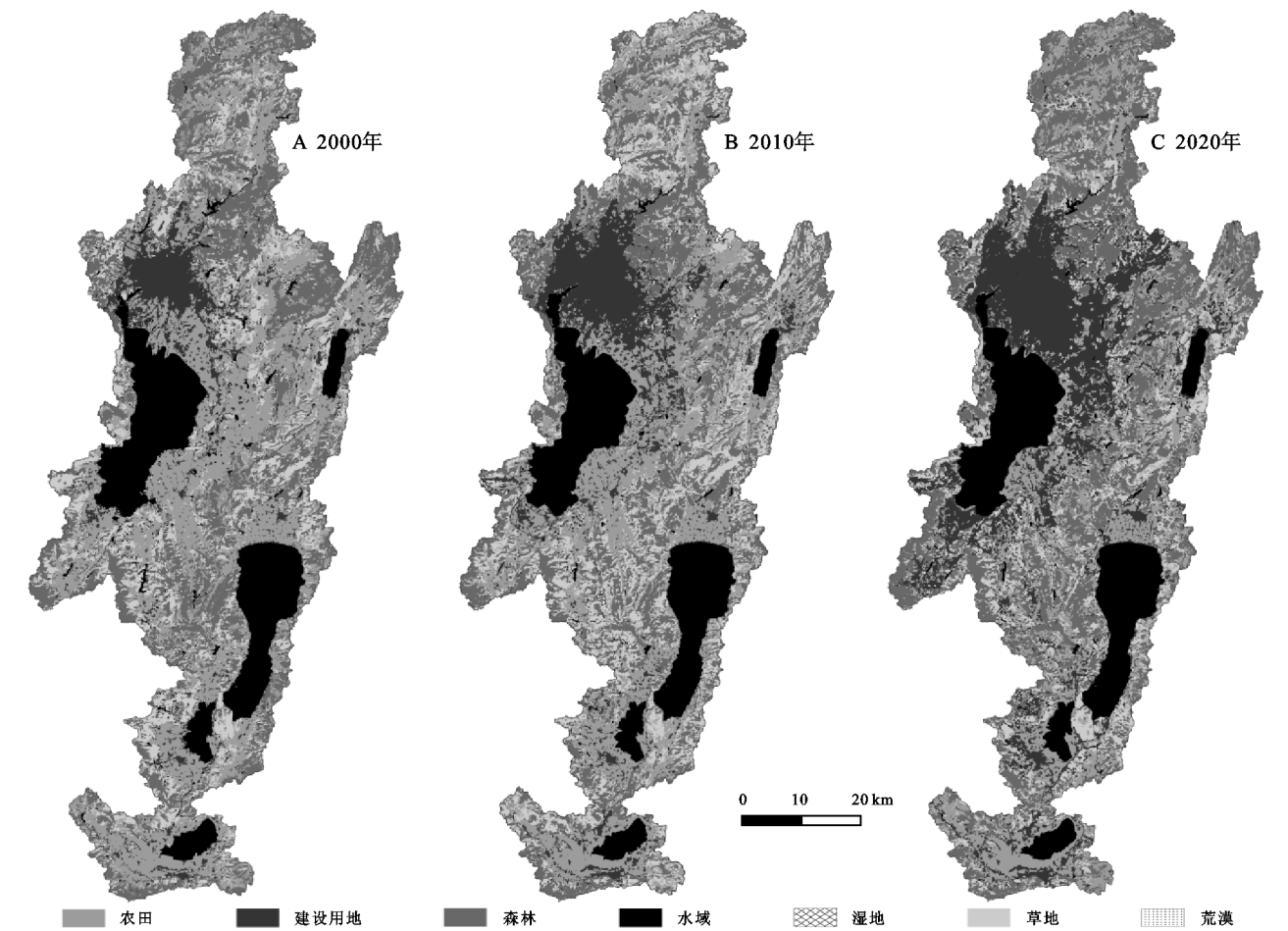


图 2 滇中五大高原湖泊流域土地利用时空格局演变

3.1.4 土地利用转移矩阵 基于 ENVI 5.3 软件和遥感土地利用类型分类数据,构建湖泊流域 2000—2010 年、2010—2020 年的土地利用转移矩阵近 20 a 以来,研究区土地利用类型转移变化呈现出以下特点:

(1) 2000—2010 年(表 5),农田转为其他地类的面积为 562.55 km²,其中 59.30%转化为草地和森林、33.64%转化为建设用地、2.26%转化为荒漠和水域以及湿地;森林、草地、建设用地分别有 10.91%, 59.18%和 19.73%转化为农田,荒漠、水域和湿地共转化了 10.18%为农田,随着建设用地的不断增加,导致 2010 年农田面积急剧减少了 280.73 km²;森林转为其他地类的面积为 240.62 km²,其中 81.62%转为草地、3.67%转为建设用地,转化为荒漠、水域的面积仅为 4.65 km²,35.71%的农田和建设用地转为森林,使森林在 2010 年增加了 46.74 km²;草地转为其他地类的

面积为 392.51 km²,其中 44.50%转化为森林、8.76%转为建设用地、3.67%转为荒漠,草地的面积到 2010 年增加了 88.35 km²;建设用地随着耕地的减少而增加,而荒漠和湿地由于本身面积较少,变化不明显。

表 4 滇中五大高原湖泊流域土地利用综合指数及变化

年份	土地利用 程度综合指数	土地利用 程度变化量	土地利用 程度变化率
2000	248.03	—	—
2010	249.01	0.98	0.01
2020	267.13	18.12	0.82

表 5 2000—2010 年滇中五大高原湖泊流域各土地利用类型转移矩阵 km²

土地类型	森林	荒漠	水域	建设用地	农田	草地	湿地	减少合计	净减少量
森林	1024.52	3.53	1.12	8.82	30.74	196.41	0.00	1265.14	240.62
荒漠	0.55	1.19	0.08	3.86	8.34	1.60	0.00	15.62	14.43
水域	3.64	0.11	616.25	16.55	15.49	2.35	1.33	655.72	35.72
建设用地	16.32	3.71	2.93	282.18	55.60	5.92	0.18	366.84	84.66
农田	86.31	9.52	3.05	189.25	987.19	274.28	0.14	1549.74	562.55
草地	174.68	14.39	2.27	34.38	166.78	449.21	0.01	841.72	392.51
湿地	5.86	0.01	0.94	3.62	4.87	0.30	0.28	15.88	15.60
增加合计	1311.88	32.46	626.64	538.66	1269.01	930.07	1.94	4710.66	—
净增加量	287.36	31.27	10.39	256.48	281.82	480.86	1.66	—	—

(2) 2010—2020 年(表 6),农田转化为其他地类的面积为 659.10 km²,其中 65.36%转化为建设用地、31.07%转为草地、1.61%转为森林、1.95%转为水域和荒漠以及湿地,而有 71.91%的草地转为农田、19.91%森林转为农田、6.31%建设用地转为农田,大量农田被建设用地占用,导致农田面积减少了 201.44

km²;94.86%的农田、草地和森林转为建设用地,建设用地的面积增加最为显著,增加了 500.80 km²;草地转为农田、森林和建设用地的面积为 596.83 km²,远大于农田、森林、建设用地转为草地的面积 311.96 km²,导致草地面积大幅减少;荒漠、水域和湿地的转化幅度较小。

表 6 2010—2020 年滇中五大高原湖泊流域各土地利用类型转移矩阵 km²

土地类型	森林	水域	建设用地	农田	草地	荒漠	湿地	减少合计	净减少量
森林	1073.23	3.68	44.34	98.30	90.38	0.91	0.00	1310.84	237.61
水域	1.36	608.75	10.46	4.55	1.01	0.03	0.46	626.62	17.87
建设用地	2.82	5.85	480.59	31.15	16.77	1.25	0.20	538.63	58.04
农田	10.62	7.11	430.79	609.63	204.81	5.39	0.38	1268.73	659.10
草地	186.85	2.31	54.99	354.99	326.55	2.94	0.01	928.64	602.09
荒漠	0.67	0.07	17.77	3.95	3.60	1.95	0.00	28.01	26.06
湿地	0.00	0.68	0.49	0.72	0.04	0.00	0.02	1.95	1.93
增加合计	1275.55	628.45	1039.43	1103.29	643.16	12.47	1.07	4703.42	—
净增加量	202.32	19.70	558.84	493.66	316.61	10.52	1.05	—	—

3.2 生态系统服务价值

3.2.1 滇中五大高原湖泊流域生态服务价值变化
根据滇中五大高原湖泊流域 2000 年、2010 年、2020 年各生态系统对应的土地利用类型面积(表 3)和修正后的流域土地利用类型生态系统服务价值系数(表 2)通过公式(6)分别计算出滇中五大高原湖泊流域

3 期的生态系统服务功能价值(表 7)。滇中五大高原湖泊流域在近 20 a 来 ESV 减少了 15.36 亿元,平均减少率为 5.20%。2000 年、2010 年、2020 年 ESV 分别为 2 249 359 万元、2 205 032 万元和 2 095 792 万元,呈负增长趋势。从各生态系统服务价值构成来看,水域、森林、草地是生态系统服务功能价值的

主体部分,其生态服务价值占到了整个系统服务价值的 94%以上。

2000—2010 年,农田、水域和湿地的面积分别减少了 28 073 hm²,2 909 hm²,1 389 hm²,生态服务价值分别损失了 1.840 7×10⁸ 元、6.065 3×10⁸ 元和 1.199 1×10⁸ 元;草地、森林和荒漠的面积分别增加了 8 836 hm²,4 669 hm²,1 684 hm²,生态系统服务价值分别增加了 2.888 1×10⁸ 元、1.778 7×10⁸ 元和 1.078×10⁷ 元,此时段 ESV 损失了 4.432 6×10⁸ 元。2010—2020 年,耕地仍处于持续损失状态,年损失率 1.31%;草地、森林和荒漠与前期相反,面积分别减少

了 28 695 hm²,3 624 hm²,19.99 hm²,ESV 分别减少了 9.378 7×10⁸ 元、1.380 8×10⁸ 元和 6.6×10⁵ 元,年损失率分别为 3.09%,0.28%和 6.16%;湿地和水域的面积分别增加了 630 hm²,158 hm²,ESV 分别增加了 5.442×10⁷ 元和 3.847×10⁷ 元。整个研究时段生态系统服务总价值损失 15.36 亿元,草地损失最多 6.490 6×10⁸ 元,其次是水域 5.680 6×10⁸ 元,农田生态系统服务价值一直处于衰减趋势,年均损失 1.44%;草地、森林和荒漠的生态系统服务价值均呈倒“V”形变化,水域和湿地则呈“V”形变化;森林年均增长 0.04%。

表 7 2000—2020 年滇中高原湖泊流域各类用地生态系统服务功能价值变化

土地利用类型		森林	草地	农田	湿地	水域	荒漠	建设用地	总计
2000 年	生态价值 ESV/10 ⁶ 元	4819.78	2751.24	1016.13	233.83	13672.08	0.52	0.00	22493.59
	比例/%	21.43	12.23	4.52	1.04	60.78	0.00	0.00	100.00
2010 年	生态价值 ESV/10 ⁶ 元	4997.65	3040.05	832.07	113.93	13065.55	1.08	0.00	22050.32
	比例/%	22.66	13.79	3.77	0.52	59.25	0.00	0.00	100.00
2020 年	生态价值 ESV/10 ⁶ 元	4859.58	2102.18	723.39	168.34	13104.02	0.41	0.00	20957.92
	比例/%	23.19	10.03	3.45	0.80	62.53	0.00	0.00	100.00
2000—2010 年	价值变化 ESV/10 ⁶ 元	177.87	288.81	−184.07	−119.91	−606.53	0.56	0.00	−443.26
	年变化率/%	0.37	1.05	−1.81	−5.13	−0.44	10.78	0.00	4.81
2010—2020 年	价值变化 ESV/10 ⁶ 元	−138.08	−937.87	−108.67	54.42	38.47	−0.66	0.00	−1 092.40
	年变化率/%	−0.28	−3.09	−1.31	4.78	0.03	−6.16	0.00	−6.02
2000—2020 年	价值变化 ESV/10 ⁶ 元	39.80	−649.06	−292.74	−65.49	−568.06	−0.10	0.00	−1535.66
	年变化率/%	0.04	−1.18	−1.44	−1.40	−0.21	−1.01	0.00	−5.20

3.2.2 生态系统单项服务价值及变化 2000 年、2010 年、2020 年 3 个研究时期中,滇中高原五大湖泊流域单项生态系统服务价值年际变化呈现出不同的形式(表 7)。水文调节生态系统服务价值最大,其次是气体调节功能,维持养分循环服务功能价值最少。食物生产、原材料生产、气体调节、净化环境、水文调节、维持养分循环和美学景观等生态系统服务价值均呈较少的趋势,其中粮食生产服务功能价值损失最为显著,从 2000 年的 4.876 3×10⁸ 元下降至 2020 年 3.894 5×10⁸ 元,主要原因是城镇化快速推进,导致农业用地持续锐减,进而提供食物生产的服务功能也随之降低;气候调节、土壤保持和生物多样性的生态系统服务功能价值呈先增加后减少的趋势,后期损失的服务价值比率远大于前期增加的比率,整个时段平均损失变化率分别为 8.47%,10.57%和 8.71%,此 3 种类型的生态服务功能价值变化与森林和草地的面积变化相似,均呈现出倒“V”的变化趋势,说明森林、草地对气候调节、土壤保持和生物多样性等生态系统服务功能具有重要的影响;水资源供给呈稳步上升趋势,分别从 2000 年的 6.929 8×10⁸ 元增加到

2010 年的 7.149 8×10⁸ 元,平均变化率为 3.17%,至 2020 年达到 7.393 2×10⁸ 元,水资源供给的增加与研究区众多的高原湖泊、水库等密切相关,研究区五大湖泊面积为 628.54 km²[25],占整个研究区流域面积(4 722 km²)的 13.31%,加之对五大湖泊一流域生态治理的不断加强,使得水资源供给的生态服务功能价值持续增强。

4 结 论

(1) 滇中五大高原湖泊流域土地利用类型主要以农田、森林、草地和建设用地为主,农田随着建设用地的持续扩张而不断减少,林地和草地呈“先增加后减少”的趋势。近 20 a 来,该区土地利用处于发展阶段,且开发利用程度不断加强。

(2) 近 20 a 以来,各土地利用类型均呈现出多向动态转移,建设用地转入量最高,农田为其主要转出源,草地主要转化为农田和森林,水域、荒漠和湿地主要转化为建设用地和农田。

(3) 2000—2020 年 ESV 减少了 15.36 亿元,平均减少率为 5.20%,呈下降趋势。各类生态系统服务

价值的变化量与土地利用类型的面积变化量基本一致,水域生态系统服务价值对该区的贡献率最大,农田生态系统价值下降最快。

(4)在整个研究时段,水文调节的单项生态系统服务价值最大,气候调节、土壤保持和生物多样性的生态系统服务价值呈先增加后减少的趋势,水资源供给呈稳步上升的趋势,其他单项生态系统服务价值均呈减少趋势。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999,18(1):81-87.
- [3] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等.20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J].地理学报,2014,69(1):3-14.
- [4] 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.
- [5] 宋小青.论土地利用转型的研究框架[J].地理学报,2017,72(3):471-487.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems(1997)[M]. New Haven, USA: Yale University Press, 2013.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李屹峰,罗跃初,刘纲,等.土地利用变化对生态系统服务功能的影响:以密云水库流域为例[J].生态学报,2013,33(3):726-736.
- [13] 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.
- [14] Millennium ecosystem assessment(MEA). Ecosystems and human well-being[M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [15] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5):607-613.
- [16] 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.
- [17] 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,2008,23(5):911-919.
- [18] 李丽,王心源,骆磊,等.生态系统服务价值评估方法综述[J].生态学杂志,2018,37(4):1233-1245.
- [19] 颜俨,姚柳杨,郎亮明,等.基于 Meta 回归方法的中国内陆河流域生态系统服务价值再评估[J].地理学报,2019,74(5):1040-1057.
- [20] 咎欣,张玉玲,贾晓宇,等.永定河上游流域水生态系统服务价值评估[J].自然资源学报,2020,35(6):1326-1337.
- [21] 兰紫橙,贾岚,程煌.闽江流域生态系统服务价值评估及权衡协同关系[J].生态学报,2020,40(12):3909-3920.
- [22] 张宇硕,吴殿廷,吕晓.土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响:空间尺度视角的研究综述[J].自然资源学报,2020,35(5):1172-1189.
- [23] 曾涛,陈美球,魏晓华,等.“湖泊—流域”系统理念及其在鄱阳湖生态经济区建设中的应用[J].江西农业大学学报(社会科学版),2010,9(2):74-77,102.
- [24] 云南省人民政府办公厅.云南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-02-09)[2021-04-21]. http://www.yn.gov.cn/zwgk/zfxxgkpt/fdzdgknr/zcwj/zdkgwjyjf/202102/t20210209_217052.html.
- [25] 朱泓,王金亮,程峰,等.滇中湖泊流域生态环境质量监测与评价[J].应用生态学报,2020,31(4):1289-1297.
- [26] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等.1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J].地理学报,2014,69(1):54-63.
- [27] 孙慧兰,李卫红,陈亚鹏,等.新疆伊犁河流域生态服务价值对土地利用变化的响应[J].生态学报,2010,30(4):887-894.
- [28] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003,58(5):643-650.
- [29] 云南省统计局.云南省统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2000-2020.
- [30] 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)[2021-04-21]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/jgs/sjdt/202002/t20200228_1221748.html?code=&state=123.