

近 20 年滇池流域土地利用/覆被变化过程、特征及其生态价值变化研究

付磊 李增华¹

(云南师范大学 地理学部, 云南 昆明 650500)

【摘要】: 采用 2000—2020 年滇池流域 GlobeLand30 三期土地利用分类数据和两期 Landsat 遥感数据进行分层面面向对象分类, 分析其土地利用/覆被变化过程、特征, 进而测算其不同时段生态服务价值。研究表明: (1) 滇池流域土地利用/覆被变化主要受城镇化建设和农业产业升级影响, 20 年间建设用地扩张和耕地减少均明显, 其建设用地面积扩大到原来的 3 倍、耕地面积减小约 400 平方千米; (2) 滇池流域土地利用结构逐渐均衡, 城市土地结构的均质性逐渐增强, 信息熵年均增长率分别为 0.40%、1.11%、1.11% 和 0.57%; (3) 滇池流域土地利用程度综合指数逐渐增高, 最高值为 351.08 (2020 年), 最低值为 332.13 (2010 年); (4) 滇池流域整体生态服务价值在研究时段内呈小幅波动下降态势, 分别为 31.45 亿元/年、30.50 亿元/年、29.79 亿元/年、30.69 亿元/年和 29.78 亿元/年。

【关键词】: 滇池流域 土地利用/覆被变化 生态价值变化

【中图分类号】: F292; X32 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407 (2022) 06-183-09

通过定量研究分析流域用地变化过程对生态质量的影响一直是生态安全评估的研究重点和现代地理科学的重要研究切入点。土地资源管理中, 土地利用/覆被变化 (简称 LUCC) 是人类活动对自然地表环境影响的直接表现, 其变化是生物多样性变化、现实和潜在生产力变化、土壤质量变化、流域径流变化等各种变化之耦合, 长期受到区域经济发展、生态环境变化与可持续发展研究者的高度重视和关注^[1,2], 特别是 20 世纪 90 年代以来, 全球生态环境变化研究领域的学者持续增强对土地利用/覆被变化领域研究并将其列为全球四大环境变化之一^[3,4]。随着 3S 技术 (遥感技术、地理信息系统和全球定位系统) 发展, 地理学家借助此技术探索构建了具有实时、时空表达全面、兼容性强等优势的土地覆被空间变化模型, 围绕不同尺度土地覆被和用地过程时空演变规律 (LUCC 本体)^[5,6,7]、驱动力 (LUCC 生发机制)^[8,9,10]、环境效应、生态变化、土质^[11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28] 等领域开展了系统性研究, 拓展了土地利用变化科学应用过程、情景及其与其他要素协调关系的研究范围, 推动形成了生态水文、土地城镇化、生态价值、资源环境经济等交叉研究领域。尤其是在 1970 年联合国发布的《人类对全球环境的影响报告》中首次提出生态系统服务功能概念后, 联合国实施了旨在科学评估世界生态系统、植物和动物面临的威胁的“千年生态系统评估项目”^[29,30], 掀起了生态系统价值研究的热潮。Costanza 等^[31]通过系统研究, 将生态系统服务功能划分为 17 类, 并对不同生态系统服务价值进行评估, 为后续相关研究奠定了理论基础。在此基础上, 欧阳志云等^[32]认为生态系统服务功能经济评估方法可分为“影子价格”和“消费者剩余”两类, 冉圣宏等^[33]提出生态环境价值指标, 为系统考察土地利用/覆被变化过程、科学测算不同生态系统服务价值提供了依据。

从既有研究成果看, 学者们主要围绕大江大河流域、平原坝区、沙漠演进、水库流域等开展土地利用/覆被变化研究, 对生态脆弱的高原湖泊流域土地利用/覆被变化及其生态价值变化研究较少, 难以为高原湖泊流域治理提供有效的理论支撑和应用方

作者简介: 付磊, 博士研究生, 讲师, 研究方向为国土资源遥感监测和生态效应评估。E-mail:87318968@qq.com; 李增华, 博士研究生, 高级经济师, 研究方向为城市与区域经济。E-mail:152767925@qq.com

案。近年来,部分学者对滇池流域水生态环境、耕地时空变化、综合治理、环境污染等开展了专题研究,而滇池流域土地利用/覆被变化及其生态价值的研究尚属空白。近 20 年来,随着全球气候变暖和云南省城市化/城镇化进程加快,生态脆弱的高原湖泊滇池及其流域生态环境状况面临着严峻威胁,亟须对其开展系统性研究。因此,本文采用 2000—2020 年滇池流域 GlobeLand30 三期土地利用分类数据和两期 Landsat 遥感数据进行分层面向对象分类,深入分析其土地利用/覆被变化过程、特征,进而系统测算其不同时段生态服务价值,以期为滇池流域生态治理提供决策参考和流域背景下生态系统服务价值理论应用提供范式借鉴。

1 研究区概况及数据

1.1 研究区位及概况

滇池流域位于东经 $102^{\circ} 29' \sim 103^{\circ} 01'$, 北纬 $24^{\circ} 9' \sim 25^{\circ} 28'$, 地处云贵高原中部、云南省昆明市西南部,地质构造以断裂为主、褶皱次之,南北向为狭长的山间盆地,是一个相对独立的自然生态系统,具有较好的地理、气候、物质资源等自然条件,较为适宜人类生存和社会发展。同时,滇池流域是典型的高原湖泊流域,属长江流域上游金沙江水系,流域面积 2920 平方千米,水资源总量为 5.55 亿立方米,人均水资源量仅 155 立方米,水资源严重缺乏^[34, 35]。

1.2 数据来源

研究以滇池流域 5 期 Landsat-5 和 Landsat-8TM/ETM+影像为主要遥感数据源,使用遥感影像,从地理空间数据云官方网站(<http://www.gscloud.cn>)获取,对数据进行拼接处理后,分别得到 2005 年、2015 年研究区影像数据。2005 年、2015 年滇池流域土地分类数据由面向对象分层分类获得。2000 年、2010 年和 2020 年研究区数据采用 GlobeLand30(全球地理信息公共产品)提供的滇池流域土地分类数据(<http://www.globallandcover.com/>),其中道路和裸地通过遥感影像监督分类获取。

2 研究方法

2.1 研究区 LUCC 分类系统建立

对 2005 年、2015 年的遥感影像进行预处理和面向对象分层分类,得到两个时相的土地利用图,作为后期分析补充 LUCC 两个时相的分类数据。

根据第二次全国土地调查一级土地分类系统、万荣荣和杨桂山^[36]建立的基于水文响应研究的土地利用/覆盖分类系统,结合滇池流域土地资源的实际利用方式、覆盖特征和动态监测需求,将研究区土地利用类型划分为水域、道路、建设用地、耕地、园地、林地、草地和裸地八类。

2.2 LUCC 面向对象分层分类

研究采用面向对象的方法,以滇池流域图像中相邻像素组成的对象为处理单元,实现 2005 年和 2015 年的研究区图像分类及目标对象提取。

影像分割包含波段选择和分割参数确定两个主要部分。选择波段是为了在满足基本信息量的同时避免信息冗余。在应用多尺度分割法的过程中,因识别目标不同,选取的波段也不同,结合 2005 年分类情况介绍本研究分类逻辑规则(图 1)。

基于 eCognition 软件,分别对 2005、2015 年两个时段的遥感图像进行面向对象分层分类,具体完成影像分割^[37],背景、云

和阴影去除，植被、水体、不透水表面区分^[38]，建设用地、裸地和道路区分，耕地、园地与草地区分等，进而得到两期土地利用类型数据，分类结果通过精度评价，Kappa 系数分别达到 84.02%和 85.67%，符合预期要求。

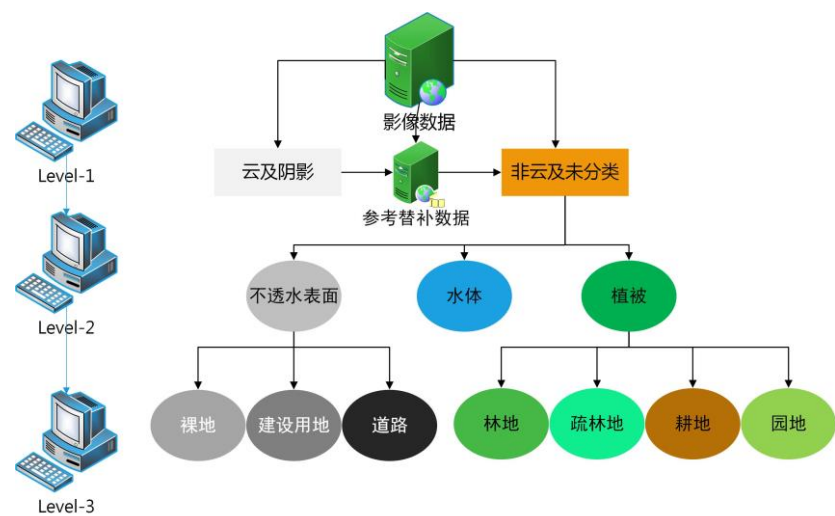


图 1 影像分类逻辑图

2. 3 滇池流域 LUCC 的变化过程及特征分析

2. 3. 1LUCC 类型和结构特征分析

流域或区域的土地利用根据功能分为不同类型，国内外学者由于认识、需求的不同，往往会有不同的分类标准。地理学家在Shanon 信息熵^[39, 40]基础上提出城市土地利用均衡度概念，以便更好揭示城市土地利用结构特征^[41]，认为城市土地利用结构形成是因为城市土地资源空间功能分异导致，其在某种意义上也是产业结构的空间重构过程^[42]。流域土地利用的信息熵方程(H)可以表示为：

$$H=-\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \tag{1}$$

式中：H 为函数信息熵(单位 Nat)，P_i 是区域内各类土地面积占土地的百分数，i 为流域土地利用类型数。信息熵的水平可以反映区域土地利用的均衡程度，即熵值越高，不同功能的土地利用类型数量越多，各功能类型土地面积差异越小、分布越平衡。当流域内各类型土地面积相等即 P₁=P₂=...=P_n=1/n 时，熵值达到最大，说明城市土地利用已达到均衡状态。

为避免土地利用信息熵的不足，可把实际熵值与最大熵值之比作为城市土地利用构成的均衡度(J)，其均衡度越大，土地利用的同质性就越强。与信息熵相比，均衡度的数值直观性和可比性有所增强^[40]。

$$J=-\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i / \ln n \tag{2}$$

2. 3. 2 土地利用/覆被变化的过程分析

为反映各类型土地面积的变化范围和速度以及流域土地利用变化的区域差异，国内学者提出土地利用类型（包括综合土地利用和单一土地利用）的动态度^[43, 44]，并通过类型之间的比较反映类型之间的差异，从而探索其背后的驱动或制约因素^[45]。

(1) 综合土地利用动态度。研究区土地综合利用的动态度(LC)可表示为：

$$LC = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中：LU_i为研究起始时第 i 类土地利用面积；ΔLU_{i-j}为研究期内 i 类土地利用类型转为非 i 类土地利用类型面积的绝对值；T 为研究时段，当 T 值为年时，LC 值为研究区土地利用变化的年速率。

(2) 单一土地利用类型动态度。

单一土地利用类型的动态程度(K)表示研究区内某种土地利用类型在某段时间内数量的变化，其表达式为：

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a \times T} \times 100\% \quad (4)$$

式中：U_a、U_b分别是研究初期和研究末期某种土地利用类型的数量；T 是研究时段，当 T 值为年时，K 值为研究区某一土地利用类型的年变化率。

土地利用程度是反映土地利用的广度以及深度，既可反映土地利用中土地自身属性，也可反映人为因素、自然因素的综合作用。对此，本研究参考谢叶伟等^[30]提出的“土地利用程度分级与赋值”，樊玉山和刘纪远^[46]提出的“土地利用程度综合分析方法”，根据社会因素影响下的土地自然综合体的自然平衡状态，将滇池流域土地利用程度划分为 5 个等级，并对该流域内 8 类土地赋予分类指标(表 1)。同时，基于土地利用程度综合指数和土地利用程度变化的定量表达，可计算出该流域土地利用程度的变化情况。

表 1 滇池流域土地利用程度分级表

用地类型	道路	耕地	建设用地	林地	裸地	草地	水体	园地
分级指数	5	4	5	3	1	2	3	4

(3) 土地利用程度综合指数。研究区土地利用程度综合指数(L_i)可表示为：

$$L_i = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad (5)$$

式中：A_i为研究区土地利用程度一级分类指标，C_i为研究区 i 级土地利用程度的面积百分比；n 为土地利用程度分类号^[40]。

(4) 土地利用程度变化率。

特定范围内土地利用程度的变化是各种土地利用类型变化的耦合结果，土地利用程度变化量 (ΔL_{b-a}) 和土地利用程度变化率 (R) 可表示为^[43]：

$$\Delta L_{b-a} = L_b - L_a = 100 \times \left[\sum_{i=1}^n A_i \times C_{ib} - \sum_{i=1}^n A_i \times C_{ia} \right] \quad (6)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \times C_{ib}) - \sum_{i=1}^n (A_i \times C_{ia})}{\sum_{i=1}^n (A_i \times C_{ia})} \quad (7)$$

式中： L_b 和 L_a 分别为时间 b 和 a 的区域土地利用程度综合指数； A_i 为 i 级土地利用程度分类指标； C_{ib} 和 C_{ia} 分别是时间 b 和 a 的 i 级土地利用程度的面积百分比。如果 $\Delta L_{b-a} > 0$ ，或 $R > 0$ ，则该区域土地利用处于发展期，否则处于调整期或下降期。

2.4 滇池流域生态服务价值变化分析

快速城市化进程下区域 LUCC 及其环境影响日益突显，必然引起各陆地生态系统面积及其时空分布、景观格局的变化。具体而言，LUCC 对生态环境的影响大致可分为无污染生态系统服务功能的变化和主要污染物非点源污染负荷的变化两个方面^[47]。对此，本文参考 Costanza 等^[31]、冉圣宏等^[33]的研究成果和 2006—2019 年 CPI 指数，结合滇池流域实际，计算出 2006—2019 年我国通货膨胀率为 112.28%，适当调整了 Costanza 等^[31]、冉圣宏等^[33]的研究中的计算结果，得出了滇池流域不同土地利用类型的生态服务价值。

3 研究结果分析与讨论

通过对研究期内滇池流域五个时段土地利用数据的汇总计算，系统分析了滇池流域土地利用结构特征（信息熵与均衡度）、土地利用动态度（综合动态度和单一动态度）、土地利用程度（综合指数和变化率）、生态服务价值变化情况，并阐述其驱动因素和影响，具体从以下五个层面解析。

3.1 滇池流域 LUCC 过程及特征表现

从 2000—2020 年，滇池流域主要土地利用类型在不同时期差异不大，但道路、建设用地持续增加，耕地逐年减少是一个总体趋势（表 2）。具体而言，以变化强度判断，滇池流域建设用地面积占比从 2000 年的 7.86% 上升到 2020 年的 22.67%，增幅达 14.81%，面积扩展到近原来的 3 倍，而耕地面积占比从 2000 年的 39.24% 下降到 2020 年的 25.02%，降幅达 14.22%，减小约 400 平方千米；以占比第一用地类型判断，2000 年滇池流域占比第一用地类型为耕地，占总类型的 39.24%，而 2020 年则为 25.02%，下降约 14 个百分点；以用地面积比例位居前三的用地类型判断，2000 年滇池流域主导用地类型为耕地、草地和林地，占总土地规模的 79.11%，而 2020 年则转变为耕地、建设用地和草地，占总土地规模的 68.619%；以相近时段典型特征判断，2015 年和 2020 年的主导用地类型均为耕地、草地和林地，均占总土地规模的 68.624%，占比相近，但构成发生了变化，其中 2020 年的耕地占比比 2015 年下降了 4 个百分点，建设用地占比比 2015 年增加了近 5 个百分点，林地占比比 2015 年减少 1 个百分点，其他用地类型五年内变化效应为 1%。总体来看，滇池流域土地利用/覆被变化的过程及特征表现正好反映了云南城镇化政策实施以来滇池流域所属高原坝区的土地自然属性，与滇池流域在云南省的特定政治经济背景及近 20 年高强度的人类经济社会活动和城市化建设加速发展的特点密切相关。

表 2 2000—2020 年滇池流域 LUCC 构成表

用地类型	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
道路	6.32	7.01	12.56	17.52	24.82
耕地	1146.01	1100.12	985.53	861.62	730.72
建设用地	229.57	247.23	298.17	517.34	662.11
林地	518.25	548.91	578.48	544.85	510.89
裸地	6.93	7.31	14.21	13.06	19.47
草地	645.98	651.23	677.52	597.46	611.34
水体	340.08	326.68	316.51	332.88	323.67
园地	27.23	31.64	37.05	35.42	37.67
总计	2920.37	2920.13	2920.03	2920.15	2920.69

3.2 滇池流域土地利用结构的信息熵与均衡度

近 20 年来，2000—2020 年滇池土地利用结构逐渐均衡，除建设用地显著增加、耕地迅速减少外，各用地类型的面积差别逐渐缩小，城市土地结构的均质性逐渐增强。从信息熵来看(图 2)，2000—2020 年，滇池流域土地利用结构的信息熵经历了每五年线性增长的变化过程，2000—2005 年，2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年年均增长率分别为 0.40%、1.11%、1.11%、0.57%，年均增速经历了从增加到稳定再到下降的过程。从均衡度指标看(图 3)，2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年滇池流域土地利用结构的均衡度分别为 0.735、0.745、0.771、0.799、0.812，平均均衡度为 0.773。在纵向上，滇池流域 2000—2010 年土地利用结构均衡度平均值(0.751)略比近 20 年土地利用结构均衡度平均值低 0.022，可推断出 2010 年后滇池流域城市化建设加快；在横向上，滇池流域 2020 年土地利用结构均衡度最接近 2000 年我国北京、上海、天津、哈尔滨、长春、沈阳、大连、武汉、重庆、广州等 10 个主要中心城市土地利用结构均衡度平均值(0.886)^[40, 48, 49]，可推断出滇池流域城市发展水平明显滞后于上述城市。

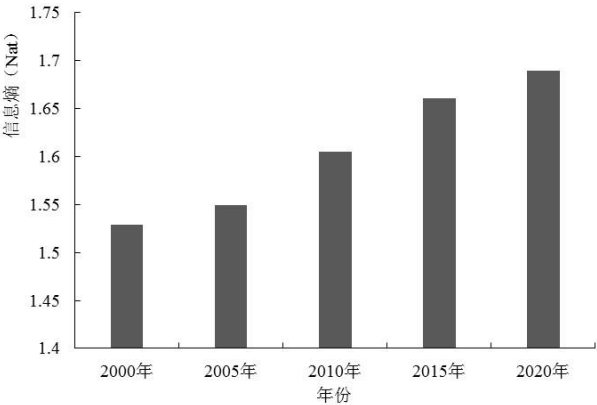


图 2 2000—2020 年滇池流域土地利用结构信息熵

3.3 滇池流域土地利用程度

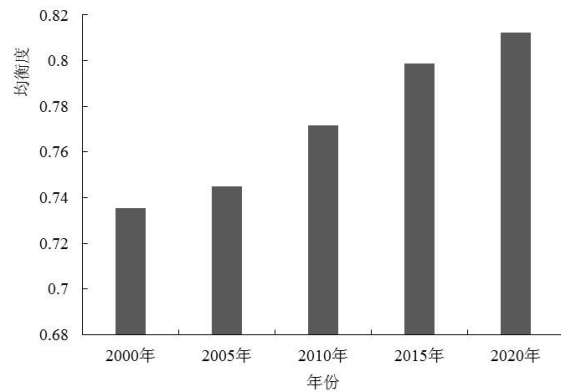


图3 2000—2020年滇池流域土地利用结构均衡度

滇池流域土地利用程度主要体现在综合动态度和单一动态度两个方面。从综合动态度变化(表3)看,变化最快的是2010—2015年,变化最慢的是2000—2005年。从单一动态度变化(表4)看,2005—2010年滇池流域裸地、道路用地变化较大,其中裸地每年增加18.88%、道路用地每年增加15.83%,这既可能与2009—2010年滇池流域气候干旱有关,也可能与道路等基础设施建设力度加大相关,有待进一步研究证实;耕地在研究期内均出现负增长(下降),尤其是2015—2020年下降幅度最大,达到每年3.04%,而该期间单一动态度增加最快的为裸地、道路和建设用地;2010—2015年建设用地每年增长14.70%,表明此时段是研究期内滇池流域城市化进程最快的时期,五年间建设用地增加最为迅猛;在八种用地类型中,水体单一动态度变化最小,且2000—2005年、2005—2010年、2015—2020年三个阶段水体单一动态度均为负值,变化绝对值均小于1,2010—2015年动态度变化最大也只有年均1.03%。进一步看,滇池流域2000—2020年土地利用程度综合指数(图4)显示,2020年综合指数值为351.08,是5个时期中的最高值,而2010年综合指数值为332.13,是5个时期中的最低值;滇池流域2000—2020年土地利用程度变化率(图5)显示,2005—2010年土地利用程度变化率为-0.37%,表明滇池流域正处于土地利用调整期。另外,从2010—2020年,滇池流域土地利用程度综合指数逐渐增高,并呈现研究期内两个极大值,即土地利用综合指数最高值351.08(2020年)和土地利用程度变化率最高值4.18%(2010—2015年),特别是在2015—2020年,滇池流域土地利用程度变化率降低到1.47%,上升速度明显减缓,表明在没有强力驱动因素的影响下,滇池流域土地利用可能在未来几年间迎来一个调整期。

表3 2000—2020年滇池流域土地利用综合动态度表

指标	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	2015—2020年
综合动态度	0.20%	0.43%	0.82%	0.60%

表4 2000—2020年年均滇池流域土地利用单一动态度表

用地类型	单一动态度			
	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	2015—2020年
道路	2.18%	15.83%	7.90%	8.33%

耕地	-0.80%	-2.08%	-2.51%	-3.04%
建设用地	1.54%	4.12%	14.70%	5.60%
林地	1.18%	1.08%	-1.16%	-1.25%
裸地	1.09%	18.88%	-1.61%	9.81%
草地	0.16%	0.81%	-2.36%	0.46%
水体	-0.79%	-0.62%	1.03%	-0.55%
园地	3.24%	3.42%	-0.88%	1.27%

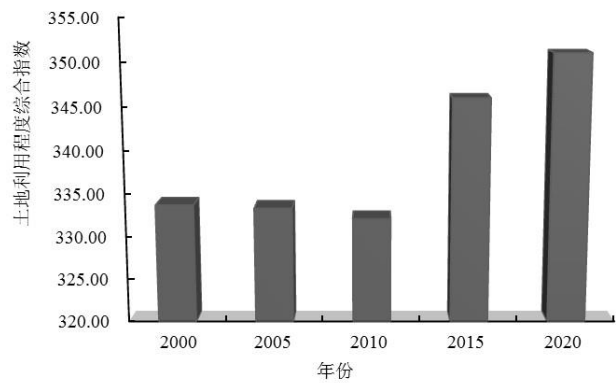


图 4 2000—2020 年土地利用程度综合指数

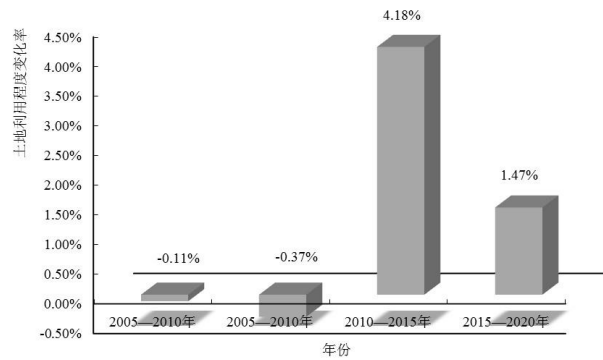


图 5 2000—2020 年土地利用程度变化率

3.4 滇池流域土地利用生态服务价值变化

从总体看，滇池流域土地利用生态服务价值在 2000—2020 年呈现小幅波动逐渐下降态势，五个时段的生态服务价值分别为 31.45 亿元/年、30.50 亿元/年、29.79 亿元/年、30.69 亿元/年和 29.78 亿元/年，其中总价值最低的是 2020 年，这与该年的耕地、林地面积减小有直接关系，因为耕地、林地减少势必造成滇池流域水源涵养、水调节、供水等功能相应下降进而导致流域生态系统服务价值下降。从表 5 可以看出，滇池流域水体、林地、草地的生态服务价值在 8 种用地类型中分别居第一位、第二位、

第三位，表明水的涵养、水体面积的增加或其他用地类型向水体、林地、草地的转化有益于流域生态服务价值增值。

3.4.1 滇池流域不同土地利用/覆被类型的生态服务功能变化

表 5 2000—2020 年滇池流域土地利用生态服务价值 单位：万元/年

用地类型	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
道路	11.72	13.00	23.30	32.50	46.04
耕地	10681.61	10253.89	9185.83	8030.90	6810.82
建设用地	425.82	458.58	553.07	959.60	1228.13
林地	19888.98	21065.62	22200.44	20909.81	19606.52
裸地	3.86	4.07	7.90	7.27	10.83
草地	14564.73	14683.10	15275.86	13470.76	13783.71
水体	268122.68	257557.98	249539.85	262446.13	255184.87
园地	829.47	963.81	1128.61	1078.95	1147.49
合计	314528.88	305000.05	297914.84	306935.92	297818.41

从 LUCC 生态服务功能变化看，近 20 年滇池流域道路、建设用地、裸地、园地的价值明显增加，耕地、林地、草地的价值有所降低，水体出现波浪式下降的态势。从单一用地类型看，按照生态服务功能增减量级来分，可把滇池流域各用地类型生态服务价值变化分为四个层次：第一层次是 10 万元区间的道路和裸地，相较 2000 年，2020 年道路生态服务价值增加了 34.32 万元、裸地生态服务价值增加了 6.98 万元；第二层次是 100 万元区间的建设用地、林地、草地和园地，相较 2000 年，2020 年建设用地、园地生态服务价值分别增加了 802.30 万元和 318.02 万元，但草地和林地的生态服务价值却分别下降了 781.02 万元和 282.46 万元，价值总量基本平衡；第三层次、第四层次分别是 1000 万元区间的耕地和 1 亿元区间的水体，其中近 20 年滇池流域耕地的生态服务价值减少了 3870.79 万元，水体的生态服务价值减少了 12937.82 万元，成为该流域生态服务价值下降的主要原因。换言之，滇池流域快速的城市化发展产生的建设用地、道路和裸地所增加的生态服务价值不能冲抵草地、林地、水体和耕地减少所导致的生态服务价值损失。这在一定程度上也证明了滇池流域水体和耕地资源对该流域生态服务功能和生态价值的极端重要性。

3.4.2 滇池流域不同类型生态系统服务功能变化

通过对研究初期(2000 年)和研究末期(2020 年)滇池流域不同类型生态系统服务功能变化的分析比较看(表 6)，其生态服务价值占比最高的前三项分别是水分调节、水供应和废物处理，其中水分调节占比达到 56.61%以上，可见水资源的涵养、保护和合理利用明显关系到滇池流域生态系统服务功能一半以上的价值。两期相比，前三项分别占比 98.23%和 89.12%，占比有适度的减小趋势；文化功能有显著提高，变化率为 35.95%，与建设用地的增加有关，而生物控制和食物供应、传粉功能下降幅度最快，分别下降 37.45%、23.49%和 21.23%，与耕地和林地的减少密切相关，还在一定程度上体现了生物多样性的下降趋势。当然，生态服务价值尽管是一个可以衡量区域生态环境质量的货币化综合指标，但由于指标在统一维度后转化为货币价格，计算结果必然有不确定性，故研究在着力探讨滇池流域的生态服务功能和生态价值的相对变化趋势及其驱动因素，并非计算生态服务的绝

对价格(价值)。

表 6 滇池流域 2000 年和 2020 年土地利用生态服务价值比较(按生态系统服务功能)

生态服务价值	2000 年/亿元	占比	2020 年/亿元	占比	变化率
大气调节	980.8	0.36%	908.7	0.31%	-7.94%
气候调节	4379.7	1.59%	4362.8	1.51%	-0.39%
扰动调节	5034.8	1.83%	4741.5	1.64%	-6.19%
水分调节	171992.1	62.45%	163701.0	56.61%	-5.06%
水供应	68476.7	24.86%	65179.9	22.54%	-5.06%
侵蚀控制	1223.8	0.44%	1179.2	0.41%	-3.78%
土壤形成	579.3	0.21%	556.6	0.19%	-4.08%
营养物循环	189.5	0.07%	168.0	0.06%	-12.77%
废物处理	30070.4	10.92%	28826.7	9.97%	-4.31%
传粉	3316.7	1.20%	2735.9	0.95%	-21.23%
生物控制	3522.4	1.28%	2562.7	0.89%	-37.45%
栖息地	1123.2	0.41%	1113.1	0.38%	-0.90%
食物供应	11870.4	4.31%	9612.5	3.32%	-23.49%
原材料	1334.2	0.48%	1307.9	0.45%	-2.02%
基因资源	148.1	0.05%	128.2	0.04%	-15.51%
娱乐	9573.7	3.48%	9620.3	3.33%	0.48%
文化	713.1	0.26%	1113.4	0.39%	35.95%
合计	314528.88	114.21%	297818.41	102.99%	-5.61%

3.5 滇池流域土地利用/覆被变化及其生态服务价值变化的动因和影响

近 20 年来滇池流域土地利用/覆被变化及生态服务价值变化受多种因素驱动,给滇池流域环境保护和生态文明建设带来巨大压力。

3.5.1 滇池流域土地利用/覆被变化及其生态服务价值变化的驱动因素

根据前述分析,滇池流域土地利用/覆被变化及其生态服务价值变化的驱动因素主要体现在自然地理和人文地理两个维度。

首先,从自然地理维度看,水资源严重缺乏是近 20 年滇池流域土地利用/覆被变化及其生态服务价值变化的自然驱动力。滇池流域具有较好的地理、气候、物质资源等自然条件,是一个较为适宜人类生存发展的区域。但是滇池流域地处云贵高原喀斯特地貌发育区,生态环境脆弱,整个流域水资源总量为 5.55 亿立方米,人均水资源量仅为 155 立方米,属水资源严重缺乏地区,加之滇池水质的长期恶化,在一定程度上导致滇池流域发展的先天不足,滇池流域土地不能得到充分利用。其次,从人文地理维度看,流域城镇化建设和农业产业升级是近 20 年滇池流域土地利用/覆被变化的主要动因。从数据分析看,近 20 年滇池流域用地结构变化明显,呈现建设用地持续增加与耕地逐渐减少并存、其他用地类型适度起伏变化的总体态势。这与滇池流域作为云南政治、经济、文化中心区域的地理区位特征高度吻合,意即其区域发展特别是城镇化建设发展必然驱动滇池流域用地结构持续变化,因为建设用地规模的持续扩大必将不断挤兑和压缩滇池流域有限的土地资源空间。加之城镇化建设带来的人口增多,城市规模不断扩大,生活用水、工农业耗水量增加,特别是沿滇池流域工农业回归水仍多次被提取重复利用,使滇池流域的水资源开发利用效率很高,远超云南省平均开发利用程度(6.9%),造成滇池流域生态服务价值总体有所下降。

3.5.2 滇池流域土地利用/覆被变化及其生态服务价值变化的影响

近 20 年滇池流域土地利用/覆被变化及其生态服务价值变化给整个流域的经济社会发展和生态环境带来较大影响,具体表现在四个方面:(1)经过近 20 年的城镇化建设和农业产业升级,滇池流域的土地利用空间越来越小,未来建设用地供需矛盾将更加突出;(2)通过近 20 年滇池流域城市发展趋势看,滇池流域的城市和城镇规模及人口规模将有不断扩大的可能,进一步加剧水资源短缺形势和供需矛盾;(3)近 20 年滇池流域土地利用生态服务价值呈小幅波动下降的态势,给滇池流域生态文明建设和生态环境保护带来巨大压力;(4)20 年来滇池流域土地利用过程中形成的水污染、土壤污染、废弃物排放、耕地林地草地破坏等问题,给今后滇池流域生态环境修复造成极大困难。客观而言,近 20 年滇池流域土地利用类型及其生态服务价值变化所造成的这些影响,深刻启示我们要高度重视经济社会与生态建设协调发展、经济建设与生态保护协同推进。

4 结论与建议

本研究采用 2000—2020 年滇池流域 GlobeLand30 三期土地利用分类数据和两期 Landsat 遥感数据进行分层面向对象分类,分析其土地利用/覆被变化过程、特征,以及土地利用类型动态度及土地利用程度变化,进而测算其不同时段生态服务价值。主要结论及建议如下。

(1)推进滇池流域城市/城镇总体规划修编,科学确定城市/城镇规模。滇池流域是云南政治、经济、文化的中心区域,在云南经济社会发展中具有举足轻重的作用。从土地利用均衡度和土地利用程度来看,近 20 年滇池流域土地利用的广度及深度呈现先逐渐增强后冲高回落的趋势,土地资源空间功能分异减小,不同功能的土地利用类型数量增加、面积差异变小、分布趋向平衡,城市土地结构均质性逐渐增强,但其流域城镇化建设水平仍然偏低,大致相当于国内主要发达城市 20 年前的水平,可见滇池流域经济社会发展仍有较大空间。因此,滇池流域未来建设用地供需矛盾必然更加突出,耕地保护面临更大挑战。对此,滇池流域内各级地方政府应充分考虑滇池流域土地、环境、资源等要素的总体承载能力,适时制定或修编城市/城镇总体规划,推进“多规合一”,科学确定城市/城镇总体规模尤其是人口规模和用地规模,加强用地结构管理和比率调控,推动城市土地节约集约利用与可持续发展。

(2)坚持生态优先、绿色发展,切实推进滇池流域生态经济社会系统协调发展。滇池流域既是云南经济社会发展的重要区域,又是云南生态建设的主要板块,其经济意义和生态意义都极为重要。客观上,滇池流域属于生态脆弱的高原湖泊流域和金沙江水系上游退耕还林的重要流域区段,加之滇池流域缺水、石漠化、湖泊富营养化等问题多元并存,导致生态环境治理压力较大。显然,滇池流域面临经济发展和生态建设的双重压力和协同愿景。对此,滇池流域各级地方政府应坚决贯彻习近平生态文明思想,坚持“绿水青山就是金山银山”的理论指引,走生态优先、绿色发展新路,有效协调生态保护与经济社会发展的关系,科学确定并严格落实滇池流域生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界三条控制线,优化该流域生产、生活、生态“三生”空间,实现生态效应的纳什均衡和流域土地资源治理现代化,推进滇池流域生态经济社会系统协调发展。

(3)加强生态环境修复治理,有效提升滇池流域土地利用生态服务价值。从生态服务功能变化估算看,滇池流域土地利用/覆被变化过程及其特征具有重要的生态服务价值。特别是在滇池流域土地利用生态服务功能体系中,水分调节、水供应、废物处理等三大功能尽管在近 20 年略有下降,但在 2020 年仍占有 89.12%(其中水分调节占比达 56.61%以上),发挥着重要作用。可见,水资源具有大气调节、气候调节、扰动调节、水分调节、水供应等生态功能,其科学开发、高效利用、系统治理和有效保护对滇池流域的生态建设至关重要。对此,滇池流域各级地方政府应重点把握滇池流域生态环境变化,尽快制定和修订完善滇池(流域)生态环境治理和保护总体规划及单项规划,严格耕地、林地、草地、水体和生物多样性等多要素治理、保护与修复,加强“三废”和水体富营养化治理,涵养滇池流域生态系统,切实提升滇池流域自我净化和生态净化能力,有效提升滇池流域土地利用生态服务价值。

(4)加大生态环境立法、执法力度,严厉打击破坏滇池流域生态环境违法违规行为。从驱动因素看,近 20 年滇池流域土地利用及其生态服务价值变化除受经济发展、城市建设、城市人口增长和农业产业升级影响外,还受非法破坏生态环境行为(诸如围绕滇池的“环湖开发”“贴线开发”“过度开发”“三废排放”“毁林占地”)的影响。对此,云南省有关部门应尽快修订完善《云南省滇池保护条例》,为新形势下滇池保护提供有力法规保障;昆明市有关部门应系统梳理和修订完善《云南省滇池保护条例》配套措施、《昆明市河道管理条例》《滇池湖滨湿地建设规范》《滇池湖滨湿地管护规程》、“三废”排放标准等涉及滇池保护的规章制度,确保滇池流域生态环境治理和保护有章可循;国家及云南省级有关部门要加大对滇池流域土地利用及生态环境建设的监督指导,及时纠正违法违规行为;滇池流域各级地方政府应加强生态环境保护综合行政执法队伍建设,提高执法能力,有效运用生态环境保护督察、排查、检查、投诉、举报机制,依法严厉打击破坏滇池流域生态环境违法违规行为;各级有关部门要加大滇池流域生态环境治理、保护、执法的监督执纪问责力度,营造滇池流域治理的良好环境。

参考文献:

- [1]Schilling K E, Jha M K, Zhang Y K, et al. Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: Historical effects and future directions[J]. Water Resources Research, 2008, 44: W00A09.
- [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(1): 81-87.
- [3]Turner B L, Skole D, Sanderson S, et al. Land-use and land-cover change: Science/research plan[J]. Global Change Report (Sweden), 1995, 43: 669-679.
- [4]李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996(6): 553-558.
- [5]Dewan A M, Yamaguchi Y. Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization[J]. Applied Geography, 2009, 29(3): 90-401.
- [6]焦继宗. 民勤绿洲土地利用/覆盖时空演变及模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [7]孟庆香, 张莉坤, 位贺杰, 等. 基于 LUCC 的伊河流域生态系统服务供需风险时空演变[J/OL]. 生态学报, (2021-11-17). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20211116.1727.022.html>.
- [8]Parker D C, Manson S M, Janssen M A, et al. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: A review[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2003, 93(2): 314-337.
- [9]Li S H, Jin B X, Zhou J S, et al. Analysis of the spatiotemporal land-use/land-cover change and its driving

forces in Fuxian lake watershed, 1974 to 2014[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2017, 26(2): 671-681.

[10] 韩海青, 王旭红, 牛林芝, 等. 1992—2015 年中亚五国 LUCC 特征及耕地驱动力研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021(2): 325-339.

[11] 许倍慎. 江汉平原土地利用景观格局演变及生态安全评价[D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.

[12] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响——以河北省遵化市为例[J]. 地理学报, 2001(4): 447-455.

[13] Biro K, Pradhan B, Buchroithner M F, et al. Land use/land cover change analysis and its impact on soil properties in the northern part of Gadarif region, Sudan[J]. Land Degradation and Development, 2013, 24(1): 90-102.

[14] Post W M, Kwon K. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential[J]. Global Change Biology, 2010, 6(3): 317-327.

[15] 邱莉萍, 张兴昌. 子午岭不同土地利用方式对土壤性质的影响[J]. 自然资源学报, 2006(6): 965-972.

[16] 武丹, 李欢, 艾宁, 等. 基于 CA-Markov 的土地利用时空变化与生境质量预测——以宁夏中部干旱区为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020(12): 1969-1978.

[17] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报, 2007(2): 189-204.

[18] 史培军, 潘耀忠, 陈晋, 等. 深圳市土地利用/覆盖变化与生态环境安全分析[J]. 自然资源学报, 1999(4): 293-299.

[19] 史培军, 宋长青, 景贵飞. 加强我国土地利用/覆盖变化及其对生态环境安全影响的研究——从荷兰“全球变化开放科学会议”看人地系统动力学研究的发展趋势[J]. 地球科学进展, 2002(2): 161-168.

[20] 王宗明, 张柏, 张树清. 吉林省生态系统服务价值变化研究[J]. 自然资源学报, 2004(1): 55-61.

[21] Rimal B, Sharma R, Kunwar R, et al. Effects of land use and land cover change on ecosystem services in the Koshi River Basin, Eastern Nepal[J]. Ecosystem Services, 2019, 38: 100963.

[22] 张志强, 孙成权. 全球变化研究十年新进展[J]. 科学通报, 1999(5): 464-477.

[23] 周广胜, 王玉辉. 土地利用/覆盖变化对气候的反馈作用[J]. 自然资源学报, 1999(4): 318-322.

[24] Ostberg S, Schaphoff S, Lucht W, et al. Three centuries of dual pressure from land use and climate change on the biosphere[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10: 044011.

[25] 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(5): 1894-1906.

-
- [26]王根绪, 杨玲媛, 陈玲, 等. 黑河流域土地利用变化对地下水资源的影响[J]. 地理学报, 2005(3): 456-466.
- [27]Bronstert A, Niehoff D, Bürger G. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modeling capabilities[J]. Special Issue: The Future of Distributed Hydrological Modelling, 2002, 16(2): 509-529.
- [28]Sarukkalgil P R. Impacts of land use on groundwater quality in western Australia[EB/OL]. (2009-09-06). <https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/28386>.
- [29]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(5): 19-25.
- [30]谢叶伟, 刘兆刚, 赵军, 等. 基于 RS 与 GIS 的典型黑土区土地利用变化分析——以海伦市为例[J]. 地理科学, 2010(3): 428-434.
- [31]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(15): 253-260.
- [32]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(5): 635-640.
- [33]冉圣宏, 吕昌河, 贾克敬, 等. 基于生态服务价值的全国土地利用变化环境影响评价[J]. 环境科学, 2006(10): 2139-2144.
- [34]何佳. 滇池流域水质目标管理与精准治污实践[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [35]昆明市环境科学研究所. 滇池富营养化调查研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1992.
- [36]万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨[J]. 地理科学进展, 2005(3): 25-33.
- [37]Xu H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [38]Varshney A. Improved NDBI differencing algorithm for built-up regions change detection from remote-sensing data: An automated approach[J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(5): 504-512.
- [39]夏学惠, 东野脉兴, 周建民, 等. 滇池现代沉积物中磷的地球化学及其对环境影响[J]. 沉积学报, 2002(3): 416-420.
- [40]程江. 上海中心城区土地利用/土地覆被变化的环境水文效应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [41]许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [42]姚士煤. 中国大都市的空间扩展[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- [43]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(1): 81-87.

-
- [44]摆万奇, 赵士洞. 土地利用和土地覆盖变化研究模型综述[J]. 自然资源学报, 1997(2): 74-80.
- [45]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(5): 643-650.
- [46]樊玉山, 刘纪远. 西藏自治区土地利用[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [47]冉圣宏, 吕昌河, 贾克敬, 等. 深圳宝安区土地利用变化的环境影响研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2006(5): 72-77.
- [48]陈彦光, 刘继生. 城市土地利用结构和形态的定量描述: 从信息熵到分维数[J]. 地理研究, 2001(2): 146-152.
- [49]赵晶, 徐建华, 梅安新, 等. 上海市土地利用结构和形态演变的信息熵与分维分析[J]. 地理研究, 2004(2): 137-146.