

DOI: 10.5846/stxb202112223629

王佳恒, 颜蔚, 段学军, 段岩燕, 邹辉, 金满库. 湖泊生态缓冲带识别与生态系统服务价值评估——以滇池为例. 生态学报, 2023, 43(3): 1005-1015.
Wang J H, Yan W, Duan X J, Duan Y Y, Zou H, Jin M K. Lake ecological buffer zone identification and ecosystem service value evaluation: A case study of Lake Dianchi. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1005-1015.

湖泊生态缓冲带识别与生态系统服务价值评估 ——以滇池为例

王佳恒^{1,2}, 颜蔚^{2,4}, 段学军^{2,3}, 段岩燕¹, 邹辉^{2,3,*}, 金满库²

1 天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300387

2 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

3 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 湖滨带及环湖区域是发挥湖泊生态功能的关键区域, 湖泊生态缓冲带建设是生态系统服务功能提升和湖泊生态保育的重要手段。基于原地污贡献、单位面积价值当量因子和 GIS 分析等方法, 以滇池为例识别湖泊生态缓冲带并评估生态系统服务价值。结果表明: ①滇池生态缓冲带识别划定出山体型缓冲带、农田型缓冲带、村落型缓冲带、城镇型缓冲带和湿地型缓冲带等 5 种类型, 上边界和下边界长度为 171.50km 和 127.55km, 平均宽度为 349.49m, 总面积为 38.12km²; 其中湿地型占主, 缓冲带宽度处于 20—825m 之间, 面积为 10.31km²、占比 27.05%; ②2000—2020 年环滇池区域生态系统服务价值整体呈下降趋势, 价值总量由 12.40 亿元降低至 7.78 亿元; 价值等级以低等级和中等等级为主, 多期评估显示二者占比处于 70.21%—77.66% 之间; 外海北岸和草海区域生态系统服务价值降低最为明显, 反映出城镇建设等人类活动的影响; ③环滇池区域湿地型、林地型和草地型三种情景模拟对生态系统服务价值分别提升 58.87%、21.08% 和 17.48%, 湿地型情景下水文调节、生物多样性等指标提升效果显著。研究结果直观显示了生态缓冲带的生态价值, 为滇池生态缓冲带构建和生态修复提供参考。

关键词: 湖泊生态缓冲带; 生态系统服务价值; 湖滨带; 滇池

Lake ecological buffer zone identification and ecosystem service value evaluation: A case study of Lake Dianchi

WANG Jiaheng^{1,2}, YAN Wei^{2,4}, DUAN Xuejun^{2,3}, DUAN Yanyan¹, ZOU Hui^{2,3,*}, JIN Manku²

1 School of Geography and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

2 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

3 Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The lakeshore and the area around the lake were the key areas for lake ecological functions. The construction of lake ecological buffer zone was an important means to improve ecosystem services and lake ecological conservation. Lake Dianchi is located in the south of the main urban area of Kunming, Yunnan Province, with an altitude of 1886m and an area of about 300km². It is the largest plateau freshwater lake in China and plays an important role in supporting the ecological security barrier in Southwest China. Dianchi Lake Basin is the most concentrated and dynamic area of social economy and urban development in Yunnan Province as well. In recent years, with the rapid development of Dianchi Lake Basin, various ecological and environmental problems have arisen constantly. Based on the pollutant generation of land

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41901156); 中国国土勘测规划院外协项目 (20221811179)

收稿日期: 2021-12-22; **网络出版日期:** 2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hzhou@niglas.ac.cn

patches, the value equivalent factor per unit area and GIS analysis, this paper took Lake Dianchi as an example to identify the lake ecological buffer zone and evaluate the ecosystem service value around the lake. The results showed that: ① the ecological buffer zone identification of Lake Dianchi delineated five types: mountain buffer zone, farmland buffer zone, village buffer zone, urban buffer zone and wetland buffer zone. The upper and lower border lengths were 171.50km and 127.55km, with an average width of 349.49 m and a total area of 38.12km². Among them, the wetland buffer zone was dominant and its width ranged from 20 to 825 m, with an area of 10.31km², accounting for 27.05%. ② The overall ecosystem service value of the Lake Dianchi region from 2000 to 2020 has been declining, the total value decreased from 1.240 billion yuan to 778 million yuan. The value grades were mainly low-grade and medium-grade, and the multi-period assessments showed that the proportions of the low-grade and medium-grade were 70.21% and 77.66%, respectively. The decreases of the ecosystem services value in the north coast of Waihai and Caohai were the most significant, reflecting the impact of intensive human activities such as urban construction. ③ The three scenarios of wetland, woodland, and grassland around Lake Dianchi increased the ecosystem service value by 58.87%, 21.08%, and 17.48%. Under the wetland scenario, the hydrological regulation, biodiversity and other indicators had a significant improvement effect. The research results showed the ecological value of the ecological buffer zone, and provided a reference for the ecological buffer zone construction of Lake Dianchi and ecological restoration.

Key Words: lake ecological buffer zone; ecosystem service value; lakeshore; Lake Dianchi

近年来,湖泊生态环境问题引起了全球的关注,中国也逐步重视湖泊的生态环境保护。2021年11月,国家发展和改革委员会发布《关于加强长江经济带重要湖泊保护和治理的指导意见》,将长江经济带湖泊治理问题提升到了新的高度,为强化重要湖泊保护和治理工作指明方向。目前,针对生态缓冲带的识别和生态系统服务价值评估,众多国内外学者已开展了一系列研究。生态缓冲带边界确定的常用方法有经验值法^[1]、实地调研法^[2-3]、数学模型法^[4]和GIS分析法^[5-6]。不同的划定方法各有优缺点,适用于多种自然地理环境。李春华等研究指出^[7],流域生态缓冲带宽度的影响因素有水体环境质量要求、区域污染强度、流域的经济发展水平和流域的土壤条件。叶春等认为^[8],湖泊缓冲带的构建,不仅要防控缓冲带内污染源,也要注重生态系统的完整性。关于生态系统服务价值的定量化研究,欧阳志云等将生态系统分为各类生态产品^[9],从功能量和价值量核算了生态系统价值的总和。谢高地等基于Costanza的研究^[10-11],总结归纳出适用于我国的单位面积价值当量因子法,并核算了中国生态系统服务价值。诸多学者在谢高地的研究基础上,考虑了植被指数^[12]、降水量^[13]、生物量^[14]、沉陷因子^[15]、社会经济因子^[16]等的影响作用,对价值当量表进行校正修订,得出准确度更高的生态系统服务价值核算结果。

近年来,对生态缓冲带和生态系统响应关系的探讨成为了生态修复的研究热点之一。现有研究从以下3个方面展开:一是从污染防治角度^[17-19],生态缓冲带类型、宽度、长度对拦截污染和净化水体起到重要影响。张静等基于时空视角^[20],在三峡库区研究了不同宽度的缓冲区在不同季节所引起的生态效应也不同。二是从综合效益角度^[21],付文凤等从社会、经济、生态方面构建指标体系评价缓冲带的建设价值。李春江构建缓冲带草林生态效益指标体系^[22],并运用生态学为主的效益计量方法进行定量计算。三是从生态系统服务角度,Zak D在西北欧温带提出了综合缓冲区的概念^[23],在防控污染的基础上,继续探究缓冲带所提供的额外生态系统服务。吴一帆等基于InVEST模型^[24],探究草地类型的河岸缓冲带有效提高了生态系统服务价值。

湖泊生态缓冲带作为湖泊水体和陆地的过渡带,一定程度上减轻了人类活动和自然过程对湖泊的干扰,保护着湖泊生境,对维护环湖生态系统安全有重要意义。同时湖泊生态缓冲带是湖泊生态系统的重要组成部分,对提升湖泊生态系统完整性和生态系统服务价值起到显著作用^[25]。在构建生态缓冲带的背景下,对生态系统服务价值变化进行定量化分析,可以直观反应湖泊生态缓冲带在生态环境保护与修复上所创造的价

值^[26]。目前,针对生态缓冲带对生态系统服务价值影响的研究仍较缺乏,相关研究仅评估了单一类型的缓冲带对生态系统服务价值的影响。通过多情景模拟,可以全面分析不同类型生态缓冲带所带来的生态价值,深入探究生态缓冲带构建的最佳方案,同时也给决策者们提供灵活的多情景参考,为生态缓冲带的落地工作奠定基础。基于此,本研究采用 GIS 分析法识别滇池生态缓冲带,运用单位面积价值当量法,在 2020 年土地利用类型的基础上设置 3 种不同的土地利用类型情景,进一步分析滇池湖泊生态缓冲带所带来的生态系统服务价值变化,以此为滇池湖泊生态缓冲带的构建提供理论支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

滇池地处云南省昆明市主城区南部,东经 102°36'—102°48',北纬 24°40'—25°01',湖面海拔 1886m,面积约为 300km²,被誉为“高原明珠”(图 1)。同时滇池流域是昆明市社会经济和城市发展最为集中、最有活力的地区。2020 年滇池流域涉及的五华区、盘龙区、官渡区、西山、呈贡区以及晋宁区共实现地区生产总值(GDP)5161.32 亿元,占昆明市地区生产总值的 77%。在近些年发展进程中,滇池流域的城市发展与生态环境的关系上开始出现新的变化。

滇池是我国湖面面积最大的高原淡水湖泊,同时也对西南生态安全屏障具有重要的支撑作用。近年来,随着滇池流域的快速发展,各种生态环境问题凸显。《2020 年度昆明市生态环境状况公报》显示,2020 年滇池湖体综合富营养状态指数为 61,营养状态为中度富营养,滇池流域生态功能逐渐退化,这大大降低了生态系统结构的稳定性和生态系统服务功能。经过 20 年的治理,滇池流域污染负荷削减量大幅提升,城市和农业面源污染入湖量显著下降。但滇池周边人类活动强度大,湖泊水质波动较大,难以实现稳定达标。由于滇池流域雨旱两季分明,雨季时降水强度大、部分雨季合流污水加重了滇池污染。因此迫切需要科学划定滇池生态缓冲带,阻滞城镇、农业等未经处理的面源污染直接入湖,提升湖泊生态系统的自我修复和调节能力。

1.2 数据来源

本研究的 DEM 数据来源于地理空间数据云网站(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率为 30m。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),选用 2000 年、2010 年和 2020 年的土地利用栅格图像,分辨率为 30m。相关经济数据来源于 2020 年《云南统计年鉴》和《中国农产品价格调查年鉴》。

1.3 研究方法

1.3.1 单元划分

本研究根据 DEM 数据,使用 ArcGIS 的水文分析,对 DEM 数据进行填洼、流向、流量等操作,根据提取的河网划分研究单元。在环滇池 2km 范围内,共得到 13214 个研究单元,单元平均面积为 0.018km²。

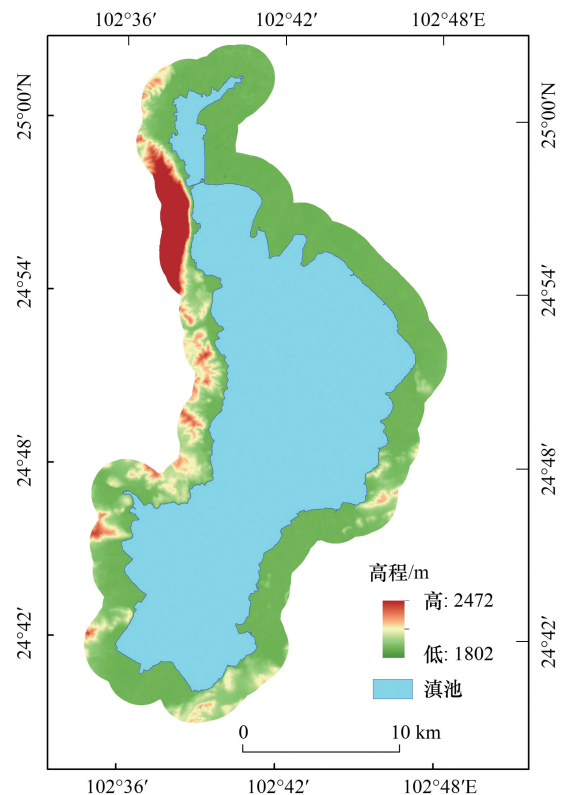


图 1 滇池区位及沿岸地形图

Fig. 1 Location of Lake Dianchi and the terrain along Lake Dianchi

1.3.2 原地产污贡献测算

湖泊生态缓冲带对污染防控和净化水环境具有重要意义。因此在识别生态缓冲带时,还需考虑非点源污染对湖泊的影响,参考王亚空研究中的湖泊缓冲带构建方法^[27],在单元划分的基础上,探究各单元对湖泊的影响程度。将研究单元中的土地利用斑块分为增强斑块和削减斑块。当该斑块的产污能力大于纳污能力,即为增强斑块,反之则为削减斑块。根据单元划分类型,量化其产污能力,计算公式如下:

$$ZQI = \sum_{i=1}^n A_i \times W_i \tag{1}$$

$$XJI = \sum_{i=1}^n A_i \times W_i \tag{2}$$

$$R_ZXI = ZQI \div XJI \tag{3}$$

式中, A_i 为第*i*类单元占总面积的比例, W_i 为第*i*类单元对应的污染权重,ZQI、XJI、R_ZXI 分别为增强斑块指数、削减斑块指数和原地产污贡献指数。当 R_ZXI>1,则表示该单元对污染物输出有正效应,且 R_ZXI 越大,其污染物输出贡献越大,其对湖泊生态环境的威胁程度越大;若 R_ZXI<1,则表示该单元对污染物输出有负效应,且 R_ZXI 越小,其削减作用越大,对湖泊生态环境的威胁程度越小。

将建设用地、耕地等土地利用类型归为增强斑块,而林地、草地、湿地、水系等土地利用类型归为削减斑块。在增强斑块上,结合已有研究成果和 2020 滇池污染负荷来源,确定了增强斑块产污权重;在削减斑块上,总结前人的研究成果^[28—36],利用层次分析法确定了削减斑块类型的产污权重(表 1)。对计算结果利用自然间断点分级法,分为 8 个级别。根据计算公式,原地产污指数小于 1,即该单元对污染物的削减作用大于增强作用,该类值划为-1 级别。级别大于 1,即该单元对污染物的增强作用大于削减作用。在计算原地产污指数时,有的单元只有增强斑块,没有削减斑块,为了方便分析,将这类单元划为 7 级别。

表 1 滇池沿岸各类型斑块权重

Table 1 Weights of various types of plaques along Lake Dianchi

斑块类型 Plaque types	土地利用类型 Land use types	权重 Weights	斑块类型 Plaque types	土地利用类型 Land use types	权重 Weights
削减斑块 Reduced plaques	林地	0.128	增强斑块 Enhanced plaques	耕地	0.366
	草地	0.079		建设用地	0.634
	湿地	0.331			
	水系	0.462			

1.3.3 距离权重确定

滇池周边局部区域土地开发强度大,生活污染、工业污染和非点源污染等直接影响了湖泊的生态环境。因此为了便于分析,在环湖 2km 内的范围内,以滇池湖岸线为初始边界,以 200m 为间隔建立覆盖环滇池 2km 的 10 个缓冲区,得到各研究单元到湖泊的距离成本。按照离湖岸线由远及近的原则,对 10 个缓冲区依次赋予级别 1 到 10,即距离权重(*D*)。距离权重越大,代表该区域对湖泊环境影响越大,反之距离权重越小,则该区域对湖泊环境影响越小。

1.3.4 相对产污贡献测算

由于各单元在研究区域中所处的位置不同,距滇池的距离也不同,因而各单元对入湖的污染负荷的贡献不同。为此采用相对产污贡献指数 I_D ,来代表各单元的入湖污染负荷贡献度,计算公式如下:

$$I_D = R_ZXI \times D \tag{4}$$

1.3.5 生态系统服务价值评估

本文结合谢高地等研究的中国生态系统服务价值当量表^[37],基于粮食价格对价值当量表进行修订。1 个标准单位生态系统服务价值当量因子为研究区域单位面积粮食生产经济价值的 1/7,通过查阅《云南统计年鉴》《中国农产品价格调查年鉴》等资料,计算出价值当量因子为 2785.31 元/hm²,最终确定滇池区域不同

土地利用类型的单位面积生态系统服务价值当量系数表(表2)。本文将土地利用数据分为耕地、林地、草地、湿地、水系、建设用地6类。基于研究区域各用地类型的生态系统服务价值系数,最终获得研究区域生态系统服务价值,公式如下:

$$ESV = \sum (VC_i \times A_i) \quad (5)$$

式中, VC_i 是第*i*类用地单位面积的生态服务价值(元/hm²); A_i 为第*i*类土地的面积(hm²)。

表2 滇池区域生态系统服务价值系数/元

Table 2 Ecosystem service value coefficients of the Lake Dianchi area

	供给服务 Supply services			调节服务 Regulation services				支持服务 Support services			文化服务 Cultural services
	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
耕地 Arable land	3036.0	724.2	-3398.1	2451.1	1281.2	362.1	3927.3	1531.9	417.8	473.5	195.0
林地 Forest land	696.3	1615.5	835.6	5319.9	15904.1	4651.5	10389.2	6378.4	501.4	5904.9	2590.3
草地 Grassland	891.3	1309.1	724.2	4623.6	12255.4	4038.7	8968.7	5654.2	417.8	5125.0	2256.1
湿地 Wetlands	1420.5	1392.7	7214.0	5292.1	10027.1	10027.1	67488.1	6434.1	501.4	21920.4	13174.5
水系 Waters	2228.2	640.6	23090.2	2144.7	6378.4	15458.5	284770.3	2590.3	195.0	7102.5	5264.2
建设用地 Built-up area	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

基于自然间断分级法对2020年研究区域的生态系统服务价值分为低($0.00 \leq ESV < 37.17$)、较低($37.17 \leq ESV < 97.90$)、中等($97.90 \leq ESV < 218.79$)、较高($218.79 \leq ESV < 467.78$)、高($467.78 \leq ESV < 894.75$)5个级别。为了便于分析,2000年和2010年的计算结果按照2020年的分级区间进行划分。在生态系统服务价值核算结果的基础上,对研究区域进行情景模拟。在构建湖泊生态缓冲带的背景下,模拟3种用地类型作为生态缓冲带,以此来明确土地利用类型的变化对生态系统服务价值的影响。3种情景根据2020年用地类型中的非生态用地(耕地、建设用地)转为生态用地(湿地、林地、草地)设定。

2 结果分析

2.1 湖泊生态缓冲带识别

结果表明,原地产污指数等级为7即没有削减斑块的流域单元面积为139.02km²,占研究区域的58.76%。该级别流域单元内主要为耕地和建设用地。湖泊缓冲带的划定需要考虑到各单元的相对产污能力,相对产污指数可以由原地产污指数和距离权重相乘得到。根据计算结果,用自然间断分级法对相对产污指数也进行分级处理,分级结果见图2。对相对产污指数分级结果进行分析研究,得到不同流域单元对湖泊的影响能力及影响类别。

依据相对产污指数大于59的研究单元的边界轮廓作为缓冲带上边界,滇池湖滨保护区界线作为缓冲带下边界的缓冲带范围识别方案如图3所示。滇池缓冲带上边界和下边界长度分别为171.50km和127.55km,平均宽度为349.49m,总面积为38.12km²。结合滇池周边的现状土地利用类型,滇池湖泊生态缓冲带主要包括山体型缓冲带、农田型缓冲带、村落型缓冲带、城镇型缓冲带和湿地型缓冲带,各类型湖泊缓冲带宽度、地形地貌、人类活动表现为不同特征(表3)。

根据划分的缓冲带类型,湿地型缓冲带占缓冲带总面积的27.05%,主要分布在滇池湖滨的各类型湿地,具有生态观光、拦截污染负荷等功能,对滇池湖滨生态环境具有重要意义,但湿地型缓冲带分布较为分散,生态斑块联系与廊道保护功能有待加强;城镇型缓冲带占缓冲带总面积的26.52%,范围内主要为城镇住宅用地和商业服务业用地,分布在草海岸段、外海东岸等区域,城镇型缓冲带内人为干扰强度较大;村落型和农田型缓冲带占缓冲带总面积的26.78%,划定范围内主要是濒临湖泊的农村宅基地和耕地,主要分布在滇池南岸和西岸等区域;山体型缓冲带与湖泊相邻,为山体支脉与湖泊相交地带和陡崖区域,主要位于西山、大湾山等区域。

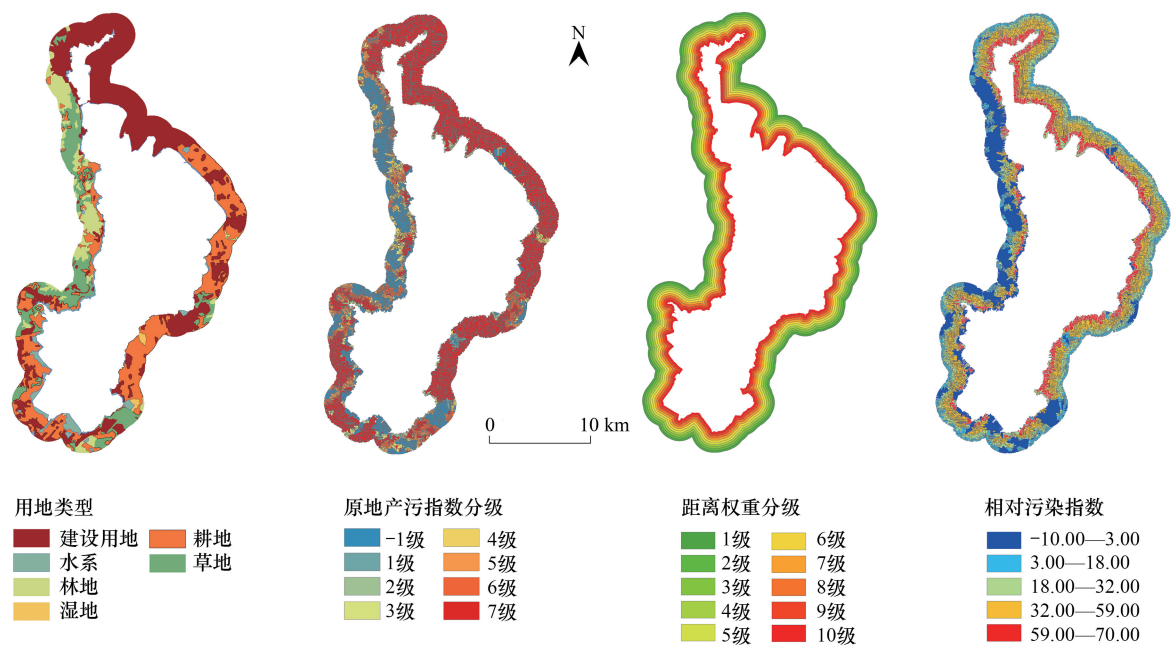


图 2 滇池生态缓冲带关键因子测算结果

Fig.2 Calculation results of key factors in the ecological buffer zone of Lake Dianchi

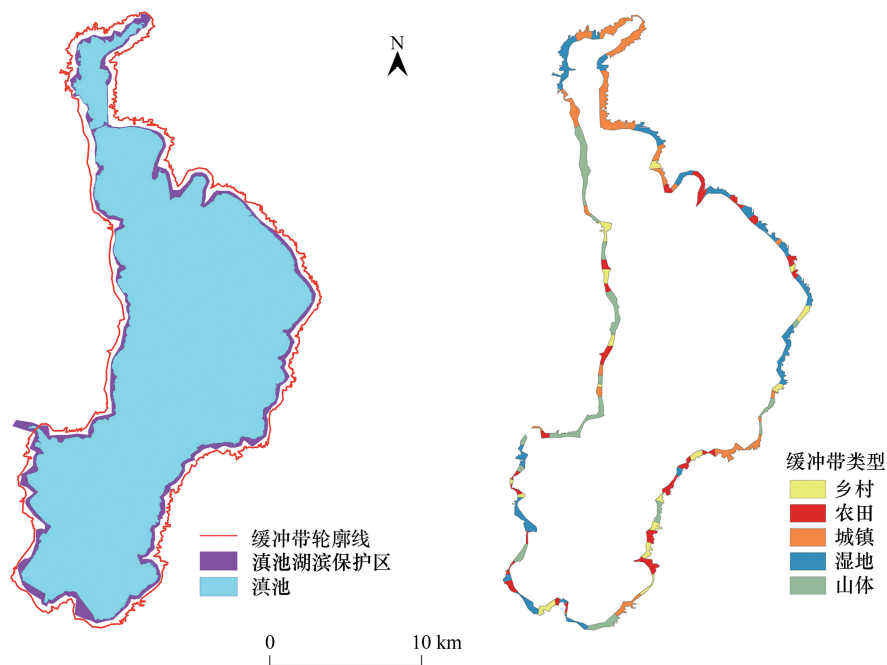


图 3 滇池生态缓冲带识别结果

Fig.3 Identification results of the ecological buffer zone in Lake Dianchi

2.2 环湖生态系统服务价值评估

从空间分布看,环滇池 2km 范围的生态系统服务价值评估结果以 500m×500m 的格网尺度进行空间表达 (图 4)。2000 年滇池的草海岸段和外海东北岸段,生态系统服务功能良好且分布具有聚集性,但城镇化进程不断加速,草海岸段和外海北岸的生态系统服务价值降低明显。滇池西岸的面山区域,例如西山风景区区域

主要为林地、草地等景观,人为干扰因素少,区域开发强度不高,生态保育较好,生态系统服务价值变化趋势也较稳定。与此相反,滇池南岸部分区域生态系统服务价值出现了提升现象,这与多年来滇池治理密不可分。湖岸湿地的整治保护和农业面源污染的治理,缓解了非生态用地带来的负面影响,是生态系统服务价值提升的重要因素。从 2000 年开始,草海片区的生态优势逐渐弱化,主要由于建设用地扩张。

表 3 滇池缓冲带类型及其特征
Table 3 Types and characteristics of buffer zones in Lake Dianchi

类型 Types	宽度 Width/m	面积 Area/km ²	主要特征 Main characteristics
山体型缓冲带 Mountain buffer zone	40—625	7.49	缓冲带与山体直接相邻,划定范围内以丘陵山区为主要特征,例如西山风景区、大湾山、梁王山等区域。
农田型缓冲带 Farmland buffer zone	50—680	6.08	在缓冲带划定范围内具有连片或分片的农田。
村落型缓冲带 Village buffer zone	80—690	4.13	有一定规模连片的乡村村落分布特征,例如海晏村、河泊村和牛恋村等村落。
城镇型缓冲带 Urban buffer zone	40—875	10.11	有城镇住宅、公共设施分布特征,多数分布在草海岸段。
湿地型缓冲带 Wetland buffer zone	20—825	10.31	以湿地为主要特征,例如捞鱼河湿地公园、斗南湿地公园、南滇池国家湿地公园等区域。

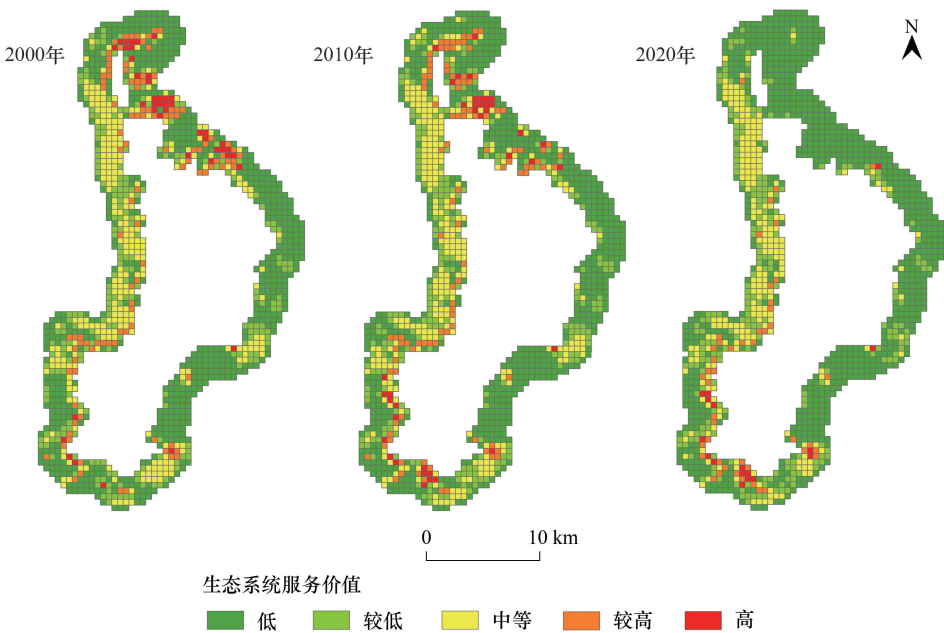


图 4 2000—2020 年环滇池 2km 区域生态系统服务价值空间分布
Fig.4 The spatial distribution of ecosystem service value in the 2km area around Lake Dianchi from 2000 to 2020

2000 年、2010 年和 2020 年的研究区域生态系统服务价值分别为 12.40 亿元、12.18 亿元和 7.78 亿元,研究区域生态系统服务价值总量显著下降。2000—2020 年研究区域的生态系统服务价值等级以低等和中等为主,占研究区总面积的 70.21%—77.66%。生态系统服务价值高和较高级别区域所占面积比例,从 2000 年的 11.56%下降到 2020 年的 4.89%。由表 4 可知,生态系统服务价值低值和较低值增长幅度最大,增加了 62km²,占变化总面积的 82.67%。较高级别和高级别区域也有一定幅度的扩大,增加了 5km²(表 4)。滇池生态缓冲带作为城镇扩张边缘和滇池之间的生态过渡带,对滇池环湖区域的生态系统服务价值提升起到重要作用。

表 4 2000—2020 年环滇池 2km 区域生态系统服务价值转移矩阵/ km^2

Table 4 The ecosystem service value transfer matrix of the 2km area around Lake Dianchi from 2000 to 2020

生态系统服务价值 Ecosystem service value		2020 年					总面积
		低	较低	中等	较高	高	
2000 年	低	149.00	5.25	1.50	0.75	1.00	157.50
	较低	15.50	39.50	2.75	0.50	0.50	58.75
	中等	10.50	8.75	48.00	1.00	0.50	68.75
	较高	10.75	2.75	3.50	9.00	0.50	26.50
	高	8.50	0.00	0.25	0.25	1.75	10.75
	总面积	194.25	56.25	56.00	11.50	4.25	322.25

2.3 环湖生态系统服务功能情景模拟

基于 2020 年土地利用类型,三种情景对生态系统服务价值的影响各有不同。三种情景下环湖 2km 范围内生态系统服务价值的各项指标变化情况如表 5 所示,空间变化差异如图 5 所示。结果显示,三种情景都对生态系统服务价值的提升有显著的作用。在环湖 2km 范围内,情景 1 湿地型的 ESV 增长了 4.58 亿元;情景 2 林地型的 ESV 增长了 1.64 亿元;情景 3 草地型的 ESV 增长了 1.36 亿元。三种情景在水文调节功能即生态系统截留、吸收和贮存降水,调节径流,调蓄洪水、降低旱涝灾害的方面有显著提升,对控制面源污染起到重要作用。三种情景在水资源供给、气体调节、净化环境、生物多样性方面的提升作用相当。情景 1 转为湿地类型,相比其他两种情景,在水文调节、生物多样性、美学景观增长的生态价值更为突出。情景 2 转为林地,在气候调节上增长更为显著。总体上,三种情景对生态系统修复都有一定的促进作用。在非生态用地都转为湿地的情景下,生态系统服务价值都得到明显的提升,部分指标值呈倍数增长,相较于另外两种情景,效果显著。

表 5 环滇池 2km 区域各情形生态系统服务价值/ 10^4 元

Table 5 Ecosystem service value in each scenario of 2km area around Lake Dianchi

	供给服务 Supply services	调节服务 Regulation services	支持服务 Support services	文化服务 Cultural services	合计 Total
现状 Actual state	5046.63	60453.88	10058.07	2272.50	77831.08
情景 1 湿地 Scenario 1 wetland type	8273.05	89668.59	19148.78	6551.15	123641.57
情景 2 林地 Scenario 2 woodland type	6024.43	71178.90	13895.92	3091.73	94190.99
情景 3 草地 Scenario 3 grassland type	5951.60	69094.15	13377.01	2982.49	91405.25

从空间分布来看,情景 1 对生态系统服务价值的提升作用在滇池的北岸和东岸最为显著。因为草海片区和滇池东岸片区主要为连片的建设用地,在构建生态缓冲带的情景下,土地模拟为生态用地,所以恢复了原先湖滨的生态功能,生态系统服务价值大幅度提升;滇池南岸的农业用地被生态用地代替,完善了生态系统结构,生态系统服务价值也得到一定幅度的提升;滇池西岸的生态保育状况良好,在构建生态缓冲带的情景下,相较于其他区域生态系统服务价值增长程度不明显。

3 讨论

3.1 环湖生态系统服务价值变化原因

通过三期滇池土地利用数据对比研究发现,从 2000—2020 年,环滇池 2km 范围内建设用地扩张了一倍,生态系统服务价值显著下降,草海片区变动最为剧烈。研究发现,滇池南部仍然存在生态系统服务价值增长的区域,且人地关系逐渐改善,这与前人研究结果相一致^[38-41]。环滇池开展的“四退三还一护”工程,初步恢复了滇池湖滨湿地的生态环境功能,南滇池国家湿地公园等的建设使得湖滨生态带有了质的变化。滇池沿岸的草海片区作为高强度城镇开发区域,同时也是生态系统服务价值低值区域,在滇池的未来发展规划中,如何统筹权衡经济效益、社会效益和生态效益,构建环草海生态缓冲带,成为相关规划中应重点考虑的问题。

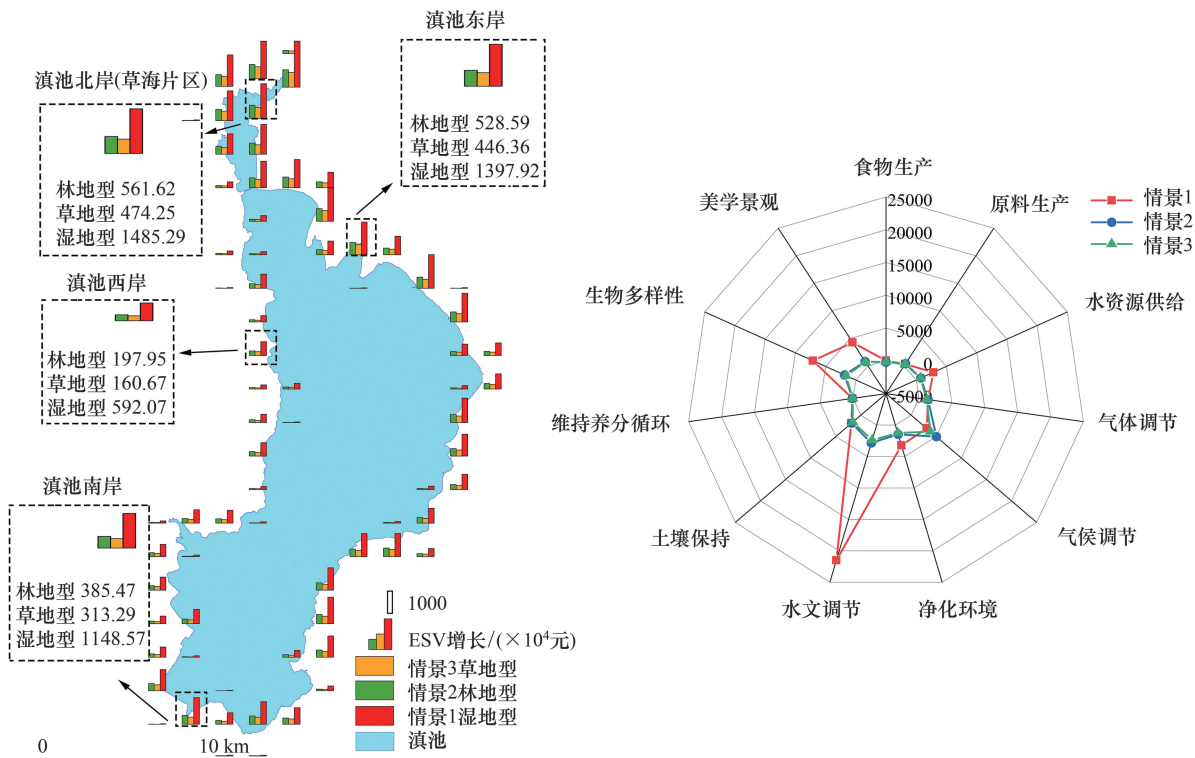


图5 三种情景对生态系统服务价值的影响

Fig.5 The impact of three scenarios on the ecosystem service value

3.2 构建环湖生态缓冲带

基于情景模拟的结果,构建湿地型缓冲带对维护滇池生态安全和生态系统完整性具有重要意义。在生态缓冲带内,对现存的自然湿地,应采取自然恢复为主,人工维护为辅的管控方式。对于现状较好,破坏不严重的自然湿地,采取严格管控措施,减少人为干扰;对于受人为因素破碎、离散的湿地区域,采用生物技术恢复生态系统的多样性。对于面山区域,应防治山体水土流失对湖泊所带来的污染^[42]。建议严格控制生态缓冲带内城镇建设用地扩展,完善排污管网等设施,减小污染入湖负荷量。对于农业用地,严格控制化肥农药施用、优化种植结构、调整种植方式,大力消减入湖面源污染。

从生态缓冲带的识别到落地,需充分考虑湖泊周边地形地貌、城镇及产业布局、人口和村庄分布、环湖湿地等现实因素,充分与国土空间规划、环湖生态规划、环湖湿地规划等规划衔接,逐步构建滇池环湖生态缓冲带。

3.3 生态功能评估对比

本研究是从生态系统服务价值视角对识别的生态缓冲带进行评估,其具有以下2个特点:其一对生态缓冲带的生态价值评估相对全面。目前国内学者针对缓冲带的生态效益研究大多从拦截污染、净化水体或维持生物多样性等角度切入,探究缓冲带的生态效益,缺少对缓冲带综合服务功能的研究^[43—44]。其二为污染型湖泊生态缓冲带构建和生态系统服务功能提升提供参考,同时也为生态修复决策制定和生态系统管理提供决策依据。

生态系统服务功能的评估旨在体现自然环境对人类福祉的贡献。对比其他研究发现,休闲娱乐服务功能的价值在生态修复区的占比较大^[45—46]。随着人们福祉需求的不断增长,生态系统服务和人类福祉交互日益紧密,未来的相关研究应在人类福祉方面选取更多指标,建立规范高效的生态系统评价方式^[47—49],并结合政策方案,设定多样化的情景,加强其实践参考意义。

4 结论

本研究使用 2020 年滇池流域的土地利用数据,采取 GIS 分析法识别了滇池生态缓冲带。采用单位面积价值当量因子法,对 2000 年、2010 年和 2020 年环滇池 2km 范围的生态系统服务价值进行评估,并基于 2020 年土地利用类型设定了三种情景,模拟了生态缓冲带对生态系统服务价值的影响。

(1)参照基于土地利用的相对产污分级结果和滇池湖滨保护区边界,确定了生态缓冲带范围,上边界和下边界总长度分别为 171.50km 和 127.55km,总面积为 38.12km²,平均宽度为 349.49m。根据滇池湖滨土地利用类型,将缓冲带类型划分为山体型缓冲带、农田型缓冲带、村落型缓冲带、城镇型缓冲带和湿地型缓冲带,其中湿地型占比最大,为 27.05%。

(2)2000 年、2010 年和 2020 年的研究区域生态系统服务价值分别为 12.40 亿元、12.18 亿元和 7.78 亿元,生态系统服务功能显著下降。研究结果显示,研究区域的生态系统服务价值等级多处于低级别和中等级别,比例在 70.21%—77.66%之间。

(3)在环滇池 2km 范围内进行情景模拟,构建了三种不同用地类型的生态缓冲带。模拟结果显示,湿地型缓冲带、林地型缓冲带和草地型缓冲带的生态系统服务价值增长了 4.58 亿元、1.64 亿元和 1.36 亿元;其中,湿地型提升最为显著,提升了 58.87%。

参考文献(References):

- [1] Quinn J M, Boothroyd I K G, Smith B J. Riparian buffers mitigate effects of pine plantation logging on New Zealand streams: 2. Invertebrate communities. *Forest Ecology and Management*, 2004, 191(1/3): 129-146.
- [2] 胡小贞, 许秋瑾, 蒋丽佳, 董思远, 金丹越. 湖泊缓冲带范围划定的初步研究——以太湖为例. *湖泊科学*, 2011, 23(5): 719-724.
- [3] 张鸿龄, 李天娇, 赵志芳, 马国峰, 陈苏, 孙丽娜. 辽河河岸植被缓冲带构建及其对固体颗粒物和氮阻控能力. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2185-2192.
- [4] Hain E F, Kennen J G, Caldwell P V, Nelson S A C, Sun G, McNulty S G. Using regional scale flow-ecology modeling to identify catchments where fish assemblages are most vulnerable to changes in water availability. *Freshwater Biology*, 2018, 63(8): 928-945.
- [5] Ghodeif K O, Arnous M O, Geriess M H. Define a protected buffer zone for Ismailia Canal, Egypt using Geographic Information Systems. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(1): 43-53.
- [6] de Sosa L L, Glanville H C, Marshall M R, Abood S A, Williams A P, Jones D L. Delineating and mapping riparian areas for ecosystem service assessment. *Ecohydrology*, 2018, 11(2): e1928.
- [7] 李春华, 叶春, 高尚超, 魏伟伟, 郑烨. 关于在长江经济带布局以水质改善为目标的流域生态缓冲体系的思考. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1206-1213.
- [8] 叶春, 李春华, 邓婷婷. 湖泊缓冲带功能、建设与管理. *环境科学研究*, 2013, 26(12): 1283-1289.
- [9] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 徐卫华, 郑华, 张琰, 肖懿. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究. *生态学报*, 2013, 33(21): 6747-6761.
- [10] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [11] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [12] 刘志涛, 王少剑, 方创琳. 粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制. *地理学报*, 2021, 76(11): 2797-2813.
- [13] 王若思, 潘洪义, 刘翊涵, 唐玉萍, 张之风, 马红菊. 基于动态当量的乐山市生态系统服务价值时空演变及驱动力研究. *生态学报*, 2022, 42(1): 76-90.
- [14] 白羽萍, 王佳斌, 刘恋, 杜昱东, 邓祥征, 陈建成. 黑河流域生态系统服务价值预测及权衡分析--以张掖市为例. *生态学报*, 2022, 42(13): 5187-5199.
- [15] 龙精华, 张卫, 付艳华, 胡振琪. 鹤岗矿区生态系统服务价值. *生态学报*, 2021, 41(5): 1728-1737.
- [16] 左玲丽, 彭文甫, 陶帅, 祝聪, 徐新良. 岷江上游土地利用与生态系统服务价值的动态变化. *生态学报*, 2021, 41(16): 6384-6397.
- [17] 汤家喜, 孙丽娜, 孙铁珩, 张鸿龄. 河岸缓冲带对氮磷的截留转化及其生态恢复研究进展. *生态环境学报*, 2012, 21(8): 1514-1520.
- [18] 闫钰, 董艳红, 汤洁, 段宇聪, 杨波, 孙杨, 俞双. 东新开河岸边植被缓冲带对雨水径流中典型污染物截留效果试验. *环境工程*, 2020, 38(9): 139-144.
- [19] Li K, Chi G Q, Wang L, Xie Y J, Wang X R, Fan Z Q. Identifying the critical riparian buffer zone with the strongest linkage between landscape characteristics and surface water quality. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 741-752.
- [20] Zhang J, Li S Y, Jiang C S. Effects of land use on water quality in a River Basin (Daning) of the Three Gorges Reservoir Area, China: Watershed versus riparian zone. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106226.

- [21] 付文凤, 姜海, 房娟娟, 管永祥, 吴田乡, 赵海燕, 吴昊. 竺山湾湖滨缓冲带生态工程综合效益评价——以江苏省宜兴市周铁镇为例. 水土保持通报, 2017, 37(2): 268-273.
- [22] 李春江. 湖泊缓冲带三种不同类型草林复合系统生态效益评价[D]. 上海: 东华大学, 2015.
- [23] Zak D, Stutter M, Jensen H S, Egemose S, Carstensen M V, Audet J, Strand J A, Feuerbach P, Hoffmann C C, Christen B, Hille S, Knudsen M, Stockan J, Watson H, Heckrath G, Kronvang B. An assessment of the multifunctionality of integrated buffer zones in northwestern Europe. *Journal of Environmental Quality*, 2019, 48(2): 362-375.
- [24] 吴一帆, 张璇, 李冲, 郝芳华, 殷国栋. 生态修复措施对流域生态系统服务功能的提升——以潮河流域为例. 生态学报, 2020, 40(15): 5168-5178.
- [25] 叶春, 李春华, 吴蕾, 杨文娟. 湖滨带生态退化及其与人类活动的相互作用. 环境科学研究, 2015, 28(3): 401-407.
- [26] 裴宏伟, 刘孟竹, 李雅丽, 张红娟, 肖雨霄, 杨国丽. 生态修复措施对于旱半干旱地区生态系统服务影响研究——以河北坝上地区为例. 水土保持研究, 2022, 29(02): 192-199+205.
- [27] 王亚空. 以非点源污染控制为目标导向的湖泊缓冲带范围规划方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- [28] 李伯根. 控制滇池生态环境的关键. 水资源保护, 2002, 18(1): 18-22, 68.
- [29] 胥勤勉, 杨达源, 董杰, 周彬. 滇池水环境治理的“调水”“活水”工程. 长江流域资源与环境, 2006, 15(1): 116-119.
- [30] 刘红, 代明利, 刘学燕, 欧阳威, 刘培斌. 人工湿地系统用于地表水水质改善的效能及特征. 环境科学, 2004, 25(4): 65-69.
- [31] 王晓东, 褚丽娟, 姜明, 王国栋, 孙嘉鸿. 挠力河流域恢复湿地与天然湿地水质对比分析. 湿地科学, 2018, 16(2): 179-184.
- [32] 宋雪燕, 马兰, 赵海茜, 土琦, 陆轶峰, 卢少勇. 滇池捞鱼河湿地公园不同功能单元水质净化效果及稳定性. 环境工程技术学报, 2019, 9(2): 167-174.
- [33] 张灿强, 张彪, 李文华, 杨艳刚, 王斌. 森林生态系统对非点源污染的控制机理与效果及其影响因素. 资源科学, 2011, 33(2): 236-241.
- [34] Hefting M M, Clement J C, Bienkowski P, Dowrick D, Guenat C, Butturini A, Topa S, Pinay G, Verhoeven J T A. The role of vegetation and litter in the nitrogen dynamics of riparian buffer zones in Europe. *Ecological Engineering*, 2005, 24(5): 465-482.
- [35] 卜晓莉, 王利民, 薛建辉. 湖滨林草复合缓冲带对泥沙和氮磷的拦截效果. 水土保持学报, 2015, 29(4): 32-36.
- [36] 汤家喜, 何苗苗, 王道涵, 曾祥峰, 李仁杰, 应博. 河岸缓冲带对地表径流及悬浮颗粒物的阻控效应. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2747-2755.
- [37] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 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. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [38] 卢丽琛, 洪亮. 云南省九大高原湖泊水体面积时空变化研究. 人民长江, 2021, 52(10): 128-134.
- [39] 李浩杰, 种丹, 范硕, 张世强, 王杰. 近三十年云南九大高原湖泊水面面积遥感变化监测. 长江流域资源与环境, 2016, 25(S1): 32-37.
- [40] 杨文军, 刘强, 袁旭, 田昆, 岳海涛. 不同恢复措施对南滇池湿地冬季水禽多样性的影响. 生态学报, 2021, 41(18): 7180-7188.
- [41] 周玲, 李云梅, 赵焕, 房晟忠, 颜翔, 吕恒. 滇池湖滨带植被时空变化及其对滇池总磷浓度的影响. 地球信息科学学报, 2020, 22(10): 1946-1958.
- [42] 谢自建, 魏伟伟, 李春华, 叶春, 王昊. 典型高山堰塞湖湖滨带和缓冲带的划定及生态修复思路——以镜泊湖为例. 环境工程技术学报, 2021, 11(6): 1147-1153.
- [43] 胡小贞, 耿荣妹, 许秋瑾, 蒋丽佳, 林娜娜. 太湖流域流经不同类型缓冲带入湖河流秋、冬季氮污染特征. 湖泊科学, 2016, 28(6): 1194-1203.
- [44] 刘毅, 任文彬, 舒潼, 谢楚芳, 蒋金辉, 杨劭. 洪湖湖滨带植被现状以及近五十年的变化分析. 长江流域资源与环境, 2015, 24(S1): 38-45.
- [45] 王璨, 钱新, 高海龙, 李慧明. 太湖地区贡湖生态修复区生态系统服务价值评估. 湿地科学, 2017, 15(2): 263-268.
- [46] 吴威, 李彩霞, 陈雪初. 基于生态系统服务的海岸带生态修复工程成效评估——以鸚鵡洲湿地为例. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2020(3): 98-108.
- [47] 叶春, 李春华, 邓婷婷. 论湖滨带的结构与生态功能. 环境科学研究, 2015, 28(2): 171-181.
- [48] 李锋, 马远. 城市生态系统修复研究进展. 生态学报, 2021, 41(23): 9144-9153.
- [49] 王晨旭, 刘焱序, 于超月, 刘小茜. 国土空间生态修复布局研究进展. 地理科学进展, 2021, 40(11): 1925-1941.