

蒋尖尖,胡文,叶春,等.近60年滇池水生态系统演替及驱动因子[J].环境工程技术学报,2023,13(2):541-551.
JIANG Jianjian, HU Wen, YE Chun, et al. Succession and driving factors of Lake Dianchi aquatic ecosystem in the past 60 years [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 541-551.

近60年滇池水生态系统演替及驱动因子

蒋尖尖^{1,2},胡文^{1*},叶春^{3*},宋迪¹,王志芸¹,李春华³,李杰¹,唐诚¹

1.云南省高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室,云南省生态环境科学研究院

2.香港都会大学科技学院

3.湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室,中国环境科学研究院

摘要 滇池流域作为长江上游和我国西南地区生态安全屏障的重要组成部分,对保障区域乃至全国生态安全具有重要作用。采用文献调研、分类梳理等方法,并结合1950—2020年滇池水质变化和富营养化演化过程,系统分析了近60年滇池水生态系统中浮游植物、浮游动物、水生植物、底栖动物、鱼类等重要组成部分的演替过程及驱动因子。结果表明:1960s以前,滇池水体清澈见底,水生生物丰富,处于草型阶段;1970s—1990s,随着滇池富营养化程度加剧,水体理化性质的改变以及水生生物耐营养物种的数量增加,湖泊生态系统由草型阶段向草藻混合型阶段转变;2000—2015年,滇池水质进一步恶化,处于GB 3838—2002《地表水环境质量标准》V类~劣V类,水生生物从多优势种向单优势种、清水种向耐污种转变,处于藻型阶段;2016年之后,滇池水质虽逐步改善,但仍面临着严重的富营养化问题。滇池水生态系统演替的驱动因子主要是自然因素、流域污染物排放超出滇池环境容量及生态系统生境片段化。

关键词 滇池;水生态系统;演替;水生生物;驱动因子

中图分类号:X524 文章编号:1674-991X(2023)02-0541-11 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20220121

Succession and driving factors of Lake Dianchi aquatic ecosystem in the past 60 years

JIANG Jianjian^{1,2}, HU Wen^{1*}, YE Chun^{3*}, SONG Di¹, WANG Zhiyun¹, LI Chunhua³, LI Jie¹, TANG Cheng¹

1.Yunnan Key Laboratory of Pollution Process and Management of Plateau Lake-Watershed, Yunnan Research Academy of Eco-environmental Sciences

2.School of Science and Technology, Hong Kong Metropolitan University

3.National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract As an essential part of the ecological security barrier in the upper reaches of the Yangtze River and southwest China, Lake Dianchi plays a critical role in safeguarding national and regional environmental security. The succession process and driving factors of phytoplankton, zooplankton, macrophytes, zoobenthos, fish and other essential compositions in Lake Dianchi aquatic ecosystem were systematically analyzed using literature research and classification, combined with the water quality change and eutrophication evolution process of Lake Dianchi in 1950-2020. The results showed that before the 1960s, Lake Dianchi maintained its natural form and belonged to the stage of the macrophyte type lake. Between the 1970s and 1990s, the situation of eutrophication, the physical and chemical properties of the water changed rapidly, and nutrient-tolerant species increased. It indicated that the lake regime shifted from a macrophyte type lake to a macrophyte-algal type lake. From 2000 to 2015, the water environment of Lake Dianchi seriously deteriorated. The water quality was between “Inferior” and “Class V” of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002), and the water use function was basically lost, indicating that it belonged to the stage of an algal lake. Since 2016, although the water quality of Lake Dianchi had

收稿日期:2022-02-09

基金项目:云南省重大科技专项(202102AE090030-003)

作者简介:蒋尖尖(1993—),女,硕士研究生,主要从事湖泊水生态研究,jiangjianjian0927@163.com

*通信作者:1.胡文(1993—),男,工程师,主要从事湖泊水生态研究,qingnianxiegang@163.com

2.叶春(1970—),男,研究员,主要从事湖泊富营养化治理和生态恢复理论与技术研究,yechun@craes.org.cn

gradually improved, the eutrophication had remained at a high level. The driving factors of the aquatic ecosystem succession of Lake Dianchi were natural factors, pollutant discharge exceeding Lake Dianchi's environmental capacity, and ecosystem habitat fragmentation. The results could provide important reference values and theoretical support for decision-makers and stakeholders in managing similar shallow lake-water ecosystems.

Key words Lake Dianchi; aquatic ecosystem; succession; aquatic organism; driving factors

滇池是云南省九大高原湖泊中水面面积最大的淡水湖泊,湖体北部的海埂将湖体分为草海(面积为10.8 km²)和外海(面积为298.2 km²)。滇池多年平均库容为15.6亿m³,多年平均入湖径流量为9.7亿m³,多年平均湖面蒸发量达4.4亿m³,湖泊补给系数(9.6)远小于太湖(15.8)和巢湖(12),换水周期(981.3 d)却远高于太湖(310.5 d)和巢湖(210.4 d)^[1]。滇池是昆明城市备用饮用水源地,具备防洪、调蓄、灌溉、景观、生态和气候调节等多种功能^[2-3]。自1970s以来,滇池水生态环境受诸多因素影响,水质从1950s—1960s的Ⅱ类下降至1989—2015年的Ⅳ类~劣Ⅴ类,水生态系统从草型生态系统退化为藻型生态系统。《水污染防治行动计划》实施以来,云南九湖中GB 3838—2002《地表水环境质量标准》劣Ⅴ类水体从2015年的4个减少到2020年的1个,治理成效显著。其中,滇池水质得到改善,尤其是滇池草海水水质连续2年稳定在Ⅳ类,达到近30年来最优水平^[4]。虽然滇池目前已消除了劣Ⅴ类水质,但对于这样一个库容不大、入湖径流量较小的高原湖泊而言,其水生态系统的严重退化成为制约云南省生态文明建设重大战略的主要瓶颈,影响湖泊水生态系统功能和流域内生产生活用水安全,并制约昆明市的可持续发展^[5]。笔者采用文献调研、分类梳理方法,在回溯滇池水生态系统历史演替的基础上,分析了滇池水生态系统退化原因,以期为未来滇池水生态系统综合管理体系构建提供支撑。

1 滇池水生态系统演替分析

1.1 浮游植物群落演替

近60年来滇池浮游植物群落演替及群落结构组成变化分别见表1、图1。1950s—1960s,滇池水体存在一些对水质要求高的浮游植物种类,如轮藻、锥囊藻、基枝藻、刚毛藻等,优势种以单角盘星藻、粗壮双菱藻、鼓藻目等为主。其中,1956—1963年滇池绿藻门种类数占比最大(53.40%),硅藻门次之(19.35%),蓝藻门排第三(13.98%),除隐藻门未见报道外,其余门类占比均在7%以下。1970s—1990s,滇池浮游植物群落结构组成发生显著变化,整体呈现出从多优势种到单优势种、从无毒种向有毒种的

变化^[6];优势类群也从硅藻类群演替成蓝藻-绿藻类群,微囊藻成为极为突出的单优势属^[6];浮游植物丰度呈现上升趋势,由1950s的 0.649×10^4 ~ 8.413×10^4 个/L明显增长到1990s的 1.97 ~ 7.45×10^8 个/L,总体上升了4个数量级。同时,以球囊藻、飞燕角甲藻、二角盘星藻等为代表的寡污水性指示种数量占比明显下降,由48%降至28%,而以水华束丝藻、有尾扁裸藻、盘星藻等为代表的β-中污水性和以两栖菱形藻、盘藻、小球藻等为代表的α-中污水性的指示种数量占比总体呈上升趋势,分别由36%上升至44%和16%上升至26%^[6]。此外,相较1956—1963年,1982—1983年滇池浮游植物种类数占比发生较大变化,绿藻门、裸藻门、黄藻门、金藻门种类数占比均呈下降趋势;蓝藻门、硅藻门、甲藻门、隐藻门则呈显著增长趋势。2000s初期,滇池浮游植物种类数占比再次发生突变,此时黄藻门和金藻门占比已为0%,优势类群发展成以蓝藻占绝对优势的蓝藻-绿藻类群,盘星藻属基本退出优势地位,被束丝藻属、微囊藻属、栅藻属及卵囊藻属等取代^[7]。蓝藻门中,微囊藻属依然是极为突出的单优势属^[8],且种类丰富,而束丝藻属优势已不太明显;绿藻门中,栅藻仍保持很高的优势;硅藻门中,直链藻属和小环藻属的优势地位保持不变^[6];隐藻门则普遍存在。相较2001—2002年,2015—2016年滇池浮游植物中绿藻门、裸藻门、隐藻门、甲藻门种类数显著上升,而其余门类均呈下降趋势。2019年之后,在局部水域发现对水质要求高的锥囊藻、脆杆藻、星杆藻及飞燕角甲藻等浮游植物^[9],表明滇池水环境得到一定的恢复。

1.2 浮游动物群落演替

近60年来滇池浮游动物群落演替及群落结构组成变化分别见表2、图2。1950s滇池浮游动物群落结构组成以原生动物为主,其平均丰度为2 980~3 185个/L^[14]。1982—1983年浮游动物丰度较1950s增加了1个数量级,达到19 302个/L,此时原生动物种类数占47.69%,轮虫类占32.30%,其余种类占比均在10%以下,无节幼体仅占4.61%,且物种呈小型化趋势。该阶段草海浮游动物优势种是小口钟虫、萼花臂尾轮虫、近亲裸腹溞和广布中剑水蚤;外海优势种是螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫、浮

表1 1950—2020年滇池浮游植物群落演替
Table 1 Phytoplankton community succession of Lake Dianchi in 1950-2020

年份	门属种数量	丰度/(10 ⁴ 个/L)	优势种	指示种数/种			
				寡污水性	β-中污水性	α-中污水性	多污水性
1950s—1960s ^[7]	186种	0.649~8.413	单角盘星藻、鼓藻目、粗壮双菱藻、轮藻等	12	9	4	0
1956—1963 ^[10]	7门100属186种	8.95	草海为鼓藻、绿球藻科、水网藻科、空星藻科等; 外海为基枝藻、刚毛藻、游丝藻、针杆藻、菱形小环藻、粗壮双菱藻	50	57	28	4
1982—1983 ^[11]	8门81属205种		草海为颗粒直链藻; 外海为单角盘星藻、飞燕角甲藻、湖生卵囊藻、湖沼圆筛藻、美丽隐球藻、转板藻	37	52	34	5
1989 ^[12]		草海: 1 239.3 外海: 2 381.9	菱形小环藻、隐头舟形藻蓝色变种、近缘桥弯藻、高山桥弯藻、箱形桥弯藻、箱形桥弯藻驼背变种、新月形桥弯藻、缠结异极藻二叉变种、热带异极藻、单角盘星藻和短角角甲藻	19	30	18	1
1997—1998 ^[6]	5门64种	19 700~74 500	微囊藻、水华束丝藻、颤藻、鱼腥藻、铜绿微囊藻等				
2006—2007 ^[8]	8门89属185种	外海: 7 750	微囊藻、绿藻	17	30	20	6
2012—2013 ^[6]	8门66属157种	18 450	微囊藻属、栅藻属、十字藻属	28	49	25	5
2015—2016 ^[13]	6门49属84种	(1.65±3.57)×10 ⁴	蓝藻、隐球藻、微囊藻、束丝藻、栅藻、直链藻				
2019—2020 ^[9]	8门68属		惠氏微囊藻、罗氏微囊藻、铜绿微囊藻				

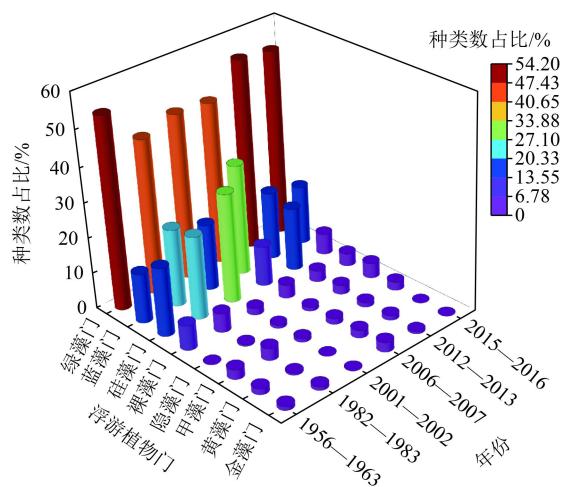


图1 1956—2016年滇池浮游植物群落结构组成变化

Fig.1 Change of phytoplankton community structure composition of Lake Dianchi in 1956-2016

游累枝虫和长额象鼻溞。该阶段滇池常见的12种轮虫类生物中有5种是富营养化湖泊典型指示种^[5]。此外,由于该阶段引进鱼苗鱼种及其他水产资源生物,带进新的浮游动物种类,改变了原有浮游动物区系组成状况^[15],不同类别浮游动物种类数差异明显。1994年滇池浮游动物除桡足类种类数占比上升外,其余种类数占比均呈下降趋势。优势属演替为以秀体溞属、聚花轮虫属、累枝虫属等为主,而1980s常见的小口钟虫、萼花臂尾轮虫、裸腹溞等优势属已未见报道。 α -中污水性指示种广布中剑水蚤、角突臂尾轮虫、螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫、长额象鼻溞仍然存在^[16]。浮游动物物种数减少及污染指示物种的存在,反映了水质受到污染。2000s初期浮游动物丰度较1990s降低了1个数量级,为1 797个/L,优势属演替为以钟虫属、溞属等为主,而

表2 1957—2020年滇池浮游动物群落演替

Table 2 Zooplankton community succession of Lake Dianchi in 1957-2020

年份	科属种数量	丰度/(个/L)	优势种
1957 ^[14]		2 980~3 185	原生动物
1982—1983 ^[16]	130种	19 302	草海为小口钟虫、王氏似铃壳虫、粤花臂尾轮虫、裸腹溞、广布中剑水蚤和右突新镖水蚤; 外海为浮游累枝虫、脾脱虫、螺形龟甲轮虫、针簇多肢轮虫、长额象鼻溞、透明溞、广布中剑水蚤和右突新镖水蚤
1994 ^[17]	37科52属	31 038	累枝虫属、单核太阳虫属、柿毛虫属、三肢轮虫属、聚花轮虫属、龟甲轮虫属、晶囊轮虫属、象鼻、溞属、秀体溞属、低额溞属、盘肠溞属、晶莹仙达溞、真剑、水蚤属、温剑水蚤属、中镖水蚤属和荡镖水蚤属
2009—2010 ^[18]	34科54属78种	543~3 658, 平均值为1 797	钟虫属、太阳虫属、龟甲、臂尾、单趾、多肢属、溞属、象鼻溞、盘肠溞属、桡足类幼体
2013 ^[19]	31种	春季为1 130; 夏季为1 932	钟虫、螺形龟甲轮虫、英勇剑水蚤
2019—2020 ^[9]	40属40种		锥虫、水蚤、独眼水蚤、萼花臂尾轮虫

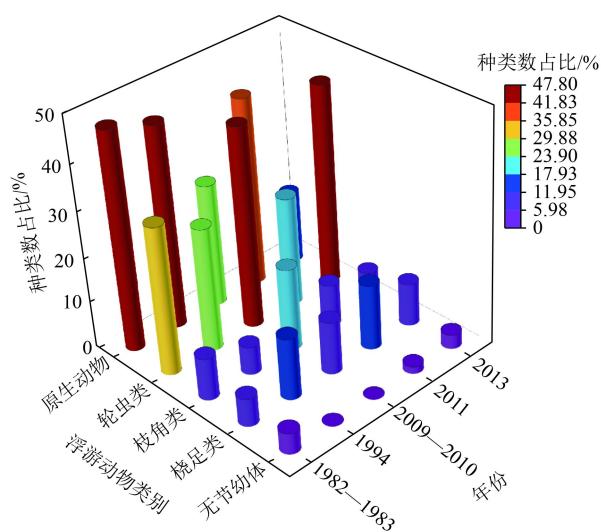


图 2 1982—2013 年滇池浮游动物群落结构组成变化

Fig.2 Change of zooplankton community structure composition of Lake Dianchi in 1982-2013

过去占优势的秀体溞属、聚花轮虫属、柿毛虫属等已基本消失。相较 1994 年, 2013 年滇池浮游动物中轮虫类的种类数增长了 62.52%, 无节幼体从 0% 增长到 3.12%, 其余种类则均呈下降趋势。

1.3 水生植物群落演替

近 60 年来滇池水生植物群落演替及群落结构组成变化分别见图 3 表 3。1960s 以前滇池保持了湖泊自然形态, 水生植物覆盖度为 90%, 共有 14 个植物群落, 以海菜花和竹叶眼子菜为优势种^[5]。期间, 滇池水生植物种类以沉水植物为主 (17.27%)。到 1970s 滇池水生植物覆盖度下降至 20%, 海菜花在滇池的种群数量开始迅速下降, 至 1980 年李恒等对滇池进行全湖水生植物调查时, 仅 3 次见到海菜花。此后在延续 7 年的逐年调查中, 均未在滇池发

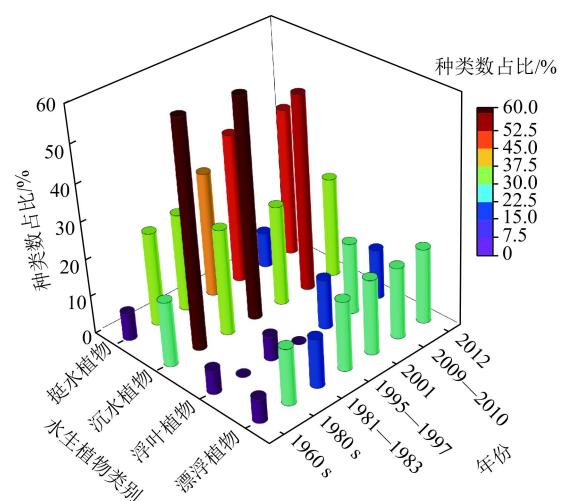


图 3 1960s—2012 年滇池水生植物群落结构组成变化

Fig.3 Change of macrophytes community structure composition of Lake Dianchi in 1960-2012

现过海菜花^[20]。1980s 滇池水生植物群落演替加快, 覆盖度仅为 12.6%, 其中沉水植物、挺水植物和漂浮植物种类数占比较 1960s 显著升高, 而浮叶植物并未被发现。此时滇池水生植物共减少了 8 个群落, 以芦苇、菰、龙须眼子菜及篦齿眼子菜等为优势物种^[5], 局部水域土著物种已消失, 在河口位置出现篦齿眼子菜、穗状狐尾藻、凤眼莲等耐污性较强的种类。1990s 以后, 滇池水生植物消亡严重, 尤其是在湖体北部, 而湖体东部、西部、南部相对较好^[5]。2000 年以后, 滇池水生植物覆盖度仅 1.4% 左右^[21], 其中沉水植物仅有篦齿眼子菜、穗状狐尾藻 2 个群落分布, 且 2012 年沉水植物种类数较 1995—1997 年下降了 54.49%。2020 年前后滇池水生植物与浮游植物的竞争仍处于劣势, 水生植物的种类数、丰度、覆盖度与 1950s 相比已大幅度降低。

表 3 1950—2020 年滇池水生植物群落演替

Table 3 Macrophyte community succession of Lake Dianchi in 1950-2020

年份	科属种数量	覆盖度/%	分布区域	优势种
1950s—1960s ^[20]	28科45种	90	全湖	海菜花(1960s以前)、竹叶眼子菜、苦草、菹草、穗状狐尾藻、篦齿眼子菜
1970s ^[20]	22科32种	20	部分水域	
1980s ^[22]	12科13属15种	12.6	全湖	篦齿眼子菜、龙须眼子菜、穗状狐尾藻、菹草、凤眼莲、菰
1986 ^[23]	20科33属46种	13	南部水域	穗状狐尾藻、凤眼莲
1990 ^[24]	沉水植物9种	100	晖湾	穗状狐尾藻、篦齿眼子菜
1995—1997 ^[25]	12科18属22种	草海>60; 外海为1	全湖	凤眼莲、喜旱莲子草、龙须眼子菜、穗状狐尾藻
2001 ^[26]	16科27种	1.4	南部水域	篦齿眼子菜
2016 ^[27]	沉水植物9种	10	近岸3 m以内水域	篦齿眼子菜、轮叶黑藻、穗状狐尾藻、竹叶眼子菜、微齿眼子菜
2019—2020 ^[9]	111科248属303种		全湖	篦齿眼子菜、轮叶黑藻、穗状狐尾藻、竹叶眼子菜等

1.4 底栖动物群落演替

近 60 年来滇池底栖动物群落演替及群落结构

组成变化分别见表 4、图 4。1950s—1960s 滇池底栖动物以软体动物门的腹足类和双壳类为绝对优势

表4 1950—2014年滇池底栖动物群落演替
Table 4 Zoobenthos community succession of Lake Dianchi in 1950-2014

年份	科属种数量	丰度/(个/L)	优势种
1950—1960s ^[28]	螺蛳属6种、其他螺类10种		腹足类和双壳类软体动物、方格短沟蜷、云南萝卜螺
1980s ^[28]	57种		尾鳃蚓、水丝蚓、羽摇蚊幼虫
1992—1995 ^[28]			尾鳃蚓、前突摇蚊幼虫、羽摇蚊幼虫
2000 ^[29]	15科40种	11 089.78	苏氏尾鳃蚓、羽摇蚊幼虫
2000—2001 ^[30]	27科68种	7 198.11	摇蚊幼虫、水蚯蚓
2001—2002 ^[31]	5科9属13种	5 010 121	摇蚊幼虫、水蚯蚓
2006—2010 ^[28]			羽摇蚊幼虫、尾鳃蚓、水丝蚓、颤蚓
2008—2009 ^[32]	7科8属	16~21 296	水丝蚓属
2009—2010 ^[33]	9科26属	696	甫水丝蚓、正颤蚓、羽摇蚊
2012—2013 ^[34]	13科15属	0~18 752	尾鳃蚓属
2013—2014 ^[35]	11种	145	羽摇蚊、霍普水丝蚓、细长摇蚊

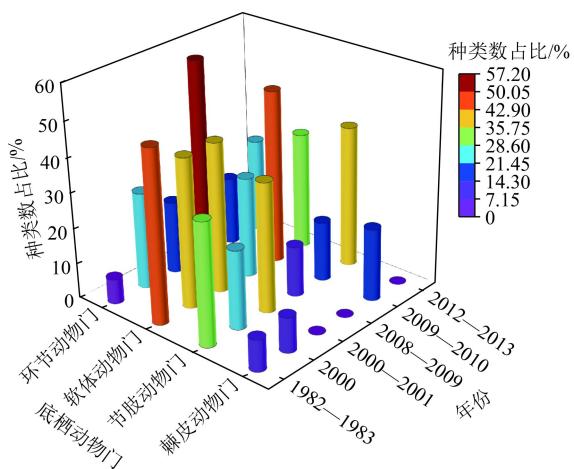


图4 1982—2013年底栖动物群落结构组成变化

Fig.4 Change of zoobenthos community structure composition of Lake Dianchi in 1982-2013

种^[28]，其中腹足纲类的格短沟蜷群体数量占比较大，而椎实螺科的云南萝卜螺也普遍分布于全湖。此时，滇池中螺蛳属有6种，其他螺类有10种^[29]。1970s末，曾遍布湖体的云南萝卜螺仅在深水区偶见，仅发现螺蛳属2种，格短沟蜷已难见踪迹^[30]。1980s滇池以耐污的尾鳃蚓、水丝蚓和羽摇蚊幼虫等为优势种，种群结构趋向单一化。1982—1983年，滇池底栖动物中软体动物门种类数占比最大(49.11%)，节肢动物门次之(34.82%)，环节动物门(7.14%)和棘皮动物门(8.93%)最小。1990s随着滇池富营养化的加重，滇池底栖动物群落结构发生了很大的变化，1992—1995年主要以前突摇蚊幼虫、羽摇蚊幼虫等耐污种为主。2000—2002年，滇池底栖动物中苏氏尾鳃蚓、羽摇蚊幼虫、克拉泊水丝蚓、水蚯蚓等不仅分布广泛而且种群数量大，构成湖内的

优势种群，但较1980s末种类数明显减少。2006—2010年底栖动物群落结构发生转变，优势种以羽摇蚊、霍普水丝蚓及细长摇蚊等为主，且相较1982—1983年，2009—2010年滇池节肢动物门种类数占比呈下降趋势，环节动物门和棘皮动物门则显著增加，软体动物门变化较小。此时滇池底栖动物已出现优势类群单一、物种多样性减少的现象。自“十一五”以来，随着地方政府对湖滨湿地的修复，2019年之后已在滇池局部区域出现对水质要求较高的螺、蚌等软体动物^[9]。

1.5 鱼类演替

1950—2020年滇池鱼类种类组成演替见表5。1950s之前滇池鱼类以云南鲴、麓鲤、鲫、草、银白鱼、多鳞白鱼为优势种^[36]。1950s—1980s渔业管理部门多次从长江或其他水系中人工引入鱼苗^[37]，引入的鱼类严重侵占土著鱼类生境，导致敏感鱼类云南光唇鱼几乎灭绝，鱼类群落结构从土著鱼类演替为以银鱼为优势种。1990s以后，滇池进入富营养化阶段，蓝藻水华暴发，水体透明度(SD)下降，水生植物大量死亡，由于天然繁殖环境受限制，鱼类种类数减少至25种。到2005年，滇池土著鱼类自然增殖受到严重影响，仅剩下滇池金线鲃、云南鲴、银白鱼、乌鳢4种，许多土著鱼类不复存在。2020年在滇池共采集到鱼类23种，较1958年下降了55.77%，土著鱼类下降了73.91%。其中土著鱼类包括云南光唇鱼、泥鳅、银白鱼、滇池金线鲃、滇池高背鲫鱼、黄鳝6种，外来鱼类包括鲢、鳙、太湖银鱼、间下鱥等17种，还有部分滇池特有鱼类，如中鲤、银白鱼、中臀拟鲿、多鳞白鱼、云南鲴、滇池金线鲃、昆明鮈、昆明高原鳅等，而中鲤、多鳞白鱼、云南鲴、昆明

表 5 1950—2020 年滇池鱼类种类组成演替

Table 5 Change of fish species composition of Lake Dianchi in 1950-2020

年份	科属种数量
1950s以前 ^[14]	18种
1957 ^[39]	7科18属23种(特有种12种)
1958 ^[40]	12科40属52种(人工引入29种,土著鱼类23种)
1970s ^[41]	30种(土著鱼类20种)
1981—1983 ^[38]	30种(土著鱼类7种)
1994 ^[42]	25种
2005 ^[41]	4种(土著鱼类)
2019—2020 ^[38]	14科22属23种(土著鱼类6种,外来鱼类17种)

鮰、昆明高原鳅等特有鱼类已经多年未见^[38]。

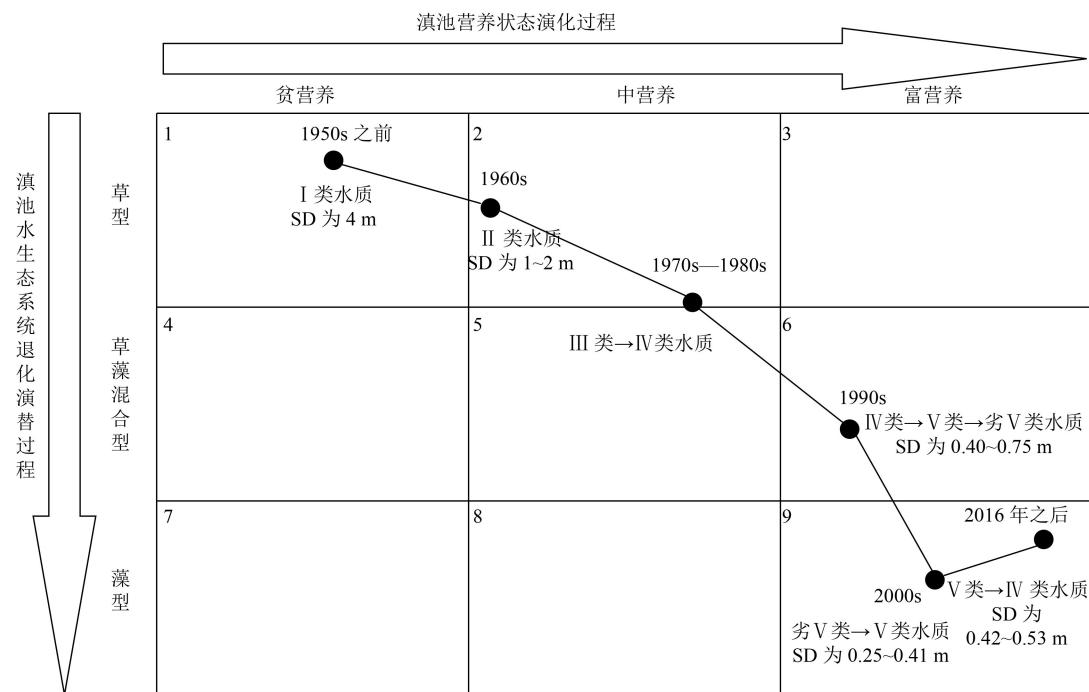
2 滇池水生态系统演替特征及驱动因子

2.1 滇池水生态系统演替特征

滇池水生态系统演替如图 5 所示。1960s 以前滇池保持了湖泊自然形态,水体清澈见底,水体透明度(SD)可达 4 m^[43],此时水体营养盐浓度较低,水质为 I 类~II 类,营养水平为贫营养^[44],水生态系统为草型生态系统,水生生物种类较多,且以对水质要求较高的水生生物为优势类群。

1970s—1990s 是滇池水生态系统演替的重要阶

段,该阶段滇池水生态系统变化受流域内人口、社会经济快速发展、流域水资源供需矛盾日益突出及外源污染长期得不到有效治理等因素影响。1970s 滇池草海、外海水质均为 III 类,1980s 初期水体逐渐受到污染,1990s 水质迅速恶化。期间,水质从 III 类下降到劣 V 类,外海从 1980s 的富营养化发展到 1990s 的严重富营养化,草海则异常富营养化。不到 10 年的时间,滇池营养水平从中营养上升到富营养,水生态系统则从 1960s 的草型逐步退化成草藻混合型,水生态健康受到严重损害^[44]。到 1990s 末,蓝藻水华暴发面积达 20 km²^[45],草海水体表层叶绿素 a 浓度为 2 600 mg/m³,外海高达 5 000 mg/m³^[46],且浮游植物呈小型化趋势;水生植物种类与分布面积开始减少,且群落结构发生了明显演替,海菜花和轮藻群落先后消失,菖蒲、水葱群落也因围垦及修筑防浪堤相继消失,随后苦草、竹叶眼子菜群落等也逐步消失,凤眼莲群落逐渐成为优势种;浮游动物优势属演替为以秀体溞属、聚花轮虫属、累枝虫属等为主,而 1980s 常见的小口钟虫、萼花臂尾轮虫、裸腹溞等优势属已消失;底栖动物从对水质要求较高的腹足类、双壳类演替为耐污型物种羽摇蚊幼虫;土著鱼类则几乎消失不见。1996 年,国务院召开第四次全国环境保护会议,发布《关于环境保护若干问题的决定》,全面开展滇池流域水污染工程治理,重点提升流域水污染基础处理能力^[47],使点源污染得到了一定的



注: 1 代表未受到人类影响状态; 2~8 代表逐渐受到人类威胁的状态; 9 代表遭到人类最为强烈干扰程度湖泊状态。

图 5 滇池水生态系统演替过程

Fig.5 Succession process of aquatic ecosystem in Lake Dianchi

控制。

2000s—2015年滇池以治理和修复为重点。2003年在昆明市官渡、西山、呈贡、晋宁4个区(县)开展了湖滨生态湿地建设工程,到2005年滇池湖滨生态恢复和建设面积为3.3 km²,建成3 km²的草海生态示范区^[47]。2007年在国家水体污染控制与治理科技重大专项的支持下,滇池治理的科学性和系统性不断加强,工业点源污染得到了有效控制,入湖河流、内源污染治理受重视程度不断提升。实施了环湖截污和交通建设、外流域调水及节水、入湖河道整治、农业农村面源治理、生态修复与建设、生态清淤“六大工程”^[48]。其中,为解决滇池流域水资源短缺、换水周期长带来的环境问题,分别于2007年和2012年启动了掌鸠河(年调水2.5亿m³)和清水海(年调水6000万m³)引水供水工程,这2项工程减轻了滇池的供水负担,一定程度上缓解了水资源短缺问题^[47]。尤其是2013年实施了牛栏江—滇池补水工程(年补水约6亿m³),该外流域调水及节水治理措施,使得外海水环境容量增加,水质向好且改善速度加快^[48]。

经过20多年的不懈努力,滇池保护治理工作取得了阶段性成效,2016年滇池水质由持续了20多年的劣V类改善为全湖V类。2017年在牛栏江—滇池补水工程的基础上开展了“滇中引水工程”,完成湖滨退塘32 km²,退房233万m²,退人3.2万人,拆除防浪堤90 km,建成湖滨生态湿地41.93 km²^[4]。2018年滇池水质持续好转为IV类,成为近30年来的最好水质。2019年至今,滇池全湖水质稳中向好,持续保持在IV类,蓝藻水华发生规模和频次不断下降;大型水生植物物种及分布相对稳定,喜清水物种有所增加;全湖底栖动物数量和多样性仍然不足,但近年来随着湖滨湿地的修复,在局部区域出现对水环境要求较高的螺、蚌等软体动物^[9];滇池特有种—滇池金线鲃的濒危状况得到缓解;湖内营养状态由重度富营养转变为中度富营养,但富营养化仍维持

在较高水平波动。此外,流域森林覆盖率也从2007年的13.1%提升至53.5%^[49],流域生态环境明显改善,湖滨生物多样性显著提升^[9]。

2.2 水生态系统演替驱动因子

滇池水生态系统演替主要驱动力因子除与自然因素(流域水资源匮乏、湖泊补给系数低、换水周期长、气候雨热同季、干湿分明及水生态系统脆弱)有关外,更受到人类活动因素(污染物排放、围湖造田及修建防浪堤)的直接影响。

(1)流域水生态系统脆弱化

滇池是一个半封闭宽浅型湖泊,没有大江大河补给,水源主要靠降水补给。流域多年平均入湖径流量为9.03亿m³,多年平均蒸发量为5.78亿m³,蒸发消耗了流域很大部分的水资源量,使流域成为典型的贫水区^[50]。此外,滇池流域气候属于典型的高原季风气候,多年平均降水量为980 mm^[4],雨季集中在6—10月,11月—次年5月为旱季,雨季降水量占年降水总量的80%~90%。

相较于长江流域其他湖泊生态系统(表6),滇池生态系统的系统平均转移效率仅为4.9%,远低于生态金字塔能够转化效率的最优“1/10定律”。系统连接指数和系统杂食指数是反映生态系统内部联系复杂程度的2个指数,成熟生态系统这2个指数都接近于1,但滇池仅为0.194和0.061,表明滇池生态系统的食物网结构脆弱,内部联系复杂程度低且成熟度较低;相反,滇池总初级生产力与总生物量比却较高,说明滇池生态系统结构很不合理,能量传递效率降低,大量初级生产力未进入食物网并得到有效利用。此外,与其他湖泊相比较,滇池食物网Finn循环指数高达39.98%,表明滇池可能受到外部环境变化的巨大压力,使其湖泊生态系统脆弱化。

(2)流域污染物排放量超出湖泊环境容量

滇池位于昆明主城区下游,是流域污水的唯一受纳水体。近几十年来,滇池流域城市化进程逐步加快,人类活动产生和排放的污染负荷日益增大(表7)。

表6 长江流域湖泊水生态系统特征比较

Table 6 Comparison of the aquatic ecosystem characteristics among lakes in the Yangtze River basin

湖泊	系统平均转移效率/%	总初级生产量/总呼吸量	总初级生产量/总生物量	系统连接指数	系统杂食指数	Finn循环指数/%	Finn平均路径长度
太湖(2008—2009年) ^[51]	4.1	4.215		0.188	0.041	18.30	3.324
洪泽湖(2010年) ^[52]	6.43	1.138	6.992	0.195	0.089	6.77	2.849
滇池(2009—2010年) ^[53]	4.9	1.665	61.812	0.194	0.061	39.98	5.536
巢湖(2007—2010年) ^[54]	6.9	13.530	137.920	0.200	0.092	3.32	2.270
隔湖(2010年) ^[55]	6.4	2.189	3.509	0.219	0.189	7.99	2.841

表 7 1988—2020 年滇池流域污染负荷产生量和入湖量变化趋势

Table 7 The pollution load generation and discharge from Lake Dianchi watershed in 1988-2020

年份	污染源类型	产生量/(t/a)				入湖量/(t/a)							
		COD _{Cr}	NH ₃ -N	TN	TP	COD _{Cr}	NH ₃ -N	TN	TP				
1988 ^[57]													
1993 ^[57]													
2000 ^[57]													
	点源	55 398		11 215	1 005								
2005 ^[58]	面源	22 475		3 060	482								
	合计	77 873		14 275	1 487	38 031		9 810	851				
	点源									15 427		5 267	353
2014 ^[59]	面源									20 469		1 602	258
	合计	101 578		16 448	1 760	35 896		6 869	611				
	点源	117 597	12 724	18 228	1 660	14 687	4 333	5 199	340				
2015 ^[60]	面源	56 295	2 554	5 467	1 141	23 947	730	1 884	255				
	水土流失	1 041	142	238	19	1 041	142	238	19				
	合计	174 933	15 420	23 933	2 820	39 676	5 205	7 321	614				
2017 ^[61]		181 500	16 200	26 900	3 300	30 100	3 500	4 700	450				
	点源									9 005	589	2 623	192
2019 ^[49]	面源									16 337	619	1 058	187
	水土流失									0	0	24	11
	合计									25 343	1 208	3 704	391
	点源									9 782	610	3 092	204
2020 ^[62]	面源									14 241	316	700	86
	水土流失									0	0	21	10
	合计	184 832	14 611	26 019	2 634	24 023	926	3 813	300				

随着城市污水处理规模的不断增加, 污染负荷削减能力也得到大幅度提升, 污水处理规模从 1991 年(首座污水处理厂)的 5.5×10^4 t/d 增加到 2005 年的 5.55×10^5 t/d, 又增加到 2015 年的 1.36×10^6 t/d^[56], 再增加到 2020 年底的 2.16×10^6 t/d。但截至 2019 年, 滇池流域主要污染物的入湖总量仍超过水环境容量的要求(“十三五”规划目标的 COD_{Cr}、TN 和 TP 水环境容量分别为 39 400、4 660 和 443 t/a)^[56]。这些过量的污染物持续输入滇池, 对滇池这样一个库容不大、径流量较小、自净能力较差的高原湖泊而言, 在引起水质下降和水体富营养化的同时, 驱动水生态系统的功能退化及水生生物群落演替。

(3) 水生态系统生境片段化

湖滨带作为滇池的生态保护屏障, 不仅是水陆物质循环和能量流动的区域, 而且也是生物活动最为频繁的区域, 还是生物多样性丰富的区域。1950s—1970s 滇池实施了大规模的围湖造田工程, 使滇池湿地面积减少了 73.81 km², 导致湖滨带原有

的天然湿地大量消失, 水生生物栖息地不复存在。1980—1990 年, 滇池环湖修建防浪堤 113 km, 使湖滨带生境条件进一步恶化, 且切断了湖泊水体生态系统和陆地生态系统的连续性, 致使湖泊生境片段化^[63]。而生境片段化又大大降低了滇池的水生生物多样性, 造成水生生物资源量下降、种群结构变化、湖泊水生态平衡失调等问题。

3 结语

梳理滇池流域众多研究成果可以发现, 近 60 年滇池水生生物群落组成发生了明显演替, 整体呈现出生物多样性下降、结构趋于单一化, 湖泊生态系统已从“清水态”的草型生态系统, 逐步转换为“浊水态”的藻型生态系统。造成滇池水生态系统演替的驱动因子非常复杂, 大尺度上应关注滇池流域的自然因素与流域人类活动等。针对高原湖泊水生态系统演替复杂性与水生态系统修复的长期性, 未来在滇池的管理过程中, 应从水生态系统演替的角度出

发, 辨析滇池生态系统退化原因和当前滇池水生态格局特征, 找到针对性的治理措施和修复技术, 解决日益复杂的污染治理与多要素统筹的水生态监测问题, 并促进滇池蓝藻水华的控制和水生态系统由“浊水态”向“清水态”转变。

参考文献

- [1] 昆明市人民政府. 昆明市滇池流域水体达标方案(2016—2020年)[A/OL]. [2022-08-02]. <https://www.docin.com/p-1949831808.html>.
- [2] 杨一光, 杨桂华. 滇池自然地理概要[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1985, 7(增刊1): 1-8.
- YANG Y G, YANG G H. An outline of physical geography of the Yunnan Dianchi Lake[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences), 1985, 7(Suppl 1): 1-8.
- [3] 昆明市滇池管理局. 云南省滇池保护条例[A/OL]. [2022-07-08]. <http://dgj.km.gov.cn/c/2018-12-07/2844346.shtml>.
- [4] 云南省人民政府. 云南九大高原湖泊劣V类水体数量由2015年的4个减少为1个[A/OL]. [2022-07-08] https://www.yn.gov.cn/ynxwfbt/html/2021/zuixinbaodao_0817/4247.html.
- [5] 戴丽, 李跃青, 胡小贞. 滇池生态安全调查与评估[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2011.
- [6] 金玉. 滇池浮游藻类分布特征研究及群落演替探讨[D]. 昆明: 云南大学, 2013.
- DONG Y X. Research and development of algae in the nine plateau lakes in Yunnan[J]. Environmental Science Survey, 2014, 33(2): 1-8.
- [7] 董云仙. 云南九大高原湖泊藻类研究进展[J]. 环境科学导刊, 2014, 33(2): 1-8.
- ZHOU C L, SONG L R. Phytoplankton community in a large shallow eutrophic lake (Lake Dianchi, Southwest China)[C]//2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. June 11-13, 2009, Beijing, China. IEEE, 2009: 1-4.
- [8] 云南省生态环境厅. 《滇池流域生物多样性绿皮书》发布: 全面摸清滇池生物物种、景观、生态系统[A/OL]. [2022-06-08]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_14916571.
- [9] 钱澄宇. 滇池地区藻类植物调查报告[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1964(3): 75-79.
- [10] 钱澄宇, 邓新晏, 王若南, 等. 滇池藻类植物调查研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1985, 7(增刊1): 9-28.
- QIAN C Y, DENG X Y, WANG R N, et al. A study on the Dianchi Lake algal flora[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences), 1985, 7(Suppl 1): 9-28.
- [11] 施之新, 魏印心, 陈嘉佑. 西南地区藻类资源考察专集[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 376-395.
- [12] 冯秋园, 王殊然, 刘学勤, 等. 滇池浮游植物群落结构的时空变化及与环境因子的关系[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2020, 56(1): 184-192.
- FENG Q Y, WANG S R, LIU X Q, et al. Seasonal and spatial variations of phytoplankton communities and correlations with environmental factors in Lake Dianchi[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(1): 184-192.
- [13] 黎尚豪, 俞敏娟, 李光正, 等. 云南高原湖泊调查[J]. 海洋与湖沼, 1963(2): 87-114.
- LI S H, YU M J, LI G Z, et al. Limnological survey of the lakes of Yunnan Plateau[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1963(2): 87-114.
- [14] GANNON J E, STEMBERGER R S. Zooplankton (especially crustaceans and rotifers) as indicators of water quality[J]. Transactions of the American Microscopical Society, 1978, 97(1): 16.
- [15] 王忠泽. 滇池浮游动物的初步调查[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1985, 7(增刊1): 53-72.
- WANG Z Z. The basic survey of the zoo- plankton in Yunnan Dianchi Lake[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences), 1985, 7(Suppl 1): 53-72.
- [16] 彭琼英. 滇池浮游动物的调查分析[J]. 水利渔业, 1995, 16(6): 22-24.
- PENG Q Y. Investigation and analysis of zooplankton in Dianchi Lake[J]. Reservoir Fisheries, 1995, 16(6): 22-24.
- [17] 孙长青. 滇池浮游动物的群落结构和种群数量变化的研究[D]. 昆明: 云南大学, 2010.
- [18] 王华, 刘丽萍, 李娅萍. 滇池春夏季浮游动物群落结构特征及与环境因子的关系[J]. 环境科学导刊, 2016, 35(6): 10-16.
- WANG H, LIU L P, LI Y P. Relationship between zooplankton community structure and environmental factors in spring and summer in Dianchi Lake[J]. Environmental Science Survey, 2016, 35(6): 10-16.
- [19] 赵晨, 吴学灿, 夏峰. 滇池水生植物研究概述[J]. 云南环境科学, 1999, 18(3): 4-8.
- ZHAO S, WU X C, XIA F. On aquatic plant in Dianchi Lake[J]. Yunnan Environmental Science, 1999, 18(3): 4-8.
- [20] 王圣瑞. 滇池水环境[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [21] 杨赵平, 张雄, 刘爱荣. 滇池水生植被调查[J]. 西南林学院学报, 2004, 24(1): 27-30.
- YANG Z P, ZHANG X, LIU A R. Study on aquatic vegetation change in Dianchi Lake[J]. Journal of Southwest Forestry College, 2004, 24(1): 27-30.
- [22] 戴全裕. 云南滇池水生植被的观察与分析[J]. 海洋湖沼通报, 1986(2): 65-75.
- DAI Q Y. Observation and analysis of aquatic vegetation in Kunminghu Lake[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 1986(2): 65-75.
- [23] 黄文成. 沉水植物在治理滇池草海污染中的作用[J]. 植物资源与环境, 1994, 3(4): 29-33.
- HUANG W C. The effect of using submerged vegetation for the pollution treatment of Dianchi Caohai Lake[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 1994, 3(4): 29-33.
- [24] 余国营, 刘永定, 丘昌强, 等. 滇池水生植被演替及其与水环境变化关系[J]. 湖泊科学, 2000, 12(1): 73-80.
- YU G Y, LIU Y D, QIU C Q, et al. Macrophyte succession in Dianchi Lake and relations with the environment[J]. Journal of

- Lake Science*, 2000, 12(1): 73-80.
- [26] 陈开宁. 莼齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus* L.)生物、生态学及其在滇池富营养水体生态修复中的应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2002.
- [27] 王琦, 高晓奇, 肖能文, 等. 滇池沉水植物的分布格局及其水环境影响因子识别[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(1): 157-170.
- WANG Q, GAO X Q, XIAO N W, et al. Distribution pattern of submerged macrophytes and its influencing factors of water environment in Lake Dianchi[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1): 157-170.
- [28] 李娅萍. 滇池底栖动物群落演变趋势[J]. *环境科学导刊*, 2015, 34(6): 1-3.
- LI Y P. Changes of zoobenthos communities in Dianchi Lake[J]. *Environmental Science Survey*, 2015, 34(6): 1-3.
- [29] 王丽珍, 徐小清, 周文博, 等. 云南滇池马村湾、海东湾底栖动物本底调查研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2002, 24(2): 134-139.
- WANG L Z, XU X Q, ZHOU W B, et al. A study on the zoobenthos in Macunwan and Haidongwan region of Dianchi Lake Yunnan[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences)*, 2002, 24(2): 134-139.
- [30] 王丽珍, 刘永定, 肖帮定. 滇池非封闭围隔水体底栖动物的监测调查[J]. *水利渔业*, 2004, 25(1): 49-51.
- [31] 王丽珍, 刘永定, 陈亮, 等. 滇池底栖无脊椎动物群落结构及水质评价[J]. *水生生物学报*, 2007, 31(4): 590-593.
- WANG L Z, LIU Y D, CHEN L, et al. Benthic macroinvertebrate communities in Dianchi Lake Yunnan and assessment of its water[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, 31(4): 590-593.
- [32] 蔡佳亮, 苏玉, 文航, 等. 滇池流域入湖河流丰水期大型底栖动物群落特征及其与水环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2011, 32(4): 982-989.
- CAI J L, SU Y, WEN H, et al. Characteristics of macrozoobenthic assemblages and their relationship with aquatic environmental factors in streams of Lake Dianchi watershed in the wet season[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 982-989.
- [33] 王丑明, 谢志才, 宋立荣, 等. 滇池大型无脊椎动物的群落演变与成因分析[J]. *动物学研究*, 2011, 32(2): 212-221.
- WANG C M, XIE Z C, SONG L R, et al. Dianchi Lake macroinvertebrate community succession trends and retrogressive analysis[J]. *Zoological Research*, 2011, 32(2): 212-221.
- [34] 高喆, 曹晓峰, 樊灏, 等. 滇池流域入湖河流水文形貌特征对丰水期大型底栖动物群落结构的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(7): 1209-1215.
- GAO Z, CAO X F, FAN H, et al. Influence of hydromorphological factors on macrozoobenthic communities in streams of Lake Dianchi Basin in the wet season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(7): 1209-1215.
- [35] 黄可, 张先智, 张恒明, 等. 治理工程对新运粮河浮游动物与底栖动物影响[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(10): 11-15.
- HUANG K, ZHANG X Z, ZHANG H M, et al. Effect of sewage interception project and ecological project on ecological restoration of zooplankton and zoobenthos in Xinyunliang River[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(10): 11-15.
- [36] 昆明市委宣传部. 60年滇池放鱼史: 光唇鱼的回归使滇池鱼类达24种 [A/OL]. [2022-06-08]. <http://xcb.km.gov.cn/c/2018-01-04/2403217.shtml>.
- [37] 何纪昌, 刘振华. 从滇池鱼类区系变化论滇池鱼类数量变动及其原因[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 1985, 7(增刊1): 29-36.
- HE J C, LIU Z H. An analysis of the causes of fish quantity variance from changes of the fish fauna in Yunnan Dianchi Lake[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences)*, 1985, 7(Suppl 1): 29-36.
- [38] 滇池市管理局. 我的兄弟回来了, 滇池23条鱼的故事[A/OL]. [2022-06-08]. <http://dji.km.gov.cn/c/2021-03-24/3871648.shtml>.
- [39] 陈培康. 云南滇池水体现状与渔业[J]. *淡水渔业*, 1981, 11(6): 6-8.
- CHEN P K. Present situation of water body and fishery in Dianchi Lake, Yunnan Province[J]. *Freshwater Fisheries*, 1981, 11(6): 6-8.
- [40] 成庆泰. 云南的鱼类研究[J]. *动物学杂志*, 1958(3): 153-165.
- CHENG Q T. Fish research in Yunnan[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1958(3): 153-165.
- [41] 孙昳, 王文玉, 钟文武, 等. 滇池渔业生态环境监测及评价[J]. *云南农业*, 2014(2): 45-46.
- [42] 杨君兴, 舒树森, 陈小勇. 草鱼引入对滇池湖体海菜花消亡的影响[J]. *动物学研究*, 2013, 34(6): 631-635.
- YANG J X, SHU S S, CHEN X Y. Effect of grass carp introduction of the extinction of *Ottelia acuminata* in Dianchi Lake[J]. *Zoological Research*, 2013, 34(6): 631-635.
- [43] 罗民波, 段昌群, 沈新强, 等. 滇池水环境退化与区域内物种多样性的丧失[J]. *海洋渔业*, 2006, 28(1): 71-78.
- LUO M B, DUAN C Q, SHEN X Q, et al. Environmental degradation and loss of species diversity in Dianchi Lake[J]. *Marine Fisheries*, 2006, 28(1): 71-78.
- [44] 倪兆奎, 王圣瑞, 金相灿, 等. 云贵高原典型湖泊富营养化演变过程及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(12): 2681-2689.
- NI Z K, WANG S R, JIN X C, et al. Study on the evolution and characteristics of eutrophication in the typical lakes on Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(12): 2681-2689.
- [45] 李原, 张梅, 王若南. 滇池的水华蓝藻的时空变化[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2005, 27(3): 272-276.
- LI Y, ZHANG M, WANG R N. The temporal and spatial variation of the cyanobacteria which caused the water bloom in the Dianchi Lake, Kunming, China[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences)*, 2005, 27(3): 272-276.
- [46] 刘丽萍. 滇池水华特征及成因分析[J]. *环境科学研究*, 1999, 12(5): 36-37.
- LIU L P. Characteristics of blue algal bloom in Dianchi Lake and analysis on its cause[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, 12(5): 36-37.
- [47] 杨枫, 许秋瑾, 宋永会, 等. 滇池流域水生态环境演变趋势、治

- 理历程及成效[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3): 633-643.
- YANG F, XU Q J, SONG Y H, et al. Evolution trend, treatment process and effect of water ecological environment in Dianchi Lake Basin[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(3): 633-643.
- [48] 昆明市滇池管理局. 滇池治理六大工程取得积极进展[A/OL].[2022-10-08]. <https://dgj.km.gov.cn/c/2014-04-28/1514888.shtml>.
- [49] 昆明市滇池管理局. 滇池流域水环境保护治理“十四五”规划(2021—2025年)公示稿[A/OL].[2022-06-08]. <http://dgj.km.gov.cn/upload/resources/file/2021/06/18/3486916.pdf>.
- [50] 段昌群, 何峰, 刘嫦娥, 等. 基于生态系统健康视角下的云南高原湖泊水环境问题的诊断与解决理念[J]. 中国工程科学, 2010, 12(6): 60-64.
- DUAN C Q, HE F, LIU C E, et al. Challenges and solutions of the water environmental issues of plateau lakes in Yunnan of China: from the perspective of ecosystem health[J]. *Engineering Sciences*, 2010, 12(6): 60-64.
- [51] 李云凯, 刘恩生, 王辉, 等. 基于Ecopath模型的太湖生态系统结构与功能分析[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 2033-2040.
- LI Y K, LIU E S, WANG H, et al. Analysis on the ecosystem structure and function of Lake Taihu based on Ecopath model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7): 2033-2040.
- [52] 郭春, 陈茹, 李文, 等. 中国南水北调东线最大蓄水湖食物网结构及生态系统特性[J]. *生态信息*, 2018, 43: 174-184.
- [53] ZHANG J Q, WANG C M, JIANG X M, et al. Effects of human-induced eutrophication on macroinvertebrate spatiotemporal dynamics in Lake Dianchi, a large shallow plateau lake in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(12): 13066-13080.
- [54] 刘恩生, 李云凯, 瞿日伟, 等. 基于Ecopath模型的巢湖生态系统结构与功能初步分析[J]. *水产学报*, 2014, 38(3): 417-425.
- LIU E S, LI Y K, ZANG R W, et al. A preliminary analysis of the ecosystem structure and functioning of Lake Chaohu based on Ecopath model[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(3): 417-425.
- [55] 贾佩娇, 胡忠军, 武震, 等. 基于Ecopath模型对滆湖生态系统结
- 构与功能的定量分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(2): 189-197.
- JIA P Q, HU Z J, WU Z, et al. Quantitative analysis on the structure and function of the Gehu Lake ecosystem based on Ecopath modeling[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(2): 189-197.
- [56] 何佳, 徐晓梅, 杨艳, 等. 滇池水环境综合治理成效与存在问题[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(2): 195-199.
- HE J, XU X M, YANG Y, et al. Problems and effects of comprehensive management of water environment in Lake Dianchi[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(2): 195-199.
- [57] 李益敏, 彭永岸, 王玉朝, 等. 滇池污染特征及治理对策[J]. *云南地理环境研究*, 2003, 15(4): 32-38.
- LI Y M, PENG Y A, WANG Y C, et al. The pollution feature of Dianchi Lake and its control countermeasure[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2003, 15(4): 32-38.
- [58] 昆明市滇池管理局. 滇池流域水污染防治规划(2006—2010年)[A/OL].[2022-06-08]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/200910/W020080423440539131830.pdf>.
- [59] 徐晓梅, 吴雪, 何佳, 等. 滇池流域水污染特征(1988—2014年)及防治对策[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(3): 476-484.
- XU X M, WU X, HE J, et al. Research on the pollution characteristics of Dianchi watershed (1988-2014) and identification of countermeasures[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(3): 476-484.
- [60] 昆明市人民政府办公室. 滇池流域水环境保护治理“十三五”规划(2016—2020年)[A/OL].[2022-06-08]. <http://www.km.gov.cn/c/2016-12-09/3459862.shtml>.
- [61] 昆明市人民政府. 滇池保护规划(2020—2035年)[A/OL].[2022-12-15]. <https://www.km.gov.cn/c/2021-06-01/3963054.shtml>.
- [62] 昆明市人民政府. 云南省滇池“一湖一策”保护治理行动方案(2021—2023年)[A/OL].[2022-08-03]. <http://dgj.km.gov.cn/upload/resources/file/2021/06/28/3489647.pdf>.
- [63] 黄艺, 曹晓峰, 陈小勇, 等. 滇池流域水生态系统状态与健康评估[M]. 北京: 科学出版社, 2019. ◇