

水质较好湖泊环境保护的理论基础及中国实践*

郑丙辉^{1**}, 曹晶^{1,2}, 王坤¹, 储昭升¹, 姜霞¹

(1: 中国环境科学研究院, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012)

(2: 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 目前, 我国湖泊富营养化及蓝藻水华问题十分突出, 国家高度重视湖泊的生态环境保护。自“九五”以来, 国家就投入太湖、巢湖、滇池“老三湖”等重污染湖泊的治理, 但成本巨大, 且历经近 30 年才初见成效。按照湖泊污染程度, 湖泊治理与保护可分为“污染治理型”“防治结合型”“生态保育型”3 大类。“老三湖”的治理是典型的“先污染、后治理”的模式, 水质较好湖泊主要属于生态保育型湖泊, 因此, “老三湖”治理模式不适用于水质较好湖泊的保护。本文系统总结了我国水质较好湖泊优先保护理念的形和水质较好湖泊专项实施的历程。根据水质较好湖泊的特点, 及其生态系统退化与修复的一般过程, 提出了水质较好湖泊保护的基本思路。从热力学角度, 阐明了氮磷营养盐输入湖泊生态系统中是熵增过程, 也是湖泊生态系统退化的根本原因, 湖泊氮磷污染负荷源头控制是关键。湖泊流域生态安全格局是确保湖泊生态系统健康的基础, 从景观生态学角度, 阐明了优化湖泊流域水土资源利用、优化发展模式是减轻湖泊环境压力的重要途径。在浅水湖泊生态系统, 以沉水植物占优势的“清水态”和以浮游植物占优势的“浊水态”转换过程不是沿着同一条途径, 存在上临界阈值和下临界阈值, 水生态修复过程表现出一种迟滞的现象。从湖泊水生态系统稳态转换理论角度, 阐明了湖泊生态修复工程应在湖泊生态系统发生退化转变之前实施, 才能获得较高的环境效益。通过国家财政专项对 81 个水质较好湖泊的支持, 既能促进湖泊流域经济社会发展, 又能确保湖泊水环境质量变好, 湖泊水生态系统逐步改善。建议加强不同类型湖泊保护模式的总结, 深入对水质较好湖泊生态系统演替理论和保护技术研究, 支撑国家系统开展水质较好湖泊保护。

关键词: 水质较好; 湖泊; 生态系统; 保护; 成效

Theoretical basis and Chinese practice for environmental protection of lakes with better water quality*

Zheng Binghui^{1**}, Cao Jing^{1,2}, Wang Kun¹, Chu Zhaosheng¹ & Jiang Xia¹

(1: *National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P.R.China*)

(2: *School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R.China*)

Abstract: At present, the problems of lake eutrophication and cyanobacterial blooms in China are still very prominent and the state attaches great importance to the ecological environment protection of lakes. Since the “Ninth Five-Year Plan”, the government has started to control the “old three lakes” of Lake Taihu, Lake Chaohu and Lake Dianchi, but it has spent huge treatment costs. After nearly 30 years of governance, the trend of further deterioration of water quality in the “old three lakes” was initially curbed. According to the degree of lake pollution, lake control and protection can be divided into three types: “pollution control type”, “combined prevention and control type” and “ecological conservation type”. The governance of the “old three lakes” was a typical “pollution first, treatment later” model, and the lakes with better water quality mainly belong to “ecological conservation type”, so the treatment model for “old three lakes” is not suitable for the protection of lakes with better water quality. This paper systematically summarizes the formation of the concept of priority protection of lakes with better water quality in China and the implementation history of special lakes with better water quality. According to the characteristics of the lake with better water quality and the

* 2022-03-29 收稿; 2022-04-11 收修改稿。

国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07401003) 资助。

** 通信作者; E-mail: zhengbinghui@craes.org.cn.

general process of ecosystem degradation and restoration, the basic idea for the protection of the lakes with better water quality was put forward. From a thermodynamic perspective, the entropy increase process of nitrogen and phosphorus nutrient input into the lake ecosystem was analyzed, revealing the root cause of the degradation of the lake ecosystem and the importance of source control of nitrogen and phosphorus pollution load into lakes. The ecological security pattern of lake basin is the basis for ensuring the health of lake basin ecosystem. From the perspective of landscape ecology, this paper clarifies that optimizing the use of soil and water resources in lake basin and optimizing the development pattern are important ways to reduce the environmental pressure on the lake. The transition process of the "clear water state" dominated by submerged plants and the "turbid water state" dominated by phytoplankton in shallow lake ecosystems is not along the same pathway. There are upper and lower critical thresholds, and the aquatic ecological restoration process shows a hysteresis phenomenon. From the theory of steady-state transformation of lake water ecosystem, we clarified that the lake ecological restoration project should be implemented before the degradation transformation of lake ecosystem to obtain higher protection benefits. The support of 81 lakes with better water quality through the special national finance can not only promote the economic and social development of the lake basin, but also ensure the improvement of the quality of the lake water environment and improvement of lake water ecosystem. We recommended to strengthen the summary of different types of lake protection models, conduct in-depth research on the theory of ecosystem succession and protection technology of lakes with better water quality, and support the state to carry out the protection of lakes with better water quality systematically.

Keywords: Better water quality; lakes; ecosystem; protection; effect

湖泊是地球上重要的淡水资源库和物种基因库,与人类生产生活息息相关,在自然物质循环和流域经济社会可持续发展中发挥着重要作用^[1]. 湖泊具有引水蓄洪、净化水质、调节气候、维护生物多样性、提供生物生境、供水、航运和休闲旅游等多种功能^[2-3],也是生态环境的重要保障,能够平衡水量、削减洪峰、回补地下水、调节区域气候等,在维持区域生态安全格局方面发挥着重要作用^[4]. 近 50 年来,随着人类活动加剧及社会经济的不断发展,湖泊开发强度不断增大,湖泊生态系统健康状况日益衰退^[5]. 湖泊面临水体富营养化、蓝藻水华频发、大型水生植物退化、水生生物多样性下降、食物网结构简单化等一系列生态环境问题,许多湖泊生态系统逐渐由以大型沉水植物为优势的清水态转变为以浮游植物(藻类)为优势的浊水态^[6-13],给流域和区域生态安全及经济社会发展带来巨大影响.

回顾我国水污染治理历程,自“九五”以来,我国开展了太湖、巢湖、滇池“老三湖”重点流域水污染治理行动,投入了大量财力和物力. 经过多年探索发现“先污染、后治理”是一种投入大、见效慢的湖泊治理模式. 在对我国不同类型湖泊环境安全状态的调查评估基础上,逐步认识到水质较好湖泊优先保护的重要性. 自 2011 年以来,国家实施了水质较好湖泊保护专项,针对全国 81 个水质较好湖泊开展保护行动. 实践证明,“良好湖泊,优先保护”是湖泊生态环境保护的正确思路,国家及地方政府对湖泊保护和治理的认识也进一步提高. 本文总结了我国水质较好湖泊保护专项实施的成效,从湖泊生态系统退化和恢复机理出发,阐明水质较好湖泊环境保护的理论基础,揭示水质较好湖泊实施“优先保护”的重要性,为我国湖泊生态环境保护与治理提供借鉴.

1 湖泊水生态系统退化与修复的一般过程

1.1 我国湖泊水生态环境特征

湖泊生态系统是指在湖泊中由生物群落及其环境作用所构成的自然系统^[14],储存了地球上可被利用的大部分淡水,占全球生态系统服务价值的 40%. 我国湖库提供了全国约 40% 的饮用水,粮食产区的 1/3 在湖泊流域,工农业总产值的 30% 也来自湖泊流域^[15-16]. 我国有面积 1 km² 以上的湖泊 2693 个,总面积约 8.1 万 km²,其中东部平原湖区和青藏高原湖区是我国湖泊分布范围最广的区域,分别占全国湖泊总数量和总面积的 62.7% 和 77.2%^[17]. 而东部平原湖区多为浅水湖泊,主要生态特征为热分层不明显^[18]、水体扰动对沉积物再悬浮影响大,相较于深水湖泊,更易受外界环境影响. 近几十年来,随着经济快速发展及人类的高强度开发,我国浅水湖泊正面临着湖泊萎缩、生态退化、耗氧有机物污染、富营养化等一系列生态环境问题^[19]. 2020 年,开展水质监测的 112 个重要湖泊(水库)中,Ⅰ~Ⅲ类占比 76.8%,劣Ⅴ类占比 5.4%,主要污染指标为总磷、化学需氧量和高锰酸盐指数^[20]. 水质较好湖泊一般指水质好于Ⅲ类、湖泊生态状态为草型清水态

或草—藻混合态^[21]、营养状态为中营养或贫营养、具有饮用水水源功能或重要生态功能、自然湖滨岸线不低于全湖岸线的75%、山区湖泊流域森林覆盖率达到75%的湖泊或水库。

1.2 湖泊水生态系统退化

随着人类活动加剧,大量氮磷入湖,湖泊污染负荷不断增加,湖泊营养水平持续升高。水利枢纽工程建设、江湖阻隔等造成湖泊水位波动、水文自然节律发生变化、水生态非良性演替,进而致使水生植物生境发生变化,大型水生植物严重退化,部分水体水化学失衡^[22-23]。水产养殖、过度捕捞等不合理的渔业活动对水生生物群落结构产生重大影响,造成浮游生物小型化、食物网结构简单化、生物多样性下降^[8,24-27]。高强度的流域开发下,氮磷持续高位输入,局部湖区藻型化,导致重污染区水华暴发,水质恶化,水生态功能下降;加上全球气候变化的影响,湖泊蓝藻水华暴发形势严峻^[28]。蓝藻水华暴发及不合理的渔业活动进一步加剧沉水植物退化,加速湖泊生态系统由以大型水生植物为优势的清水态向以浮游植物为优势的浊水态转变^[13,29],湖泊水质下降,生态服务功能下降或消失,严重时影响到供水安全。

1.3 湖泊水生态系统修复

水生态系统修复是指将已经退化的水生态系统采取一系列的措施进行恢复或修复,对已经退化的水生态系统进行补救,使其具有更高的生态忍受性^[30]。水生态系统修复的最终目的是通过模仿一个自然的、可以自我调节的并与所在区域完全整合的系统,从而最大限度地减缓水生态系统的退化,使系统恢复或修复到可以接受的、能长期自我维持的、稳定的状态水平^[30]。虽然水生态系统的恢复有时可以在自然条件下进行,但一般还是通过人工干预的方式来实现,通常包括以下主要过程:重建干扰前的物理环境条件、调节水和土壤环境的化学条件、减轻生态系统的环境压力(减少营养盐或污染物的负荷)、原位处理(采取生物修复或生物调控的措施,包括重新引进已经消失的土著动物、植物区系)、尽可能地保护水生态系统中尚未退化的组成部分等^[30]。事实上,真正意义的水生态系统修复是一项长期的系统工程,要达到修复的最终目标可能需要比想像更长的时间。它不仅取决于所修复水体中水的滞留时间,而且与所采用的修复方式密切相关^[30-31]。

2 水质较好湖泊保护的理论基础

2.1 水质较好湖泊保护思路

由于水质较好湖泊所处状态不同于重污染湖泊,其入湖氮磷负荷基本没有超过水环境容量,水生态系统受损程度较低,湖泊治理与保护的相对压力较低。因此,水质较好湖泊保护的基本策略是“保护优先”,其基本思路是“控源减排—绿色发展—生态修复—生态管理”。

首先,从湖泊生态系统退化过程看,氮磷输入是湖泊生态系统退化的首要原因。虽然水质较好湖泊所受环境压力较低,但由于这些湖泊所在地区经济发展较落后,水污染治理水平也较差,因此,水质较好湖泊的保护首先应该控源减排,补治理短板,还历史旧账。

其次,从湖泊流域经济社会发展需求看,水质较好湖泊普遍面临着巨大的发展压力。绿色发展是降低流域经济社会发展带来的环境压力的关键,核心内容是优化水土资源利用,调整生产生活方式,实现湖泊生态系统健康可持续发展。

其三,从湖泊水生态系统退化程度看,水质较好湖泊生境条件尚好,生态系统受损程度较低,通过湖滨湿地修复、沉水植物修复、食物网修复等生态修复措施,可以促进湖泊水生态系统健康。

其四,从流域水环境管理发展历程看,流域水环境管理从工业污染源管理、污染物排放总量控制,逐步发展到流域水质目标管理。水质较好湖泊保护的目的是保证湖泊水生态系统健康,因此,水质较好湖泊保护的环境管理模式应该从生态系统过程出发,构建流域水生态管理体系。

2.2 熵焓定律与控源减排

熵是衡量一个孤立系统混乱程度的度量指标,熵增定律表明在自然过程中一个孤立系统的总混乱度、总稳定度(即“熵”)不会减小,体系总是自发地向混乱度增大的方向变化,总使整个系统的熵值增大,而该过程是不可逆的。根据熵的统计意义,系统熵的降低就是系统的有序度增大,反之,系统熵的升高就是系统的混乱度增加;系统的结构受到破坏,熵值必然增加,随之而来的生产水平和经济效益必然下降。

湖泊氮磷污染负荷排放与控制遵循熵焓定律。氮磷污染物进入河流湖泊自然水体、导致生态系统的退

化是熵增的过程,将导致湖泊生态系统混乱度增加,这个过程是容易发生的;而想要在湖内进行氮磷控制,使水体、沉积物中氮磷含量降低,实现生态系统恢复,是熵减过程,必须外加能量降低系统的熵值,才能使生态系统稳定平衡,这个过程是困难的. 因此,在污染物源头进行控制将更加容易(图 1),即熵增容易,熵减难,污染物源头控制是关键.

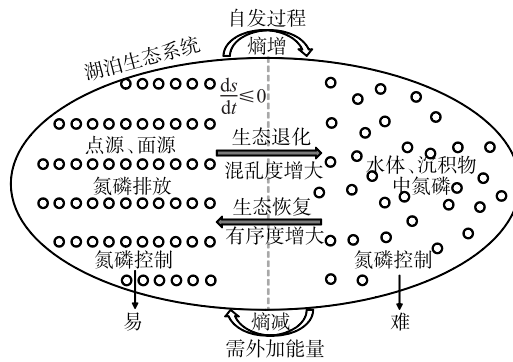


图 1 熵增变化与湖泊生态系统退化和修复的关系

Fig.1 The relationship between the theory of entropy increase and lake ecosystem degradation and restoration

2.3 景观生态学原理与湖泊流域生态安全格局构建

生态安全格局 (security patterns, 简称 SP) 对维护或控制某种生态过程、生物保护和景观改变具有重要意义^[32]. 流域生态安全格局的构建旨在为流域生态安全和健康提供解决方案^[33], 协调人类活动方式和高强度开发与生态系统的配置, 补偿和恢复生态功能, 提高湖泊流域水源涵养能力及湖泊自我保护能力, 实现流域可持续发展. 景观生态学注重人类活动对景观格局与过程的影响, 强调广阔的空间尺度和生态系统空间格局的生态效应, 退化和破坏了的生态系统保护与重建也是景观生态学的研究重点之一^[34-35]. 湖泊生态系统退化的重要原因是不合理的土地开发利用造成水源涵养能力下降、湿地减少和湖滨带被侵占等问题, 进而导致湖泊流域生态安全格局受损, 而引起生态安全格局部分或全部破坏的景观改变将导致生态过程的急剧恶化^[36].

生态安全格局构建意味着如何选择、维护和在某些潜在的生态节点引入斑块, 意味着如何来构筑源间连接生态廊道^[36]. 湖泊流域生态安全格局构建可以景观生态学原理为基础, 通过优化、控制土地资源开发利用, 有效控制流域空间利用, 形成以流域上游水源涵养区、中游生态农业与城镇绿色发展区、下游湖滨生态缓冲区的湖泊“一湖三区”流域纵向生态安全格局(图 2). 在生态安全格局构建过程中应充分考虑其水系连通性, 入湖河流作为湖泊水环境与陆地环境之间的景观廊道, 具有明显的水系连通性和景观结构连接性,

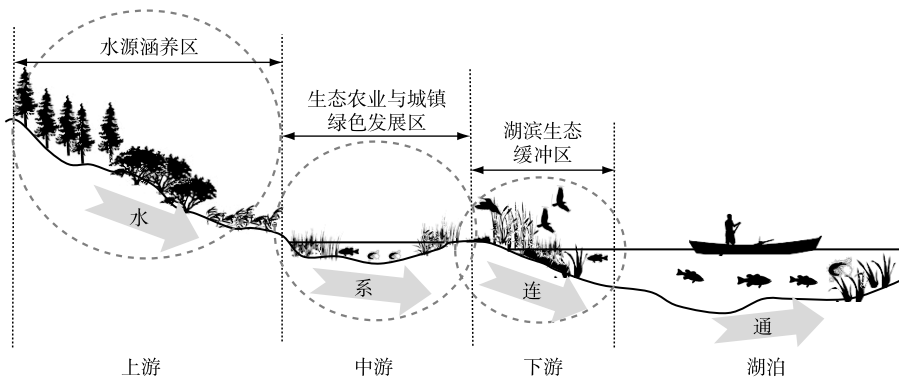


图 2 湖泊流域生态安全格局

Fig.2 Ecological security pattern of lake basins

是贯穿“三区”的动脉,通过河流—滨岸带作用,以保证清洁水源入湖.水质较好湖泊的环境保护应以流域生态安全格局构建为前提,统筹生态系统各组成单元的类型、数目的空间分布与配置等,使其具有合适的空间构型,以保证种群动态、群落演替、养分循环等生态学过程正常运转,保证生态系统的结构和功能.

2.4 水生态系统稳态转换理论与湖泊水生态修复

生态系统会随着外部条件如气候、营养盐等的变化呈现不同的响应(图3),当响应曲线出现向后“折叠”现象时(图3c),生态系统将会有两种可选的稳定状态,由一个不稳定的平衡边界隔开,即正反馈和负反馈两种调节方式(图3c)^[37].当生态系统处于折叠曲线上分支状态时,不能顺利通过到下分支状态,只有当环境条件达到阈值 F_2 或处于 F_2 附近时,生态系统才能从上分支自然转换或在特定条件下突破边界跃迁至下分支状态,即正反馈调节;而如果试图通过逆转条件恢复至上分支状态,生态系统会显示迟滞,逆向转变只有在条件逆转得足够远到达阈值 F_1 时才能实现,即负反馈调节(图3c)^[37].可以使用“恢复力 resilience”来表示在不导致生态系统由一种稳定状态转移到另一稳定状态的情况下所能承受的最大扰动条件,而 F_2 和 F_1 就是能承受的扰动边界,在边界范围内生态系统可以承受内部发生的扰动变化并进行自我修复^[18];而一旦扰动超过边界阈值,生态系统就会进入另一稳定状态,想要恢复就会出现迟滞.

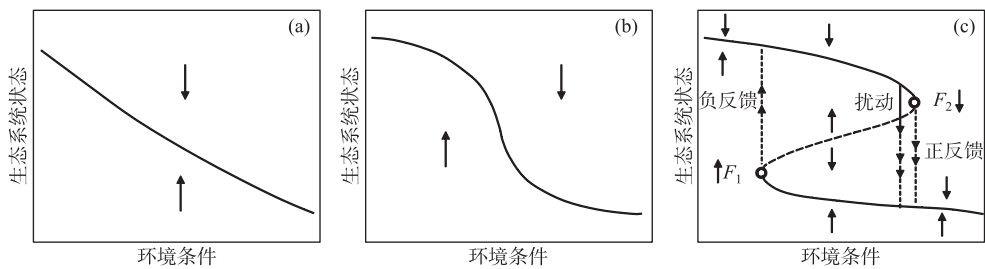


图3 生态系统随外部条件转换的3种模式(a:线性响应模式;b:曲线响应模式;c:折叠响应模式)^[37]

Fig.3 Three modes of ecosystem transition with external conditions

(a, linear response mode; b, curvilinear response mode; c, folded response mode)^[37]

对于浅水湖泊,Scheffer等^[37-38]提出了以沉水植物占优势的“清水态”和以浮游植物占优势的“浊水态”的浅水湖泊稳态转换模型.该模型阐释了营养盐浓度增加对水体浊度增加以及对稳态转换的影响,包含2个主要变化过程:1)沉水植物可以抑制由营养盐浓度增加造成的浊度增加,当有沉水植物存在时,随着营养盐浓度的增加,水体浊度增加幅度小,生态系统呈现以沉水植物为优势的“清水态”或以沉水植物和藻类共存的“清水—浊水(草—藻)”混合态;2)随着营养盐浓度增加至足够高到浊度超过临界值时,浮游植物大量繁殖,水体浊度急剧增加,维持水体清水态的沉水植物消失,生态系统转变为以浮游植物占优势的“浊水态”.此时营养盐浓度变化即为引起生态系统状态转变的扰动条件,当营养盐扰动达到稳态转换的阈值条件时,生态系统则由“清水态”转变为“浊水态”.

由于沉水植物具有防止沉积物再悬浮、为浮游动物提供庇护进而抑制藻类生长、分泌化感物质降低藻类数量等作用,因此即便营养盐浓度的增加使水体浊度增加,但生态系统的恢复力强,营养盐扰动只要在其可承受范围之内,就可以进行自我修复.然而当水体浊度逐渐增加时,水下光照将逐渐衰减,沉水植物光合作用将受到限制,数量逐渐减少,而浮游植物数量将逐渐增多,此时若环境扰动继续增加至超过生态系统可承受的边界阈值,将导致沉水植物消失,浮游植物迅速繁殖,生态系统转变为浊水状态.此时将营养盐浓度降低至稳态转换时的水平往往不足以恢复沉水植被丰富的清水状态,必须采取更加严格的营养盐削减措施,因为由图2c可知,清水状态恢复所发生的营养盐水平要远远低于清水状态崩溃所发生的营养盐水平,表现出一种迟滞的模式^[37].

荷兰 Veluwe 湖的治理历程可以很好地反映这种迟滞模式(图4)^[39],1960s末至1970s初,当TP浓度升高至0.15 mg/L时,大型水生植物群落崩溃,清水状态消失,浑浊状态持续了约20年之久,直到1990s TP浓度下降至0.1 mg/L时才开始逐渐恢复清水状态,而当水体中TP浓度降低至0.05 mg/L左右,才有可能实现

浊水态向清水态的转变^[39]. Zhao 等^[40]基于巢湖、滇池等生态系统中控制营养输入使生态系统恢复缓慢或恢复迟滞的现象,提出了7种不同的湖泊富营养化恢复轨迹模式(图5),进一步说明生态系统发生稳态转变后想要恢复的艰难性.

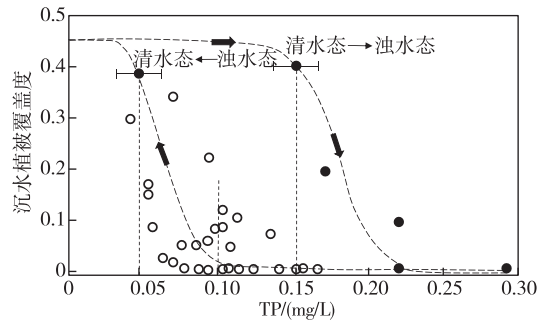


图4 沉水植物随 TP 浓度增加后降低的响应迟滞曲线(实心点代表 1960s 末和 1970s 初沉水植物随 TP 浓度增加由清水态向浊水态的正向转变,空心点代表 TP 的逐渐减少最终导致 1990s 由浊水态向清水态的逆向转变)^[37,39]

Fig.4 The response hysteresis curve of submerged vegetation with increasing TP concentration (solid dots represent the positive transition of submerged vegetation from clear state to turbid state with increasing TP concentration in the late 1960s and early 1970s; the hollow dots represent the gradual reduction of TP concentration that eventually led to the reverse transition from turbid state to clear state in the 1990s)^[37,39]

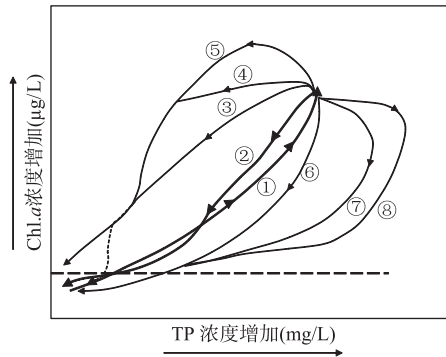


图5 Chl.a 浓度随 TP 浓度升高及降低的 7 种假设恢复轨迹(虚线曲线表示 Chl.a 浓度的目标值;①为 Chl.a 浓度随 TP 浓度增加的路径,②为 Chl.a 浓度随 TP 浓度增加后降低的逆向回归路径,③④⑤为在不同环境条件下的左向迟滞路径,⑥⑦⑧为在不同环境条件下的右向迟滞路径;虚线直线表示 Chl.a 阈值、参考状态或控制标准,生态系统恢复轨迹可能多次跨越该线才能达到恢复目标)^[40]

Fig.5 Seven hypothetical recovery trajectories of Chl.a concentration increasing and decreasing with TP concentration (the dotted curve indicates the environmental goal of Chl.a concentration; ① is the path of Chl.a increasing with TP concentration, ② is the reverse regression path of Chl.a concentration decreasing with TP concentration increasing, ③④⑤ are the leftward hysteresis paths under different environmental conditions, ⑥⑦⑧ are the rightward hysteresis paths under different environmental conditions; the dotted line represents the Chl.a threshold or reference state or control standard, and the ecosystem restoration trajectory may cross this line many times to achieve the restoration goal)^[40]

那么湖泊生态系统稳态恢复为什么会出现这种迟滞的现象,沉积物营养盐的释放延缓了水体实际营养

水平对外部负荷减少的反映是重要的原因^[41]. 浅水湖泊由于水浅,沉积物中积存的营养盐浓度可以达到上覆水的数十倍,在风浪扰动作用下,沉积物中营养盐不断向上覆水释放,即使外源得以控制,但水体营养盐浓度难以在短期内达到预期效果^[42-43]. 另外营养盐浓度及形态、风浪大小、光照强弱、鱼类及群落结构等都会影响生态系统的恢复^[18]. 因此,富营养化浅水湖泊由于在稳态转换前后生态系统的内部结构(沉水植物优势地位消失)、驱动因素(扰动达到阈值)和关键过程(营养盐流动出现障碍)均发生了显著变化,生态系统出现了明显的不可逆性^[44].

由此可见,稳态转换理论对于湖泊生态恢复具有重要的指导意义,根据湖泊所处的不同生态系统状态选择修复节点是非常重要的. 当湖泊生态系统处于以沉水植物占优势的清水态时,“清水维持”是湖泊生态修复的首要目标,此时通过恢复沉水植物可以实现生态系统的清水稳态维持. 当湖泊生态系统处于“清水—浊水(草—藻)”混合态时,生态系统比较脆弱,处于一个不稳定的平衡,此时若在恢复沉水植物的同时实施控源减排消除高营养盐胁迫,生态系统是有可能实现从“清水—浊水”混合态向“清水态”转换的. 而当生态系统处于以浮游植物为优势的“浊水态”时,由于生态系统已经发生了稳态转换,要想实现稳态的过度转换,需要投入多倍的人力、物力和时间成本,要先使营养盐浓度下降至稳定状态能够实现逆转的较低阈值水平,才能通过沉水植物恢复达到湖泊生态修复效果,这样的治理效益很低. 只有在一种稳定的生态系统状态下实施治理才足以恢复生态系统初始状态并产生持久效果. 因此,应在湖泊生态系统状态发生转变之前进行治理,在营养盐浓度未达到状态转变的阈值水平,即在一个生态系统的修复力范围之内进行治理,才能实现较高的治理效益. 水质较好湖泊多为草型清水态或草—藻混合态,因此,对水质较好湖泊开展水环境保护治理是一项防治并重、资金节约、治理效益高的措施.

3 水质较好湖泊保护的中国实践

3.1 水质较好湖泊保护思路形成

我国湖泊治理经历了很多年努力,就太湖、巢湖和滇池“老三湖”而言,太湖流域自 1980s 以来流域内河湖水质不断下降,2007 年暴发水华导致供水危机后,地方政府组织开展大规模控源治污、调水引流、生态修复、河网综合整治等行动^[45-46]. 巢湖大力治理开始于“十五”期间,以“水质改善、国控断面达标、蓝藻抑制”为目标,全面启动了环巢湖地区生态保护与修复工程建设^[47]. 滇池治理自“九五”以来便开始被重视,“九五”期间的治理重点是工业污染和城镇污水处理,“十五”期间治理重点转向污染控制和生态修复,“十一五”至“十二五”又实施了六大工程^[48].

虽然“老三湖”的治理投入了大量的财力物力,但治理成效不理想,水体中污染物削减效率不高. 如太湖“十一五”期间的总氮和总磷浓度分别为 2.38 和 0.085 mg/L,“十二五”期间分别降低为 2.08 和 0.066 mg/L,“十三五”期间总氮继续降低至 1.48 mg/L,但总磷浓度反弹至 0.079 mg/L. 巢湖“十一五”期间的总氮和总磷浓度分别为 1.68 和 0.128 mg/L,“十二五”期间分别降低至 1.63 和 0.092 mg/L,“十三五”期间总氮浓度持续降低至 1.50 mg/L,但总磷浓度仍保持在 0.092 mg/L. 滇池外海“十一五”以来氮磷浓度下降趋势显著,总氮、总磷浓度分别从 2.54 和 0.152 mg/L 持续降低至“十三五”期间的 1.42 和 0.086 mg/L. 虽然“老三湖”水质有所改善,但治理成本巨大. 以太湖为例,“九五”至“十二五”,用于太湖治理的累积投资成本约为 2388 亿元;“十三五”期间太湖继续投入 515 亿元用于流域水污染治理. 因此,湖泊保护治理首先应控源减负,其次再进行生态修复,这是湖泊治理几十年总结的历史经验,也是实现湖泊低成本治污最大化的一种有效途径.

2008 年,国家启动了“全国重点湖库生态安全调查与评估”项目,建立了湖泊生态安全评估方法,将湖库分为 3 种类型,即“污染治理型(重度污染)”、“防治结合型(中度污染)”和“生态保育型(水质较好)”^[49]. 2009 年,持续开展“全国重点湖库生态安全保障策略研究”项目,提出湖泊生态环境分类治理与保护的技术思路,原环境保护部出台了《湖泊生态环境保护实施方案编制指南》^[50]. 太湖、巢湖、滇池和乌梁素海等为典型的“污染治理型(重度污染)”湖泊. 这类湖泊流域社会经济较为发达,环境压力强大;此类湖库富营养化严重,生态系统失衡,水华频繁暴发危及饮用水安全^[51]. 洞庭湖、洪泽湖、鄱阳湖和三峡水库等为典型的“防治结合型(中度污染)”湖泊. 这类湖泊的流域社会经济发展需求旺盛,环境压力逐步加大,多数处于轻度富营养水平,生态系统结构发生变化,生境出现退化迹象,局部区域出现水华;此类湖泊的环境保护应以“污染

防治与生态修复”相结合为主^[51]。抚仙湖、梁子湖和瓦埠湖等为典型的“生态保育型(水质较好)”湖泊。这类湖泊的流域经济发展需求才刚开始显现,生态环境保持较好,环境保护应以“污染防治、优化调控和生态补偿”为主要策略^[51]。

3.2 水质较好湖泊保护专项组织实施

2011年,鉴于水质较好湖泊生态环境恶化及生态服务功能退化问题,为避免众多湖泊再走“先污染、后治理”的老路,国家财政部和环境保护部联合启动了水质较好湖泊生态环境保护专项,按照突出重点、择优保护、一湖一策、绩效管理的原则,推进水质较好湖泊生态环境保护工作,并优先在云南抚仙湖和洱海、湖北梁子湖、山东南四湖、安徽瓦埠湖、辽宁大伙房水库、吉林松花湖以及新疆博斯腾湖8个湖泊开展水质较好湖泊生态环境保护试点。2014年9月,原环境保护部、国家发展和改革委员会以及财政部发布了《水质较好湖泊生态环境保护总体规划(2013—2020年)》,将365个水质较好湖泊纳入规划,明确了湖泊保护总体要求、具体保障策略等^[21]。截至2016年,中央财政累计投入218亿元,支持全国77个湖泊实施生态环境保护工作,带动地方和社会投入超过400亿元,惠及29个省(区、市)。

3.3 水质较好湖泊保护专项实施成效

在流域经济社会快速发展背景下,基于有限的资金投入和发展方式调整,这些湖泊总体持续保持着良好的环境状态。根据2010—2020年《中国环境状况公报》,2010年以来监测的重点湖库中,中度富营养状态湖库所占比例呈显著下降趋势,中营养状态的湖库所占比例呈显著上升趋势。2010年中度富营养湖库占比为22.2%,2020年下降为4.5%;2010年中营养湖库占比为33.3%,2020年上升为61.8%。2010年,水质较好湖泊镜泊湖、洱海和博斯腾湖为Ⅲ类水质,洪泽湖、鄱阳湖和南四湖为Ⅴ类水质,达赉湖、白洋淀和洞庭湖为劣Ⅴ类水质,主要超标指标为总氮、总磷和高锰酸盐指数;2019年,洪泽湖、鄱阳湖水质好转为Ⅳ类,南四湖好转为Ⅲ类,白洋淀和洞庭湖好转为Ⅳ类;2020年,丹江口水库和洱海水质为优,白洋淀为轻度污染。

湖库是保障饮用水安全的重要基石,但也面临脆弱性增加的风险。在我国,湖库型水源地数量占比为40.6%,北京、上海、深圳等10个重点城市湖库型水源地占比高达65.4%。就服务人口而言,湖库型水源地服务的人口占比为47.2%^[52]。国家和地方重点针对湖库型水源地实施“优先保护”,全国集中式饮用水源地水质达标率明显提升。2009年集中式饮用水源地水质达标率仅为73%,随着水质较好湖泊的环境保护治理,水质较好湖泊水质稳中改善,地表水饮用水源地水质明显好转,2016年以来呈显著提升的趋势,2016年地表水饮用水源地达标率为93.6%,2019年达标率升高为95.8%,2020年达标率升高为97.7%^[53]。

经过专项实施,水质较好湖泊的水生态也逐步得到恢复^[21]。截至2016年,纳入中央财政支持范围的77个水质较好湖泊中,17个湖泊水质较基准年有所提高,57个湖泊水质保持不下降。湖岸线、湖滨湿地生态修复成果显著,77个湖泊湖滨缓冲带面积共增加175.67 km²,湿地面积恢复444.47 km²,生态涵养林面积增加1168.53 km²,湖泊生物多样性显著提高。如“十二五”以来,云南洱海水质稳定保持在Ⅲ类,有28个月达到Ⅱ类,超过“十一五”同期7个月;湖南东江湖水质稳定在Ⅱ类,饮用水源一级保护区达到Ⅰ类水质标准,各地湖泊流域生态环境也得到显著改善。江苏白马湖、四川邛海、安徽太平湖等湖泊通过转变粗放式养殖模式,改变种植结构,发展生态旅游,提升了生态系统健康状况^[54-56]。此外,水质较好湖泊保护法规制度逐步完善,湖泊长效保护机制初步建立。湖泊保护应在生态系统发生转变之前进行治理,避免生态系统恢复出现的迟滞性,并且还能节约治理成本,获得更大的治理效益。

4 总结及展望

我国湖泊众多,湖泊在区域国民经济和社会发展中提供了极其重要的生态服务功能,湖泊生态环境工作是我国流域水生态环境保护的重要任务。太湖、巢湖、滇池“老三湖”是我国污染较重的湖泊,国家和地方自“九五”以来就开始开展湖泊治理保护工作,花费了大量的人力、物力和时间成本,进行了大规模的治理,目前初步遏制了“老三湖”水质继续恶化的趋势,但这种“先污染、后治理”的老路走得很艰难,原因是“老三湖”的水生态系统状态发生转变,由清水态转变为浊水态,而且一旦生态系统发生转变,想要实现恢复或逆转,就会出现迟滞现象,就需要花费更多的治理成本来达到初始状态,治理效益低。对于我国环境质量较好的湖库,国家和地方实施了水质较好湖泊保护行动,经过实践检验,水质较好湖泊环境保护成效显著,在湖

泊水质较好、生态系统相对健康状态下进行保护和治理是实现治理效益最大化的良好途径,也符合当前国家要求的生态文明建设的新要求。

由于不同湖泊氮磷污染、生态系统受损程度各不相同,首先要开展湖泊生态系统健康状态的调查和评估,科学确定湖泊生态系统所处的状态;其次按照“绿色发展、控源减排、生态修复、生态管理”的湖泊保护思路,制定水质较好湖泊“一湖一策”的生态环境保护策略。

1)构建湖泊流域绿色发展体系。以湖泊承载力为基础,确定湖泊保护重点。以湖泊水质持续改善和水生态系统健康为目标,识别污染物时空分布特征以及水文气象等关键影响因素和社会经济发展总量、结构及效率的影响,依据湖泊承载力对湖泊进行分期分区保护。构建绿色流域,协调经济发展与湖泊保护。协调经济总量、经济发展速度和产业结构以及人口总量、人口增长速度、人口结构和生活习惯;严把水资源红线、土地利用红线,提高流域水土利用效率。制定湖泊流域生态补偿机制,保证全流域湖泊保护。按照各流域水环境功能区划的要求,建立流域环境协议,明确流域在各行政交界断面的水质要求,按水质情况确定补偿或赔偿的额度,给出流域生态补偿政策。

2)实施湖泊流域生态修复工程。上游水源涵养区:重点做好水土流失防控措施,增加入湖水量,减少泥沙入湖;中游生态经济发展区:实施污染治理工程的同时,建设入湖河流生态廊道、生态湿地等工程,保证清水入湖;下游湖滨缓冲区:建设缓冲区减少湖泊直接环境压力,修复湖滨带提高湖泊防护能力;湖泊:实施湖泊食物网调控、沉水植被恢复等生态调控工程,形成“一湖三圈”的流域生态安全格局。

3)实施科技攻关,解决水质较好湖泊保护的理论与技术问题。十五年的“水专项”重点针对重污染湖泊开展了系统研究,取得了丰硕成果。首先要总结水质较好湖泊保护的成功模式;其次研究水质较好湖泊的生态系统退化过程与修复理论,研发湖泊流域生态修复技术方法等,形成技术指南向全国推广应用。

5 参考文献

- [1] Schallenberg M, de Winton MD, Verburg P *et al* eds. Ecosystem services of lakes. Ecosystem services in New Zealand-Conditions and trends. Lincoln: Manaaki Whenua Press, 2013; 203-225.
- [2] Wu SS, Gao SP, Hu XD *et al*. Study on the influence on water ecosystem by a lake inflow filtration system. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2018, **379**: 363-369. DOI: 10.5194/piahs-379-363-2018.
- [3] Sterner RW, Keeler B, Polasky S *et al*. Ecosystem services of Earth's largest freshwater lakes. *Ecosystem Services*, 2020, **41**: 101046. DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.101046.
- [4] Cichoń M. Changing values of lake ecosystem services as a result of bacteriological contamination on Lake Trzesiecko and Lake Wielimie, Poland. *Environmental & Socio-Economic Studies*, 2017, **5** (4): 87-94. DOI: 10.1515/enviro-2017-0024.
- [5] Xu FL, Jørgensen SE, Tao S. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health. *Ecological Modelling*, 1999, **116**(1): 77-106. DOI: 10.1016/S0304-3800(98)00160-4.
- [6] Yang GS, Ma RH, Zhang L *et al*. Lake status, major problems and protection strategy in China. *J Lake Sci*, 2010, **22** (6): 799-810. DOI: 10.18307/2010.0601. [杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799-810.]
- [7] Huang FF, Zhang K, Huang SX *et al*. Patterns and trajectories of macrophyte change in East China's shallow lakes over the past one century. *Scientia Sinica: Terrae*, 2021, **51**(11): 1923-1934. DOI: 10.1007/s11430-020-9806-9. [黄菲帆, 张科, 黄世鑫等. 过去百年来中国东部浅水湖泊水生植被演化模式. 中国科学地球科学, 2021, **51**(11): 1923-1934.]
- [8] Kong XZ, He W, Liu WX *et al*. Changes in food web structure and ecosystem functioning of a large, shallow Chinese lake during the 1950s, 1980s and 2000s. *Ecological Modelling*, 2016, **319**: 31-41. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.06.045.
- [9] Alimov AF, Golubkov MS. Lake eutrophication and community structure. *Inland Water Biology*, 2014, **7**(3): 185-191. DOI: 10.1134/s1995082914030031.
- [10] Qin BQ, Gao G, Zhu GW *et al*. Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(9): 961-970. DOI: 10.1007/s11434-012-5560-x.
- [11] da Huo, Gan NQ, Geng RZ *et al*. Cyanobacterial blooms in China: diversity, distribution, and cyanotoxins. *Harmful Al-*

- gae, 2021, **109**: 102106. DOI: 10.1016/j.hal.2021.102106.
- [12] Dokulil M, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia*, 2000, **438**: 1-12. DOI: 10.1023/A%3A1004155810302.
- [13] Qin BQ, Xu PZ, Wu QL *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 3-14. DOI: 10.1007/s10750-006-0521-5.
- [14] Yang C ed. Ecology: 2nd. Beijing: Higher Education Press, 2008. [杨持. 生态学: 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2008.]
- [15] Wu FC, Meng W, Song YH *et al.* Research progress in lake water quality criteria in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(12): 2385-2393. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2008.12.016. [吴丰昌, 孟伟, 宋永会等. 中国湖泊水环境基准的研究进展. 环境科学学报, 2008, **28**(12): 2385-2393.]
- [16] Wang SM, Dou HS eds. Lakes of China. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [17] Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences ed. Report of lake survey in China. Beijing: Science Press, 2019. [中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊调查报告. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [18] Qin BQ. Principles and approach for lake ecological restoration. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(11): 4848-4858. [秦伯强. 湖泊生态恢复的基本原理与实现. 生态学报, 2007, **27**(11): 4848-4858.]
- [19] Qin BQ. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River. *J Lake Sci*, 2002, **14**(3): 193-202. DOI: 10.18307/2002.0301. [秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 193-202.]
- [20] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China ed. China's Ecological and Environmental Status Report of 2020, 2020. [中华人民共和国环境保护部. 2020 年中国生态环境状况公报, 2020.]
- [21] Ministry of Environmental Protection, Development and Reform Commission, Ministry of Finance. Overall planning of ecological environment protection of lakes with better water quality (2013-2020). Beijing, 2014. [环境保护部, 发展和改革委员会, 财政部. 水质较好湖泊生态环境保护总体规划(2013-2020). 北京, 2014.]
- [22] Zheng P, Jiang XM, Cao L *et al.* Long-term changes in the functional trait composition and diversity of fish assemblages in eastern plain lakes under the regime of river-lake connectivity loss. *J Lake Sci*, 2022, **34**(1): 151-168. DOI: 10.18307/2022.0114. [郑鹏, 蒋小明, 曹亮等. 江湖阻隔背景下东部平原湖泊鱼类功能特征及多样性变化. 湖泊科学, 2022, **34**(1): 151-168.]
- [23] Zhu ZT, Huai WX, Yang ZH *et al.* Assessing habitat suitability and habitat fragmentation for endangered Siberian cranes in Poyang Lake region, China. *Ecological Indicators*, 2021, **125**: 107594. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107594.
- [24] Wang ZQ, Cui AH, Miu JQ *et al.* Research progress on the driving factors of freshwater lake ecosystem degradation and associated restoration techniques. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(18): 6253-6264. DOI: 10.5846/stxb201606281269. [王志强, 崔爱花, 缪建群等. 淡水湖泊生态系统退化驱动因子及修复技术研究进展. 生态学报, 2017, **37**(18): 6253-6264.]
- [25] Zhang GH, Cao WX, Chen YY. Effects of fish stocking on lake ecosystems in China. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1997, **21**(3): 271-280. [张国华, 曹文宣, 陈宜瑜. 湖泊放养渔业对我国湖泊生态系统的影响. 水生生物学报, 1997, **21**(3): 271-280.]
- [26] Xu DL, Cai Y, Jiang H *et al.* Variations of food web structure and energy availability of shallow lake with long-term eutrophication; A case study from lake Taihu, China. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 2016, **44**(10): 1306-1314. DOI: 10.1002/clen.201300837.
- [27] Liu JK ed. Ecological research on East Lake (2). Beijing: Science Press, 1995. [刘建康. 东湖生态学研究(二). 北京: 科学出版社, 1995.]
- [28] Ho JC, Michalak AM, Pahlevan N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature*, 2019, **574**(7780): 667-670. DOI: 10.1038/s41586-019-1648-7.
- [29] Scheffer M, Jeppesen E. Regime shifts in shallow lakes. *Ecosystems*, 2007, **10**(1): 1-3. DOI: 10.1007/s10021-006-9002-y.
- [30] Qin BQ, Gao G, Hu WP *et al.* Reflections on the theory and practice of shallow lake ecosystem restoration. *J Lake Sci*, 2005, **17**(1): 9-16. DOI: 10.18307/2005.0102. [秦伯强, 高光, 胡维平等. 浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践

- 思考. 湖泊科学, 2005, **17**(1): 9-16.]
- [31] Klapper H. Technologies for lake restoration. *Journal of Limnology*, 2003, **62**(1s): 73. DOI: 10.4081/jlimnol.2003.s1.73.
- [32] Yu KJ, Gao ZC. Ecological safe format approach to landscape ecology and environmental protection planning. *Shaanxi Environment*, 1999, (4): 44-45, 43. [俞孔坚, 高中潮. 景观生态和环境保护规划的生态安全格式途径. 陕西环境, 1999, (4): 44-45, 43.]
- [33] Zhao XQ, Tan K, Yi Q *et al.* Construction of ecological security pattern in typical plateau lake basin—A case of the Qilu Lake basin. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 768-777. [赵筱青, 谭琨, 易琦等. 典型高原湖泊流域生态安全格局构建——以杞麓湖流域为例. 中国环境科学, 2019, **39**(2): 768-777.]
- [34] Li MH, Peng SL, Shen WJ *et al.* Landscape ecology and restoration of degraded ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2003, **23**(8): 1622-1628. [李明辉, 彭少麟, 申卫军等. 景观生态学与退化生态系统恢复. 生态学报, 2003, **23**(8): 1622-1628.]
- [35] Turner MG. Landscape ecology: The effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1989, **20**: 171-197. DOI: 10.1146/annurev.es.20.110189.001131.
- [36] Yu KJ. Landscape ecological security patterns in biological conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(1): 8-15. [俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999, **19**(1): 8-15.]
- [37] Scheffer M, Carpenter S, Foley JA *et al.* Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 2001, **413**(6856): 591-596. DOI: 10.1038/35098000.
- [38] Scheffer M. Multiplicity of stable states in freshwater systems. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**(1): 475-486. DOI: 10.1007/BF02530365.
- [39] Meijer ML. Biomanipulation in the Netherlands—15 years of experience. Wageningen University, 2000: 1-208. DOI: 10.1109/48.820749.
- [40] Zhao J, Gao QS, Liu QQ *et al.* Lake eutrophication recovery trajectories: Some recent findings and challenges ahead. *Ecological Indicators*, 2020, **110**: 105878. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105878.
- [41] Scheffer M, Hosper SH, Meijer ML *et al.* Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in Ecology & Evolution*, 1993, **8**(8): 275-279. DOI: 10.1016/0169-5347(93)90254-M.
- [42] Qin BQ, Hu WP, Gao G *et al.* Dynamics of sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(1): 54-64. DOI: 10.1007/BF02901743.
- [43] Qin BQ, Zhu GW, Zhang L *et al.* Estimation of internal nutrient release in large shallow Lake Taihu, China. *Science in China Series D*, 2006, **49**(1): 38-50. DOI: 10.1007/s11430-006-8104-x.
- [44] Zhao L, Liu Y, Li YZ *et al.* Survey on theory and driving factors of regime shifts on lake ecosystems. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(10): 1697-1707. [赵磊, 刘永, 李玉照等. 湖泊生态系统稳态转换理论与驱动因子研究进展. 生态环境学报, 2014, **23**(10): 1697-1707.]
- [45] Lv ZL. Practice and thoughts on comprehensive treatment of water pollution in Taihu Lake. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2012, **40**(2): 123-128. [吕振霖. 太湖水环境综合治理的实践与思考. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, **40**(2): 123-128.]
- [46] Zhan YX, Ji YH, Shen L. Analysis on the role of water transfer to the comprehensive environment management in the Taihu Lake. *China Water Resources*, 2010, (4): 53-55. [展永兴, 季轶华, 沈利. 调水引流在太湖水环境综合治理中的作用分析. 中国水利, 2010, (4): 53-55.]
- [47] Xia W, Zhu Q. Research on Chaohu Lake governance and protection strategy based on the concept of “City-Lake Symbiosis and Green Development”. *China Flood & Drought Management*, 2018, **28**(12): 30-32.
- [48] He J, Xu XM, Yang Y *et al.* Problems and effects of comprehensive management of water environment in Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2015, **27**(2): 195-199. DOI: 10.18307/2015.0201. [何佳, 徐晓梅, 杨艳等. 滇池水环境综合治理成效与存在问题. 湖泊科学, 2015, **27**(2): 195-199.]
- [49] Chinese Research Academy of Environmental Science ed. Lake ecological security strategy. Beijing: Science Press, 2016. [中国环境科学研究院. 湖泊生态安全保障策略. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [50] Ministry of Environmental Protection. Circular on printing and distributing technical guidelines for ecological and environmental protection of rivers and lakes. 2014-12-23. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201501/t20150104_

- 293730.htm. [环境保护部. 关于印发江河湖泊生态环境保护系列技术指南的通知. 2014-12-23.]
- [51] Zheng BH. Reflections on lake environmental governance and protection in China. *Democracy and Science*, 2018, (5): 13-15. [郑丙辉. 中国湖泊环境治理与保护的思考. 民主与科学, 2018, (5): 13-15.]
- [52] Zhang YL, Deng JM, Qin BQ *et al.* Importance and vulnerability of lakes and reservoirs supporting drinking water in China. *Fundamental Research*, 2022 DOI: 10.1016/j.fmre.2022.01.035.
- [53] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China ed. China's Ecological and Environmental Status Report of 2009-2020, 2009-2020. [中华人民共和国环境保护部. 中国生态环境状况公报(2009-2020年), 2009-2020.]
- [54] Cui Q. Huai'an Baima Lake: "Jiangsu Model" of lake ecological restoration. *China Today*, 2020, 69(6): 59. [崔泉. 淮安白马湖: 湖泊生态修复的“江苏样板”. 今日中国, 2020, 69(6): 59.]
- [55] Liu YX, Xiong JY, Huang C. Research on protective development of tourism resource of Qionghai Lake wetland. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(34): 12160-12161, 12295. [刘宇翔, 熊金银, 黄璨. 邳海湿地旅游资源的保护性开发研究. 安徽农业科学, 2014, 42(34): 12160-12161, 12295.]
- [56] Lu L, Tian N, Yu H *et al.* The evolution process and mechanism of Taiping Lake in Anhui Province. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4): 604-616. [陆林, 天娜, 虞虎等. 安徽太平湖旅游地演化过程及机制. 自然资源学报, 2015, 30(4): 604-616.]