

# 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

段昌群, 何峰, 刘嫦娥, 和树庄, 张国盛

(云南大学环境科学与生态修复研究所云南生态建设与可持续发展研究基地, 昆明 650091)

[摘要] 以滇池为代表,从生态系统健康的视角分析云南高原湖泊水环境问题的特点,提出解决问题的宏观路径,对未来重点应解决的关键问题进行了讨论。

[关键词] 云南高原湖泊;水环境;滇池;生态系统健康

[中图分类号] X171.4 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)06-0060-05

## 1 前言

云南是包括长江、珠江、澜沧江等具有重大战略价值的江河流经之地,境内分布的众多高原湖泊成为影响江河水环境的关键区域。湖泊水质优劣不仅影响地方经济社会的发展,而且对地处江河下游我国黄金经济带的水环境安全和社会安全产生影响。

云南高原的湖泊有 30 多个,汇水面积达到 9 000 km<sup>2</sup>,湖面面积 1 164 km<sup>2</sup>,占全省总面积的 0.3%<sup>[1]</sup>。高原湖泊及其所在区域大多是云南省开发较早、利用强度较大、人口特别密集的关键地段。特别是在滇中地区,地处生态交错带,生态环境比较脆弱,经济社会发展水平高,人类影响程度大,以滇池、星云湖为代表的高原湖泊成为我国湖泊受人类干扰程度最大、湖泊质量下降最严重、富营养化问题最突出的地区之一。保护湖泊环境、恢复湖泊生态功能,为区域经济社会发展提供基本的水资源和环境支持,为江河下游重要经济区的水环境安全提供保障,是我国水环境保护及湖泊科学领域的重要任务。

湖泊水体的富营养化是一个迄今为止对其成

因、诱发要素、治理方略都颇有争议的科学技术问题<sup>[2~6]</sup>。生态系统生态学的研究表明,湖泊具有水质自净、水环境维护及水资源的再生性维持的功能,而这种功能实现的前提是湖泊生态系统处于健康状态<sup>[7]</sup>。为此,解决湖泊水环境问题及治理湖泊水污染的核心就是人工创造条件促进湖泊生态系统向健康状态演变,使湖泊这个生命体系具有自我维护、自我更新的能力。但是,长期以来湖泊的水体污染控制及富营养化防治较少从生态系统服务功能修复及维持湖泊良性运转的条件出发,对湖泊水环境好转的条件和生态过程缺乏深入认识和综合把握,从而治理和恢复工作缺乏系统性和前瞻性,对所开展的治理措施和方案缺乏科学引导和理论支持,水环境整治当中缺乏针对性和可预见性。文章从生态系统健康的视角分析云南高原湖泊水环境问题的特点,提出解决问题的宏观路径。

## 2 云南高原湖泊生态系统的自然特点

云南高原湖泊分布在海拔 1 280~3 270 m 的高原面上,除抚仙湖、阳宗海等少数湖床为倾斜度较大、湖岸平直的深水湖外,大多数为湖床倾斜平缓,湖岸弯曲较大,湖底有机质沉积较厚的浅水湖。很

[收稿日期] 2009-11-24

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项研究课题(2009ZX07102-004)

[作者简介] 段昌群(1966-),男,陕西镇安县人,云南大学教授,博士,研究方向为污染生态、恢复生态、生态经济等;

E-mail: cn-ecology@126.com

多湖泊,湖面快速缩小,湖盆变浅,在人类的干扰下快速消亡。据统计,50年代云南水面面积在1 km<sup>2</sup>以上的湖泊有50多个,半个世纪以来20多个湖泊已经消失。目前,包括滇池在内的多个高原湖泊,水质恶化、富营养化程度严重,多年治理效果欠佳,严重影响区域经济社会的发展<sup>[7,8]</sup>。以滇池为代表的云南高原湖泊,大多由于湖泊生态系统自然特点所致健康水平较低,存在的先天不足易于受损退化。

### 2.1 湖泊生态系统脆弱

云南高原湖泊大多地处大河水系的分水岭地带,汇水面积小,源近流短,来水量小,湖泊换水周期长,生态系统脆弱<sup>[8]</sup>。

以滇池为例,该湖泊是云南高原面积最大的淡水湖,作为一高原湖泊,地处珠江水系南盘江的西北、元江水系的东北、金沙江水系之南,为三江分水岭地带。在其海口以上(滇池唯一出水口)流域面积为3 050 km<sup>2</sup>,湖面面积为294.5 km<sup>2</sup>,约占流域面积10.0%。集水区小,来水量少,补给系数仅9.78,仅及太湖补给系数15.6的62.6%。滇池东、西、北三面山岭环绕,中部为冲积平原和湖面,滇池水体是滇池流域内地表径流及地下水在低洼湖面的暂时停留,从而湖水主要靠分水岭内30余条大小河流的地表水补给。由于特殊的地理条件,使各河流水源源近,流程短,同时地域内广泛分布石灰岩地貌,地下渗漏率高,地表水补给量很少<sup>[1,9]</sup>。滇池流域终年总降水量为 $29.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,蒸发量为 $17.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,流域总产水量为 $12 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;入湖水量为 $9.235 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,出湖水量为 $9.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,即在正常年份,滇池水体仅能在目前这种水平上略保平衡。在湖面高程为1 885.9~1 887.0 m,年调节水量仅为 $3.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

云南其他湖泊与滇池基本类似,与太湖、巢湖等东部湖泊相比,云南湖泊生态系统的水资源保障能力十分低下(见表1)。

### 2.2 湖泊水环境敏感

云南高原湖泊大多为构造湖泊,湖水完全依靠集雨区的降雨补充,入湖支流水系多,出流水系很少,营养盐易于积聚<sup>[9]</sup>。

云南高原湖泊为断陷形成的构造湖,湖水的来源依靠降雨;而湖区所在区域大多数为云南的少雨区,年降雨量800~1 100 mm,且全年80%~90%的雨量集中在5~10月的雨季,蒸发量一般在1 200~1 800 mm,大于降水量,成为云南少水区。湖泊一

般地处断裂带或各大水系的分水岭地带,如滇池位于金沙江支流普渡河的上游和珠江水系的南盘江源头,抚仙湖和洱海分别位于南盘江的源头和红河及澜沧江的分水岭地带。大多湖泊可比喻为“山顶上的一团水”。入湖水流多而短,出流河道往往很少,相当一部分湖泊如滇池、抚仙湖出流河道只有一条,营养盐入湖后排出的数量很小,大多在湖泊内滞留,湖泊富营养化的自然压力很高。不仅如此,很多湖泊在其他自然和人类因素作用下,更容易积聚营养盐。

表1 云南典型湖泊生态系统水资源条件

Table 1 Profiles of water resource of some lakes in Yunnan, China

湖泊	汇水面 积/km <sup>2</sup>	补给 系数	流域年产水量 /湖泊水容量	换水 周期/a
滇池	2 920	9.78	0.81	2.70
洱海	2 785	10.14	0.28	3.50
太湖(参比)	36 500	15.0	1.65	0.83
巢湖(参比)	9 258	12.0	2.15	1.86

滇池、抚仙湖、星云湖、阳宗海等湖泊还受地球化学元素的深刻影响。如滇池地区是地球化学因素中磷的富集区,表面磷的本底值为0.32%,比一般地区的0.1%高三倍以上。磷是湖泊富营养化的限制因子。磷的进入是藻类大量繁殖引起水体透明度下降的主导因素。有关研究结果表明,每增加1 g磷可使藻类增殖达110 g<sup>[10]</sup>。作为富集区,自然的淋溶作用水土流失,每年有大量的磷进入滇池,由于滇池的封闭性,经水体相互交换排出磷的机会较小,导致磷在区域内向心性移动,在滇池累集,使水体富营养化加深。

### 2.3 湖泊生态系统封闭

云南高原湖泊呈现半闭流的特点,营养物质一旦入湖,从湖泊排出水平很低,在人类的影响干扰下湖泊富营养化发展速度快<sup>[8]</sup>。滇池地区位于北回归线附近,处于全球生态系统的脆弱区域中,在全球变化和认为人为影响的作用下,这里的以常绿阔叶林为地带性植被转变为云南松林的次生演替中,反映了生境条件由湿生向旱生的逆向演替,且森林植被覆盖率很低,仅为16.5%,生态系统中生物成份单一、结构简单,自我保障能力差,为地区性的生态脆弱带。

滇池地区的土地由低向高依次为湖面、坝平地、台地丘陵、山地,面积比相应为1:2:3:6。以湖面为中心四周的地形起伏大,没有比较大的开口同外部

环境相通。在这种立地条件下,区域内自然的物质流动呈向心性方向,作为湖面自然地成为大多数物质循环的归宿。包括滇池流域在内的滇中地区,山地—盆地—湖泊(河流)这类以地理界限为标志的生态系统比较典型。在这种生态系统内,物质基本上是从山地向湖泊单向流动,不成一个封闭的循环体系,从而先天性就比较脆弱,在人类的干扰和破坏下,特别是随着人口压力的加大和人类对环境影响能力的增大,使这种脆弱的生态系统难以实现基本的功能<sup>[11]</sup>。

### 3 湖泊生态系统对人类破坏和扰动的响应

在高原条件下,人类对湖泊生态系统高度依赖,过度利用,使湖泊受损和退化严重。

#### 3.1 湖泊生存的生态空间极度萎缩

云南高原地区地形起伏大,平坦的土地资源十分稀缺,湖盆地尤其是湖滨区自然成为当地经济社会发展的最好土地资源,从而临近湖泊区域人口密集,城镇化高度发展,产业布局高度密集,土地利用强度极高,污染物产生负荷量大。

以滇池为例,流域内人口为332万人,人口密度达到1136人/km<sup>2</sup>,流域面积只有全省面积的0.78%,却聚集了全省7.5%的人口。全省工业企业的40%、全省25.3%工农业生产总值、44%左右工业总产值、1/5社会商品零售额在这个弹丸之地完成。目前昆明正是实施现代新昆明城市发展战略,昆明市城区将从现在的180 km<sup>2</sup>发展到460 km<sup>2</sup>,人口由245万发展到450万,城市空间快速拓展,湖泊自然土地空间全面萎缩。更为重要的是,伴随滇池流域城市化的进程,城乡边际区域逐渐扩张,边际区域内农业格局将呈现较大的调整,设施农业会得到快速发展,农田面源污染强度将可能显著增大,此前作为半自然状态的农业生态系统将沦为高强度的人工控制之下,曾经可以作为湖泊生态空间的农田生态系统将丧失支撑湖泊生存和发展的能力。滇池流域湖滨区绝大多数已经成为城市的建成区或规划建设区,城市包裹湖泊、湖泊沦为城市内湖的情景正在发生,湖泊生存所需的基本空间几乎丧失,只有连接湖泊的河道输送质量低下的水源,低层次维持湖泊的生命。

#### 3.2 湖泊生态用水全面挤占

云南地形起伏很大,地貌结构有广泛的夷平面、高山深谷和盆地交错分布而成。其中盆地面积较

小,河流切割作用使大量江河中的水资源从深陡的河谷中流过,难以利用,而高原面上的湖泊提供的水资源便成为区域经济社会最主要的水资源。因此,高原湖泊的水资源利用强度很高。特别重要的是,入湖河流在从周边山地进入山间盆地注入湖泊之前,大多被水库和坝塘截留,通过管道和水渠输入城镇、工业和农业生产生活环节,湖泊生态用水被挤占。

滇中地区是云南高原湖泊最集中分布的区域,也是全省经济社会发展的核心区域。从经济社会地位上来看,滇中包括7个地区,41个县区,12万 km<sup>2</sup>,人口1800万,面积占全省30%,工业和农业占全省79%和51%,GDP占全省70%,人均财政收入水平高于全省平均水平1.8倍。而从水资源条件来看,该区域水资源总量仅为全省3.6%,单位面积水资源量为仅为全省均值的三分之一。以滇池为例,多年水资源量仅为 $5.7 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,人均水资源量只有260 m<sup>3</sup>,为全省人均水资源量的1/19,只有我国人均水资源量(2700 m<sup>3</sup>/人·年)的1/8,为世界人均水资源量的1/25,比北方京、津、唐地区还少。

#### 3.3 湖泊水资源再生性维持条件丧失

根据云南高原湖泊地形地貌特征、土地利用类型及污染物输出特征,整个流域可分为三大单元:水源控制区、过渡区与湖滨区。以滇池为例,由于流域先天缺水,流域内各入湖河流在进入滇池湖盆之前都被大小不同的各级水库和坝塘截留,通过管道供给城镇生产和生活用水。这些水库和坝塘控制线以上的山地区域称为水源控制区。该区域的面积为1370 km<sup>2</sup>,占流域面积的43%。水源控制区以下至湖滨区之间的地带为过渡区,主要由台地、丘陵组成,面积约1250 km<sup>2</sup>,是流域农业主要用地,这里坡耕地、梯地比例大,是传统农业最集中的区域。过渡区至湖岸之间的地带为湖滨区,主要是环湖平原,面积约300 km<sup>2</sup>。

目前在水源控制区,由于水库和坝塘的作用,该区域的汇集的径流主要输送到城镇和工厂企业,很少能够通过河道补充进入滇池;在滇池湖滨区,已经被昆明城市、城镇化和工厂企业所割据,全面的城市化景观使该区域丧失了自然水文功能;在滇池过渡区,平缓的坝地大部分被城市新区和新设立的各种开发区占用,农业用地被挤压到台地和丘陵地带,这里农业开发利用强度不断加大,化肥和农药使用强

度越来越高,农业尾水污染强度大,降雨形成的径流淋洗高污染强度的土地,使汇集出来的水流成为滇池流域污染负荷最大的来源。

不难看出,流域空间格局的完整性遭到破坏,流域陆地生态系统对湖泊清洁水资源的不同能力瓦解,湖泊缺乏水资源再生性维持的基本条件。

## 4 水环境问题的系统诊断和整体解决思路

### 4.1 湖泊水环境问题的系统诊断

云南高原湖泊水环境质量的退化问题,是一个复杂的系统工程。涉及自然、经济社会多方面的诸多因素。特别是湖泊的自然生态系统的特点区别于我国东部平原地区的湖泊。如滇池区域物质流动呈向心性集中,封闭性大,湖泊老化发展,自我更新能力低;地处三江之源,源小流短,水量有限,水体自我更新能力小;位居地球化学因素磷的富集区,同时又位于生态系统的脆弱带上,从而使滇池区域生态系统以滇池水面为中心,背景负荷量大,环境容量低,生态系统脆弱,自我维持和保证能力低,生态环境容量小,对外界影响的缓冲力和抵抗力也差。同时,流域水资源先天紧缺,水资源的配置错位和环境污染加剧了水资源的供需矛盾。水荒问题突出,水污染严重。滇池水环境对区域社会经济的影响已初见端倪。如果这个问题得不到尽快、很好地解决,昆明很可能因水环境恶化而城市走向衰落。

对云南高原湖泊在水环境问题的分析,可以得出这样的诊断结果:

- 1) 污染表现在湖泊中,症结还在流域内;
- 2) 问题出在水面上,根子还在城镇乡村的陆地中;
- 3) 环境问题最根本的原因还是经济社会发展思路的问题。

### 4.2 重新定位湖泊水环境治理的目标

长期以来,在环境保护中存在的普遍现象是:保护什么,就失去什么。之所以出现这种现象的根本原因在于:当在做保护工作时,往往的思路和做法是:当保护什么,就认为这个东西很重要,不能影响它;但是,相应地却认为其他东西就不重要,因此可以影响它、干扰他,甚至为了弥补因保护哪个东西带来的损失,反而变本加厉地利用和开发所谓不重要的东西,这样所谓不重要的东西就日益丧失;但是正是这些不重要的东西构成了重要东西存在和发展的条件,因此当这些不重要的东西消失时,重要东西也

随之消失。在这种就事论事的保护策略中,保护的力度越大,保护对象受损也越大,保护对象的健康状态恶化的速度也越大<sup>[7]</sup>。

在湖泊水环境保护时,湖泊是保护的主体,湖泊维持生存和发展的支撑条件是流域内的陆地生态系统,只有当陆地生态系统是健康时,湖泊生存的条件才能得到保障,湖泊自身水生态系统好转的成果才能得到巩固。我们认为,把恢复湖泊生态系统健康作为高原湖泊水环境治理的目标是至关重要的。

长期以来,在湖泊水环境的治理方面仅仅把目光盯在物理和化学形态的水上,而没有考虑到充沛、洁净的水来自湖泊生物地球化学良性循环的过程中,那么这种治理将可能使湖泊永远都停留在永无休止的依靠人工支持系统(工程性)维持生存的救火状态中。而一个健康的湖泊之所以能够长期不断地为人类社会提供清洁的水质,维持水环境处于一个良好的状态,关键在于湖泊生态系统具有生态服务功能,是一个生命体,具有吐故纳新、新陈代谢的能力。为此,应从生态系统的视野构建湖泊生命体系。

### 4.3 湖泊水问题整体解决思路

鉴于高原湖泊特殊的生态系统特点,高原湖泊水环境保护不仅要象所有湖泊治理一样,从全流域的角度,采用工程、经济、社会等诸多措施进行综合整治,减少外源污染,治理内源污染,还要提高全流域的生态系统健康水平,为水域生态系统的良性运转提供条件。

对云南高原湖泊水环境问题的解决,整体上需要调整治理方略:

- 1) 跳出水体治理水污染——提高陆地生态系统对湖泊水资源的再生性维持能力尤为重要;
- 2) 跳出湖泊解决湖泊问题——降低城市及其发展对湖泊生态系统的污染负荷;
- 3) 跳出环境问题解决环境问题——优化流域生态经济结构和空间布局至为关键。

由于高原湖泊水环境的更新和维持在根本上依赖流域汇水区区内水资源的补充能力和污染物的输移水平,从而湖泊水域生态系统的健康能力决定于全流域的生态系统结构和功能状态。因此,除了常规的控制污染源、为湖泊休养生息创造条件以外,还需要恢复湖泊生态系统健康、为实现流域清水产流以服务和支持湖泊水环境的根本好转提供保障。后者这项工作,其难度和需要耗费的时间可能比污染源

控制更为艰巨。因此,在目前广泛对湖泊进行控源治理的同时,也需要尽快开展流域生态修复和重建工作,这对于高原湖泊而言,尤其重要和迫切。为了恢复和提高流域的生态健康水平,重点需要做好以下两点:

1) 优化全流域生态系统结构,这是恢复湖泊生态系统健康的重点;

2) 构建陆地生态系统良性运转的保障体系,这是促进湖泊水环境好转的核心。

目前,除了对湖泊的水源控制区进一步做好保护和修复工作以外,要尽可能在过渡区和湖滨区构建生态屏障,提高该区域人工或半人工化的生态系统在水资源与水环境改善方面的作用。例如,在城市和农田等面源污染负荷较高的景观中增加绿色廊道和各种异质斑块,形成物理的或生物地球化学的生态屏障,在污染物运移过程中进行拦截并促进其向无害形态转化。常见生态屏障包括带状植被缓冲带、人工湿地和植物篱等。结合景观格局优化和生态环境功能的需要,进行面源污染削减的最小生态屏障(minimum ecological barrier)设计研究<sup>[12]</sup>。包括带状植被带植物种类的优化配置、带宽生态设计的合理性分析、人工湿地的面积和最小容积分析、植物篱的格局优化等。

#### 4.4 维持湖泊生态系统健康的工作重点

为了重构湖泊的生命支撑系统,提高全流域的生态系统健康水平,笔者等认为未来研究应着重解决注意如下关键问题:

1) 从传统的就水治水的思路向通过人工积极干预以创造条件帮助恢复湖泊及流域生态健康;

2) 湖泊水环境已经与其所在流域形成了一个相互支撑、互动发展的生态经济系统,如何进行优化使该生态经济系统能够满足流域生态系统健康的需

要在当前经济社会快速发展时尤显重要;

3) 尽快揭示高原湖泊生态系统能够良性运转的条件,尽快寻找人类良性干预帮助湖泊实现这个自然过程的关键切入点;

4) 对业已开展的面源截污、点源控制、内源清理、生态修复等技术和工程手段进行回顾性分析,理解这些手段对湖泊的生命恢复产生的作用,明确未来制定技术方案和工程措施的时空优化方案。

#### 参考文献

- [1] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京:科学出版社,1998: 1-42
- [2] 金相灿,稻森悠平,朴俊大. 湖泊和湿地水环境生态修复技术与管理指南[M]. 北京:科学出版社,2007:3-14
- [3] Schindler D W , Hecky R E. Eutrophication: more nitrogen data needed[J]. Science, 2009, 324: 721-722
- [4] Schelske C L. Eutrophication: focus on phosphorus[J]. Science, 2009, 324: 722
- [5] Bryhn A C , Lars Hakanson. Eutrophication: model before acting [J]. Science, 2009, 324: 723
- [6] Javoby C A , Frazer T K. Eutrophication: time to adjust expectations [J]. Science, 2009, 324: 724
- [7] 段昌群,杨雪清. 生态约束与生态支撑—对生态环境问题与经济社会发展互动关系的探讨[M]. 北京:科学出版社,2006: 26-43
- [8] 姜汉侨,段昌群,杨树华,等. 植物生态学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社,2009:1-36
- [9] 曲仲湘,王焕校. 云南高原“四湖”的生态问题与生态后果[M]. 昆明:云南科技出版社,1987:1-21
- [10] Winfried Lampert, Ulrich Sommer. Limnoecology: the ecology of lakes and streams[M]. USA: Oxford University Press,2007
- [11] Dobson M , Frid C. Ecology of aquatic Systems[M]. USA: Oxford University Press,2009
- [12] 彭 华,段昌群. 纵向岭谷区生态系统的稳定性与修复重建[M]. 北京:科学出版社,2009:368-376

(下转 70 页)