



当代
杰出青年
科学文库

翻阅巢湖的历史

——蓝藻、富营养化及地质演化

谢 平 著



科学出版社
www.sciencep.com

当代杰出青年科学文库

翻阅巢湖的历史 ——蓝藻、富营养化及地质演化

谢 平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一部从淡水生态学、湖沼学、遥感、水文学、古环境演化等视点分析巢湖的蓝藻、富营养化及地质演化历史的专著。全书共分为十章,第一章描述巢湖蓝藻的历史演变和空间格局,第二章介绍巢湖湖水和水产品中微囊藻毒素(MC)的污染现状,第三章描述巢湖沉积物和流域表层土壤中的氮和磷的分布格局,第四章介绍巢湖氮、磷输入和湖水中氮、磷浓度的历史变化,第五章描述巢湖泥沙淤积的历史变化过程,第六章分析巢湖生态系统的巨大变化,第七章比较巢湖和太湖的水生态系统特征,第八章从众多湖泊看巢湖的富营养化,第九章从流域特征展望巢湖和太湖的未来,第十章介绍巢湖的地质历史变迁。

本书重点论述巢湖的蓝藻水华、富营养化和地质演化,并试图通过与太湖及其他湖泊的比较,更深刻认识巢湖富营养化问题的特性。本书可供湖泊学、环境生物学、藻类学、生态学、生态水文学、水环境遥感、水产学、古湖沼学、环境地球化学、水环境工程等相关领域的研究人员和管理人员、大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

翻阅巢湖的历史:蓝藻、富营养化及地质演化/谢平著. —北京:科学出版社,2009

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 978-7-03-023205-2

I. 翻… II. 谢… III. ①巢湖-蓝藻纲-藻类水华 ②巢湖-富营养化
③巢湖-古环境-水文地质 IV. Q949.22 X321.254 P641.625.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 161402 号

责任编辑:韩学哲 席 慧/责任校对:张 琪

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 2 月第一次印刷 印张:14

印数:1—2 000 字数:260 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

2007年5月发生在太湖无锡贡湖水厂的饮用水污染事件，使政府和民众对湖泊富营养化和蓝藻水华问题空前关注！市民闻蓝藻色变，一些政府官员急功近利，到处打探速效控制蓝藻的良方妙药。遗憾的是，目前仍无法找到能在数百乃至数千平方公里范围控制蓝藻水华的有效技术。在一些大型湖泊，数亿乃至数百亿的资金仍然挡不住碧波滚滚的蓝藻水华，治理技术的合理性备受质疑，政治家的承诺和科学家的豪言壮语接二连三地化为乌有，无论是政府的公信力还是科学技术的威力都面临空前挑战。一些网民甚至声称要控告一些通过鉴定并取得“重要成果”的首席科学家……，等等。从普通百姓、科学家到政府官员对大型湖泊的蓝藻和富营养化治理深感茫然和无助，不知如何才能与湖泊和谐共存！

湖泊的富营养化和蓝藻问题可谓冰冻三尺，非一日之寒！遗憾的是，很多人热衷于速效速成，崇尚应急思维，一些“先进”技术也许可以有效解决数平方米的问题，但面对数千平方米的蓝藻水华也只能是沧海一粟！人们的认知也在经历着痛苦的煎熬，以前满以为水体的自净力是无限的，因此放纵污水尽情排放，当如梦初醒时，又以为控制污水排放很快就能解决问题，于是乎就喊出了太湖“零点行动”及“2000年太湖水变清”这种令国人无法忘怀的洪亮口号，遗憾的是这终究还是变成了不了了之的空洞的政治豪言。之后，一些人（这中间真正的植物学行家并不多）开始幻想用生态修复（特别是种植水生植物）来彻底解决这一问题，转眼间，生态修复的口号响成一片，甚至雄心勃勃地要在一些原本就不适合植物生长的地方圆其梦想，其结局可想而知，收获的只能是失败和教训！缺乏对很多湖泊生态（特别是植物群落）演化的了解，何以能成功进行生态修复？就像是一个不懂人体解剖和生理的人来操刀，后果可想而知！大型富营养湖泊治理面临的困难和挑战几乎超出了所有人的想象，用“万念俱灰”形容都不为过！无奈之下，最近一些科学家开始思索和关注轻度或中度富营养化湖泊的防退化、生态修复和保育问题，这或许是科学家和政府未来需要关注和努力的重要方向之一。就如医学上需要治癌症的方法，也需要治感冒的方法，还需要进行保健和健康调理一样。但是，有多少人知道何谓一个健康的湖泊生态系统？现在的湖泊是如何发展演化而来的？

大量惨痛的失败和教训告诉我们，湖泊的蓝藻水华和富营养化治理亟待回归理性。医生治病，需要了解人的结构和生理。同样的道理，治理湖泊需要先认识具有系统完整性的湖泊及与其密切相关的流域。湖泊既是一个物理系统，又是一个化学系统，还是一个生命系统，并且发生着极为复杂的相互作用，推动着湖泊

的发展与演化。事实上,湖泊是一个各种过程交织在一起的极为复杂的生态系统,并且在不断变化之中,以天、月、年、十年、百年、千年乃至万年为时间尺度。湖泊并不是地球上与生俱来的,也不是永恒的,它是地球地质过程(内、外营力作用)的产物,经历着从诞生到消亡的历史过程,在此期间,许多湖泊受到气候变化的影响,还会出现反复的扩张与收缩。一般来说,在千年以上的时间尺度上,湖泊的演化主要是一种自然过程,然而,近千年(特别是近百年)以来,人类活动(譬如围垦、水利调控、氮磷等污染物排放、生物资源过度利用等)的影响日益强烈,许多湖泊已是面目全非,富营养化日益严重,有毒蓝藻水华频繁暴发,严重威胁人类的饮水安全。

在陆地生态系统,人们关注土壤的贫瘠化问题,想方设法希望将氮(N)、磷(P)留在系统中。而湖泊是整个流域物质的汇集地,来自陆地生态系统的N、P大量进入湖泊、河流等水生态系统中,导致其中的N、P增加数倍甚至数十倍!事实上,湖泊的富营养化过程十分复杂,不仅深受人类活动(有时十分强烈)的影响,还叠加了自然过程。湖泊中的N、P受控于一系列复杂的界面交换过程,譬如,水-陆界面、水-气界面、水-泥界面等,其中,土壤和沉积物的岩性(譬如含磷地层)也会有重大影响。而蓝藻水华的暴发机制更是复杂,它是一系列非生物环境和生物环境要素综合作用的结果,当然,毫无疑问,无数经验事实告诉我们,N、P富集是湖泊蓝藻水华暴发的最根本原因。

太湖、巢湖和滇池均以蓝藻水华严重暴发而闻名中外,也是我国目前正在重点治理的三个大型富营养湖泊。它们均位于长江流域的亚热带气候区,其中滇池位于云贵高原,巢湖和太湖位于长江下游,太湖面积最大(2338 km^2),巢湖次之(760 km^2),滇池最小(300 km^2),平均水深滇池(5 m)>巢湖(3 m)>太湖(1.9 m)。太湖是在海湾和河流共同作用下所形成的古潟湖;滇池属断层陷落形成的构造湖;巢湖位于大地构造单元的转折地带,也是在构造盆地基础上发育起来的断陷构造湖泊。本书的主要对象为巢湖。从地理上来看,巢湖流域($13\ 350\text{ km}^2$)位于安徽省中部,东南濒临长江,西接大别山山脉,北依江淮分水岭,东北邻滁河流域,属于长江下游左岸水系。从地质背景上来看,巢湖处在华北板块和扬子板块的交汇地带,也位于两个重要的造山带——大别造山带和张八岭造山带的转折地带,而且与大别山造山带垂直的深断裂——郯庐断裂正好穿过巢湖,并且一系列断裂在巢湖湖盆周围发育,因此,巢湖湖盆还处在活跃的变化之中。

有关巢湖的专著很少,屠清瑛等(1990)出版了书名为《巢湖——富营养化研究》的专著,在一些专著中对巢湖的水环境问题也有一定程度的介绍,如《中国湖泊环境》第二册(金相灿等,1995年),《中国五大淡水湖》(窦鸿身和姜加虎,2003年),《长江中下游湖泊环境地球化学与富营养化》(范成新和王春霞,2007年)。本书聚焦巢湖的蓝藻水华、富营养化和地质演化历史及其可能的联

系。此外,本书试图通过与太湖和其他湖泊的比较,刻画巢湖问题的特性和本质。需要指出的是,本书并不是想要给出治理巢湖的良方妙药,但试图解剖巢湖生态系统及其流域的特征,分析巢湖的“病”因,为未来巢湖的蓝藻和富营养化治理并最终将其建成一个水质良好、生物丰富多样(理想的是接近未受人类活动干扰前的自然的群落结构)、人与自然和谐共存的系统提供若干知识铺垫。

本书共分为十章,第一章介绍巢湖蓝藻的历史演变和空间格局,巢湖发生蓝藻水华(湖靛)的历史悠久,最早可追溯到19世纪末,这至少可以说明,早在100多年前,巢湖就具备了发生一定规模湖靛的营养条件,而湖靛在历史上曾是很受巢湖沿岸农民重视的一种天然肥料。20世纪50年代,首次科学记载了巢湖蓝藻水华的主要种类。60年代,数量上蓝藻(主要是微囊藻)占绝对优势;80年代,数量上微囊藻一统天下,西湖区显著高于东湖区;90年代,数量上微囊藻依然占优势。到了21世纪初,才有了藻类生物量的资料,从年平均生物量来看,蓝藻仅占浮游植物总量的3成,蓝藻中鱼腥藻为第一优势种,微囊藻次之,夏季蓝藻仍然占优势。以蓝藻生物量 $>10\text{ mg/L}$ 作为蓝藻聚集成水华的标准,2002~2003年巢湖夏季蓝藻水华的覆盖面积略达西部湖区的 $1/4$;根据卫星遥感影像资料,4~11月均有明显蓝藻水华,绝大多数情况下聚集在西湖区,最大蓝藻水华覆盖面积略占全湖区面积的 $1/4$ 。

第二章介绍巢湖的微囊藻毒素(MC)污染。由于近几年才开始进行巢湖湖水和水产品中微囊藻毒素含量的研究,因此谈不上回顾历史。初步结果表明,巢湖湖水和十几种水产品的不同器官中均有不同程度的MC污染,有的远超过世界卫生组织建议的标准。2002~2003年期间,平均胞内MC浓度西湖区略高于东湖区,西湖区最高MC含量为 $4.6\text{ }\mu\text{g/L}$,单个采样点最高胞外MC浓度达 $17.3\text{ }\mu\text{g/L}$,远高于世界卫生组织的指导值($1\text{ }\mu\text{g MC-LR/L}$),胞外(释放到水中)的MC远低于 $1\text{ }\mu\text{g/L}$ 。在一些水产品(鱼、蚌、螺)的不同器官中均检测出有含量不等的MC,譬如,2003年9月,8种鱼类每100g肌肉(鲜重)含 $2.64\sim 49.7\text{ }\mu\text{g MC-LR}_{\text{eq}}$,超过世界卫生组织对MC-LR规定的临时性TDI值的 $1.3\sim 25$ 倍。水生动物卵和性腺中大量累积MC,表明MC对动物及人类的生殖毒性不容忽视。

第三章介绍巢湖沉积物中的氮、磷分布格局。巢湖沉积物TN和TP的垂直分布格局十分复杂,很难找到两个垂直分布格局十分相同的沉积柱,这可能缘于复杂的地质背景以及复杂的水动力过程。但是无论是TN还是TP,表层(0~10cm)多数呈现出显著上升的趋势,而且西部湖区一般高于东部湖区。1987~1988年,巢湖全湖表层沉积物中的平均TN含量 0.67 mg/g ,TP含量 0.51 mg/g ;2006年,巢湖全湖平均TP含量为 0.55 mg/g ,即在过去的20年期间,巢湖表层沉积物中的TP含量仅有轻微上升。巢湖流域表层土壤中的TP含量平均为 0.54 mg/g ,与巢湖表层沉积物中TP含量惊人的相似。以下特性可能与巢

湖北岸的含磷底层（地表风化产物经径流冲刷以及开采磷矿过程中的尾矿粉和尾矿水排入巢湖）有关：①TP 的本底含量高，有时甚至超过 TN；②表层沉积物中的 TP 有从北向南递减的趋势。沉积物中高 TP 本底浓度也许是巢湖蓝藻水华发生历史十分悠久的重要原因，这可能给巢湖的富营养化治理也增加了难度。

第四章介绍巢湖氮、磷输入和湖水中氮、磷浓度的历史变化。早在 20 世纪 80 年代初，巢湖湖水中的 TP 就达到 0.129 mg/L（而太湖同时期 TP 仅有 0.02 mg/L），TN 为 1.7 mg/L，这与巢湖沉积物中 TP 本底含量高的结论一致。在主要入湖河流中，杭埠河-丰乐河占径流总量的 55.5%（多年平均）。而河流中的 TN、TP 浓度，以西部的南淝河最高，杭埠河-丰乐河的 TN、TP 水平最低或接近最低。1987 年的 N、P 收支研究表明，巢湖 N 的滞留率 39.5%，P 的滞留率 34.0%；1986~1995 年期间，巢湖年平均 TN 负荷为 38.0×10^3 t，年平均 TP 负荷为 2.9×10^3 t。湖水中 TN、TP 浓度西湖区显著高于东湖区，在西部湖区中又以南淝河入湖区最高。在 1984~2006 年期间，西部湖区的 TN 和 TP 高位波动，平均 TN 2.85 mg/L，TP 0.256 mg/L。1982~2007 年期间，TN 和 TP 大幅波动，经历了逐渐升高，1995 年达到顶峰，然后又逐渐回落的历程。地表径流对湖水中的 TN、TP 浓度的影响是双重的，既增加污染负荷，又增加 N、P 的流出，丰水年份（缩短湖水的滞留期）有利于降低巢湖湖水中的 TN、TP 含量。引江济巢被认为是目前最有效的“应急生态换水工程”，建议国家有关部门高度关注和重视长江水质保护问题，尽快弄清长江干流的环境承载力，确定合理的水质目标，以此为依据，控制各区域或支流的输入量，确定江-湖连通湖泊所需达到的水质标准，制定合理的江湖连通及综合生态修复计划。

第五章介绍巢湖泥沙淤积的历史变化。巢湖与其入湖河流及长江之间存在十分复杂的水量、泥沙及生源要素（N、P）的输移与交换关系，泥沙输移还显著改变巢湖流域的地形地貌，影响湖泊中 N、P 的行为和归趋。泥沙淤积受到流域降水、径流和人类活动（水利工程、土地利用）等一系列错综复杂因素的影响。近几十年来，巢湖流域土地利用格局，西南部山区（杭埠河上游）森林被大量砍伐，导致森林覆盖率显著下降，水土流失严重，向巢湖输送大量泥沙。根据水沙监测资料，1962 年巢湖闸竣工后，长江江水的入湖（通过裕溪闸）量及其所携带入湖的泥沙量大幅降低，20 世纪 90 年代以来，巢湖闸年均输沙率呈减小趋势，可能得益于造林绿化使下垫面条件改善，因而减少了水土流失。基于水沙平衡研究，1951~1983 年期间，巢湖淤沙速率 1.11 mm/a（不包括推移质）或 2.08 mm/a（包括推移质）。根据 1982~2007 年期间的淤沙速率、TN 和 TP 负荷以及滞留率，推算巢湖现在表层 5 cm 沉积物中的 P 的含量应该为 0.48 mg/g，N 的含量为 7.26 mg/g；将推算值与实测值进行比较表明，TP 十分接近，TN 实测值不到推算值的 1/4，超过 3/4 的应该滞留的 N 可能通过反硝化作用已经散失。1982 年以来，巢湖的 P 似乎达到了平衡状态，滞留的 P 几乎包埋在表层

0~5 cm的沉积物中,而且这一新生沉积物中的 TP 含量与 1987~1988 年采集的表层沉积物相比十分接近。由于 N 的输入量远大于 P,虽然滞留湖中的大量的 N 可能通过反硝化作用已经散失,0~5 cm 表层沉积物中的 TN 含量仍然有明显上升。

第六章描述巢湖生态系统的巨大变化。回顾巢湖流域生态系统的巨大变化对了解和预测巢湖生态系统的未来演变趋势十分重要。当然,在较短的时间尺度(譬如近几十年)上,这种变化主要是由人类活动引起的。今日的巢湖已大幅萎缩,据考证古巢湖面积约有 2000 km²,为现在巢湖的 2.6 倍,原有的 360 多个湖汊、湖湾已荡然无存。1962 年巢湖闸竣工后,长江江水的入湖(通过裕溪闸)量降低到原来的 1/9,巢湖最低水位平均升高近 1.5 m,原来的丰水季节也可出现最低水位。由于污染物的大量排放,1987~2006 年期间,西北湖区沉积物中 TP 水平大幅升高。有意思的是,在过去的 25 年间,水质指标经历了稳步上升到逐渐回落的过程。在过去的半个多世纪,生态变化巨大:水生植物覆盖率大幅下降(30%→1%),蓝藻的天敌——食藻鱼类(鲢、鳙)的比例大幅降低(38.3%→2.6%),而食浮游动物鱼类的比例却大幅上升(31.4%→74%),这也大大降低了大型浮游动物对小群体蓝藻(一般这种小群体是春季蓝藻复苏和开始增长的主要形式)的牧食压力。

第七章比较巢湖和太湖水生态系统的特征。在水文特征方面,太湖为巢湖面积的 3.1 倍,容积的 2.3 倍,滞留时间的 1.8 倍,水深的 2/3,太湖水位年内和年际变化也要小得多。1987~1988 年,太湖和巢湖湖水和沉积物中的 TN 水平基本接近,TP 水平则是巢湖远高于太湖;但是,2001~2006 年,太湖湖水中的 TN 浓度反超巢湖,两湖之间 TP 浓度的差异有所缩小,太湖湖水中的平均 TN/TP 比达 34.4,而巢湖仅为 11.7,相差近 3 倍!太湖比巢湖浅,理论上更适合水生植物生长,但是历史上巢湖的水生植被覆盖率高于太湖,现在却几近消失,20 世纪 60 年代初巢湖闸的修建导致的冬春季巢湖水位的大幅抬升可能是巢湖水生植物衰退的根本原因。巢湖蓝藻水华的发生历史可能早于太湖,太湖以非固氮的微囊藻占绝对优势,而巢湖中以固氮的鱼腥藻占优势,其次才是非固氮的微囊藻,这可能与巢湖较低的 TN/TP 有关。由于巢湖更为狭长,而太湖东北部分布又有若干大的湖湾,在盛行东南风的情况下,蓝藻容易在巢湖西部湖区和太湖北部湖湾聚集。遥感影响资料显示,太湖水华的覆盖面积超过巢湖。从空间上来看,巢湖蓝藻危害的重灾区在西部湖区,而太湖蓝藻危害的重灾区在北部湖湾。合肥市已停止从巢湖取水,巢湖西部现仅作为合肥备用水源地,只有巢湖市的水源地位于巢湖东部靠近裕溪河河口附近,而巢湖蓝藻主要堆积在西部湖区,因此,蓝藻堆积对巢湖饮用水源的风险相对较小。而太湖北部湖湾(特别是对无锡市来说)是重要的饮用水源地,又是蓝藻的大量堆积区,因此饮用水源面临的风险巨大。

第八章从众多湖泊看巢湖的富营养化。中国六大淡水湖均属浅水湖泊,平均水深 1.9~6.4 m,换水周期与流域面积和湖泊面积之比呈反比关系,巢湖的换水周期约在中等水平,比滇池和太湖短,比鄱阳湖、洪泽湖和洞庭湖长。湖水中的 TN 水平巢湖、太湖和滇池外海相似,TP 浓度太湖明显较低,TN/TP 比太湖为巢湖和滇池的 3 倍。长江中下游 34 个湖泊(2003 年 4 月)中,巢湖的 TN 和 TP 均明显超过平均水平,而太湖的 TN 超过平均水平,TP 在平均水平以内。长江中下游 30 个湖泊的表层(0~10 cm)沉积物中的 TN、TP 水平普遍较高,而巢湖的 TN 最低,TP 水平也在相对偏低的范围。长江中下游 25 个湖泊表层(0~5 cm)沉积物中的 TP 水平差异很大,巢湖和太湖沉积物的 TP 含量也呈现出很大的区域间差异。

第九章从流域特征展望巢湖和太湖的未来。湖泊的富营养化在绝大多数情况下都起因于流域营养物质的大量输入,而影响输入量的因素十分复杂,既与流域人类活动密切相关,又受到地貌格局、植被覆盖率的影响,还与水系、水文特征关系密切。巢湖和太湖具有明显不同的地貌格局。譬如,太湖流域山丘区仅分布于西部,巢湖流域四周均有山区分布,太湖流域的地势比巢湖要平坦得多,因此河流的比降也要小得多。巢湖水系相对简单,有入湖河流 33 条,其中裕溪河是巢湖水汇入长江的唯一通道,太湖水系复杂,原有人湖河门口 225 个,东北面出水有上百条缕港。巢湖和太湖水质差的入湖河流均集中在北部人口密集地区,而较好的水质均来自人口相对稀少的西南山区,相对于太湖苕溪水系来说,杭埠河径流量在巢湖来水总量中所占比重更大,因此对改善巢湖水质中的作用更大。太湖森林的主要分布区位于苕溪水系区,巢湖主要在杭埠-丰乐河水系区,太湖森林覆盖率为 12.6%,巢湖森林覆盖率约为 20%。太湖的人口密度为巢湖的 1.8 倍,太湖的人均 GDP 为巢湖的 3.9 倍。相对于太湖来说,巢湖流域具有较多的山地,较高的森林覆盖率,较丰富的清洁水源,较低的人口密度和人均 GDP。因此,仅从这些方面来看,巢湖的水质改善应该更加容易一些。

第十章分析巢湖的地质历史变迁。湖泊并不是地球与生俱来的,也不是永恒的,经历着从诞生到消亡的历史过程。湖泊无论作为一个物理系统、化学系统还是生命系统都处在不断运动变化之中,以天、月、年、十年、百年、千年、万年乃至更长的时间尺度;在不同的时间尺度上,驱动湖泊演化或变化的主控因子可能完全不同。对现代湖泊特性的认识程度在某种程度上来说可能依赖于对湖泊地质演化历史的了解。大多数学者都一致认为巢湖属于断陷湖泊,第四纪的气候变迁与新构造运动奠定了巢湖的基本形态,晚更新世前期,巢湖扩展至鼎盛,之后气候转向干冷,湖面缩小成今天的巢湖。如果用四季来形容全新世以来气温变化的话,现在既不是夏季,也不是冬季,相当于温暖适宜的春秋季节。考古证据表明,古巢湖范围在商代还是处于 10 m 等高线范围左右,面积约 2000 km²,之后随着区域性降温,湖泊面积不断减少。巢湖呈现活跃的板块升降、水系变迁和湖

岸崩塌。巢湖入江水系自西向东迁移。巢湖高达 48.1% 的湖岸发生不同程度的坍塌，坍塌主要发生在黏土质岸类型及断裂与湖岸线交界地区。从巢湖的历史变迁看今日之巢湖：①为何巢湖面积从 2000 km² 下降到现在的 760 km²？气候变化可能是主导因素，近千年以来的人类活动（围垦）加速了这一过程；②近几十年安徽的气候有明显变化吗？气温和降雨量的升高或降低的趋势均不明显，巢湖的富营养化进程似乎受气温或降雨的影响不大；③为何巢湖 P 水平远高于太湖？巢湖沉积物的本底 TP 含量比太湖高得多，巢湖北岸广泛分布（约 500 km² 以上）着一套古老的含磷变质岩系；④20 世纪 90 年代中期以来的水质变化趋势如何？有逐步改善的迹象，可能得益于企业达标排放、生活污水处理能力的提高、小磷矿开采的消失及造林绿化等。

最后，如何才能使巢湖恢复到水质良好、物种丰富多样、人与湖泊和谐共存的自然生态系统状态？可以肯定地说，这将会是一个漫长而艰巨的过程。笔者认为，在对巢湖流域生态系统自然过程充分认识的基础上，①恢复陆地森林植被（特别是西南山区）以增加对陆地 N、P 的截留；②逐步降低外源 N、P 的输入量（包括生活污水、工业废水、农业面源等，特别是要控制巢湖西部区域城市污水的排放）；③控制来自含磷地层出露区（巢湖北岸）的 TP 输入；④恢复巢湖原有的水网结构及水位变动的自然节律（冬季回落、夏季升高，以适合春季水生植物的萌发和生长）；⑤退田还湖恢复原有的湖汊、浅滩和自然湿地（增加对水体 N、P 的固定和净化）；⑥恢复原有的水生动物群落结构（增加天敌对蓝藻的控制作用）等举措将会逐渐减少和遏制蓝藻的发生，最终使水生植物（包括沉水植物、浮叶植物、挺水植物）得以恢复和扩展的条件不断改善。

感谢中国环境科学研究院的孟伟院长和金相灿首席研究员给予我机会参加由中国环境科学研究院牵头的“全国重点湖泊水库生态安全调查及评估”专项，并负责“巢湖生态安全调查与评估”项目，这样使我有更多的机会接触和思考巢湖的问题，在项目执行过程中，与中国环境科学研究院的金相灿首席研究员、姜霞博士、王圣瑞博士和储昭升博士、安徽省环境科学研究院的肖莆院长、陈云峰所长和李堃博士、安徽省环境保护局水环境保护办公室的孙莉宁工程师、安徽省环境监测中心的朱余副站长等围绕巢湖问题进行了广泛的讨论。特别要感谢国家环境保护部污染控制司流域规划处的王谦博士对巢湖问题的许多富有建设性的提问，推动我去思索和寻求答案。感谢王谦博士、肖莆院长、姜霞博士、李堃博士、孙莉宁工程师等提供考察巢湖的机会及现场考察中的大力帮助，特别是在与姜霞博士、李堃博士等一起考察肥东县大横山磷矿时，遭遇暴雨被困，纯朴的矿山工人用巨大的运矿车解救我们下山时的情景令人难以忘怀！十分感谢李堃博士为本书提供了几张塘西河中蓝藻水华堆积的珍贵照片！感谢国家自然科学基金委主任陈宜瑜院士在地质知识上给我的诸多启发，他一直向我灌输长江流域湖泊具有较高 N、P 本底浓度的思想，虽然我没有系统地探索这一问题，但我深信，也

许就是巢湖沉积物中的高 TP 背景值、流域含磷岩石的广泛分布造就了巢湖蓝藻水华的悠久历史。衷心感谢我的许多博士毕业生（如邓道贵、陈隽、张敏、过龙根、谢丽强、杨华和徐军等，其博士论文均以巢湖为主要研究对象）及博士后郑利等的辛勤努力，他们获取了许多关于巢湖的宝贵的生态学研究资料，并被撰写在本书的相关章节中。此外还使用了张敏博士和邓道贵博士的一些未发表数据，感谢曹特博士和倪乐意研究员提供了 2007 年巢湖水生植物相关的资料（未发表）。本书仅是抛砖引玉，真诚地期待和欢迎各位读者对本书提出批评或建议。

谢 平

2008 年 7 月 18 日于武汉

目 录

前言

第一章 巢湖蓝藻的历史演变和空间格局	1
一、巢湖蓝藻的发展历程	2
二、巢湖叶绿素 a 浓度的变化	15
三、巢湖蓝藻水华的发生面积	18
四、结语	25
第二章 巢湖的微囊藻毒素 (MC) 污染	27
一、巢湖水柱中的 MC	28
二、巢湖水产品中的 MC	31
三、结语	39
第三章 巢湖沉积物中的氮、磷分布格局	40
一、巢湖沉积物 TN 和 TP 的垂直分布格局	41
二、巢湖表层沉积物 TN 和 TP 的季节变化	48
三、巢湖表层沉积物 TN、TP 含量等值图	51
四、巢湖入湖河口沉积物中的 TN 和 TP 含量	54
五、杭埠河流域三角洲平原钻孔和河流流域土壤 TN 含量变化	55
六、巢湖流域表层土壤 TP 含量分布	58
七、巢湖沉积物中的 N、P 本底含量	60
八、结语	61
第四章 巢湖氮、磷输入和湖水中氮、磷浓度的历史变化	62
一、来自河流的 N 和 P 的输入	63
二、N 和 P 的收支	73
三、湖水中 TN 和 TP 浓度的历史变化和空间格局	75
四、引江济巢	84
五、结语	84
第五章 巢湖泥沙淤积的历史变化	87
一、巢湖流域土地利用格局	88
二、巢湖泥沙含量的时空变化	93
三、巢湖输沙量的历史变化	94
四、巢湖泥沙淤积速率 (基于放射性同位素测年技术: ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 、 ^{14}C)	99
五、巢湖泥沙淤积速率 (基于水沙平衡)	104
六、泥沙淤积与 N、P 平衡	105

七、结语	106
第六章 巢湖生态系统的巨大变化	108
一、巢湖面积和水位的变化	108
二、底质和水质的变化	111
三、生态变化	112
四、结语	115
第七章 巢湖和太湖水生生态系统特征之比较	116
一、水文特征	118
二、营养盐特征	122
三、为何太湖湖水中的 TN/TP 远高于巢湖?	125
四、蓝藻的特征	127
五、水生植物	131
六、蓝藻水华聚集特征	137
七、蓝藻水华的重灾区	138
八、结语	143
第八章 从众多湖泊看巢湖的富营养化	145
一、六大淡水湖水文特征和形态度量的比较	145
二、长江流域湖泊湖水中 TN、TP 水平的比较	147
三、长江中下游湖泊表层沉积物中 TN、TP 水平的比较	150
四、结语	153
第九章 从流域特征展望巢湖和太湖的未来	154
一、地貌格局	154
二、水系特征和入湖河流水质	157
三、土地利用和社会经济	162
四、结语	165
第十章 巢湖的地质历史变迁	166
一、巢湖的区域地质特征	168
二、巢湖形成的地质历史过程	170
三、全新世 (Holocene, 1 万年以来) 巢湖的历史演变过程	173
四、古巢湖曾有多大?	179
五、板块升降与水系变迁	183
六、湖岸崩塌	188
七、从巢湖的历史变迁看今日之巢湖	193
八、结语	200
参考文献	202

Contents

Preface

Chapter 1 Historical changes and spatial pattern of cyanobacteria in Lake Chaohu

.....	1
1. Historical development of cyanobacteria in Lake Chaohu	2
2. Changes in Chl-a concentration in Lake Chaohu	15
3. Changes in coverage area of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu	18
4. Concluding remarks	25

Chapter 2 Microcystin (MC) contamination in Lake Chaohu

1. MC concentration in the water column of Lake Taihu	28
2. MC content in fisheries product of Lake Taihu	31
3. Concluding remarks	39

Chapter 3 Distribution patterns of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Chaohu

1. Vertical distribution of TN and TP in the sediment of Lake Chaohu	41
2. Seasonal changes in TN and TP contents in the surface sediment of Lake Chaohu	48
3. Contour map for N and P contents in the surface sediment of Lake Chaohu	51
4. TN and TP contents of the sediments from inlets of rivers around Lake Chaohu	54
5. TN profile of ACN drilling core in the alluvial plain of the Hangbu River and TN contents in soil of river basins	55
6. TP contents in surface soils of the Chaohu basin	58
7. Basal TN and TP contents in sediments	60
8. Concluding remarks	61

Chapter 4 N and P inputs and historical changes of TN and TP concentrations in the water column of Lake Chaohu

1. N and P inputs from rivers	63
2. Budgets of N and P	73

3. Historical changes and spatial patterns of TN and TP in the lake water	75
4. Water diversion from the Yangtze River to Lake Chaohu	84
5. Concluding remarks	84
Chapter 5 Historical changes of sedimentation area in Lake Chaohu	87
1. Land use in the Chaohu Basin	88
2. Temporal and spatial patterns of sand contents in the water of Lake Chaohu based on remote sensing images	93
3. Historical changes of sand transport rate in Lake Chaohu	94
4. Sedimentation rate of Lake Chaohu estimated from radioactive isotope dating technique (^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{14}C)	99
5. Sedimentation rate of Lake Chaohu estimated from water-sand balance	104
6. Relation between sedimentation and N and P balances	105
7. Concluding remarks	106
Chapter 6 Great changes in the ecosystem of Lake Chaohu	108
1. Changes in surface area and water level	108
2. Changes in sediment and water qualities	111
3. Ecological changes	112
4. Concluding remarks	115
Chapter 7 A comparison of the lake ecosystems between Lakes Chaohu and Taihu	116
1. Hydrological characteristics	118
2. Characteristics of nutrients	122
3. Why was TN/TP ratio in the lake water of Lake Taihu much higher than that of Lake Chaohu?	125
4. Characteristics of cyanobacteria	127
5. Macrophytes	131
6. Accumulation characteristics of cyanobacterial blooms	137
7. Cyanobacterial disaster areas	138
8. Concluding remarks	143
Chapter 8 Looking at eutrophication of Lake Chaohu from various lakes ...	145
1. Comparisons of hydrological and morphological characteristics among the six largest freshwater lakes	145
2. A comparison of TN and TP levels in the water columns among lakes of the Yangtze basins	147

3. A comparison of TN and TP levels in surface sediments among lakes of the middle and lower reaches of the Yangtze River	150
4. Concluding remarks	153
Chapter 9 Looking at future of Lakes Chaohu and Taihu from features of the lake basins	154
1. Physiognomical patterns	154
2. Characteristics of water system and water quality of inflowing rivers	157
3. Land use and social economy	162
4. Concluding remarks	165
Chapter 10 Geological evolution of Lake Chaohu	166
1. Geological characteristics of the Chaohu basin	168
2. Geological history of Lake Chaohu	170
3. Historical changes of Lake Chaohu during the Holocene (10000 aBP)	173
4. How large was the ancient Lake Chaohu?	179
5. Rise and subsidence of plates	183
6. Collapse of the lakeshore	188
7. Looking at the present Lake Chaohu from its historical changes ...	193
8. Concluding remarks	200
References	202

第一章 巢湖蓝藻的历史演变和空间格局

内 容

一、巢湖蓝藻的发展历程

1. 巢湖的蓝藻水华（湖靛）最早何时开始出现——可追索到 19 世纪末
2. 20 世纪 50 年代——首次科学记载巢湖蓝藻水华（湖靛）的主要种类
3. 20 世纪 60 年代——数量上蓝藻（主要是微囊藻）占绝对优势¹
4. 20 世纪 80 年代——数量上微囊藻一统天下，西湖区显著高于东湖区
5. 20 世纪 90 年代——数据有限，但数量上微囊藻依然占优势
6. 21 世纪初的浮游植物——从年平均生物量来看，蓝藻仅占 3 成，蓝藻中鱼腥藻为第一优势种，微囊藻次之，夏季蓝藻仍然占优势

二、巢湖叶绿素 a 浓度的变化

1. 西部湖区年均 Chl-a 浓度（1984~2006）——宽幅波动，1992 年超过 60 $\mu\text{g/L}$ ，多数在 20~40 $\mu\text{g/L}$ 之间波动
2. Chl-a 浓度的季节变化——高值出现在夏季，在南淝河入湖断面可能由于蓝藻聚集出现难以相信的极端高浓度（2040 $\mu\text{g/L}$ ）
3. Chl-a 浓度的昼夜变化——白天远远高于夜间

三、巢湖蓝藻水华的发生面积

1. 基于直接观察的定性描述——西湖区的蓝藻水华更盛，覆盖率达湖面的 3/5~4/5
2. 根据蓝藻生物量估算——以 $>10 \text{ mg/L}$ 作为蓝藻聚集成水华的标准，2002~2003 年巢湖夏季蓝藻水华的覆盖面积略占全湖面积的 1/4
3. 根据卫星遥感影像资料估算——4~11 月均有明显蓝藻水华，绝大多数情况下聚集在西湖区，最大蓝藻水华覆盖面积略占全湖区面积的 1/4

四、结语

蓝藻（或蓝细菌 Cyanobacteria）是地球上最早出现的光合自养生物，淡水水体富营养化最常见的结果就是导致藻类特别是蓝藻大量繁殖而形成水华。巢湖蓝藻水华（俗称湖靛）的发生历史悠久，可追索到 19 世纪末，虽然只是依赖于大规模的社会调查。而关于巢湖蓝藻的科学调查始于 20 世纪 50 年代末。但是，近半个世纪以来，有关巢湖蓝藻的研究十分零散，各种资料也要远远少于在太湖的研究。最近，一些关于巢湖蓝藻水华分布的遥感影像资料使得较为准确地估计巢湖蓝藻水华的发生面积成为可能。