



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学精品教材



黄卫东 / 编著

湖泊水华治理 原理与方法

Theory and Methods of Lake Eutrophication Treatment

中国科学技术大学出版社



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学  精品教材



黄卫东 / 编著

Theory and Methods of Lake Eutrophication Treatment

湖泊水华治理 原理与方法

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书全面阐述了水华治理的原理、技术和管理等方面。第1部分主要论述水华发生的原理、影响水华发生的各种因素、控制水华的原理。第2部分阐述以控磷为基础的水华治理与控制技术、水华治理规划和管理。第3部分介绍西方发达国家,特别是美国在水华治理方面的经验,论证了国外水华治理采用的控磷法;还介绍了我国在水华治理方面存在的问题、治理建议,包括长远治理建议和临时治理措施。

图书在版编目(CIP)数据

湖泊水华治理原理与方法 黄印全编著. —合肥:中国科学技术大学出版社, 2014. 10
(中国科学技术大学精品教材)
“十二五”国家重点图书出版规划项目
ISBN 978-7-312-03435-0



I. 湖… II. 黄… III. 湖泊—藻类水华—水污染防治—研究—中国
IV. X524

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 178761 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号, 230026

<http://press.ustc.edu.cn>

合肥市宏基印刷有限公司印刷

全国新华书店经销

开本: 710mm×960mm 1/16 印张: 18.75 插页: 2 字数: 357 千

2014 年 10 月第 1 版 2014 年 10 月第 1 次印刷

定价: 35.00 元



编审委员会

主 任 侯建国

副主任 窦贤康 陈初升
张淑林 朱长飞

委 员 (按姓氏笔画排序)

方兆本	史济怀	古继宝	伍小平
刘 斌	刘万东	朱长飞	孙立广
汤书昆	向守平	李曙光	苏 淳
陆夕云	杨金龙	张淑林	陈发来
陈华平	陈初升	陈国良	陈晓非
周学海	胡化凯	胡友秋	俞书勤
侯建国	施蕴渝	郭光灿	郭庆祥
奚宏生	钱逸泰	徐善驾	盛六四
龚兴龙	程福臻	蒋 一	窦贤康
褚家如	滕脉坤	霍剑青	

总 序

2008年,为庆祝中国科学技术大学建校五十周年,反映建校以来的办学理念和特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

五十周年校庆精品教材系列于2008年9月纪念建校五十周年之际陆续出版,共出书50种,在学生、教师、校友以及高校同行中引起了很好的反响,并整体进入国家新闻出版总署的“十一五”国家重点图书出版规划。为继续鼓励教师积极开展教学研究与教学建设,结合自己的教学与科研积累编写高水平的教材,学校决定,将精品教材出版作为常规工作,以《中国科学技术大学精品教材》系列的形式长期出版,并设立专项基金给予支持。国家新闻出版总署也将该精品教材系列继续列入“十二五”国家重点图书出版规划。

1958年学校成立之时,教员大部分来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。虽然现在外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

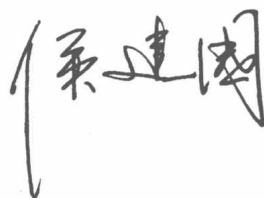
学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养

了一届又一届优秀学生。入选精品教材系列的绝大部分是基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

入选的这些精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。希望该精品教材系列的出版,能对我们继续探索科教紧密结合培养拔尖创新人才,进一步提高教育教学质量有所帮助,为高等教育事业作出我们的贡献。



中国科学技术大学校长
中国科学院院士
第三世界科学院院士

序

我国的湖泊有多种功能和资源,为我们提供了灌溉、航运、发电、调节径流、发展旅游之便。水中的鱼、虾、蟹、贝、菱、藕等动植物资源,是人类副食的主要来源之一。湖泊像一个个天然的水库,对河流的水量起着调剂作用。雨季时,水量增加,湖泊起蓄水作用,将河水拦阻起来,减轻下游洪涝灾害。到了春、冬季节,河流水量减少,湖泊将储存的水放出,既能灌溉农田,又能解决饮水和工业用水的困难。由于湖泊的作用,我国很多湖泊的周围地区大都是旱、涝保收的鱼米之乡或重要工业基地。湖泊除了能够调节河流的水量之外,还能调节气候,最为典型的的就是我国云南省的滇池和洱海。八百里滇池夏季吸热,冬季放热,同时又有大量水蒸气的扩散,形成了地区性的小气候,使得昆明气候温和湿润,夏无暴热,冬无严寒,成为一年四季鲜花怒放、芳草长青的“春城”。另外,有湖泊的地方多是风景优美、山光水色的游览胜地。

然而,在我国除了人烟稀少的高山湖泊,大多数淡水湖泊富营养化严重,水华频繁爆发,使湖泊不仅不能提供水资源,而且成为环境的污染源,严重影响周围民众的生活和身体健康,也给我国经济发展带来了巨大损失。

我国又是一个雨水分布十分不均匀的国家,很多地方缺水。为了解决水资源短缺问题,很多城市建设引水工程,从离城市很远的地方获得水资源,输水工程艰巨,还要不断支付水资源费和设施运行维护费。为节省投资,要利用现有河道和新建明渠输水,全长上千多公里,在污染控制和安全防护方面难度很大,估计让水质达到饮用水水源要求的保证率会有困难。

石油燃烧后不能再生,而水利用后大都可再生。发展城市污水资源化,污水和雨水的再生利用,修建人工湖泊储存再生水,同时减少天然湖泊污染,防止湖泊富营养化,不仅可以用于雨季防洪,改善周边小气候,还可为社会提供源源不断的水资源,是解决水资源短缺,促进社会可持续发展的良好途径。

自20世纪70年代以来,以色列、新加坡、南非和美国加州等地建设城市污

水深度处理和雨水处理设施,解决湖泊富营养化引起的污染问题;同时还大力建设人工湖泊,储存再生水,为解决水资源短缺问题提供了可持续发展方案。以色列地处沙漠,人均水资源量比我国华北还低近一半,通过污水深度处理后,其水资源得到多次循环利用,不仅保护和改善了环境,而且为以色列社会可持续发展提供了丰富的水资源。

到目前为止,我国在污水深度处理和雨水收集处理方面投入较少,湖泊富营养化严重,使我国很多可资利用的水源被污染浪费,例如,滇池和巢湖均出现水华现象,污染严重,无法利用。水华是我国很多城市水资源短缺的主要原因之一。治理湖泊水华,是治理湖泊污染,保护湖泊水资源的关键措施之一。如何减小治理支出,同时提高治理湖泊收益,需要我们了解水华产生机理及治理方法。

本书全面阐述了水华治理的原理、技术和管理等各个方面。第1部分主要论述水华产生机理、影响水华发生的各种因素、控制水华的原理。第2部分阐述以控磷为基础的水华治理与控制技术、水华治理规划和管理。第3部分介绍西方发达国家,特别是美国在水华治理方面的经验,论证了国外水华治理采用的控磷法;还介绍了我国水华治理方面所存在的问题、治理建议,包括长远治理建议和临时治理措施。

作者黄卫东博士是我国环保产业协会水处理领域的专家。他长期从事水处理教学、科研、技术开发和工程建设;主持和参与水处理工程建设项目10多项,其团队开发了城市污水处理厂成套工艺设备共计12种,在多个污水处理厂得到实际应用;发明了多项污水处理技术,获得国家专利10多项;曾到美国和加拿大考察,在美国弗吉尼亚州立大学从事相关研究工作;在国际SCI杂志发表论文数十篇;负责研究完成了多项国家“863计划”和省部级重要课题。

本人有幸曾与黄卫东博士共事多年,合作完成了多项工程项目和设备研发项目。黄卫东博士具有深厚的水处理技术理论功底,结合数十年工作实践,撰写了《湖泊水华治理原理与方法》,全面阐述了控磷法治理水华的原理和方法,结合在美国的实践经验,总结国内的经验教训,必能为我国湖泊水华治理与环境保护事业提供有力支持。

天津市政工程设计研究院前总工程师
冯生华

目 次

总序	(i)
序	(iii)

第 1 部分 水华产生机理与控制原理

第 1 章 湖泊水华的产生机理与控制原理概述	(3)
1.1 水华产生机理	(3)
1.2 水华与湖泊富营养化评价	(4)
1.3 水华危害	(6)
1.4 水华产生的影响因素	(7)
1.5 水华治理原理——控制湖泊总磷浓度	(9)
第 2 章 藻类生长特点与控制因素	(11)
2.1 藻类的结构	(12)
2.2 藻类的生长特点	(14)
2.3 藻类生长的限制因子	(18)
2.4 主要藻类简介	(20)
第 3 章 湖泊的物理特性与水华	(30)
3.1 水的物理性质	(31)
3.2 光在湖水中的传输特性	(35)
3.3 湖水的传热特性	(41)
3.4 湖水的流动特性	(42)
3.5 湖泊的传质过程	(49)

第4章	湖泊化学过程与磷循环	(51)
4.1	水的化学性质与气体的溶解性	(52)
4.2	湖水中溶解性离子	(54)
4.3	水中溶解磷酸盐平衡浓度	(56)
4.4	其他影响因子	(61)
第5章	湖泊生态系统	(64)
5.1	天然水体生态系统	(64)
5.2	细菌	(66)
5.3	浮游动物	(67)
5.4	其他滤食生物	(75)
5.5	其他鱼类对生态系统的影响	(77)
5.6	大型水生植物对水华的影响	(79)
第6章	藻类生长动力学	(83)
6.1	化学计量学	(83)
6.2	藻类生长和死亡动力学	(84)
6.3	光强对藻类生长速率的影响	(86)
6.4	营养盐与藻类生长	(88)
6.5	其他因素影响	(91)
6.6	湖泊藻类的生长与竞争	(93)
6.7	扩散对藻类生长影响	(99)
第7章	水华控制原理与湖泊类型	(102)
7.1	治理水华的对策:控氮还是控磷?	(102)
7.2	湖泊水华治理原理:严格控磷	(117)
7.3	湖泊类型	(120)
7.4	藻类生长的季节变化和空间分布	(125)

第2部分 湖泊水华治理与控制方法

第 8 章 湖泊水华治理规划	(131)
8.1 水华治理规划目的与原则	(131)
8.2 规划程序	(135)
8.3 水质目标制定	(140)

8.4 监测	(141)
第 9 章 湖泊水华模型与水质预测	(147)
9.1 模型的作用	(147)
9.2 水华问题与建模步骤	(148)
9.3 其他污染物模型	(158)
9.4 其他水华模型简介	(159)
第 10 章 湖内水华直接治理	(161)
10.1 引言	(161)
10.2 磷沉淀和钝化	(164)
10.3 底泥清除	(167)
10.4 稀释和冲刷	(168)
10.5 人工曝气循环	(170)
10.6 底层滞水区曝气充氧	(171)
10.7 食物链调控	(172)
10.8 其他方法	(173)
10.9 总结	(175)
第 11 章 点源磷污染治理技术	(180)
11.1 化学除磷	(181)
11.2 生物除磷	(186)
11.3 其他除磷技术	(190)
11.4 除磷经济性	(196)
第 12 章 面源磷污染治理技术	(201)
12.1 引言	(201)
12.2 污染源控制	(203)
12.3 径流输送中污染控制	(207)
12.4 径流污染处理	(210)
12.5 美国雨污合流溢流治理	(212)
第 13 章 雨水径流污染模型与水华防治	(222)
13.1 引言	(222)
13.2 雨水径流量计算模型	(225)
13.3 雨水径流水质模型	(230)

13.4 质量传输模型 (232)

13.5 雨水径流污染模型参数优化 (234)

13.6 治理方案优化 (237)

13.7 主要模型简介 (237)

第 14 章 湖泊管理与水华防治 (244)

14.1 引言 (244)

14.2 湖泊管理的主要途径和方法 (245)

第 3 部分 水华治理国际实践与我国的水华治理建议

第 15 章 采用控磷法治理湖泊水华的国际实践 (257)

15.1 北美五大湖富营养化治理进展 (257)

15.2 伊利湖水华治理进展 (260)

15.3 美国 Onondaga 湖治理过程的启示 (269)

第 16 章 我国湖泊水华治理存在的问题与治理建议 (276)

16.1 引言 (276)

16.2 我国水华治理存在的问题 (277)

16.3 严格控磷法治理方案分析 (281)

16.4 关于我国水华水环境治理的投资和运行费用匡算 (285)

16.5 总结 (286)

第 1 部分

水华产生机理与控制原理

第 1 章 湖泊水华的产生机理 与控制原理概述

1.1 水华产生机理

水华是在水体中发生的一种自然生态现象。通常认为水华是水体中浮游生物大量生长,使浮游生物现存量达到较高水平,以至人们能够观察到的一种现象。^[1]在淡水水体中,绝大多数的水华是由浮游植物中的藻类引起的,如蓝藻、绿藻、硅藻等;在近海海域,也有部分水华现象是由浮游动物引起的,如腰鞭毛虫。“水华”发生时,水体有明显的颜色,一般呈蓝色、绿色或红色。这种在自然界就存在的水华现象,在我国古代历史上就有记载。

通常,浮游生物是指在海水或淡水中能够适应悬浮生活的动植物群落,易于在风和水流作用下被动运行。^[2]这是根据生物的生活方式划定的一种生态群,不是根据生物物种划分的。浮游生物实质上并不总是悬浮在水中,只有极少数是持续上浮的,大多数种类的密度比水大,在其生命周期的一部分或大部分时间生活在底部。一般将浮游生物划分为浮游植物和浮游动物,它们都是生态学名词。

浮游生物多种多样,特别是浮游动物,几乎可以见到全部动物类群。浮游植物以单细胞硅藻、鞭毛藻居多,还包括属于古细菌的蓝藻。一般浮游生物是小型的,但也有直径达 2 m 的水母等。按个体大小划分,浮游生物可分为六类:巨型浮游生物,大于 1 cm,如海蜇;大型浮游生物,2~10 mm,如大型桡足类、磷虾类;中型浮游生物,0.2~2 mm,如小型水母、桡足类;小型浮游生物,20 μm ~0.2 mm,如硅藻、蓝

藻;微型浮游生物,2~20 μm ,如甲藻、金藻;超微型浮游生物,小于2 μm ,如细菌。

在淡水水体中,引起水华的多是小型和微型浮游藻类。藻类是一种能进行光合作用自养生长,但没有分化根、茎、叶的水生生物。它也是一种生态学名词,包括多种生物学分类相差很远的物种。大多数藻类属于真核生物,但是,我国和世界各地淡水湖泊经常发生的蓝藻水华^[1]属于无真正细胞核的原核生物——细菌中的一员,它们也和植物一样能进行光合作用。

浮游藻类的生命周期通常很短,大多只有几周,但生长速度快,有的仅需几个小时就增殖一代,在适宜条件下,会在短时间内大量繁殖起来,从而形成水华。它们又很快大量死亡,使天然水体有机物浓度大幅度增加,不仅促使好氧细菌大量繁殖,大量消耗水中溶解氧,形成厌氧环境,导致厌氧细菌大量繁殖,产生硫化氢等恶臭气体,而且形成很多有害物质,使局部水域污染,破坏了生态系统和水资源。这对水体环境和生态系统产生了严重危害;对人们的生活和经济活动产生了严重影响。因此,水华受到人们的高度关注。

1.2 水华与湖泊富营养化评价

淡水湖泊水华主要由浮游藻类大量生长产生,因此,湖泊水华水平可用湖水中藻类浓度来表示^[3],通常用单位体积水中浮游生物的总有机碳量表示(mg C/L)。由于不同藻类所含叶绿素浓度大致相近,人们也用湖水中叶绿素含量表示。藻类生长速率与叶绿素浓度相关,叶绿素指标更能反映天然水体藻类水华的发展趋势,测定方法可参考相关标准。^[4-5]

水华通常是因向天然水体中排入过量营养盐引起富营养化而产生的,通常磷是主要影响因素。统计资料表明,藻类浓度与总磷浓度相关,世界经济合作与发展组织发布的报告中采纳了 Vollenweider 根据实测数据拟合的藻类生物量与磷浓度之间的关系。^[6]因此,根据湖水的总磷浓度,也可以大至确定水体营养状态,如水华水平。

但是,很多其他物理化学性质也能影响天然水体的水华水平,常见的包括总氮浓度、水体透明度、耗氧量等。营养状态指数是根据一些水质指标建立的经验计算式,也是一种表达天然水体水华水平的常用方法。由于经验计算式是根据特定水体建立的,不同研究者提出的表达式差别很大,在实际应用这些计算式时,需要十分小心地评估计算结果的实际意义。

由于藻类常在表水层生长,受风力影响,容易聚集,局部藻类浓度变化较大,使得任何定量表示湖泊水华水平的方法都存在内在的缺陷,因此,人们通常将天然水体状态简化为贫营养、中营养和富营养。产生藻类水华灾害的可能性常随总磷浓度增加而增加,图 1.1 是不同总磷浓度下水体营养状态的概率分布曲线^[7],它给出了不同总磷浓度湖水的富营养化状态的可能性。表 1.1 列出了主要水质指标与富营养化程度划分的边界值^[8]。

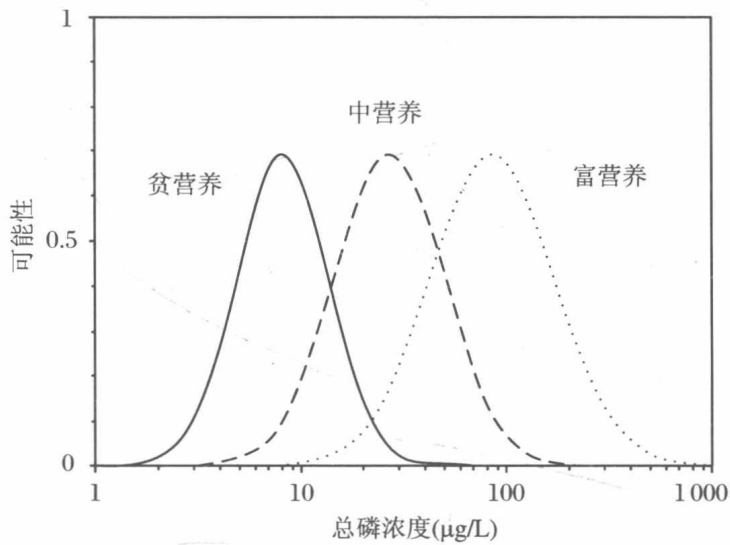


图 1.1 湖泊营养状态概率分布与总磷浓度关系

表 1.1 主要水质指标与富营养化程度的划分(营养状态边界)

营养状态指数	贫-中营养界限	中-富营养界限	富-超富营养界限
总磷(μg/L)	10	25	100
叶绿素 a(μg/L)	3.5	9	25
塞克盘深度(m)	4	2	1
AHOD[mg/(m ² ·d)]*	250	400	550
缺氧时间(天)	20	40	60
净溶解氧(mg/L)	4.5	5	
最小溶解氧(mg/L)	7.2	6.2	
总氮(μg/L)	350	650	1 200

* AHOD: 单位面积水中氧的消耗速率。