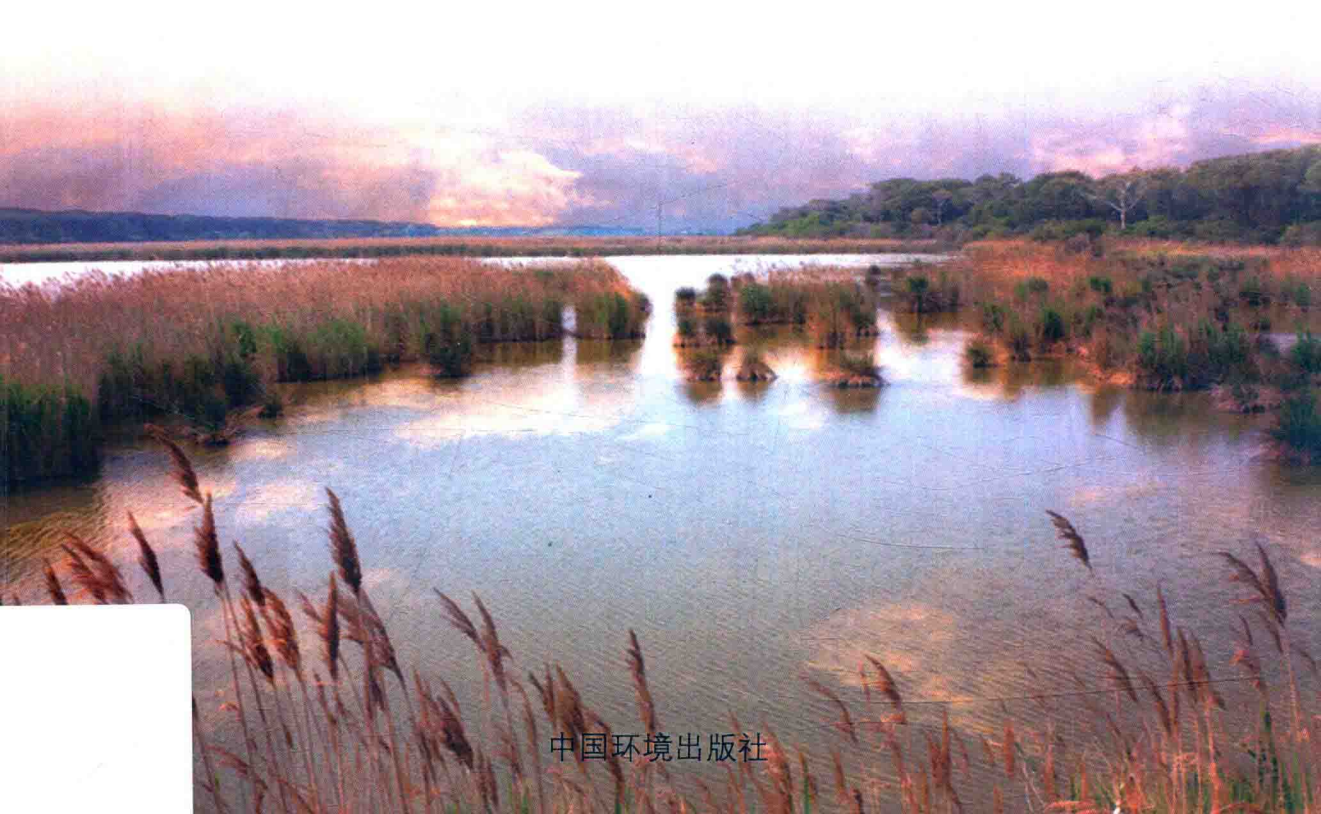


THEORY AND TECHNOLOGY OF
MACROPHYTIC LAKE
EUTROPHICATION CONTROL

草型湖泊 富营养化控制 原理与技术

袁冬海 何连生 雷红军 舒俭民 / 著



中国环境出版社

草型湖泊富营养化控制 原理与技术

袁冬海 何连生 雷红军 舒俭民 著



中国环境出版社·北京

图书在版编目（C I P）数据

草型湖泊富营养化控制原理与技术 / 袁冬海等著. —北京：中国环境出版社，2014.5

ISBN 978-7-5111-1608-6

I. ①草… II. ①袁… III. ①湖泊污染—富营养化—污染控制 IV. ①X524

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第251547号

出 版 人 王新程
责任编辑 陈雪云
责任校对 扣志红
封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境出版社
（100062 北京市东城区广渠门内大街16号）
网 址：<http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱：bjgl@cesp.com.cn
联系电话：010-67112765（编辑管理部）
010-67112735（第一分社）
发行热线：010-67125803 010-67113405（传真）

印 刷 北京中献拓方科技发展有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2016年3月第1版
印 次 2016年3月第1次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 14
字 数 300千字
定 价 55.00元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量，请寄回本社更换。

序 言

湖泊是大自然赐予人类的宝贵财富，作为自然生态系统的重要组成部分，与人类生存和发展息息相关，是维系人与自然和谐发展的重要纽带，在支撑区域生态安全和流域经济社会可持续发展方面发挥重要作用。我国湖泊数量众多、类型多样。草型湖泊是其中的一种重要类型。

我国的湖泊富营养化主要集中在浅水湖泊，在中小型浅水湖泊中一半以上是草型湖泊，我国北方的浅水淡水湖泊基本都是草型湖泊。草型湖泊流域与其他湖泊流域一样面临人口增加、工业化城镇化快速推进、大量氮磷营养盐进入湖泊、环境承载力超载、生态系统健康受损等共性问题，因此草型湖泊的保护和可持续开发迫在眉睫，也是科学研究和工程技术领域的一个重要研究热点。

草型湖泊最显著的特点是大型水生植物种类多、生物量大，尤其是沉水植物生物量大，覆盖度高。大型水生植物可以大量吸收过量的营养盐，一方面，限制藻类的爆发式生长，抑制了湖泊的富营养化；另一方面，大型水生植物的过度增殖加速了草型湖泊的沼泽化，造成湖泊萎缩与功能退化。

草型湖泊富营养化伴随的是沼泽化，两者的差异更多地取决于生物竞争的结果。藻类与草类的优势分别决定了湖泊的藻型化和草型化，二者的推动力都是营养盐代谢的作用，与藻型湖泊恢复原理近似，通过控制湖泊水污染特别是营养物的输入，并与生态恢复的技术手段相结合，将缓解草型湖泊富营养化问题，促进草型湖泊生态系统的恢复与良性化循环。

我国草型湖泊富营养化的研究工作才刚刚起步，滞后于藻型湖泊的相关研究与实践，尚未形成针对草型湖泊管理的理论、方法、技术与应用体系，这种局面特别不利于草型湖泊的生态恢复，间接促进了更多草型湖泊的衰亡与消失。因此，为控制草型湖泊富营养化，应以草型湖泊水生态系统为整体，充分考虑地质结构、气候变化、湖泊污染特征等制约因素，从草型湖泊营养盐循环过程入手，探讨草型湖泊草—藻之间的制约关系，研究生物链的结构效应，才能最终控制草型湖泊的富营养化；另一方面，摸清大型水生植物与沼泽化之间的响应关系，深入研究大型水生植物资源化技术与方法，才能最终实现对草型湖泊的长效控制与监管。

由于气候、水资源与水环境条件的特殊性，以白洋淀、乌梁素海为代表的我国华北平原地区以及干旱半干旱地区湖泊草型化和沼泽化问题日益严峻，需要针对这些地区独特的生态环境和水文条件，从不同层次、不同角度和不同时空尺度上开展工作，将水资源、水环境、水生态演化过程、耦合作用与生态效应相结合，深入研究草型湖泊的演变过程，开发草型湖泊水质改善、富营养化控制技术体系，通过示范工程论证，实现草型湖泊生态系统的全面恢复，同时为我国草型湖泊富营养化和沼泽化控制提供技术支撑。总之，草型湖泊富营养化治理与沼泽化控制是一项复杂的系统工程，在充分借鉴国内外现有研究成果基础上，通过技术开发与论证，找到一条适用于我国草型湖泊生态恢复的技术途径，是当前亟待开展的重要工作。

本书阐述了草型湖泊的定义和特征，分析了草型湖泊的分布特点，系统梳理了草型湖泊富营养化控制的原理和技术进展，以北方典型草型湖泊白洋淀和乌梁素海为案例，从两个湖泊水质变化、富营养化驱动机理、生物生态演化趋势、底层沉积物特性、生态系统失衡诊断等方面揭示草型湖泊特征及演变；介绍了水生植物种类、生物量调控的原理和技术；构建了草型湖泊水动力学模型并规划设计了生态动力学模型指导的示范工程；提出了水生植物资源化的方法和技术手段，为解决草型湖泊富营养化提供了很好的借鉴。

该著作是由国家“十一五”水体污染控制与治理重大专项课题“白洋淀草型富营养化和沼泽化逐级治理技术与工程示范”部分研究成果凝练而成，是我国首次系统地阐述草型湖泊富营养化控制原理与技术，具有较高的参考意义。

前 言

草型湖泊是一种重要的湖泊类型。草型湖泊富营养化表现上有别于藻型湖泊。针对草型湖泊富营养化控制的研究工作才刚刚起步,尚未形成针对草型湖泊管理的理论、方法、技术与应用体系;对草型湖泊富营养化形成过程与内在规律的认识也存在差异,对调控草型湖泊中大型水生植物生长、繁殖与蔓延的生态水文学机制尚不十分清楚,草型湖泊富营养化控制缺乏准确的理论指导和技术支持。

国家水专项课题“白洋淀草型湖泊富营养化和沼泽化逐级治理技术与工程示范”面向白洋淀富营养化和沼泽化防控与管理技术的需求,经过3年多的科技攻关取得显著成果与进展。针对因缺水、内源失衡带来的草型湖泊富营养化和沼泽化并存现象,以及由此产生的防控管理难题,创新了北方草型湖泊水生态健康快速诊断和分区分类治理的技术方法,有效提升了草型湖泊生态环境管理手段,完善了国家湖泊水环境管理理论与方法体系;突破了草型湖泊生物链生态协同调控技术,开发了水生植物平衡收割及高效资源化利用设备,有效支撑了草型湖泊水质改善与生态修复,为国家北方草型湖泊生态治理提供了新手段。本书就是对该课题部分研究成果的总结和展示。

本书共分7章,第1章作为全书的基础,给出了草型湖泊的定义及特征、我国草型湖泊的分布及存在的问题,综述了草型湖泊富营养化控制技术进展。第2-4章以白洋淀为典型案例湖泊,从水质变化与趋势、富营养化驱动因子分析、水生态系统结构及差异、沉积物特征、生态系统演变过程等各个角度阐释草型湖泊富营养成因,结合白洋淀分区特征,提出了利用水生植物种类、生物量调节调控富营养化的原理和技术。第5-7章以乌梁素海为典型案例湖泊,从湖泊水质和水生态系统结构变化趋势阐释富营养化产生机理,剖析了流域内营养盐产生汇聚的过程,构建了水生态动力学模型模拟各种调控方案水动力条件和水生态的变化情况;基于系统动力学方法对水环境承载力进行了核算建立了湖泊生态恢复的方案。本书有助于读者在了解我国草型湖泊的状态的同时,对草型湖泊调查、制定保护规划、环境治理和生态修复提供思路 and 参考。本书对大专院校及科研单位相关专业的研究人员具有较强的参考价值,也可供各级环保规划与管理部分工作人员参考。

本书力图涵盖草型湖泊问题诊断和修复技术的诸多方面,在编写过程中参考了大量

国内外学者的文献资料，大部分引述来源均已在书中列出，疏漏之处，谨致歉意。

本书是作者多年研究成果的总结。研究过程中在数据采集与处理、技术开发和示范、资料收集和调研等方面得到了国家水体污染控制与治理科技重大专项课题“白洋淀草型富营养化和沼泽化逐级治理技术与工程示范”（2009ZX07209-008）的经费支持。本书撰写过程中，课题组成员孟睿、黄彩红、李一葳、王美丽、白雪梅、袁震、贺方兵等在文献整理、插图绘制、模型参数订正等多方面做了大量工作，特此致谢。还要感谢环境科学出版社的陈雪云编辑，她的耐心细致的工作保证了本书的及时出版。

此外，在课题研究和本书写作过程还得到了中国环境科学研究院席北斗研究员、何萍研究员、霍守亮副研究员、刘录三副研究员、王瑜助理工程师、北京师范大学崔保山教授、白军红教授、韩祯博士、蓝燕博士、河北省环境科学研究院王靖飞研究员、吴亦红研究员等，以及课题组其他人员的大力支持和帮助，在此一并致谢。

受作者学识水平及时间和条件所限，本书在理论构建、分析、论证方面还缺乏一定深度和系统性，书中存在的不妥之处，恳请广大读者批评指正。

著 者

目 录

第一章 我国草型湖泊的特征及分布	1
1.1 草型湖泊定义与特征	1
1.2 草型湖泊分布及存在的问题	3
1.2.1 草型湖泊的分布	3
1.2.2 草型湖泊研究存在的问题	5
1.3 草型湖泊富营养化及控制研究进展	5
1.3.1 草型湖泊富营养化研究及其生态修复技术	5
1.3.2 草型湖泊富营养化与沼泽化的治理和控制	7
参考文献	9
第二章 白洋淀水环境质量变化与趋势分析	10
2.1 湖区水质变化趋势	10
2.1.1 湖区水质变化及趋势分析（以烧车淀为例）	10
2.1.2 不同淀区水质差异性分析	12
2.2 富营养化驱动因子分析	16
2.2.1 富营养化主要驱动因子分析	16
2.2.2 不同季节富营养化驱动因子分析	17
2.3 湖泊水生态调查分析	17
2.3.1 水生态参数相关性分析	17
2.3.2 水生态空间差异性分析	19
2.4 水环境有机质光谱特性研究	21

2.4.1 表层沉积物溶解性有机质荧光光谱研究	21
2.4.2 沉积物基本性质研究.....	26
2.5 沉积物腐殖酸光谱特性研究.....	27
2.5.1 材料与方法.....	29
2.5.2 富里酸（FA）光谱特性研究.....	29
2.5.3 胡敏酸（HA）紫外、荧光光谱特性研究.....	32
2.5.4 胡敏酸（HA）红外光谱研究.....	34
2.5.5 小结.....	36
参考文献	36

第三章 白洋淀水生态系统调查与失衡分析 38

3.1 水生态系统结构调查.....	38
3.1.1 浮游植物调查与分析.....	40
3.1.2 浮游动物调查与分析.....	43
3.1.3 底栖动物调查与分析.....	44
3.1.4 鱼类调查与分析.....	45
3.1.5 水生植物调查与分析.....	47
3.2 草型与藻型区域划分.....	48
3.2.1 比较湖沼学研究.....	48
3.2.2 时间序列法研究.....	51
3.2.3 白洋淀草型和藻型稳态阈值界定.....	55
3.3 水生态系统物质流分析（TN/TP）.....	57
3.3.1 白洋淀生态系统氮磷营养盐的循环特征.....	57
3.3.2 白洋淀生态系统氮磷控制的概念模型.....	58
3.3.3 白洋淀生态系统总氮、总磷模型的建立和求解.....	59
参考文献	63

第四章 白洋淀水生植物调控富营养化研究 65

4.1 水生植物修复富营养化水体原理.....	65
4.1.1 化感作用.....	65
4.1.2 生境竞争.....	65
4.1.3 水生植物作用.....	66

4.2	水生植物筛选净化效果研究	67
4.2.1	实验材料与方法	68
4.2.2	不同水生植物对水体 Chl-a 的抑制效果	68
4.2.3	不同水生植物对藻类组成结构的影响	69
4.2.4	各组群落水体中环境因子的变化	73
4.2.5	各组群落对水体营养盐的调控	75
4.2.6	小结	77
4.3	水生植物优势种覆盖度控制（以轮藻为例）	78
4.3.1	实验材料与方法	78
4.3.2	不同覆盖度的轮藻组对水体 Chl-a 的抑制效应	78
4.3.3	不同覆盖度的轮藻组对水体不同形态氮的抑制效应	79
4.3.4	不同覆盖度的轮藻组对水体不同形态磷的抑制效应	81
4.3.5	不同覆盖度的轮藻组水体中环境因子的变化	82
4.3.6	小结	83
4.4	水生植物调控富营养化示范工程	84
4.4.1	实验材料与方法	84
4.4.2	不同围隔组对水体 Chl-a 的抑制效应	85
4.4.3	不同围隔组对水体不同形态氮的抑制效应	85
4.4.4	不同围隔组对水体不同形态磷的抑制效应	87
4.4.5	不同围隔组水体中环境因子的变化	89
4.4.6	小结	90
4.5	水生植物和底泥资源化技术	91
4.5.1	水生植物收割和资源化	92
4.5.2	污染底泥环保疏浚及资源化工程示范	97
	参考文献	101
	第五章 乌梁素海及其流域水环境质量变化与趋势分析	103
5.1	水质变化趋势	103
5.1.1	湖区水质变化及趋势分析	103
5.1.2	入出湖水质变化及负荷趋势分析	104
5.1.3	乌梁素海水质参数的时空分布规律	106
5.2	水生态系统调查与失衡分析	111
5.2.1	浮游动物调查及分析	111

5.2.2	浮游植物调查及分析.....	111
5.2.3	底栖动物调查及分析.....	112
5.2.4	鱼类调查及分析.....	113
5.2.5	水生植物调查及分析.....	113
5.3	流域社会经济发展对湖泊生态系统影响.....	117
5.3.1	流域社会经济概况.....	117
5.3.2	流域污染源解析及预测.....	118
5.3.3	问题分析.....	132
5.4	本章小结.....	133
	参考文献	133

第六章 乌梁素海湖泊水生态动力学模型构建与富营养化控制数值模拟 135

6.1	水动力学模型构建	135
6.1.1	MIKE21 模型简介	135
6.1.2	MIKE21 水动力模块	136
6.1.3	数学模型的验证.....	141
6.1.4	现状航道条件下的湖流形态分析.....	144
6.1.5	规划航道对湖区流场的影响.....	146
6.2	生态动力学模型构建.....	152
6.2.1	ECO Lab 简介.....	152
6.2.2	生态模型模板搭建.....	153
6.2.3	生态模型状态变量及表达式.....	154
6.2.4	生态动力学模型搭建.....	167
6.2.5	模型率定及验证结果.....	171
6.2.6	湖区不同形态氮磷平衡分析.....	173
6.3	草型湖泊富营养化控制数值模拟研究	174
6.3.1	湖泊富营养化控制方案设置.....	174
6.3.2	数值模拟结果分析.....	177
6.4	本章小结.....	185
	参考文献	186

第七章 基于水环境承载力的乌梁素海富营养化控制研究..... 188

7.1 乌梁素海流域水环境承载力核算与总量控制..... 188

7.1.1 湖泊水环境容量核算..... 188

7.1.2 污染物总量控制..... 190

7.1.3 小结..... 191

7.2 基于 SD 模型的流域社会经济结构调控策略 192

7.2.1 流域系统动力学模型构建..... 193

7.2.2 系统动力学模型有效性分析..... 198

7.2.3 社会经济发展情景分析..... 206

参考文献 210

第一章

我国草型湖泊的特征及分布

1.1 草型湖泊定义与特征

我国湖泊资源丰富,拥有天然湖泊 24 800 多个,其中大于 1 km^2 的湖泊共 2 300 多个,湖泊面积为 $70\,988\text{ km}^2$, 约占全国陆地总面积的 0.8%, 但湖泊的汇水范围及其对整个流域的自然生态环境和社会经济发展都产生着深远的影响。湖泊是陆地水资源的重要组成部分,我国湖泊储水总量 7 088 亿 m^3 , 其中淡水储量 2 250 亿 m^3 , 是地下水可开采量的 2.2 倍, 也是饮用水的重要来源, 全国城镇饮用水水源的 50% 以上取自湖泊。

自 20 世纪 80 年代以来, 由于工农业迅速发展, 人口急剧增长, 工业化和城市化进程加快, 增大了氮、磷等营养物质向水体的排放量, 特别近 20 年来, 我国许多湖泊都面临着渔业过度利用和人为富营养化等各种问题。从全国范围来看, 城市湖泊目前都已经处于富营养状态, 大部分大中型湖泊均已经达到发生富营养化的临界营养盐浓度或者已经处于富营养化状态。据环保部发布的 2012 年中国环境公报, 62 个国控重点湖泊(水库)中, I~III 类、IV~V 类和劣 V 类水质的湖泊(水库)比例分别为 61.3%、27.4% 和 11.3%。除密云水库和班公错外, 其他 60 个国控重点湖泊(水库)均开展了营养状态监测。其中, 4 个为中度富营养状态, 占 6.7%; 11 个为轻度富营养状态, 占 18.3%; 37 个为中营养状态, 占 61.7%; 8 个为贫营养状态, 占 13.3%。太湖为轻度污染, 总体为轻度富营养状态; 滇池为重度污染, 总体为中度富营养状态, 草海和外海均为重度污染, 均为中度富营养状态; 巢湖为轻度污染, 总体为轻度富营养状态。鄱阳湖水质良好, 全湖总体为中营养状态; 洞庭湖为轻度污染, 总体为中营养状态。洪泽湖为中度污染, 总体为轻度富营养状态。其他 28 个国控大型淡水湖泊中, 达赉湖、白洋淀和淀山湖 3 个湖泊为中度富营养状态; 小兴凯湖、贝尔湖、兴凯湖、南四湖、南漪湖、阳澄湖和高邮湖 7 个湖泊为轻度富营养状态; 瓦埠湖、升金湖、东平湖、菜子湖、乌伦古湖、龙感湖、武昌湖、阳宗海、斧头湖、骆马湖、洱海、程海、梁子湖、博斯腾湖、镜泊湖和洪湖 16 个湖泊为中营养状态; 泸沽湖和抚仙湖为贫营养状态。

以太湖梅梁湾和滇池等为代表的重污染湖区, 其水污染的程度和范围仍呈加重的趋势; 以洱海为代表的富营养化初期湖泊面临着水质恶化加重的压力; 北方以白洋淀和乌梁素海等为主的草型湖泊面临沼泽化威胁; 以巢湖东端湖区等为代表的饮用水水源地局部湖区已经威胁周边居民, 并带来社会安定问题; 鄱阳湖、洞庭湖等大型过水型湖泊水生态面临严重的生态退化风险。另外, 大城市周边湖泊富营养化仍有逐年加重趋势, 从而使许多浅水湖泊由沉水植物丰富的清水状态转变为藻类占主导的浊态。

湖泊的富营养化从营养物响应来看，主要为草型和藻型两类，草藻混合型应视为过渡型。由于水体营养物的增加，主要生物相应为浮游植物和大型水生植物，表现为浮游植物大爆发（藻型）和大型水生植物的蔓延（草型）。根据 Bachmann（2002）草型湖泊和藻型湖泊定义，当沉水植物与浮游藻类干重的比值 $r \geq 100$ 的定义为沉水植物占主体的草型清水稳态，比值 $r \leq 1$ 的定义为浮游藻类占主体的藻型浊水稳态，其余的则定义为中间过渡类型的湖泊状态。草型富营养化湖泊多发生在浅水湖泊（水深 $<4\text{ m}$ ），藻型富营养化在浅水和深水湖泊都可能发生。

草型湖泊富营养化的主要特征是，水体营养物浓度较高，大型水生植物过量生长。许多浅水湖泊水体 TN 和 TP 达到 1 mg/L 和 0.03 mg/L ，大型水生植物为主要优势种，覆盖度大于 70%，大型水生植物生物量超过 1.2 kg/m^2 会发生湖泊草型富营养化。王海军（2007）在对 40 多个长江流域浅水湖泊的实地调查和历史资料分析的基础上，提出沉水植物干重生物量可由湿重生物量乘以 0.08 获得。浮游藻类干重生物量则可由 Chl-a 含量乘以 70 获得（Scheffer et al.,1998）（表 1-1）。

表 1-1 湖泊稳态指标

统计特征	周年（夏季）	草型稳态 $r > 100$	中间过渡态 $1 < r < 100$	藻型稳态 $r < 1$
Z_{SD}/m	平均值	1.46 (1.84)	1.15 (1.46)	0.51 (0.81)
	中位数	1.51 (1.69)	0.91 (1.23)	0.38 (0.46)
	最小值	0.49 (0.67)	0.53 (0.58)	0.18 (0.18)
	最大值	2.59 (3.68)	3.26 (4.15)	1.48 (3.93)
Z_{SD}/Z_M	平均值	0.72 (0.69)	0.47 (0.54)	0.27 (0.30)
	中位数	0.73 (0.71)	0.39 (0.51)	0.25 (0.24)
	最小值	0.40 (0.31)	0.26 (0.23)	0.07 (0.07)
	最大值	0.95 (0.92)	0.91 (0.94)	0.85 (0.81)
TN/ (mg/m^3)	平均值	802 (851)	1 202 (878)	4 485 (3 018)
	中位数	708 (806)	1 023 (627)	3 773 (2 061)
	最小值	74 (88)	450 (169)	547 (131)
	最大值	410 (1 600)	2 526 (2 222)	13 690 (11 522)
TP/ (mg/m^3)	平均值	31 (40)	58 (46)	411 (303)
	中位数	34 (38)	52 (40)	256 (108)
	最小值	5 (5)	14 (18)	33 (23)
	最大值	62 (77)	107 (95)	1 424 (1 616)
Chl-a/ (mg/m^3)	平均值	3 (3)	9 (9)	70 (67)
	中位数	3 (3)	6 (6)	45 (20)
	最小值	1 (1)	2 (2)	3 (1)
	最大值	7 (8)	26 (47)	295 (478)

统计特征	周年（夏季）	草型稳态 $r > 100$	中间过渡态 $1 < r < 100$	藻型稳态 $r < 1$
$B_{MM}/(g/m^2)$	平均值	2 235 (3 350)	289 (439)	0 (0)
	中位数	1 339 (2 520)	208 (369)	0 (0)
	最小值	311 (368)	30 (27)	0 (0)
	最大值	9 132 (12 081)	896 (1 274)	0 (0)

王英才（2009）也在对长江中下游湖泊研究后，主要依据 TP、TN、透明度、沉水植物、Chla、浮游植物细胞数、浮游藻类优势种类七个主要指标和一个辅助指标底栖动物优势种类，提出湖泊演替五阶段，如表 1-2 所示。

袁冬海（2012）根据 Bachmann（2002）草型湖泊和藻型湖泊定义，结合白洋淀实际观测，利用比较湖沼学方法研究确定，在白洋淀湖泊区域，当沉水植物与浮游藻类干重的比值 $r \geq 200$ 的定义为沉水植物占主体的草型清水稳态，比值 $r \leq 10$ 的定义为浮游藻类占主体的藻型浊水稳态，其余的为中间过渡类型的湖泊状态。

1.2 草型湖泊分布及存在的问题

1.2.1 草型湖泊的分布

根据以上草型湖泊的定义，我国淮河以北湖泊的沉水植物与浮游藻类干重的比值 $r \geq 200$ 的归类为草型湖泊，比值 $r \leq 10$ 的归类为藻型湖泊；我国淮河以南湖泊水植物与浮游藻类干重的比值 $r \geq 100$ 的归类为草型湖泊，比值 $r \leq 1$ 的归类为藻型湖泊。

按照此判断依据，我国南方草型湖泊包括：大通湖、黄盖湖、毛里湖、安乐湖、珊瑚湖、柳叶湖、东湖、北民湖、芭蕉湖、岳阳南湖、洪湖、梁子湖、长湖、斧头湖、西梁湖、汴汉湖、大冶湖、保安湖、网湖、鲁湖、涨渡湖、汤逊湖、汉阳东湖、武昌东湖、赤东湖、野猪湖、豹解湖、太白湖、三山湖、上津湖、朱婆湖、后湖、武山湖、牛浪湖、童家湖、里湖、崇湖、三湖、海口湖、大沙湖、上涉湖、策湖、严西湖、花马湖、玉湖、鄱阳湖、军山湖、珠湖、赤湖、赛湖、新妙湖、南北湖、陈家湖、太泊湖、七里湖、龙感湖、黄大湖、泊湖、城西湖、菜子湖、瓦埠湖、南漪湖、城东湖、女山湖、武昌湖、升金湖、破岗湖、高塘湖、香涧湖、沱湖、焦岗湖、白荡湖、安丰塘、花园湖、黄陂湖、天井湖、沂湖、冬太湖、洪泽湖、高邮湖、骆马湖、石臼湖、阳澄湖、溇湖、白马湖、洮湖、邵伯湖、澄湖、大纵湖、固城湖、昆承湖、元荡、东钱湖、南四湖等 100 多个湖泊。

我国北方草型湖泊分布广泛，东北、西北、华北地区有白洋淀、衡水湖、微山湖、居延海、乌梁素海、哈素海、岱海、黄旗海、达里诺尔、科尔沁沼泽、呼伦湖等共计 60 多个湖泊，水面总面积超过 5 000 km²。这些草型湖泊不仅承担饮用水水源、旅游、居住及水产养殖功能，还有极高的生态、经济功能，对区域环境安全极其重要。但是干燥的气候、大量污水排入，导致这些草型湖泊普遍存在富营养化和沼泽化问题。

表 1-2 湖泊稳态状态划分

阶段			主要控制指标					辅助控制指标	
			1	2	3	4	5	6	7
代码	简称	名称	总磷 / ($\mu\text{g/L}$)	总氮 / ($\mu\text{g/L}$)	透明度 / m	沉水植物 / (g/m^3)	叶绿素 / a ($\mu\text{g/L}$)	浮游植物细 胞数	浮游藻类优 势种类
I	清水 稳态	草型清水恒稳态 (unshiftable state of macrophytes- do minated clear water)	<30	<500	>1.0	盪度 >70% >3 000	<5	$\leq 10^5$ 水平	金藻、鼓藻、 硅藻、甲藻、 绿藻
II	草— 藻共 存阶 段	草型清水变稳态 (shiftable state of macrophytes- do minated clear water)	30 ~ 100	500 ~ 2 500	0.5 ~ 2.5	盪度 30% ~ 70% 500 ~ 5 000	2 ~ 10	$10^5 \sim 10^6$ 水平	硅藻、蓝藻、 绿藻、隐藻
III	草— 藻共 存阶 段	藻型清水变稳态 (shiftable state of algae-dominated turbid water)	30 ~ 100	500 ~ 2 500	0.5 ~ 2.5	盪度 <40% 0 ~ 500	5 ~ 20	$10^6 \sim 10^7$ 水平	硅藻、蓝藻、 绿藻
IV	藻型 浊水 稳态	藻型浊水恒稳态 (unshiftable state of algae-dominated turbid water)	>100	>5 000	<0.5	盪度 <10% 0	>20	> 10^7 水平	绿藻、蓝藻、 裸藻
V	黑臭 阶段	菌型黑水恒稳态 (unshiftable state of bacteria-dominated black water)	$P/R < 1$, 以异样 细菌为主	0	0	0	0		极少量蓝藻
								底栖动物优势类群	扁蝾螺 (Planorbidae)、纹 沼螺 (Parafossarulus)、萝卜螺 (Radix)、异腹鳃螺 蚊 (Einfeldia)、多足摇蚊 (Polypedilum)、苏氏尾鳃蚓 (Branchiura sowerbyi)、管水 蚓 (Aulodrilus)
									环棱螺 (Bellamya)、纹沼 螺 (Parafossarulus)、长足摇 蚊 (Tanypus)、苏氏尾鳃蚓 (Branchiura sowerbyi)、管水 蚓 (Aulodrilus)
									环棱螺 (Bellamya)、纹沼 螺 (Parafossarulus)、长足摇 蚊 (Tanypus)、苏氏尾鳃蚓 (Branchiura sowerbyi)、管水 蚓 (Aulodrilus)
									环棱螺 (Bellamya)、长 足摇蚊 (Tanypus)、摇 蚊 (Chironomidae)、雌翅 摇蚊 (Glyptotendipes)、红 裸须摇蚊 (Propiloscerus akamusi)、水丝蚓 (Limnodrilus)、苏氏尾鳃蚓 (Branchiura sowerbyi)、颤蚓 科 (Tubifex)、霍甫水丝蚓

白洋淀、乌梁素海是北方草型湖泊的代表，湖水较浅，水生植物覆盖度达到 80% 以上。近年来水量的短缺、上游污水的排入，造成富营养化程度加剧，沼泽化进程加快，大大降低了生态服务功能的发挥，严重影响了周边群众的生活和生产。

1.2.2 草型湖泊研究存在的问题

国际上湖泊的研究多专注于藻型湖泊富营养化的机理和防治技术，在理论和方法上取得了重要突破，在实践上也有许多成功的案例。但由于湖泊类型的复杂性，到目前还没有真正在草型湖泊的问题上给予足够的重视。我国从“七五”就开始了湖泊富营养化的研究和防治工作，特别针对藻型湖泊，完成了多个国家级和省部级科研项目和示范工程，产生了大量成果和专利，在理论和方法体系的建立上取得了一系列重要成果。但草型湖泊富营养化和沼泽化的研究基础非常薄弱，使得湖泊草型富营养化机理、规律以及沼泽化趋势缺乏必要的理论基础，导致草型湖泊治理在关键技术方面的落后和缺乏，严重制约了草型湖泊污染的控制和水体的修复。

不同于藻型湖泊，草型湖泊的富营养化和沼泽化防治由于其内部作用机制的差异及特殊性，使原有藻型湖泊富营养化防治的理论和技术在解决草型湖泊类似问题上面临很大的局限性，难以系统有效地指导实践工作。因此，需要着眼于草型湖泊富营养化和沼泽化防治的理论方法及关键技术支撑需求，研究探索草型湖泊富营养化和沼泽化的发生发展、驱动机制、变化规律和防治途径，通过因地制宜的创新技术自主研发，突破原有技术的简单集成，创建草型湖泊富营养化与沼泽化防治的理论、方法和关键技术支撑，并丰富和发展草型湖泊相关理论体系，推动草型湖泊生态管理的实践。

我国对湖泊的研究一直非常重视，从湖泊调查到目前富营养化的防治，涵盖了湖泊问题的许多层面，培养了大批湖泊研究和理论的专门科技人员，并出版了大量论著。但随着国民经济的快速发展，各类湖泊生态环境问题日趋严重，传统的湖沼学已难以系统指导当前湖泊所面临的新问题。对于草型湖泊，更是缺乏长期定位监测的系统支持，缺乏对机理机制整体上的理解，也无法提出科学的调控和保护原理。

1.3 草型湖泊富营养化及控制研究进展

1.3.1 草型湖泊富营养化研究及其生态修复技术

自 19 世纪末期以来，以湖泊富营养化为重点的湖泊生态环境问题研究，推动了湖泊水质改善与生态修复等一系列工作的开展。然而，由于湖泊成湖地质年代的不同，所处地区地质结构和气候变化历程各异，不同“年龄”湖泊所呈现出来的问题也不同，从而使湖泊恢复工作体现出明显的个性特征，增加了湖泊生态恢复的难度，限制了湖泊科学研究与工程实践的前进步伐。

20 世纪中叶以来，湖泊生态环境问题日益突出，众多国际组织与科研机构将湖泊生