

Driving Mechanisms and
Regulating Measures for Lake Terrestrialization:
A Case of Lake Baiyangdian

白洋淀沼泽化驱动机制 与调控模式

崔保山 韩 祯 李 夏 蓝 艳 白军红 蔡燕子 等/著



科学出版社

白洋淀沼泽化驱动机制与调控模式

Driving Mechanisms and Regulating Measures for Lake
Terrestrialization: A Case of Lake Baiyangdian

崔保山 韩 楨 李 夏 蓝 艳 白军红 蔡燕子 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以华北平原最大的草型浅水湖泊白洋淀为研究对象。根据生态系统演替的基本理论,通过长期对白洋淀生态系统的定位监测、模拟实验和工程实践,以水生植物群落组成结构变化为切入点,识别了白洋淀沼泽化的演替规律;从物理过程、化学过程、生物过程入手,阐明了沼泽化的驱动机制;结合水文连通、水生植物多目标配置、台田格局优化等方法,构建了延缓沼泽化过程的调控模式。

本书可作为高等院校环境科学与工程专业、水利工程专业、生态学专业研究生和高年级本科生的教材或参考书,也可供环保、林业、水利等部门的研究和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

白洋淀沼泽化驱动机制与调控模式/崔保山等著. —北京:科学出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-03-052865-0

I. ①白… II. ①崔… III. ①白洋淀-湖泊-沼泽化-治理 IV. ①X522

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第110678号

责任编辑:张 菊/责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年11月第一次印刷 印张:26 3/4

字数:630 000

定价:188.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

自然状态下，湖泊的沼泽化过程极为缓慢，往往需要上千年甚至更长时间。但在气候变化和人类活动的强烈干扰下，湖泊沼泽化速度显著加快，极大地损害了湖泊的生态服务功能，严重缩短了其寿命。在诸多湖泊类型中，草型浅水湖泊水质良好，生产力水平和生物多样性水平较高，具有优良的生态服务功能和极高的社会经济价值。正因如此，草型浅水湖泊更易被人类开发利用，当人类活动干扰的强度超过湖泊生态系统自我维持、自我调节的能力时，湖泊就会产生一系列生态环境问题，其中，富营养化和沼泽化是最为突出的两种表现。与沼泽化问题相比，湖泊富营养化问题一贯受到管理者和科研工作者的高度重视。“九五”以来，围绕着太湖、巢湖、滇池等“三湖”的治理，国家在基础研究、技术开发、实践应用等方面投入了大量的人力、物力、财力，并且出台了一系列政策、法规、指导意见和管理办法。经过长期努力，上述湖泊的营养盐富集趋势和富营养化水平得到了基本控制，科研同行也系统构建了富营养化治理的理论框架和技术体系，并且总结了丰富的实践经验。相比之下，湖泊沼泽化问题得到的关注较少，无论是在基础理论、研究方法上，还是在实践应用上，都有待进一步完善。

党的十八大报告指出，“必须树立尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念，把生态文明建设放在突出地位，融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程”，要“五位一体”地建设中国特色社会主义。由此可见，生态文明建设已经被提到经济社会可持续发展的战略高度。环境保护部、水利部近年出台的一系列文件也表明，湖泊生态环境的保护与恢复已成为生态文明建设的重要抓手和重点任务。在此背景下，深入认识草型浅水湖泊沼泽化过程，构建有效调控沼泽化趋势的技术手段，不仅在科学研究上具有重大意义，同时也是大力推进湖泊生态环境保护和恢复工作的必然要求。

本书选择的研究区——白洋淀，是我国华北地区最大的草型浅水湖泊，在区域经济社会发展和生态环境保护等方面地位极其重要。过去 30 年来，受气候变化和人类活动的双重影响，白洋淀天然入淀径流逐年减少，平均水位不断下降，淀底高程逐年抬升，水生植物蔓延生长且群落结构单一，生物残体大量累积，表现出典型的沼泽化现象。本书作者崔保山教授及其团队，长期关注白洋淀的生态环境问题，在白洋淀生态需水、白洋淀生态补水效应评估等方面取得了一系列研究成果，引起了科研同行和管理部门的广泛关注。在上述工作的基础上，研究团队面向白洋淀的沼泽化问题，以揭示沼泽化的演替规律、阐明沼泽化驱动机制为出发点，以构建延缓白洋淀沼泽化趋势的调控模式、维持区域生态平衡、保护生物多样性、改善环境效益等为落脚点，以沼泽化发生、发展的过程为研究主线，在生态学、水文学、湿地学、环境化学等相关学科理论的指导下，结合国内外相关文献、历史资料和实地调研结果，综合运用数理统计、模拟试验、遥感模型、景观格局分析等手

段，开展了大量研究工作，特别是对沼泽化阶段的划分、富营养化和沼泽化的关系、淀内侵蚀产沙特征及其对沼泽化的贡献、水生植物分解-累积规律及其对沼泽化的贡献等关键科学问题进行了积极探索。当前，雄安新区的开发建设为白洋淀的生态修复和保护带来了重大历史机遇，希望本书的出版不仅能够体现对白洋淀生态系统开展全面深入研究的实践需求和科学意义，也能为解决白洋淀的生态环境问题提供一定参考。

全书共分 10 章，崔保山提出了专著研究工作的总体思路，负责全书的框架设计，韩祯负责全部章节的统稿和定稿。具体撰写分工如下：第 1 章由崔保山、韩祯、蔡燕子撰写；第 2、3 章由崔保山、韩祯撰写；第 4、5 章由崔保山、韩祯、蓝艳撰写；第 6 章由崔保山、韩祯、蓝艳、张宇、蔡燕子撰写；第 7 章由蓝艳、李晓文撰写；第 8 章由韩祯、白军红、王婷婷撰写；第 9 章由崔保山、李夏、张永涛撰写；第 10 章由崔保山、韩祯撰写。此外，张永涛硕士、王婷婷硕士、刘佩佩硕士、高楠楠硕士协助完成了本书部分内容的修订。研究生解成杰、马旭、骆梦、宁中华、闫秋如、邱冬冬、汪方芳等同学协助完成了本书图片、表格和参考文献的整理等工作。

感谢国家水体污染控制与治理科技重大专项“白洋淀草型富营养化和沼泽化逐级治理技术与工程示范课题”（课题编号：2009ZX07209-008）对本书出版的资助，同时感谢科学出版社各位编辑在本书撰写和出版过程中给予的大力支持！

由于作者水平有限，研究和编写过程中难免存在一些不足之处，敬请广大读者批评指正，以便进一步完善和提高！

作 者

2016 年 9 月

目 录

1 绪论	1
1.1 草型浅水湖泊及其沼泽化问题	1
1.1.1 草型浅水湖泊的定义及主要特征	1
1.1.2 草型浅水湖泊的沼泽化问题	2
1.2 草型浅水湖泊沼泽化研究进展	5
1.2.1 概念界定	5
1.2.2 演替阶段	6
1.2.3 驱动机制	7
1.2.4 沼泽化研究中的“过程-格局”关系	19
1.2.5 调控手段	23
1.3 草型浅水湖泊沼泽化研究的关键科学问题	29
1.3.1 演替过程的阶段化	29
1.3.2 驱动机制的综合化	29
1.3.3 调控措施的针对性	29
2 白洋淀概况及其沼泽化问题	31
2.1 基本特征	31
2.1.1 地理位置	31
2.1.2 形态结构	32
2.1.3 水文特征	33
2.1.4 生态系统组成结构	33
2.1.5 淀内人类活动	36
2.1.6 当前主要生态环境问题	37
2.2 白洋淀的沼泽化问题	39
2.2.1 地质历史时期的“湖-沼”转化	39
2.2.2 淤积沿革	40
3 研究方法	42
3.1 演替规律的识别方法	42
3.1.1 理论基础	42
3.1.2 识别方法	44
3.2 驱动机制的揭示方法	49
3.2.1 白洋淀沼泽化的物理过程	49

3.2.2	白洋淀沼泽化的化学过程	57
3.2.3	白洋淀沼泽化的生物过程	63
3.3	沼泽化趋势的预测方法	76
3.4	调控模式的构建方法	77
3.4.1	台田区水质调查	77
3.4.2	台田结构数据采集	79
3.4.3	台田结构对水质影响的试验方法	79
3.4.4	“淀泊-水道”网络优化方法	82
4	白洋淀沼泽化演替规律	86
4.1	近三十年来景观格局变化	86
4.1.1	景观类型面积	86
4.1.2	景观格局指数	89
4.2	草型浅水湖泊的沼泽化演替模式	91
4.3	不同淀泊所处的沼泽化演替阶段	93
4.3.1	评价指标	93
4.3.2	阶段划分	98
5	白洋淀沼泽化的物理过程	101
5.1	水文特征	101
5.1.1	降雨量	101
5.1.2	入淀水量	102
5.1.3	水位、面积和容积	105
5.1.4	水量平衡	106
5.2	外源泥沙	108
5.3	淀内坡面侵蚀产沙过程模拟试验	109
5.3.1	侵蚀产沙过程模拟	110
5.3.2	降雨强度对产沙量的影响	112
5.3.3	径流量与产沙量的关系	114
5.4	土壤侵蚀空间模拟	115
5.5	淀底淤积特征分析及空间化	118
5.5.1	回归方程特性	118
5.5.2	淀底淤积现状	120
5.5.3	淤积特征变化	121
6	白洋淀沼泽化的化学过程	126
6.1	沼泽化过程中化学元素的循环转化	127
6.1.1	表层沉积物中的元素分布	127
6.1.2	沉积物的形态结构	129
6.1.3	沉积物柱状样中的生源要素	131

6.1.4	沉积物的其他特征	134
6.1.5	台田土壤中的化学沉积	145
6.1.6	台田土壤的反硝化作用	148
6.2	水生植物在营养盐周转中的作用	151
6.2.1	元素含量变化	151
6.2.2	元素持有量变化	154
6.2.3	元素周转特征	156
6.3	白洋淀富营养化和沼泽化的关系	159
6.3.1	白洋淀富营养化特征	159
6.3.2	淀泊尺度的“富-沼”关系	164
6.3.3	驱动因素和反馈关系	167
7	白洋淀台田格局及其对沼泽化的影响	169
7.1	台田格局在景观尺度上的变化特征	169
7.1.1	台田面积变化趋势	169
7.1.2	影响因素分析	175
7.2	台田对水生植物群落结构的影响	180
7.2.1	台田区水生植物的种类、生物量和丰富度	180
7.2.2	影响因素分析	183
7.2.3	台田沟渠内主要群落类型的划分	188
7.2.4	影响因素分析	193
7.2.5	台田芦苇产量及其残体累积量	195
7.3	台田结构和格局对水体富营养化的影响	197
7.3.1	台田沟渠水体的富营养化特征	197
7.3.2	台田结构指标和水质富营养化水平的关系	200
8	白洋淀水生植物的生长蔓延过程	205
8.1	优势水生植物对环境因子的响应	206
8.1.1	挺水植物对水位的响应	206
8.1.2	不同水位梯度上挺水植物的生长过程模拟	207
8.1.3	沉水植物对营养盐和光照条件的响应	210
8.1.4	不同环境梯度上沉水植物的生长过程模拟	211
8.2	优势水生植物对人类活动强度的响应	213
8.2.1	淀内人类活动的定量评价	213
8.2.2	水生植物对人类活动的响应	217
8.3	水生植物群落的小尺度空间分布格局	219
8.3.1	水生植物群落组成结构特征	220
8.3.2	水生植物群落在小尺度上的变化	224
8.3.3	空间格局定量分析	228

8.4	小尺度分布格局与环境因子的关系	241
8.4.1	物种多样性与环境因子的关系	241
8.4.2	群落分布与环境因子的关系	243
8.4.3	聚集强度与环境因子的关系	245
8.4.4	生物量与环境因子的关系	247
8.5	水生植物生物量控制值及其影响因素	251
8.5.1	样地分类及水生植物群落类型	251
8.5.2	主要群落类型生物量变化特征	252
8.5.3	优势物种生物量变化特征	257
8.5.4	水生植物生物量控制阈值确定	261
8.5.5	优势水生植物生物量的主要影响因子	265
9	白洋淀水生植物的分解累积规律	274
9.1	优势水生植物的分解规律	274
9.1.1	残体化学组成特征和样地水环境条件	275
9.1.2	残体分解速率和质量损失	276
9.1.3	植物种类和样地环境条件对残体分解的影响	278
9.1.4	优势水生植物分解过程的多元逐步回归	281
9.2	混合残体分解的交互作用	283
9.2.1	残体初始自身营养盐特性特征	283
9.2.2	植物种类和样地环境对混合型残体分解的影响	285
9.2.3	混合型分解中植物种类的相互作用特征	288
9.2.4	残体分解中碳、氮、磷含量的动态变化	295
9.3	芦苇根状茎在水体和土壤中的分解	297
9.3.1	芦苇根状茎在水体中的分解和营养盐释放	297
9.3.2	芦苇根状茎在土壤中的分解和营养盐释放	305
9.3.3	芦苇根状茎在水体和土壤中的分解对比及其影响因素	312
9.4	水生植物残体的生物累积	321
9.4.1	沉积物中水生植物残体生物量分布	322
9.4.2	台田格局对生物累积的影响	323
9.4.3	生物累积对淤积量的贡献	327
9.5	水生植物“分解-累积”过程的数学模型	328
9.5.1	生态系统模型概述	329
9.5.2	模型发展	329
9.5.3	主要模块	330
9.5.4	数据准备	337
9.5.5	模型校准	340
9.5.6	敏感性分析	342

9.6	模拟结果	344
9.6.1	白洋淀生物累积过程模拟	344
9.6.2	不同水位情景下水生植物残体累积量预测	347
9.7	模型评价	352
9.7.1	与同类模型比较	352
9.7.2	主要影响因素	353
9.7.3	模型的改进方向	354
10	白洋淀沼泽化趋势预测与调控模式	355
10.1	不同发展情景下主要淀泊淤积升幅预测	355
10.1.1	发展情景	356
10.1.2	不同情景下主要淀泊的淤积升幅	357
10.2	不同水位情景和淤积情景下主要淀泊水深	360
10.2.1	补水情景	360
10.2.2	不同情景下主要淀泊的水深预测	362
10.3	基于淀泊网络结构优化的沼泽化调控模式	367
10.3.1	白洋淀网络结构概化	368
10.3.2	基于水文连通的网络优化模式	370
10.4	水生植物群落结构的多目标优化配置	373
10.4.1	基本原理	373
10.4.2	计算方法	373
10.4.3	配置结果	375
10.4.4	实际效果	376
10.5	台田格局优化调控水生植物蔓延	378
10.5.1	台田高度 H 的确定	379
10.5.2	台田长度 L 的确定	381
10.5.3	台田坡度 α 的确定	383
10.5.4	台田宽度 D 及台田沟渠上宽 D_1 、下宽 D_2 的确定	384
10.6	台田区水体营养盐削减	385
10.6.1	水文水动力调控净化效果	385
10.6.2	台田土壤净化潜水	387
10.6.3	利用台田区优势水生植物富集营养盐	389
	主要参考文献	393

1.1 草型浅水湖泊及其沼泽化问题

1.1.1 草型浅水湖泊的定义及主要特征

浅水湖泊是世界上最常见的淡水生态系统 (Downing et al., 2006; Wetzel, 2001)。它是由湖泊盆地、淡水和湖水中的物质 (矿物质、可溶性物质、有机物、水生植被等) 组成的系统, 在自然界的能量流动和物质循环中扮演重要角色。同时, 浅水湖泊在调整河流流量、预防洪水、减少灾害、供给栖息地, 以及为人类社会经济活动提供水资源和食物资源等方面起着至关重要的作用。我国的湖泊数量众多, 分布广泛, 湖泊总面积为 85 938 km² (国家林业局, 2014), 其中约有 1/3 的湖泊为淡水湖, 主要分布在东部平原、内蒙古-新疆高原、云南-贵州高原、青海-西藏高原及东北平原 (Wang, 1998)。浅水湖泊约占淡水湖总面积的 90%, 主要位于东部平原, 即长江流域的中下游、淮河流域、黄河流域的下游、海河流域及沿海的运河 (王苏民和窦鸿身, 1998)。通常“浅水”湖和“深水”湖是相对的, 但二者没有明确的深度界限。Moss 等 (1997) 认为最大深度超过 3m 的为深水湖。“浅水”湖和“深水”湖本质的区别在于是否有跃温层。跃温层包括上行混合层 (变温层) 和底层 (均温层), 两者不论是化学特征还是生物特征彼此都完全不同, 并且在夏季两层保持独立。深水湖通常在夏季有明显的跃温层, 而浅水湖并不存在这种现象 (Qin et al., 2006)。

草型浅水湖泊是指滋生大量水生维管束植物, 并占据湖泊中水生植物生物量大部分的浅水湖泊。草型浅水湖泊由于其水质优良、水草丰富、物种结构稳定、生物多样性好, 具有较为优越的自然生态系统服务功能和较高的社会经济价值。其主要特征如下。

1) 无人干扰或弱人为干扰下, 草型浅水湖泊水质良好、清澈, 溶氧条件好, 初级生产力强, 富营养化程度低, 水生资源利用价值较高, 生态系统自稳定性较强。

2) 在以大型水生植物响应型的草型湖泊内, 各种挺水植物和沉水植物结构稳定, 群落盖度大。底栖生物物种多样性、密度和生物量均较高, 生态系统的复杂性、空间异质性

决定了草型浅水湖泊具有较强的功能稳定性。

3) 草型浅水湖泊的大型水生植物面积基本保持稳定,对湖泊水体中的营养盐具有较高的控制调节能力,能够较好地控制浮游植物的分布范围和数量。草型湖泊中大型水生植物、浮游植物与水体中营养盐三者之间存在一定的制约机制。

4) 草型浅水湖泊中的有机质成分积累和增加的速度较为迅速,而且在时间上与湖泊围垦活动的时间基本一致。

5) 草型浅水湖泊的沉积本底磷含量较高,间隙水的 pH、Eh、EC、氮磷营养盐、溶解性有机碳和无机碳等参数高于藻型湖泊。

20 世纪 80 年代以来,由于人类活动干扰的强度不断加剧,湖泊水体污染日益严重。草型湖泊由于其较高的社会经济价值,更是人类开发的重点对象,进入 21 世纪以来,全国主要的草型湖泊水质全面恶化,水体污染不断加重,湖泊生态系统健康受到严重威胁。造成这种状况的原因主要有以下几个方面:①点源污染严重。草型湖泊周边的工业和生活污水排放量大,处理程度低,水质差,给草型湖泊的自净系统带来了巨大的压力。②面源污染难以控制。草型湖泊周边及内部农业,以及水产养殖业的面源污染强度不断加大,控制和处理难度大。③水量匮乏。草型湖泊耗水量巨大,入湖水量减少,湖泊生态系统的基本功能不能充分发挥。

富营养化水平不断加剧是草型浅水湖泊生态环境恶化的主要表现之一。在自然条件下,湖泊由贫营养向富营养逐渐发展的过程非常漫长。在人类活动的扰动之下,湖泊富营养化的水平快速升高。例如,长江中下游湖泊在 20 世纪 70 年代之前大部分为“草型湖泊”,湖中水草茂盛,自净能力强,而后来由于填湖造田、网围养殖及农业、工业污染,很多湖泊水生植物已经灭绝,演变为“藻型湖泊”。草型湖泊的这种非正常演化给湖泊本身和人类社会都带来了重大的影响和损失。

导致我国草型湖泊的富营养化问题不断发生的原因可以简单归结为以下几个方面:①外源输入和内源污染现象严重。草型湖泊的开发力度较大,内部的养殖和周边的农业排放的污染物,尤其是氮磷等营养盐进入湖泊水体是造成草型湖泊富营养化的主要原因。②水域封闭,水体流动性差。由于上游大量水利工程的建设,湖泊水体的流动性下降,湖泊换水周期延长,湖泊的水文条件更加适宜浮游生物生长和爆发。③生物多样性减少。由于人类活动的扰动,草型湖泊中大型水生植物的种类单一,群落结构简单,缺乏对于营养盐排泄和浮游生物过量生长的有效限制。

1.1.2 草型浅水湖泊的沼泽化问题

1.1.2.1 草型浅水湖泊沼泽化的定义

草型浅水湖泊沼泽化 (terrestrialization),是指湖泊在长期泥沙淤积和生物累积的共同作用下,湖盆逐渐变浅,在光照、营养盐、温度等环境条件适宜的情况下,沉水、漂浮和挺水植物开始大量生长,这些水生植物死亡后,残体逐年累积,导致水深淤浅,湖面萎

缩, 优势水生植物群落从沉水植物转变为挺水和沼生植物, 草型浅水湖泊逐渐演替为沼泽 (王苏民和窦鸿身, 1998)。沼泽化是草型浅水湖泊生态系统的自然演替和必然趋势, 也是其衰亡的标志。

1.1.2.2 人类活动对草型浅水湖泊沼泽化的影响

草型浅水湖泊具有洪水调蓄、气候调节、生产生活用水供给、动物栖息地保障、水产品生产等多种生态服务功能和社会经济价值 (Jeppesen, 1998; Scheffer, 2007)。正因如此, 这类湖泊更容易受到人类活动的干扰。在自然状态下, 其沼泽化过程极为缓慢, 往往需要几千年甚至更长的时间才能完成。但当人类活动强度超过其自身调节能力时, 草型浅水湖泊正常的物理、化学和生物过程均会受到干扰, 导致沼泽化演替速度的大幅加快 (Mäemets and Freiberg, 2005; Papchenkov, 2003; Partanen and Luoto, 2006; 杨再福等, 2003; 邹尚辉, 1989)。人类活动对草型浅水湖泊的干扰主要有以下表现形式。

(1) 改变水文特征

草型浅水湖泊流域内及其周边生产生活用水量的增加能够造成入湖水量的减少和水位降低 (衷平等, 2005); 流域上游土壤侵蚀会导致入湖河流携带大量泥沙, 造成湖底高程抬升、水深淤浅、水域面积萎缩和蓄水量减少 (李景保等, 2008); 泥沙淤积还能够在湖滨带和浅水区形成大量浅滩, 为挺水植物芦苇、香蒲、茭草的蔓延扩展创造条件 (Lan et al., 2010); 随着人口增加和经济发展, 草型浅水湖泊内的网箱养殖规模不断扩大, 大面积围网能够通过阻滞水流和风浪形成静水环境, 水鳖、浮萍等浮叶植物和篦齿眼子菜、轮藻等沉水植物逐渐蔓延连片形成“浮毯”或“草甸” (Hilt et al., 2006; 吴庆龙等, 2000), 大量占据了水体空间, 腐烂分解后还容易引发“茭黄水”现象 (谷孝鸿等, 2005)。

(2) 提高营养水平

草型浅水湖泊周边生活污水的排放, 含氮/磷肥料的使用可以通过地表径流进入水体, 加剧其富营养化水平, 促进大型水生维管束植物, 尤其是挺水植物初级生产力的增加, 在收割利用率较低的情况下, 死亡植物残体大量堆积在湖底, 和泥沙淤积共同作用, 剧烈抬升湖底高程 (尚士友等, 2003, 2004)。

(3) 减小湖泊容积

由于经济利益的驱使, 草型浅水湖泊沿岸带的围垦非常普遍, 围垦活动一般先通过抽排泄空湖容形成浅滩, 沼生植物和多年生木本植物得以定植并向浅水区和湖心区蔓延, 严重挤压了沉水植物的生存空间; 围垦还造成湖泊调蓄量的下降, 增大了洪涝灾害的威胁 (李景保等, 2005; 张毅等, 2010)。

(4) 加速水生植物群落结构演替

由于人类活动对草型浅水湖泊水文水质条件及形态结构的改变, 水生植物, 尤其是沉水植物的多样性、丰富度和生物量均显著下降, 挺水植物如芦苇、香蒲、和茭草的初级生产力不断提高, 分布范围不断扩大, 群落结构演替明显加快 (Kolada et al., 2014)。

在高强度、大规模、长时间人类活动的作用下, 草型浅水湖泊沼泽化往往具有以下表

现：大型水生植物在湖泊中占据优势地位，初级生产力十分旺盛，由于光照、营养条件充足，大型水生植物光合作用导致水体中的二氧化碳减少，水体 pH 上升，造成水生植物和动物的死亡；过度生长的植物死亡后，在湖泊内部腐败分解，造成二次污染，营养盐滞留在水体中。植株的分解消耗水体中的溶解氧并且产生有害气体，造成水生动植物的死亡；植株残体滞留在湖泊中，体现为较强的生物填平作用，加速了湖泊的沼泽化进程，造成湖泊的自然寿命缩短，应有的自然和经济价值减少；湖泊生物结构的破坏和食物链的断裂造成草型湖泊的水体日益恶化，耐污、耐腐物种占据主导地位，湖泊生态系统功能逐步退化，沼泽化演替趋势明显加快。

1.1.2.3 我国典型草型湖泊的沼泽化现状

近几十年来，我国平均每年有将近 30 个草型浅水湖泊因沼泽化问题而消失（尚士友等，2003）。沼泽化趋势加快会导致湖泊面积萎缩、水质恶化、生物多样性降低、渔业资源枯竭、湖泊寿命大幅缩短、生态功能严重退化，给经济、社会、环境都带来严重损失。除了富营养化之外，沼泽化趋势加快已经成为湖泊生态系统面临的第二大威胁。

我国华北平原和长江中下游地区的草型浅水湖泊沼泽化现象最为显著。湖泊所处流域上游土壤侵蚀引起的泥沙淤积，以及人类以发展经济为目的的围垦利用，是造成这种现象的主要原因。这两种原因往往同时存在，推动着草型浅水湖泊的快速沼泽化。由于流域上游植被的大规模砍伐破坏，在强降雨，尤其是汛期 7 月下旬到 8 月上旬几场大暴雨的冲刷作用下，大量泥沙通过入湖河流进入湖泊中（Liu et al., 2007a; Nakayama and Watanabe, 2008）。具体来讲，在长江中下游地区，入湖河流含沙量的增加使得湖泊的容积和水面面积均不断萎缩（Liu et al., 2007a; Nakayama and Watanabe, 2008），甚至导致了浅水湖泊的消失（Huang et al., 2008）。这一地区湖泊总面积由 1949 年的 25 828km² 减少到现在的 10 493km²，面积减小的幅度为 59.4%。以洞庭湖为例，其面积由 20 世纪 50 年代初的 4300km²，减少到现在的 2270km²，面积减少近一半。此外，为了满足人口增长和经济发展的需求，大面积的湖滨带和浅水滩地被围垦。我国大规模围垦始于 20 世纪 50 年代早期，持续到 70 年代晚期，给湖泊蓄水量、容积等造成了严重损失。据统计，20 世纪 80 年代以来，江汉平原围湖造田规模巨大，湖群面积下降迅速。统计面积大于 0.5km² 的湖泊总面积变化可以发现，50 年代初湖泊面积为 4707.5km²，80 年代为 2656.8km²，面积缩小了 43.3%。在太湖流域，已建圩（圩指湖泊围垦建造的土制堤坝）湖泊达 498 个，受围垦的湖泊为 239 个，湖泊面积减少了约 529km²；因围垦而消亡的湖泊为 165 个，占到该区原有湖泊数量的 23.3%。大通水文站以上长江中游地区的湖泊面积由 20 世纪 50 年代初的 17 198km²，减少到现不足 6600km²，约 2/3 的湖泊因围垦而消失。其中，洞庭湖面积已由中华人民共和国成立初期的 4350km² 急剧缩小至 2625km²；鄱阳湖面积也由 1949 年的 5200km² 减少到目前的 2933km²。在号称“千湖之省”的湖北省，在 20 世纪 50 年代末共有湖泊 1066 个，至 80 年代初仅剩约 309 个，目前面积大于 1km² 湖泊仅剩 181 个，大于 10km² 的湖泊仅剩 44 个（不包括长江干流人工改道形成的水域）（杨桂山等，2010）。直到 80 年代中期，当地政府开始出台一系列政策限制围垦并在围垦区实施“退耕还湖”行动

计划 (Fang et al., 2005)。因此, 在 1978 ~ 1998 年, 湖泊的数量和面积都有一定程度的增加。但与 20 世纪 50 年代相比, 湖泊数量和面积仍然较小。

当前, 我国的湖泊环境问题已得到中央和各级地方政府的高度重视, 以及社会各界的广泛关注。“九五”以来, 国家对污染严重的太湖、巢湖、滇池“三湖”开展了大规模治理, 并取得了显著的成效, 有效遏制了水质恶化的趋势。2011 年以来, 财政部、环境保护部开展了良好湖泊生态环境保护试点工作, 对未被污染的湖泊采取一些预防措施, 对遭受轻度污染的湖泊进行抢救性保护, 获得了较好的环境和社会效益。但必须要指出的是, 减缓富营养化是目前湖泊环境治理的重点任务, 相关评价方法、成因机制和治理技术的研究都取得了重大突破。而相比之下, 沼泽化问题仍未得到广泛关注和足够重视。

1.2 草型浅水湖泊沼泽化研究进展

草型浅水湖泊的沼泽化问题已经引起了一些国内外学者的关注, 在欧洲多瑙河流域的 Oxbow 湖、芬兰北部大部分湖泊、波兰的 Starowlany 湖、希腊南部的 Stymfalia 湖、中国的东太湖、洪湖、太湖流域、南四湖、乌梁素海、洞庭湖等草型浅水湖泊中已开展了大量的研究。但相比湖泊富营养化, 沼泽化问题尚未得到广泛关注和足够重视, 相关的理论基础还比较薄弱、观测数据较少, 因此难以全面认识沼泽化的演替规律并准确揭示其驱动机制。现就当前国内外草型浅水湖泊沼泽化的研究进展综述如下。

1.2.1 概念界定

沼泽是一种特殊的自然综合体或生态系统, 它由水体或陆地演化而来, 但又区别于二者 (黄锡畴, 1982)。沼泽这种半水半陆的生态环境, 决定了它特殊的生物、物理、化学过程和地理分布规律。沼泽的发育规律涵盖了其发生发展的复杂过程, 是各种自然因素相互作用的结果, 其形成一般具备三个条件: 一是地表过湿或有薄层积水; 二是生长有湿生植物或沼泽植物; 三是有泥炭积累或者发育有潜育层 (邹尚辉, 1989)。沼泽的发育过程首先受到气候背景和水位因素的制约, 其次受到地区性条件, 如新构造运动、水文底质和地貌等因素的影响 (赵魁义, 1999)。“沼泽化”一词一般指沼泽的发育过程, 包括陆地沼泽化过程和水体沼泽化过程。本书中的研究主要指水体沼泽化过程, 而湖泊沼泽化是水体沼泽化的一种主要表现形式。

沼泽化一词最早出现于 19 世纪中叶, 描述的是水体环境中的植物、动物、真菌等在由水向陆过渡过程中不断变化、逐渐适应环境的一种现象, 该现象最早发生在新元古代晚期到古生代初期 (Janvier, 2010)。对于草型浅水湖泊而言, 其沼泽化过程被定义为湖泊经过长期的泥沙淤积和生物累积, 湖盆逐渐变浅, 在光照充足、温度适宜、营养盐丰富的条件下, 开始生长大量沉水和漂浮植物; 由于死亡植物不断堆积湖底, 在缺氧条件下, 分解很慢, 植物残体逐年累积, 水深变浅, 湖面萎缩, 最终整个湖泊水草丛生, 沉水和浮叶植物逐渐消失, 演变为沼泽, 同时标志着湖泊的消亡 (王苏民和窦鸿身, 1998)。沼泽化是

草型浅水湖泊生态系统演替 (succession) 的一种表现形式, 是指随着时间推移, 水生生态系统逐渐被沼生和陆生生态系统所替代的顺序过程。在自然条件下, 湖泊沼泽化是一个漫长的过程, 包含着不同的演替阶段, 但在高强度人类活动的干扰下, 草型浅水湖泊的沼泽化过程大大加快, 缩短了湖泊的寿命, 并削弱了其生态服务功能。

1.2.2 演替阶段

从湖泊的自然演替过程看, 沼泽化是湖泊发展演替的最后一个阶段, 即湖泊衰老和消亡 (秦伯强和罗淑葱, 2004)。在诸多湖泊演替的研究中, 利用水生植物群落结构的变化模式来划分演替阶段是最为常见的研究手段。湖泊沼泽化演替的经典模式是苏联著名学者 B. P. 威廉士和 B. H. 苏卡乔夫提出的“岸边侵入式”, 即水生植物从湖岸不断向湖心发展指示着沼泽化过程, 在此基础上, 孙广友 (1990) 又提出了“湖心蔓延式”演变模式, 即湖心区水生植物在水位条件适宜的情况下不断向湖岸扩展。

Devogel 等 (2004) 通过基础地质调查并利用 DEM 分析和 GIS 手段对澳大利亚中部埃尔湖 (Eyre Lake) 进行了古水文过程的模拟与分析, 根据不同空间点位的植物孢粉资料将湖泊演替过程划分为三个阶段。Laabs 和 Kaufman (2003) 运用水产软体动物化石氨基酸年代法模拟了第四纪时期 Bear 古湖泊的水位记录, 重建了湖泊的演替过程并探讨了地质构造、河流、气候、水生植物等在湖泊演化过程中的作用。Versteegh 和 Riboulleau (2010) 从生物地球化学循环的角度入手, 通过湖泊底泥中的分子标志物及其稳定的同位素变化研究了湖泊的沼泽化过程, 并且通过化石的萜类化合物及其衍生物重建了湖泊中主要水生植物群落结构的演替。

我国沼泽化程度的定量评价多以长江流域的典型草型湖泊太湖和东太湖为研究对象。吴庆龙等 (2000) 最早提出了“以植被组成为主, 促淤效应为辅”的量化原则, 结合植被类型和湖底淤高因子, 建立了沼泽化综合指标。金红华 (2007) 在上述研究的基础上对评价指数进行了发展, 增加了水质指标, 将这套指标应用于评价东太湖的沼泽化程度, 两项研究能够得到类似的结果。略有差异的是金红华 (2007) 的研究认为水质也是评价指标的组成部分, 这会在一定程度上干扰后面要进行的“富营养化和沼泽化关系”的研究。朱金格等 (2010) 在遵循“植被组成为主, 促淤效应为辅”原则的基础上, 考虑生物量是决定分解和累积的基础, 因此将植物指标分成类型指标和生物量指标, 与吴庆龙等 (2000) 的研究类似, 基于这一指标可将沼泽化程度划分为严重沼泽化、重度沼泽化、轻度沼泽化和无沼泽化四个等级。该指标也被兰书斌等 (2011) 用来评价南四湖的沼泽化程度, 并分析了各指标与环境因子之间的相关性。上述研究对浅水湖泊沼泽化阶段的划分进行了有益探索, 但目前还缺乏统一指标体系和完善的分级标准, 特别是在如何科学地选择评价指标方面还存在很大问题, 不同的指标会导致评价结果的差异。通过对湖泊演替概念模型和演替实例的总结, 李英杰 (2008) 将草型浅水湖泊“形成—发展—消亡”的动态演替过程划分为 5 个阶段: ①以低生产力和单一的植物群落结构为标志的初期阶段; ②以低植冠型沉水植物的大量生长为标志的第二阶段; ③以高植冠型沉水植物或浮叶植

物大量生长为标志的第三阶段；④以沉水植物消失、浮游植物占主导的浊水状态为标志的第四阶段，即藻型化阶段；⑤淤积不断增加以至于藻类消失、挺水植物大量生长的沼泽化状态。

1.2.3 驱动机制

辩证唯物主义认为任何事物的产生、发展和灭亡都包括内因和外因的共同作用。内因即内部的、自身的，在事物发展过程中起决定作用的因素；外因即外部的、外在的，在事物发展中对事物的发展起增速和减缓的作用。内因是变化的根据，外因是变化的条件，外因通过内因起作用。由于物质世界的范围无限广大、复杂及发展的无限性，内因和外因在一定条件下可以互相转化。在一种场合和联系中是内因，在另一种场合和联系中则可以是外因，反之亦然。现代系统论丰富了内因和外因的辩证思想，它认为系统作为整体而言，其内部的各个子系统都是内部因素，而从子系统来说，一个子系统对另一个子系统的影响和作用，则是一种外部的因素或条件。

要想全面、系统、深入地阐明草型浅水湖泊快速沼泽化的驱动机制，首先必须明确其内因、外因及其作用机制。根据以上论述，草型浅水湖泊快速沼泽化过程的内因指的是此类湖泊的物理形态和生态系统组成结构；外因指的是区域气候变化、流域及周边人类活动影响下的各种生态过程。

生态过程最早见于有关湿地的报道。湿地的生态过程被定义为湿地的发生与演化过程，包括物理、化学和生物过程（何池全等，2000）。作为地表分布最为广泛的一类湿地，湖泊的生态过程自然也包括上述三种。在气候变化和人类活动的作用下，上述三种过程发生了极大改变，共同加速了浅水湖泊的沼泽化过程。

湖泊沼泽化的物理过程包括水文过程和侵蚀产沙过程。水文过程是湿地形成、发育和演化的最基本过程和驱动机制，是决定各种湿地类型的环境因素，也是湿地生态系统最重要的特征之一（崔保山和杨志峰，2006）。侵蚀产沙过程是指在侵蚀性降雨条件下，淀区多种地类均发生了明显的土壤侵蚀，泥沙随着坡面径流进入到水体，直接导致了湖底高程抬升、水深淤浅和蓄水量减少，加快了白洋淀的沼泽化演替。

湖泊沼泽化的化学过程主要包括沼泽化演替过程中营养元素的生物地球化学循环，及营养元素在生态系统各组分（水体、沉积物、水生植物）之间的吸收、积累、分配和归还。生物地球化学循环是指化学物质在生命有机体与环境之间的不断循环（白军红等，2002）。有机体从周围环境中吸收生命活动中必需的营养元素和无机化合物，同时又通过代谢作用把部分物质排到体外环境中；当生命有机体死亡后，其死亡的残体通过微生物降解成为简单化合物后又返回到自然环境中。

湖泊沼泽化的生物过程主要包括水生植物的分解和累积，植物残体对沼泽化的贡献及残体分布特征；水生植物分布对人类活动强度的响应；不同水深梯度下挺水植物的蔓延扩展等。上述三种过程的表征及获取方法见表 1-1。