

Dynamic Modeling of  
Aquatic Ecosystem in Lakes

湖泊水生生态系统  
模拟研究

---

于 革 等/著



科学出版社

# 湖泊水生态系统模拟研究

于 革 等 著



科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书针对气候变化下湖泊生态灾害发生和生态系统退化的现象和过程,介绍了在气候、水文和生态系统多因子影响下湖泊长期演变系统模式构建。通过对长江中下游鄱阳湖、太湖、巢湖等8个典型湖泊和53个湖泊群组成的湖泊进行水文-生态系统近现代和历史时期的模拟,以反演湖泊长期变化过程的视角,从动力学机制诊断湖泊生态系统演变,进而诊断湖泊生态系统的变化归因。

本书可供从事自然地理、环境和生态、第四纪地质、湖泊沉积和水文等方面的科研、工程技术人员和有关大专院校师生阅读和参考。该书在湖泊生态系统响应气候变化和长期演化的动力学模型方面做了大胆的尝试,有关模型的开发有利于理论研究和应用。

### 图书在版编目(CIP)数据

湖泊水生态系统模拟研究 / 于革等著. —北京: 科学出版社, 2017. 9

ISBN 978-7-03-054131-4

I. ①湖… II. ①于… III. ①湖泊-生态系统-研究-中国 IV. ①X832  
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 193150 号

责任编辑: 刘 超 / 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9月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年9月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 300 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

长江中下游地区聚集了我国五分之四的淡水湖泊，既包括了鄱阳湖、洞庭湖、太湖、洪泽湖、巢湖等大型浅水湖泊，也包括了 700 多个湖泊构成的长江中游江汉-洞庭湖平原湖泊群、长江下游鄱阳湖-江北平原湖泊群、太湖-河口三角洲平原湖泊群，它们构成了我国最大的淡水湖泊群。根据历史文献记载和湖泊沉积记录的研究，在过去历史时期这些湖泊和湖泊群经历了巨大变化。由于这些浅水湖泊是在长江中下游洪泛平原上发育形成，它们具有高营养盐沉积背景且水力停留时间较短的特征，且与长江有密切的水力联系。然而在湖泊长期的演化过程中，外源磷负荷的增加极大地加快了湖泊营养态的演化速率和湖泊向富营养态的演化进程；同时洪泛平原的地质地貌特征决定了浅水型湖泊发育的几何形态，由于湖泊库容量小而面积大，较之深水湖泊，其对流域气候变化的响应更为强烈和显著。然而，由于缺乏长期连续性湖泊营养负荷的监测资料，使得在长时间尺度上认识湖泊的富营养化演化规律变得困难。欧洲和北美湖泊研究已构建了湖泊总磷计算模式，可以较好地解释一些深水湖泊的营养态变化量级、速度和趋势，反映出湖泊水文和沉积特征对营养态演化的制约。而目前针对亚欧大陆东岸的长江中下游浅水型湖泊的营养态演化和模拟研究仍是一个盲区。

富营养化是湖泊分类和演化学的一个概念，氮磷等营养物质的大量输入是水体富营养化的物质基础，是造成水体富营养化的必要条件。但湖泊营养物质的变化（如总磷水平）并非呈线性响应，它与气候变化以及与湖泊生态系统中浮游植物、高等水生植物、水生动物等的作用和反馈密切相关。这种复杂关系表征的湖泊生态系统食物链的维系、水体营养盐的平衡既有渐变也有突变现象，反映了在非线性系统中存在一定的临界域，超过这个临界阈值，即使受到很小触发可引起重大变化。然而以中国湖泊近几十年器测历史资料以及依据短期验证和率定的营养盐模型难以获得可靠的认识。为此，本书从湖泊营养态演化不同层次的驱动机制考虑，构建了多因子和多时间尺度下湖泊生态系统初级生产者与顶级捕食者的关系和结构动力模型以及湖泊营养盐变化动力模型进行长时间的计算机数值模拟，对认识气候水文因子在年际~年代际时间尺度下变化，湖泊生态系统和湖泊营养态从渐变到突变的演化过程，探索触发湖泊突变的关键因子和机制，对精确预测由人类排放活动导致的湖泊富营养化有着重要作用，也对湖泊生态系统的长期营养态变化过程认识有所突破。

湖泊生态系统系由湖泊水体内生物群落及其生境因子共同组成的动态平衡系统。气候变化对湖泊的物理水文过程、地球生物化学循环以及生态系统的结构和功能产生重大的影响。在全球变化领域里，目前多采用气候模式对下垫面诊断和情景预测的分析，鲜有采用气候模式驱动下垫面做出动力机制的分析。这是因为前者通常采用已有的气候模拟数据，进行区域化分析；而后者用气候动力驱动下垫面，不仅需要区域资料，还需要有描述区域

的专题数学模型，难度较大。

首先，本书集中了利用气候模式对过去 1000 年气候模拟得到的湖泊水文模型，并进一步驱动水文-营养盐模型和生态动力模型获得的研究成果，是这个领域不多见的一项研究尝试。由于气候模型采用的比较公认的动力因子（国际 IPCC-CMIP5 设置的太阳辐射、火山灰、温室气体和人类活动强度等 4 项因子），对水文和生态模拟能够把握住模拟的动力机制，从而可以诊断出水文-生态系统发生变化的原因。

其次，本书针对气候变化下湖泊生态灾害发生和生态系统退化的过程和机制以进行物理-生态动力学机制的模拟和预测。在湖泊生态系统中，首先构建湖泊初级生产者浮游植物（藻）与高等水生植物（草）的竞争模式，其次构建初级生产者草、藻与顶级捕食者（鱼）的捕食模式，最后利用气候-湖泊水量与生态因子的物质传递原理，构成气候与生态因子的动力方程组。模型提供了在气候-湖泊水量变化的驱动下、湖泊水生植物与顶级群落生态系统变化过程和特征的模拟和预测。作为典型浅水湖泊生态系统模拟的应用，本系统采用鄱阳湖的水生态系统参数体系，设置现代和历史不同时期的试验方案进行数值模拟。本系统以水量变化作为边界控制条件，模拟、分析了湖泊生态系统对气候变化的响应和反馈。

再次，本书介绍了基于气候、水文和生态系统的多因子影响下，浅水湖泊长期营养态演变系统模式构建及其应用。该系统基于湖泊流域的气候、水文和生态系统的年际~年代际时间尺度下变化，以湖泊营养态演化不同层次的胁迫因子，构建浅水湖泊的长期营养态演变模式。针对湖泊营养盐内源，利用湖泊初级生产者浮游植物（藻）与高等水生植物（草）的竞争模式和初级生产者草、藻与顶级捕食者鱼的捕食模式，并利用气候-湖泊水量与生态因子的物质传递原理，构成气候与生态的动力方程组，设置现代和历史不同时期的试验方案进行数值模拟研究。在耦合营养盐中，首先采用外源营养盐与湖泊水体交换模式，模拟湖泊载体和水文相互关系和变化过程，寻找制约湖泊营养盐富集度与平衡点。其次针对湖泊营养盐内源，采用湖泊营养盐对流域气候变化响应模式，模拟湖泊营养盐的外源控制，以确定受流域气候水文驱动与胁迫的营养盐量和积累速度。针对营养盐内源和外源的耦合，根据流域入湖营养盐对水生生态系统响应和反馈机制，模拟湖泊营养盐的输入和输出平衡点和变化过程。

本书汇集了该成果的理论基础、研究途径、模拟结果以及过程的诊断分析。以湖泊长期演化的视角，从动力学机制方面模拟和诊断湖泊生态系统转变。在流域水文模拟方面，采用了专门为鄱阳湖定制的 WATLAC 流域水文模型。该模型采用了具有物理基础的分布式水文模型来刻画大尺度鄱阳湖流域，并通过现代气候试验来验证模型，实现了气候模式和水文模型的单向驱动，完成了鄱阳湖过去千年古气候-水文连续模拟计算。在模拟结果经过验证后，这个模式推广到长江中下游 8 个典型湖泊以及 53 个湖泊组成的湖泊群应用。

编写本书是为了系统总结上述研究的成果。本书分为 3 篇共 19 章：

第一篇由 5 个章节组成，概述长江中下游湖泊水量和水质变化及演化的科学问题和研究意义，阐述湖泊演变研究的模拟理论基础，分别介绍气候-水文模型、湖泊水文-营养盐模型、和湖泊生态型系统中生物量模型的构建和方法。

第二篇由 8 个章节组成，分别介绍长江中下游湖泊的水质、水量、生物量的近现代模拟

应用。针对湖泊水文和营养盐变化,第6章介绍典型湖泊和湖泊群模拟的基础,第7章到第9章分别介绍对太湖、巢湖和鄱阳湖的湖泊水文-营养盐模拟,第10章和第11章介绍对8个典型湖泊和53个湖泊群的水文-营养盐模拟。针对湖泊生态系统,第12章和第13章介绍鄱阳生物量模拟和生物量空间分布模拟。

第三篇由6个章节组成,介绍历史时期湖泊演化的模拟应用,包括了第14章对过去1000年流域水文变化的模拟、第15章对过去1000年湖泊水文-营养盐变化的模拟、和第16章对过去1000年湖泊生物量变化的模拟。第17章和第18章分别介绍模拟推广到8个典型湖泊进行的历史时期湖泊水文-营养盐和生物量的模拟。第19章介绍模拟结果的检验和对比。

本书作者为于革、叶良涛、郭娅、吴攀、廖梦娜和张小琳。于革为全书的组织者和撰写人,叶良涛负责文字、图表编辑。吴攀提供第7、8、9章、郭娅提供第10、17、19章、廖梦娜提供第15章、张小琳提供第14章中的主要文字和图表。

由于本书内容广泛,涉及学科众多,尚无同类著作可供借鉴,书中不足之处在所难免。敬请读者批评指正。

作 者

2017年4月于南京

# 目 录

前言

## 第一篇 模型构建原理和方法

第 1 章 概述 .....	3
第 2 章 气候与流域水文模型 .....	9
2.1 全球气候模式在湖泊流域模拟中的应用 .....	9
2.2 流域水文模式及千年长度模拟的可行性 .....	10
第 3 章 湖泊生态系统模型 .....	14
3.1 描述生态系统方程的有关变量、参数和公式 .....	14
3.2 生态系统模型和结构 .....	18
3.3 湖泊生态系统外强迫作用和反馈模式 .....	19
3.4 模型结构、求解和运行 .....	21
第 4 章 湖泊水文-营养盐沉积模型 .....	25
4.1 基本物质平衡公式 .....	25
4.2 湖泊生态系统-营养盐沉积模型 .....	27
4.3 湖泊营养态演变模拟设计 .....	30
第 5 章 湖泊生态系统湖泊空间模型 .....	33
5.1 湖泊流域自然地理要素在空间模型中界定和设置 .....	33
5.2 空间模型的状态变量 .....	34
5.3 空间模型构建和运行 .....	35

## 第二篇 近现代模拟

第 6 章 长江中下游湖泊模拟基础 .....	39
6.1 区域湖泊特征和变化 .....	39
6.2 区域气候变化 .....	41
6.3 湖泊水质营养态 .....	42
6.4 湖泊营养盐的主要来源 .....	43
第 7 章 太湖营养盐沉积模拟 .....	45
7.1 湖泊气候水文特征 .....	45
7.2 湖泊水文因子计算 .....	47

7.3	太湖流域入湖总磷负荷 .....	50
7.4	湖泊营养态发展 .....	52
<b>第8章</b>	<b>巢湖营养盐模拟 .....</b>	<b>54</b>
8.1	巢湖流域气候水文 .....	54
8.2	水文因子计算 .....	56
8.3	巢湖流域入湖总磷负荷 .....	59
8.4	湖泊营养态发展 .....	61
<b>第9章</b>	<b>鄱阳湖营养盐模拟 .....</b>	<b>63</b>
9.1	鄱阳湖自然地理背景 .....	63
9.2	湖泊水文因子计算 .....	67
9.3	湖泊总磷负荷模拟计算 .....	70
9.4	湖泊营养态发展 .....	72
<b>第10章</b>	<b>长江中下游湖泊群营养盐模拟 (1) .....</b>	<b>74</b>
10.1	典型湖泊的选择 .....	74
10.2	数据和分析计算 .....	75
10.3	模式和模拟 .....	76
10.4	模拟结果和分析 .....	80
<b>第11章</b>	<b>长江中下游湖泊群营养盐模拟 (2) .....</b>	<b>84</b>
11.1	湖泊群模拟试验设置 .....	84
11.2	模拟试验 .....	91
11.3	结语 .....	97
<b>第12章</b>	<b>鄱阳湖生态系统模拟 .....</b>	<b>99</b>
12.1	湖泊生物群落和环境因子 .....	99
12.2	湖泊生态动力模型 .....	103
12.3	模拟方案、输入和输出 .....	103
12.4	模拟结果和分析 .....	106
12.5	敏感因子试验 (试验3) .....	108
12.6	讨论和结语 .....	111
<b>第13章</b>	<b>鄱阳湖水文和生态系统的空间变化模拟 .....</b>	<b>113</b>
13.1	湖泊植物群落空间模拟基础 .....	113
13.2	鄱阳湖水位变化下生物量响应模拟 .....	117
13.3	湖泊底形与水位控制下生物量空间模拟 .....	119
13.4	湖泊生物量空间变化模拟 .....	122

### 第三篇 历史演化模拟

<b>第14章</b>	<b>鄱阳湖历史时期流域水文模拟 .....</b>	<b>127</b>
14.1	鄱阳湖长期气候水文及生态系统变化 .....	127



14.2	历史时期湖泊水文模拟 .....	128
14.3	模拟方法和步骤 .....	129
14.4	模拟结果分析 .....	131
14.5	讨论和结语 .....	136
<b>第 15 章</b>	<b>鄱阳湖营养盐演化模拟 .....</b>	<b>138</b>
15.1	模型和模拟试验 .....	138
15.2	资料与参数 .....	138
15.3	模拟结果分析 .....	140
15.4	试验 3 和敏感试验 .....	145
15.5	讨论和结语 .....	147
<b>第 16 章</b>	<b>鄱阳湖生物量演化模拟 .....</b>	<b>149</b>
16.1	过去 1000 年资料与参数 .....	149
16.2	模拟分析 .....	151
16.3	驱动生物量变化因子分析 .....	156
<b>第 17 章</b>	<b>长江中下游湖泊群营养盐演化模拟 .....</b>	<b>160</b>
17.1	数据和资料 .....	160
17.2	试验设置和模拟结果 .....	161
17.3	分析和讨论 .....	162
<b>第 18 章</b>	<b>长江中下游湖泊群生物量演化模拟 .....</b>	<b>166</b>
18.1	控制实验 .....	166
18.2	历史时期湖泊生物量 .....	167
18.3	历史时期湖泊生物量与营养盐关系 .....	169
<b>第 19 章</b>	<b>历史模拟的对比检验 .....</b>	<b>171</b>
19.1	历史文档和湖泊沉积记录 .....	171
19.2	区域气候演化对比 .....	171
19.3	流域水文演化对比 .....	172
19.4	湖泊营养盐演化对比 .....	176
19.5	生物量变化 .....	178
<b>参考文献</b>	.....	<b>181</b>
<b>致谢</b>	.....	<b>194</b>

# 第一篇

## 模型构建原理和方法

本篇由5个章节组成，针对湖泊水量和水质变化和演化的模拟研究，综述气候模型的应用，介绍气候-水文模型、湖泊流域水文-营养盐模型、湖泊生物量-生态型系统演化模型的构建和方法。



# 第 1 章 概 述

长江中下游地区聚集了我国五分之四的淡水湖泊，包括了鄱阳湖、洞庭湖、太湖、洪泽湖、巢湖等大型浅水湖泊，也包括了由 700 多个湖泊构成的长江中游江汉-洞庭湖平原湖泊群、长江下游鄱阳湖-江北平原湖泊群、太湖-河口三角洲平原湖泊群。在长江中下游地区，面积大于 10 km<sup>2</sup> 的湖泊有 136 个（图 1-1），组成了我国最大的淡水湖泊群（王苏民等，1998）。

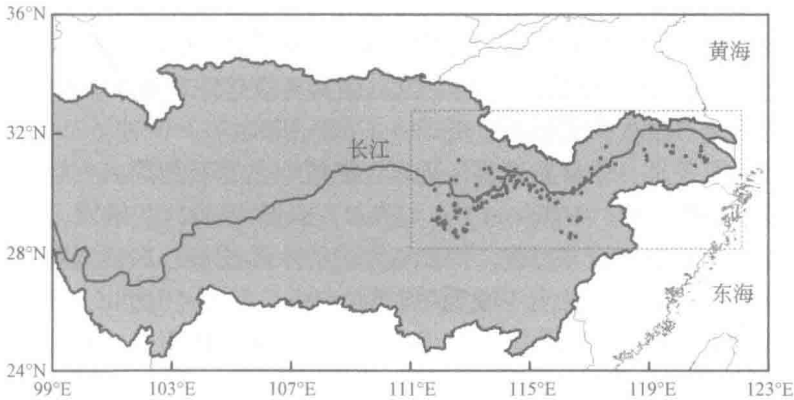


图 1-1 长江中下游流域和湖泊群的分布

根据历史文献记载和湖泊沉积记录的研究，在历史时期，这些湖泊和湖泊群经历了巨大变化。这些湖泊属于在长江中下游洪泛平原上发育的浅水湖泊，因此，它们具有高营养盐沉积背景且水力停留时间较短，并与长江有密切的水力联系。在湖泊长期的演化过程中，外源磷负荷的增加极大地加快了湖泊营养态的演化速率、促进了其向富营养态的演化；同时洪泛平原的地质地貌特征决定了浅水型湖泊发育的几何形态，由于库容量小而湖泊面积大，较之深水湖泊，其对流域气候变化的响应更为强烈和显著。然而，由于缺乏长期连续性湖泊营养负荷的监测资料，使得在长时间尺度上认识湖泊的富营养化发展变得困难。欧洲和北美在湖泊研究中构建了湖泊总磷计算模式，较好地解释了一些深水湖泊的营养态变化量级、速率和趋势，反映出湖泊水文和沉积特征对营养态演化的制约。尽管对这些浅水湖泊已经开展了许多自然地理、生物生态的调查和研究，但气候变化下的湖泊生态系统退化过程和机制目前还不清楚。例如，湖泊生态系统中以草占优势的清水态和以藻占优势的浊水态是怎样发生的？其转化时间尺度和机制怎样？气候变化下的湖泊生物群落发生怎样的非线性响应？这需要我们从仪器观测时间尺度 1 ~ 100 年延伸到历史、地质时间尺度 >100 年，认识湖泊生物群落的长期演化规律。而应用物理-生态学模型对尚未发生的过程进行动力学机制的模拟和预测，能够满足这个要求（Gillman and Hails, 1997；Kalff,

2002; Anderson et al., 2006)。

湖泊生态系统系由湖泊水体生物群落及其生境因子共同组成的动态平衡系统 (Brown, 1987), 气候变化对湖泊的物理过程、地球生物化学循环以及生态系统的结构和功能产生重大的影响。对波兰 Leczna-Wlodawa 湖区沉积物钻孔的沉积学、地球化学指标综合分析研究表明, 在晚冰期时期以气候变化为主导的背景下, 气候变化会对湖泊的水位、流域侵蚀物质的输入、水文、冰层面积、溶解氧、生产力以及生态系统结构等方面造成显著影响 (Zawiska et al., 2013)。气候变化将可能导致湖泊水温的变化, 湖泊水温升高会引起水动力过程的改变, 使湖泊分层时间延长, 提高了湖泊沉积物中营养物质的释放速率和释放量以及浮游植物的生长速率, 从而加剧湖泊的富营养化 (Blenckner et al., 2007)。气候变化导致降水强度和频率的增加直接影响流域径流状况, 使短时间内大量污染物输入湖泊水体, 增加营养物质和沉积物的含量、降低水体透明度, 对水质和生态系统造成严重冲击 (Knowles et al., 1995)。此外, 特殊的降水灾害事件, 如酸雨等会严重影响湖泊水体中的鱼类数量和其所在的食物链稳定性, 进一步破坏湖泊生态系统结构 (Harvey, 1989)。这些研究表明, 气候变化对湖泊生态系统具有直接或间接的影响, 但在气候变化下湖泊生态系统退化的过程和机制仍有待进一步深入研究。

湖泊生物群落演替是一个自然过程, 从以浮游植物主导到高等水生植物主导的生态系统演替可经历数十到数百年 (Hall and Day, 1990; Kalf, 2002)。然而, 生态系统外界的干扰和强迫可迅速打破自然演替过程, 例如从湖泊的水草茂盛、水质清澈状态转变为藻类水华泛滥状态, 往往只需经历数十年或更短时间 (Burkett et al., 2005)。Wang 等 (2012) 根据洱海沉积和水生生物化石证据, 发现了在长期湖泊演化过程中, 由于能量的集聚可使湖泊在短期内由清水态转变至浊水态的事实。太湖附着生物对水生植物影响的水文-生态实验学研究, 也证实了这种转化的可能, 同时阐明了其加速机制 (秦伯强等, 2006)。这些研究从沉积学、水文学不同视角和不同时间尺度, 解释了湖泊生态系统在草-藻型间转化的机理和清水-浊水系统转变和突变理论 (Scheffer and Beets, 1994; Scheffer and Carpenter, 2003)。但如何通过湖泊生态系统动力学方法来研究湖泊生态系统演化和机理, 从而突破时间限定、反演时空演变并预测系统的动态变化日益成为关注的焦点 (IPCC, 2007; Bennion et al., 2011)。

生态系统动力学模型的核心在于对不同生物之间、生物与环境之间的动力关系描述和构建。在 20 世纪 20 年代, Lotka (1925) 从化学反应规律、Volterra (1926) 从鱼群变化规律几乎同时提出二联常微分方程组, 用以描述两个种群之间的生态捕食模型, 被后人称为 Lotka-Volterra 模型。随后, 有关生物学家发展了生态竞争模型、互惠合作模型; 特别是引入时滞项的 SKT 模型 (Shigesada et al., 1979), 发展成各种偏微分系统的 Lotka-Volterra 模型。这些模型的扩展和延伸, 生态学意义更广泛, 使利用动力学的模型来描述生态系统性质、结构和变化成为可能 (Jørgensen, 1997)。20 世纪 90 年代以来, 我国学者对 Lotka-Volterra 模型以及扩展的动力模型做了不少数学和动力学方面的研究 (冯春华和刘永建, 2005; 袁媛等, 2007; 莫嘉琪和王辉, 2007; 朱焕桃等, 2011; Tang et al., 2013), 在生态领域进行了参数化的应用尝试。例如建立小麦、大豆两种作物套种共生的竞争模型 (李飒等, 1995), 大熊猫与两种竹子生态共生的三种群捕食-竞争模型 (吴云

华等, 1998), 藻、草和鱼三类物种共存与灭绝的捕食-竞争模型(梁英琼等, 2010)。这些研究从数学的角度, 求证模型通解的存在性和存在条件、方程稳定条件和平衡点、方程扰动后恢复到平衡的时间等, 但鲜有应用到长期生态系统演替、生态系统与边界条件的互动和反馈。究其原因, 不仅因为微分方程解析解的存在条件苛刻, 如即使采用数值解(如龙格-库塔法)也受到严格的参数限制(冯春华和刘永建, 2005; 朱焕桃等, 2011; Tang et al., 2013), 而且还由于设置边界条件和参数所需要大量的生物、生态数据获得的困难性(刘永等, 2005)。

从现代仪器的定位、定量观测的历史资料来看, 我国的气象和水文观测具有最近 50 ~ 100 年的记录。受到观测资料时间序列限制, 气象和水文领域的研究难以获得百年以上的水文记录和对周期的认识。近年来, 全球气候变化问题引起全世界的关注, 应运而生的气候模式为探究长时间水文特征变化提供了便利。气候模式模拟得到的长期气象数据驱动水文模型, 成为流域水文变化特征、水文过程研究的重要手段。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告(AR5)采用国际耦合模式比较计划(CMIP5)进行气候模拟与预估实验。通过地质资料和数值模拟对过去 1000 年全球气候变化的研究, 发现东亚地区在公元 850 ~ 1050 年期间气候偏暖, 属于一个中世纪温暖期。随后 1350 ~ 1880 年期间气候变冷, 这段寒冷小冰期气候成为了近代 21 世纪暖期的背景。过去 1200 年中的冷期与太阳活动和火山活动有关, 两者驱动了 1251 ~ 1820 的寒冷阶段(PAGES 2k Consortium, 2013)。自 19 世纪中叶以来, 由于欧洲工业革命的全球现代化过程加速, 成就了受人类影响的 20 世纪温暖期。PMIP 全球合作计划召集了国际上 20 多个气候模型组织和研究机构对过去 1000 年进行气候模拟(Bothe et al., 2013)。这些气候模拟成果为湖泊历史时期长时间序列的水文模拟提供了可靠气候边界场, 突破了水文序列和周期研究受仪器观测资料限制的瓶颈。

湖泊水位可以影响水体的光照条件从而使湖泊生态系统发生稳态转换。持续高水位会导致湖泊中水生植物生长的光照条件减弱, 并在一定时期内导致水生植物覆盖度降低, 如 20 世纪 90 年代固城湖发生的持续两年的高水位导致水生植物大范围死亡, 同时也使得湖泊水质下降(谷孝鸿等, 2002)。洪水等极端灾害事件也会对湖泊生态系统的结构、功能和动态特征造成重大影响。对加拿大西北部多个湖泊进行比较, 可以发现经常遭受洪水侵袭的湖泊水体中大型水生植物生物量与浮游硅藻群落与未遭受洪水的湖泊存在显著差异(Sokal et al., 2010)。通过分析波兰 Dobczyce 水库在 1997 年和 2001 年两次夏季大洪水事件期间的浮游植物、浮游动物和鱼类的生物量变化情况, 发现洪水过后, 浮游植物和动物生物量出现显著下降, 鱼类的数量也出现下降, 但与洪水事件关系不显著, 而是由它们的洄游行为造成的(Godlewska et al., 2003)。特大洪水事件带入湖泊的颗粒物质, 影响水体的透明度和浮游植物生物量, 造成浮游植物生物量的减少, 水体理化条件的改变也导致了浮游植物群落结构的改变(陈修康等, 2014)。这些观测研究, 发现了其他环境胁迫因素对湖泊生态系统的影响, 但湖泊生态系统对这些扰动或胁迫的响应机制尚不清楚。

湖泊生态系统变化在自然条件下受到气候水文因素控制, 同时还受到了来自湖泊生物群落的作用和反馈。湖泊生态系统中的主要初级生产者之一就是大型水生植物, 包括水生维管束植物和高等藻类(周婕和曾诚, 2008)。作为湖泊生态系统的重要组成部分, 大型

水生植物（包括浮叶植物、漂浮植物、沉水植物和挺水植物）是维持湖泊生态系统正常运行的关键类群，具有抑制风浪、固定底泥、吸附净化水体、抑制藻类繁殖、为动物提供栖息庇护场所等多种重要功能（Bachmann et al., 1999; Van Nes et al., 2002）。然而，相关研究表明水生植物也可能通过湖泊沉积物、营养物质滞留等过程对生态系统发生负反馈作用，比如历史上英国的 Alderfen Broad 湖在自然状况下也发生过约每 7~8 年周期性的草型和藻型湖泊类型的转换。这是由于水生植物死亡后转化为有机质沉积于湖底，有机质耗氧分解使得水-沉积物界面处于厌氧状态促进了沉积物中磷的大量释放。磷的释放促使藻类大量生长降低了水体的透明度，导致水生植物无法进行光合作用而最终消亡，湖泊便由草型转变为藻型。反之亦然，如果藻型状态下的湖底有机质能够逐步分解并形成好氧环境，沉积物中磷释放量相应减少，湖泊则可由藻型转化为草型（Scheffer and Van Nes, 2007; 赵磊等, 2014）。湖泊生态系统中的另一主要初级生产者就是浮游植物（Wetzel, 2001），是水体中营浮游生活的藻类，能够利用太阳光制造有机质。理论上在湖泊生态系统中，藻和水生维管束植物是竞争关系，这是因为首先它们都是水体初级生产者，竞争光以进行光合作用维持基本的生命过程（谢平, 2013）；其次，两者均吸收底泥和水中营养盐，构成相互竞争（秦伯强等, 2002）；再次，草的分泌物抑制了藻类的生长，反之亦然（Jasser, 1995）。鱼类是湖泊生态系统中的主要掠食者，其主要通过影响浮游生物种群密度对湖泊生态系统造成影响。在我国对云南洱海引进银鱼后，水生植物和浮游植物群落结构和数量变化的研究发现，银鱼成功入侵后，通过下行效应促进了浮游植物的增长，影响了洱海沉水植物种类和分布（吴功果等, 2013）。在此基础上，相关学者进一步研究了洱海富营养化与生物群落的关系，发现银鱼成功入侵洱海后导致浮游动物锐减是影响洱海藻类暴发式增长的重要原因（杜宝汉, 1997）。食草型鱼类和食鱼型鱼类也对水生植物和浮游植物具有不同影响，如食草型鱼类捕食湖泊沉水植物直接影响其生长，使得湖泊沉积物悬浮、营养盐释放增加，促进了藻类生长。食鱼型鱼类的增加会导致滤食性鱼类数量显著减少，使浮游动物获得大量繁殖的机会，导致水体中 Chla 含量和初级生产力显著下降（赵磊等, 2014）。目前大量关于湖泊生态系统变化的研究偏重于关注外源因素对生态系统的影响，而来自于内源的，即关于湖泊生态系统内部生物群落相互作用对湖泊生态系统变化的反馈作用研究相对不足。

在湖泊生态系统中，水体的富营养化是湖泊演化到中老年期的自然过程，从贫营养到富营养湖泊以百年尺度计（Kalf, 2002）。这里的时间尺度是欧美学者通过对深水湖泊（水深>10 m）的研究总结的，长江中下游聚集众多浅水湖泊（水深<5~10 m 级），对富营养化的演化进程知之甚少。弄清流域和湖泊营养盐是如何受到气候水文变化的影响，对精确预测由人类排放活动导致的湖泊富营养化有着重要意义。尽管长江中下游湖泊中的营养盐输入在不断增加，在过去的 20 年里，19 个湖泊总磷（TP）水平变化的调查结果显示，其响应并非呈线性（图 1-2）。而从长江中下游 8 个湖泊的沉积记录来看，在过去 200 年处于半自然的农耕系统下，总磷与总有机碳（TOC）之间也反映出复杂的关系。从数据的统计关系来看，这种复杂关系表征的湖泊生态系统中的营养盐平衡变化既有渐变也有突变现象，反映了在非线性系统中有一定的临界域，超过阈值即使受到很小触发即可引起湖泊生态系统发生重大变化（Burkett et al., 2005; Wang et al., 2012）。以数十年观测资料和

依据短期验证率定的营养盐模型难以获得可靠的认识。在自然过程和人为活动的双重作用下，湖泊营养态的演化是否有从渐变到突变过程呢？人们寻求稳定态的临界点，探索触发湖泊生态系统突变的关键因子和机制，而以湖泊的长期营养态变化过程为视角期望能对此予以突破。

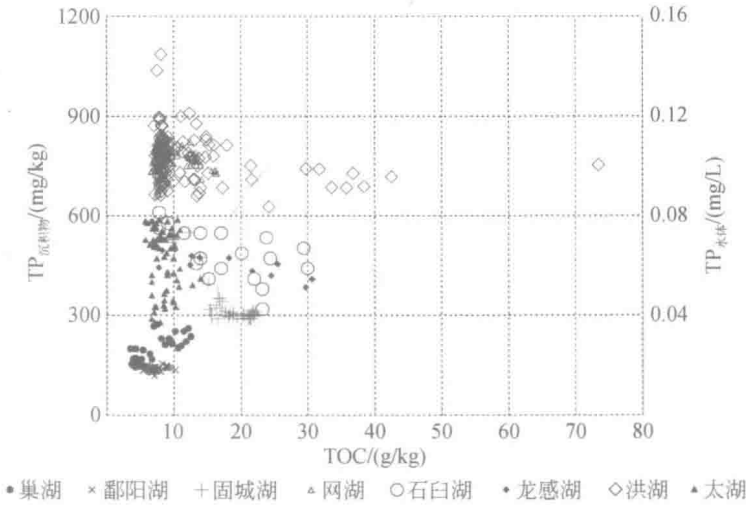


图 1-2 长江中下游湖泊沉积物 TP 与 TOC 关系

湖泊富营养化是指湖泊水体中营养盐类逐渐积累，使浮游植物异常增殖，水生生物多样性和稳定性降低，发生水体透明度下降、水质恶化的现象。它包含了一系列物理、化学和生物过程，与湖泊形态、水体动力、流域气候水文动力、湖泊营养盐平衡、浮游植物种群和产量等诸多因子密切相关。对一个与环境要素发生反应及与生态系统作用和反馈复杂变量的模拟问题，无论是从生物学角度，还是从环境学角度都无法有效地执行运算。显然，解决方案就是将不同时空尺度模型的模拟方法结合起来，构建由复杂体系构成的多尺度模型。因此，从湖泊营养态演化不同层次的驱动机制考虑，试图构建多因子和多时间尺度模型成为一个重要途径，包括：①采用外源营养盐与湖泊水体交换模式，描述湖泊载体和水文属性；制约湖泊营养盐积累与平衡；用来评估富营养化的时间尺度；②采用湖泊营养盐对流域气候变化响应模式描述湖泊外围地区：流域气候水文的驱动与胁迫；③采用水生生态系统中营养盐过程模式描述营养盐反应和过程的核心区域；生态系统对营养盐在的作用和反馈。

目前已经有众多的气候模式和水文模式。由于基于现代过程的模型应用到历史时期，面临的诸多问题要求模型理论上的进一步突破。作为对历史时期的湖泊演化模式，不仅仅在模型设置具有时间尺度上的扩大，在模式的结构和功能上需要相应扩展，发展了能够适用于地质时期和历史时期“气候变化远大于现代”的模式，适合于进行过去 1000 年的湖泊气候水文和生态系统演化模拟（图 1-3）。该模式在湖泊生态系统响应气候变化和长期演化的动力学模型方面做了大胆的尝试，模型运行中主要过程和结果采用了图像监视和输出，利于模拟过程和特征的控制，有关模型的开发有利于理论研究和应用。该模式将现代过程和机制移植到历史时期背景中，在模型原理、结构、实现技术有所突破，推进生态系



统模型的应用与发展。

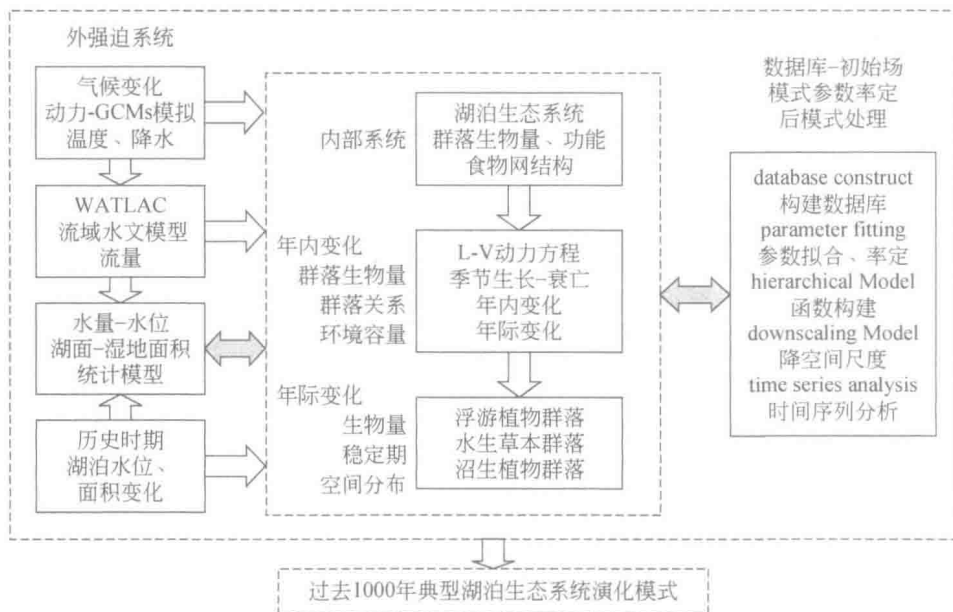


图 1-3 过去 1000 年湖泊气候水文和生态系统演化模拟流程图