

太湖

蓝藻水华生态灾害评价

高俊峰 等著



科学出版社

太湖蓝藻水华生态灾害评价

高俊峰 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在研究蓝藻水华成灾机理的基础上,提出蓝藻水华生态灾害评估指标体系的建立原则、体系结构和指标集合,确定蓝藻水华生态灾害分析方法,提出蓝藻水华生态灾害评估流程;建立蓝藻水华生态灾害风险分级体系,开发蓝藻水华生态灾害过程模拟和评估数字模型,建立蓝藻水华生态灾害预警系统;对太湖典型蓝藻水华事件进行生态灾害评估,对不同风险等级蓝藻水华造成的危害进行分析评估;通过对典型蓝藻水华生态灾害事件的反演和模拟,研究蓝藻水华的致灾过程和调控机理;筛选出不同状况下引发蓝藻水华生态灾害的控制性因子,并评估其可能造成的人类健康和社会经济损失,由此提出调控蓝藻水华生态灾害的备选方案和治理措施,以达到减轻和控制蓝藻水华生态灾害的目的。

本书可供生态学、环境学和湖泊学等学科科研人员、高等院校师生及政府部门的管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

太湖蓝藻水华生态灾害评价/高俊峰等著. —北京:科学出版社,
2014. 1

ISBN 978-7-03-039481-1

I. ①太… II. ①高… III. ①太湖-蓝藻纲-藻类水华-环境生态评价
IV. ①Q949. 22②X826

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 313864 号

责任编辑:杨帅英 朱海燕 刘艳文 / 责任校对:桂伟利

责任印制:赵德静 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

新科印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2014 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 1 月第一次印刷 印张: 15 1/2

字数: 340 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

Ecological Disaster Assessment of Algae Blooms in Lake Taihu

GAO Junfeng et al.

 Science Press
Beijing

序 言

我国富营养化湖泊发生蓝藻水华现象是比较普遍的，如太湖、巢湖和滇池等。蓝藻水华的危害表现在威胁饮用水源地、产生藻毒素危害人体健康、产生异味物质和堆积影响景观和环境、降低生物数量和生物多样性等方面。2007年5月太湖蓝藻水华暴发引起的“水危机”事件，造成无锡上百万人饮水困难，引起了世界范围内的广泛关注。

如何认识蓝藻水华的程度，如何给蓝藻水华生态灾害分等定级，如何预测蓝藻水华发生的位置、范围和持续时间等，这些问题的解答，对于认识蓝藻水华现象，处置蓝藻水华灾害，维护居民身体健康，支持区域可持续发展等都非常重要。

太湖地处太湖流域的核心区域，周边人口密集，工业集中，经济发达。伴随流域经济的高速发展，太湖水体污染严重，70%以上为富营养化水体。蓝藻水华频繁暴发，造成湖泊浮游植物种群数减少，种类组成单一，群落结构简单；浮游动物整体上数量降低，耐污种增多，种类小型化；底栖动物种类减少，个体小型化，耐污种占优势；鱼类种类减少，个体小型化；水生高等植物分布面积减少，以沉水植被为主，种群结构单一。

该书作者及其团队长期以来进行蓝藻水华生态灾害的相关研究，该书是他们多年研究成果的集成。书中系统介绍了太湖蓝藻水华发生现象和趋势，首次提出蓝藻水华分级指标体系和蓝藻水华生态灾害评估方法，对太湖蓝藻水华生态风险进行分区，研究成果丰富了灾害生态学的理论；研发了蓝藻水华的环境空间动态模拟方法，实现了对短期蓝藻水华过程的预测预警，并业务化运行，为区域可持续发展决策提供支持；就太湖蓝藻水华生态灾害的防治和调控，提出了有针对性的方案 and 对策。

这些成果对于认识太湖蓝藻水华生态灾害的程度、风险及应急处理，会起到重要的推动作用，并将对我国其他类似湖泊起到很好的示范作用。

蔡道基

· 中国工程院院士

2012年11月18日

前 言

湖泊是支撑我国经济和社会发展的资源之一。但是近三十年来，湖泊富营养化所导致的蓝藻水华频繁暴发，生态灾害事件频发，严重影响湖泊功能的发挥，制约区域经济可持续发展。

湖泊蓝藻水华生态灾害是湖泊富营养化的一种表现形式。了解蓝藻水华生态灾害的形成机理，建立灾害评估的指标体系、分级体系与方法体系进行蓝藻水华生态灾害评估，并采用计算机模拟技术建立相应的生态模型，利用计算机模型整合各类观测数据、参数与耦合关系，发展可用于生态调控的预测、评估和决策支持系统，对蓝藻水华生态灾害进行评价并提出相应的预防和调控对策，可为蓝藻水华生态灾害的风险管理与调控策略及防治蓝藻水华灾害提供急需的理论和原理支撑。

太湖流域是我国工业化和城市化程度较高、经济较为发达及社会发展较具活力的地区之一。太湖具有供水、防洪、灌溉、航运、养殖和旅游等多种功能，是太湖流域社会与经济可持续发展及湖区人民赖以生存的资源保障基础，也是流域水生态系统的中枢。然而，由于流域社会经济的高速发展以及高强度人类活动的影响，太湖全湖性的富营养化和西北部湖区水体的污染程度逐年加重，水质自20世纪80年代起，平均每10年下降一个等级。目前全湖的水质平均劣于V类，以蓝藻水华为表征的富营养化现象愈演愈烈。随着人们对蓝藻水华的关注和认知程度的提高，人们认识到蓝藻水华不但对人体的感官和水生态系统生物群落结构产生破坏，而且蓝藻水华产生的各类藻毒素和死亡腐烂分解产生的有毒有害物质等，通过食物链进入人体危害人类健康。

2007年5月29日，异常气候等环境条件导致太湖蓝藻水华异常严重，在风浪和水流作用下，部分水域藻类堆积严重，造成水质恶化，引起的水污染导致无锡市饮用水危机，影响正常的生产生活，引起国内外各界的高度关注。尽管蓝藻水华在太湖已持续发生二十余年，但太湖蓝藻水华尚不能在短期内得到有效控制，蓝藻水华造成的水质恶化进而威胁饮用水安全的状况将长期存在。因此，如何有效预防和削减蓝藻水华对供水水质安全的危害显得尤为迫切。研究解决太湖蓝藻水华对饮用水源的威胁问题，是太湖沿湖的无锡、苏州和湖州等城市的迫切需求，对于全国其他地区同样具有重要的借鉴和示范意义。

本书介绍了蓝藻水华生态灾害的概念、内涵和评估指标体系与方法，通过对太湖蓝藻水华成灾机理的分析，提出了生态灾害评估指标体系的建立原则、体系结构和指标集合；研究了水华灾害发展过程的数据获取方式；确定蓝藻水华生态灾害分析方法，提出蓝藻水华生态灾害评估流程；选择典型蓝藻水华生态灾害事件进行观测，获取相关数据以验证指标体系的准确性和可靠性，并对指标的数值范围给出科学的评价。

介绍了蓝藻水华生态灾害风险预警系统的构建。建立蓝藻水华生态灾害风险分级体系,开发蓝藻水华生态灾害过程模拟和评估数字模型,建立蓝藻水华生态灾害预警系统,对太湖典型蓝藻水华事件进行生态灾害评估,对不同风险等级蓝藻水华造成的危害进行分析。选择若干典型蓝藻水华生态灾害事件,进行全面观测与模拟,以验证等级的划分和标准。

提出蓝藻水华生态灾害防治与调控策略。通过对典型蓝藻水华生态灾害事件的反演和模拟,研究蓝藻水华的致灾过程和调控机理。筛选出不同状况下引发蓝藻水华生态灾害的控制性因子,并评估其可能造成的人类健康和社会经济损失,由此提出调控蓝藻水华生态灾害的备选方案和治理措施,以达到减轻和控制蓝藻水华生态灾害的目的。

本书提纲由高俊峰构思,参与撰写的人员有来自中国科学院南京地理与湖泊研究所的高俊峰(第一章、第二章和第六章)、王晓龙(第三章和第七章)、李恒鹏(第五章)、黄佳聪(第九章)、赵家虎(第六章)与张民(第一章),中国科学院生态环境研究中心的罗维(第四章和第十章)与李伟峰(第八章),南京工业大学的夏霆(第二章),江西省水利科学研究所的刘聚涛(第七章),中国矿业大学(北京)的杜婷婷(第四章和第十章)。由高俊峰统稿并定稿。黄琪、季宇虹和董川永等研究生整理了数据与参考文献,绘制了部分图件。

本书的出版得到国家重点基础研究发展计划“蓝藻水华生态灾害评估及防治对策”(编号:2008CB418106)、科技部科技支撑计划“应对太湖蓝藻水华的饮用水质保障应急技术研究及示范”(编号:2007BAC26B01)、江苏省科技厅太湖水污染治理科技专项“太湖蓝藻水华监测与预警体系研究”(编号:BS2007162)和中国科学院重大交叉项目“湖泊富营养化过程监测与水华灾害预警技术研究与系统集成”(编号:KZCX1-YW-14-6)等项目的支持。

本书虽力求反映蓝藻水华生态灾害的最新进展,但由于编著者水平所限,书中不妥之处在所难免,请广大读者批评指正。

高俊峰
2013年5月

目 录

序言

前言

第一章 蓝藻水华生态灾害的概念	1
第一节 蓝藻水华生态灾害的内涵	1
一、蓝藻概述	1
二、湖泊的蓝藻水华灾害	7
第二节 国内外蓝藻水华生态灾害的研究状况	8
第三节 研究区概况	10
参考文献	12
第二章 太湖健康状况评估	14
第一节 湖泊健康相关研究进展综述	14
一、湖泊健康的概念	14
二、湖泊健康的评价指标	16
三、湖泊健康的评价基准	18
四、湖泊健康评估实践	19
第二节 太湖健康评估指标体系	20
一、湖泊健康内涵	20
二、湖泊健康评估指标体系构建	25
第三节 太湖健康评价标准与分级	32
一、湖泊健康评价基准分析	32
二、湖泊健康指数分级标准	34
三、指标评价标准与分级	34
第四节 太湖健康评估方法	36
一、湖泊健康评估过程与方法	36
二、指标权重确定方法	37
第五节 太湖健康评价结果	41
一、单指标评估	41
二、太湖健康综合评估	44
参考文献	46

第三章 太湖水质时空动态与藻类生长影响因素	48
第一节 太湖水质时空动态变化	48
一、太湖湖体水质时间动态变化特征	48
二、太湖湖体水质空间变化特征	51
第二节 太湖藻类生长影响因素	56
一、太湖不同湖区富营养化环境影响因素分析	56
二、太湖富营养化环境影响因素季节动态分析	60
三、太湖藻类生长对磷输入的响应特征	65
参考文献	70
第四章 太湖生态系统服务功能	72
第一节 生态服务功能概念及其评价方法	72
一、生态系统服务功能的概念	72
二、生态系统服务功能价值评价方法	73
第二节 太湖生态服务功能评价方法	74
一、供水功能	75
二、提供水产品	75
三、航运功能	76
四、水力发电	76
五、大气调节	76
六、输沙功能	77
七、水质净化	77
八、调蓄洪水	77
九、蓄水	78
十、土壤保持	78
十一、旅游功能	78
第三节 太湖生态服务功能评价	78
一、供给服务价值评估	78
二、调节服务价值评估	82
三、支持服务价值评估	85
四、文化服务价值评估	87
五、讨论	88
参考文献	93
第五章 流域营养盐输入对太湖蓝藻水华灾害的影响	96
第一节 典型小流域营养盐产出与输移过程	96
一、暴雨过程坡面营养盐流失特征	96

二、暴雨过程小流域营养盐输出特征	97
三、流域营养盐输移过程的滞留与损失特征	99
四、太湖流域营养盐输出强度代表性参数	100
第二节 太湖上游流域营养盐模拟与入湖通量估算	101
一、国内外流域营养盐模拟技术与方法	101
二、太湖流域营养盐入湖通量模拟方案	103
三、太湖流域营养盐入湖通量模拟结果	104
四、太湖流域土地利用变化对营养盐输出的影响	106
第三节 太湖蓝藻水华对入湖营养盐输入的响应	108
一、太湖流域营养盐污染呈现持续增加的趋势	108
二、流域营养盐输出强度增加对蓝藻水华的影响	110
三、蓝藻水华控制的流域营养盐削减对策	111
参考文献	112
第六章 太湖蓝藻水华灾害时空分布	114
第一节 太湖蓝藻水华灾害数据的遥感提取	114
一、数据的获取与预处理	114
二、蓝藻水华遥感提取方法	115
第二节 太湖蓝藻水华灾害发生的次数与规模	117
第三节 太湖蓝藻水华灾害时间分布特征	119
一、蓝藻水华发生的年际变化特征	119
二、蓝藻水华发生的年内变化特征	122
第四节 太湖蓝藻水华灾害空间分布特征	124
参考文献	134
第七章 太湖蓝藻水华灾害评价	135
第一节 蓝藻水华灾害评价方法	136
一、隶属度函数的确定	137
二、指标权重的确定	137
三、综合评价模型	140
第二节 太湖蓝藻水华灾害灾情评估	141
一、指标体系构建基本原则	141
二、蓝藻水华灾害灾情评估指标体系	142
三、指标含义及其计算方法	144
四、评价标准确定	145
第三节 太湖蓝藻水华灾害灾情评估实例	145
一、经济损失计算	146

二、灾情评估	147
三、结果分析	149
四、2004~2011年太湖蓝藻水华灾害灾情分析	151
参考文献	151
附录	154
第八章 太湖蓝藻水华灾害风险评价	157
第一节 蓝藻水华灾害评价指标体系	157
一、指标体系构建基本原则	157
二、影响蓝藻水华的指标分析	158
三、评价的指标体系构建	162
第二节 太湖蓝藻水华灾害风险评价	163
一、自组织特征映射神经网络的水华灾害特征评价	163
二、蓝藻水华灾害风险不确定性分析	168
三、太湖水华灾害风险评价及综合特征	173
第三节 蓝藻水华灾害风险评价分区	176
一、分区原则和方法	176
二、保守性蓝藻水华风险分区	176
三、冒险性蓝藻水华风险分区	178
第四节 太湖藻类分布与水华灾害风险的关系	181
一、不同风险区的藻类空间分布特征	181
二、不同风险区的藻类时间分布特征	182
参考文献	187
第九章 蓝藻水华评估模型与系统设计	191
第一节 模型集成环境	191
一、Python 编程语言	192
二、Python 函数库	193
第二节 系统框架	193
第三节 系统功能	196
一、系统配置模块	196
二、数据可视化模块	197
三、分析存储模块	197
第四节 模拟案例	200
一、输入数据	200
二、模型参数	203
三、模拟结果	204

参考文献	207
第十章 太湖蓝藻水华灾害防治与调控	208
第一节 太湖蓝藻水华灾害的成因及调控机理	208
一、太湖蓝藻水华生态灾害的成因	208
二、太湖蓝藻水华的调控机理	210
第二节 蓝藻水华生态灾害的调控技术及方案优化	213
一、蓝藻水华生态灾害的调控技术	213
二、蓝藻水华生态灾害的调控方案的优化	217
第三节 蓝藻水华生态灾害的治理目标及决策建议	225
一、蓝藻水华生态灾害的治理目标	225
二、蓝藻水华生态灾害的决策建议	226
参考文献	229

Contents

Preface

Foreword

1	Concept of algae blooms disaster	1
1.1	Connotation of ecological disasters of algae blooms	1
1.2	Literature review	8
1.3	Study area	10
	References	12
2	Lake Taihu health assessment	14
2.1	Lakes health literature review	14
2.2	Index system	20
2.3	Evaluation criteria and grade	32
2.4	Indexes and methods of lake health assessment	36
2.5	Results and discuss	41
	References	46
3	Algae growth dynamic and its influencing factors	48
3.1	Lake Taihu spatial-temporal variation	48
3.2	The growth of algae in Lake Taihu and its influence factors	56
	References	70
4	Ecosystem services of Lake Taihu	72
4.1	Concept	72
4.2	Methods	74
4.3	Results and discussion	78
	References	93
5	Nutrient inputs into Lake Taihu and algae blooms disasters	96
5.1	Small watershed nutrient outputs Experiment and transport processes	96
5.2	Upstream nutrient outputs and fluxes into Lake Taihu	101
5.3	Lake algae blooms response to nutrient output	108
	References	112
6	Algae blooms disaster spatial and temporal distribution in Lake Taihu	114
6.1	Algae blooms disasters extract in remote sensing	114

6.2	Algae blooms disasters the number and scale	117
6.3	Algae blooms disasters temporal distribution	119
6.4	Algae blooms disaster spatial distribution	124
	References	134
7	Algae blooms disaster assessment	135
7.1	Assessment methods	136
7.2	Algae blooms disaster damage grade	141
7.3	Results and discuss	145
	References	151
	Appendix	154
8	Algae blooms disaster risk assessment	157
8.1	Index system	157
8.2	Assessment results	163
8.3	Algae blooms disaster risk zoning	176
8.4	Algae distribution and relationship with risks	181
	References	187
9	Modeling of algae blooms and system design	191
9.1	Model integration environment	191
9.2	System framework	193
9.3	System functions	196
9.4	Case study	200
	References	207
10	Algae blooms disaster prevention and control	208
10.1	Causes and regulation mechanism	208
10.2	Control technology and optimization	213
10.3	Management objectives and policy recommendations	225
	References	229

第一章 蓝藻水华生态灾害的概念*

第一节 蓝藻水华生态灾害的内涵

生态灾害是指在外在或内在因素的干扰下导致原有生态系统平衡改变所带来的一系列负面现象和突发事件。生态灾害的发生根源于生态系统结构和功能的灾变，即干扰因素对生态系统主体造成了损害，如生态系统破坏、生物多样性下降、财产损失、人员伤亡和社会安定失稳等 (Scheffer et al., 2001)。湖泊生态灾变是指人为活动引起湖泊富营养化，进而导致湖泊水生态系统结构和功能发生巨大变化：水质恶化，蓝藻水华暴发，威胁周边居民生活和身体健康。湖泊生态灾变一般指淡水湖泊的生态灾变。咸水湖或者微咸水湖也可能由于人类活动导致湖泊生态系统的结构和功能的变化，但这种变化一般表现形式是生态系统结构和功能的退化，如生物多样性降低、种群结构单一化和生物量降低等，甚至出现系统的崩溃，发展成为盐湖或者彻底干涸。人类活动导致湖泊富营养化，引起湖泊蓝藻水华暴发是淡水湖泊生态系统受损的主要表征之一。

我国是世界上蓝藻水华暴发最严重、分布最广泛且水华蓝藻种类最多的国家之一，如太湖、滇池和巢湖均有大面积高频率的蓝藻水华发生，在一些水华堆积区，蓝藻浓度已超过 10^{10} 个细胞/L。蓝藻水华会造成水体的“二次污染”。例如，蓝藻在生长和衰亡过程中所分泌的异味化合物或毒素等，可严重影响饮用水及水产品的品质，造成严重的经济损失，还会引起水生和一些陆生动物中毒，并可能危及人类健康。藻类堆积后腐烂分解还可导致局部水域水质的严重恶化，危及供水安全。例如，2007年5月底，蓝藻水华暴发导致无锡市主要自来水厂停产，严重干扰居民的生产和生活，影响社会稳定，引起国内外的极大关注，对生态文明与和谐社会建设产生重大不利影响 (吴庆龙等，2008)。

蓝藻水华发生风险评估是有效减少及预防蓝藻水华影响的重要手段，是蓝藻水华风险管理的重要理论依据。蓝藻水华发生风险是指蓝藻水华暴发的程度及其可能性。

一、蓝藻概述

蓝藻水华 (algae blooms) 是淡水中的一种自然生态现象，是由蓝藻在水体中大量

* 本章第一节由张民和高俊峰 (中国科学院南京地理与湖泊研究所) 撰写，第二、三节由高俊峰撰写，由高俊峰统稿和定稿。

繁殖并漂浮于水面而形成翠绿色的薄层，或絮状和丝状等形态。自然界的“水华”现象在我国古代就有记载。我国云南滇池、太湖和巢湖等每年都有不同程度的蓝藻水华发生，江浙一带称其为“湖靛”，福建称“铜锈水”。在自然界中它们会很快消失，并没有给湖泊生态环境和人类带来危害。从生物学角度看，蓝藻水华通常是指在富营养化的淡水水体中，由于蓝藻过度繁殖，在水体表面大量聚集而形成肉眼可见的团状或块状的漂浮聚集体，使水体呈现绿色。从以上水华的定义可以看出水华的形成有两个要素：一是藻类的过度生长，二是在水表面大量聚集（孔繁翔、宋立荣，2011）。

湖泊的富营养化过程加剧了蓝藻水华的频繁发生。20世纪70年代末，中国大多数淡水湖泊处于中营养状态，其面积占调查面积的91.8%；贫营养湖泊占3.2%；富营养化湖泊占5.0%。70年代到80年代末的短短10年期间，贫营养状态湖泊向中营养湖泊过渡，所占面积比例从3.2%迅速降低到0.53%；中营养状态湖泊向富营养化状态过渡，富营养化湖泊所占比例从5.0%剧增到55.01%。1996年的监测表明，26个国控湖泊中，总体富营养化的程度高达85%（金相灿，2001）。

进入21世纪，由于社会经济的高速发展，湖泊所在流域人类活动强度和范围加剧，工农业迅速发展，城市化进程加快，湖泊富营养化的进程大大加速。湖泊富营养化、湖泊生态破坏以及水质恶化等环境问题不断出现和发生，致使许多湖泊生态系统出现问题，给流域的社会与经济发展造成不可估量的损失。

流域人类活动加剧的标志之一是入湖总氮（TN）和总磷（TP）等污染物浓度增加，导致湖泊水体富营养化不断加重。据2007~2010年对东部平原、东北和云贵高原3个湖区138个面积大于10km²湖泊水质调查，采用TN、TP、叶绿素a（Chl-a）、透明度、悬浮物和化学耗氧量（COD）6个水化学指标进行评价的湖泊营养指数（TSI）显示：138个湖泊中有85.4%的湖泊达到了富营养化标准，其中达重富营养化标准的占40.1%，而全湖全年均为贫营养水平的仅泸沽湖一个；有些湖泊在部分湖区的部分季节存在贫营养状态，但全湖全年平均也大都为中营养水平，如云南抚仙湖和江西军山湖等；中营养和贫营养湖泊（湖区）总计仅为14.6%。东北平原湖区湖泊富营养化比例最高，达96.0%；其次是长江中下游湖区，为85.9%；云贵高原湖区最低，为61.5%（杨桂山等，2010）。

云贵高原以及长江中下游地区是我国目前湖泊富营养化和蓝藻水华较为严重的地区。其中以太湖、滇池和巢湖为典型：周边人口密集，入湖污染严重，蓝藻水华的暴发造成严重生态、社会和经济问题，被列为国家水污染重点治理的“三湖”。

太湖在20世纪60年代处于贫-中营养水平，至80年代达贫-中至中营养水平，90年代初上升到中富营养，至2000年已以富营养为主。监测表明，2000年全年平均太湖水域的71%已达富营养水平。采用高锰酸盐指数、TP、TN、Chl-a和透明度5项参数计算湖体综合营养状态指数，从太湖湖体综合营养状态指数的变化趋势可以看出，太湖基本处于富营养化状态；2001~2005年中营养—富营养水域呈扩大趋势；2008~2010年太湖全湖综合营养状态指数在60左右波动，期间富营养化水平略有波动。近年来太

湖富营养化程度加重，处于中—富营养化状态，局部水域已处于重度富营养化状态。水体的中—富营养化水域主要集中于太湖西部和北部区域。

巢湖的主要污染指标为 TP 和 TN。由于湖泊面积较大，因此湖区各水域 TP 和 TN 不尽相同。1982 ~ 1984 年湖泊水体 TP 和 TN 均值分别为 0.129mg/L 和 1.70mg/L。1989 ~ 1995 年的监测结果与 1982 ~ 1984 年相比，湖区两者含量均有显著提高。1995 年 TP 和 TN 的年平均值比 1982 ~ 1984 年的均值分别增长了 2.21 倍和 1.72 倍。巢湖已处于严重的富营养化状况，并经常出现密集的水华，造成很大的危害（孔繁翔、宋立荣，2011）。

20 世纪 60 年代滇池草海和外海水质均为 II 类，70 年代降为 III 类。此后水质进一步恶化，至 80 年代草海和外海的水质分别降为 V 类和 IV 类，90 年代草海和外海的水质分别降为 V 类和劣 V 类；表征富营养化的 TP、TN、Chl-a 和透明度及表征有机污染的高锰酸盐指数（ COD_{Mn} ）和五日生化需氧量（ BOD_5 ）指标浓度呈明显上升趋势（沈满洪，2003）。

在湖泊生态系统中，湖泊初级生产者包括浮游植物、底栖或固着藻类、沉水植物与挺水植物，它们相互作用相互制约，形成一个平衡的湖泊生产力系统。一旦这一平衡系统被破坏，湖泊接纳的营养盐若主要供给浮游植物，则蓝藻因其生态位在生态系统具有较高的适合度，而能够占据优势进而大量繁殖，形成水华。

蓝藻水华多发生在夏季，有明显的季节性，温度、光照、营养物质、气候条件和水动力等都有可能成为制约因素。目前对于蓝藻水华发生机理的一般性认识主要经历了野外观察、单物种的研究和多物种共存研究等过程，大多数研究认为水华是由包括营养因子、环境因子和生态因子等在内的多种因素联合作用而引发的（Spencer and King, 1989; Elser, 1999; Dokulil and Tuebner, 2000）。

（一）营养元素

在蓝藻水华形成机理探索中，研究最多的是关于氮和磷等营养盐与藻类生长的关系。藻类生长需要多种营养元素，其中碳、氮和磷是最主要的。碳是自然界大量存在的元素，因此，湖泊水体中氮和磷的含量以及它们的存在形态在一定程度上制约着藻类的生长。国际上一般认为湖水中 TN 达 0.2mg/L 和 TP 达 0.02 mg/L 是富营养化发生的浓度阈值。磷是控制湖泊藻类生长的主要因素。目前的大多数研究十分关注湖泊中营养盐的来源，通常将磷作为优先考虑的限制因子，认为必须及时有效地阻断外源营养盐的连续输入才能控制水华的形成，尤其必须重视和控制当前的点源和面源污染，如农业灌溉、施肥、养殖业、生活污水和工业废水等。

在控制外源污染的同时，也必须注意到湖泊中已经积累的大量营养盐的内源释放（Martin et al., 1996）。已有研究表明，当外源营养物切断后，底泥中营养物的释放对藻类的增长有着重要影响，尤其是对于太湖这样的浅水湖泊，底泥营养物的内源性供应更应受到重视（韩伟明，1993）。随着夏季水温升高，湖泊底部处于厌氧状态，氧化还原电位下降，使得存贮在底泥中的营养物质以还原态释放出来并进入水体营养循环。