

气候变化对欧洲湖泊的影响

〔英〕Glen George◎主编

白晓华 刘伟龙 金竹静 杨秋林◎译



科学出版社

气候变化对欧洲湖泊的影响

[英] Glen George 主编
白晓华 刘伟龙 金竹静 杨秋林 译

科学出版社

北 京

图字：01-2011-6657

内 容 简 介

本书介绍欧盟委员会框架计划（FPs）第五框架计划中的“气候变化对欧洲湖泊的影响”（CLIME）项目的主要研究内容、方法和成果。该项目利用气候模型、流域模型以及湖泊模型对湖泊的某些物理、化学和生物过程开展模拟研究，以探求未来气候变化对欧洲湖泊的可能影响。

本书可作为在湖泊学、水资源供给以及水环境保护领域从事科学研究、管理和生产实践人员的参考用书。

Translation from the English language edition:

The Impact of Climate Change on European Lakes edited by Glen George

© Springer Science+Business Media B.V. 2010

图书在版编目（CIP）数据

气候变化对欧洲湖泊的影响/（英）乔治（George, G.）主编；白晓华等译.
—北京：科学出版社，2014.7

书名原文：The impact of climate change on European lakes

ISBN 978-7-03-041367-3

I. ①气… II. ①乔… ②白… III. ①气候变化—影响—湖泊—研究—欧洲 IV. ①P941.78

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第149569号

责任编辑：朱海燕 李秋艳 李上男 / 责任校对：朱光兰

责任印制：赵德静 / 封面设计：铭轩堂

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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年7月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2014年7月第一次印刷 印张：23 1/4

字数：550 000

定价：139.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

Man is born not to solve the problems of the universe,
but to find out where the problem applies, and then to
restrain himself within the limits of the comprehensible.

人类不是为解决尘世间的问题而生，而是为找出
问题的所在，并把自己的行为控制在对世界的理解范
围内。

—— Goethe

译 序

大量监测和各种模拟结果表明,以变暖为主要特征的全球气候变化已成为事实。IPCC 第 4 次评估报告指出,21 世纪末全球地表平均增温值将会达到 $1.1\sim 6.4^{\circ}\text{C}$,其中未来北半球气候将持续变暖,夏季降雨将不断减少,并将对碳、氮、磷等主要元素的生物地球化学过程和食物链产生重要的影响,大气环流、径流和温度模式的改变也将使各种生物的栖息地及其多样性发生显著变化,尤其是处于高纬度区的物种,其生理极限将受到环境变化的极大挑战。气候变化导致的水文机制、水量和水质的变化,使得供水、航运等行业会受到直接或间接的影响。因此,对气候变化趋势的模拟和预测已成为科学家关注的重点。

气候变化也是目前中国面临的一个严重环境问题。近年来,中国西部地区降水量增加趋势明显,而华北、东北大部分地区的降水减少,海河、黄河、辽河等北方河流的流量减少尤为明显。目前,80% 左右的冰川正在退缩,气温的上升导致春季融雪性洪水提前发生,夏季冰川融水洪水更为集中,冰川面积和冰储量进一步减少,对以冰川融水为主要来源的河川径流将产生较大影响。中国冻土区域(包括永冻土)自 20 世纪 80 年代以来开始迅速退化,水热格局和资源环境承载力变化将极大影响众多行业和区域经济发展。对气候变化敏感的传染性疾病,如疟疾,传播范围增加的可能性加大,公众的健康和生活也将随之受到威胁。

全球气候不仅影响到我们的生存环境,而且也深刻地影响能源、政治和经济发展等各个方面。特别是对水资源的影响尤为明显。在第五届欧盟研究与技术开发框架内的能源、环境与可持续发展(EESD)计划的支持下,根据前期的研究和长时间的数据积累,来自 17 个国家的科学家经过 4 年的跨区域研究,共同完成了“气候变化对欧洲湖泊的影响”(CLIME)这一项目。研究方法也从定性向定量转变,以更为复杂的多因子驱动的生态模型研究为代表,对未来气候变化情形下的生态系统的响应进行了较为深入的研究。项目对欧洲 30 多个湖泊的长期监测数据进行了 15 000 次的模拟运算,为评估不同湖泊对气候的敏感度以及在量化极端气候变化带来的影响提供了可靠的依据,比较了欧洲尺度上的各类环境因子的反馈模式和过程,最后利用决策支持系统(DSS),对所有信息进行了整合,并形成对于供水工业终端用户易于使用的软件系统。

中国的水风险在全球范围内目前处于 70 位的中高水平。湖泊是中国淡水资源的重要储存地,主要集中分布在青藏高原、云贵高原和长江中下游平原。长江中下游平原湖泊受人为活动影响较大,而青藏高原和云贵高原的湖泊对气候变化的响应更为敏感。近年来针对水资源的可持续利用,我国投入了大

量资金进行研究和治理,在一定程度上遏制了水质恶化和水环境退化的问题,在国际上和学术界获得了一定的认可。特别是在气候变化影响下的水污染机制和防治方面,取得了不菲的成效,水资源管理新思路正在逐步形成。但是由于中国对于气候变化下的水资源的研究起步较晚,监测数据缺乏连续性且跨度较短,因此难以形成较为系统的结论和预测。《气候变化对欧洲湖泊的影响》一书,在研究思路和研究方法方面,可以对气候变化下的中国水资源的研究提供帮助,为中国在保护淡水资源和应对气候变化方面提供一定的启示。

本书的翻译工作得到国家水体污染控制与治理科技重大专项“湖泊富营养化控制与治理”之主题“流域入湖河流清水修复关键技术与工程示范(2012ZX07102002)”及云南省科技项目“弥苴河河口湿地恢复关键技术研究及工程示范(2008CA020)”的联合资助;主要的翻译作者有:白晓华(云南省环境科学研究院,云南高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室(筹))、刘伟龙(中科院水利部成都山地灾害与环境研究所)、金竹静(云南省环境科学研究院)及杨秋林(太原科技大学)。由白晓华博士和刘伟龙博士对全书进行统稿和审定。

此外,江苏大学外国语学院在本书的翻译方面给予了大力支持,伦敦大学 Dominic Clyde Smith 博士对部分英文进行了详细阐释,翻译工作得到云南省科技厅、大理州科技局、大理市洱海保护管理局的支持,在此我们一并表示诚挚的谢意,感谢各位参与者在翻译过程中给予的帮助。

由于译者水平所限,以及中外文化差异及中英文表达的不对称性,书中难免出现各种不足之处,敬请读者不吝赐教。

译者
2014年6月

前 言

水源不仅是动植物和人类生存的前提，也是社会经济发展不可或缺的资源。但是，由于近年来受到污染加剧、自然资源被过度开发、水生生态系统的退化以及气候变化等因素的影响，水资源的可持续利用面临严重的威胁。尽管地区和国际层面上，在应对日益退化的环境问题方面积累了一定的经验，然而对欧洲的水体而言，仍需通过持续的努力，改善和保护水环境。事实上，可以毫不夸张地说，水体保护依然是欧盟在新千年面临的主要挑战之一。

为迎接面临的挑战，建立解决水环境问题的共识性指标，欧盟出台了“水框架指令”（WFD）。所有欧盟成员国被要求采取相应的措施，确保到 2015 年，所有地表水状态能达到“良好的生态和化学状态”。随着该政策的推进，发现气候变化对 WFD 的完善具有深刻的影响。这个认识，成为近期欧盟“适应气候变化”白皮书中的一个议题。对欧洲大部分地区，未来气候变化对水环境的影响尤其重要，在水资源和水供应方面的问题将会变得更为复杂。

科学研究在欧洲环境政策的推行过程中具有举足轻重的作用。与水有关的研究，在欧盟各国的研究与技术开发（RTD）框架计划中已成为关键项目，未来水问题的研究将更为重要。自 1980 年代后期，水研究项目成为历次欧盟委员会框架计划（FPs）的主要部分，这些项目有助于加深理解水生态系统的关键过程和相互作用，对水生生态系统管理具有积极的作用。同时，在欧盟政策（水框架指令、饮用水、城市污水、氮和政府间气候变化专门委员会指令等）的执行中，对水资源可持续管理新技术研发也做出了重要贡献。欧盟框架计划资助的水研究项目的成果和理念，也在政策的不断完善中得到体现。早期的框架项目关注基础科学知识的深入研究，而近年来更多项目设计用于支持水质标准和污染物末端处理技术的研发。与此同时，欧盟委员会框架计划资助项目的规模也在扩大。早期项目主要将中小型课题的相关研究结果进行集成总结。现在，以大型整合计划和卓越网络式的研究项目为主，这类项目在解决复杂问题、满足利益相关各方和终端用户的实际需要方面，需要广泛的合作和多学科基础支持。例如，第五框架计划（1998~2002 年）中，仍关注新知识的获取；而第六框架计划（2002~2006 年）特别关注如何提高对水系统结构和动态的理解，把握水政策的执行力度和适用范围。其中包括改进水系统面对多重胁迫的响应预测，以及通过新的管理理念、模式和指南促进水的可持续利用。第七框架计划（2007~2013 年）则提出更高的目标，力

争在研究机构、科研人员以及水务公司之间形成紧密合作，主要目的是发展最为经济、最具创新性、最具竞争力的水资源管理方式，同时缓解气候变化对欧洲水资源的影响。

“气候变化对欧洲湖泊的影响”项目（CLIME）是第五框架计划的一部分，但在跨学科的结构和任务的综合性方面，与第六框架有诸多相似之处。在CLIME项目里，欧洲九国和美国共计17个研究机构的气候学家、湖泊科学家以及生态模型建模人员，通过资源整合，探索了气候变化对湖泊动态的影响。该项目由欧盟环境与可持续发展的子研究计划资助，通过软件和模型开发，模拟湖泊对历史及未来气候变化的响应。这个合作研究计划，显示了欧洲研究力量的重要性：通过欧盟层面的资助，解释高度复杂的现象，得出湖泊对气候变化在欧洲尺度上的响应模式。本书与100多篇学术论文，展示了在理解和预测气候变化对湖泊动态的影响方面这些方法和模型所起的作用。

CLIME采用的基于流域的方法，很大程度上反映了水框架指令的操作要求，因此，本书的成果将会引起欧洲的水资源调节和管理机构的兴趣。特别是模型模拟，提供了政策制定和执行所需要的部分信息。这些模型已在天气模式差别极大的北欧、西欧和中欧的不同地点进行了验证。CLIME所涵盖的环境情形的差异幅度，结合概率方法在决策支持系统（CLIME-DSS）中的应用，使本研究成果亦可用于项目未涵盖的其他欧洲地区的水资源调节与管理方面。

欧盟资助项目的关键目标是，研究结果和方法具有普适性的使用价值。这些方法要能使纳税人、资助者清楚地了解欧洲社会如何受益于这些研究，对此，感谢并祝贺所有CLIME项目的参与者，他们出色的研究成果为本书的出版做出了贡献，希望本书可以得到水务公司、政策制订者、管理机构以及学术界的认可。希望CLIME项目的研究成果可以用来评估气候变化对水资源保护策略的潜在影响。CLIME项目组非常感谢那些对本书提出反馈意见的各方人士，他们宝贵的意见和建议，为本书的出版做出了重要的贡献。

Christos Fragakis
Project Officer
European Commission
Directorate General for Research Contents
E-mail: Gesa.Weyhenmeyer@ebc.uu.se

目 录

译序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 气候变化与水框架指令	1
1.3 区域性的气候变化对水质的影响	3
1.4 项目结构	4
1.5 本书涉及的范围	6
1.6 本书的结构	7
1.7 结语	8
参考文献	9
第 2 章 区域气候模型量化气候变化对湖泊的影响	11
2.1 引言	11
2.2 气候模拟在影响评估中的作用	11
2.3 动力降尺度与统计降尺度	12
2.4 CLIME 中的降尺度链	13
2.5 气候预测	16
2.6 讨论及结语	20
参考文献	21
第 3 章 使用 GWLF 模型模拟气候变化对流域水文的影响	24
3.1 引言	24
3.2 GWLF 流域模型	25
3.3 气候变化情景	28
3.4 气候变化对水文的影响	29
3.5 结论	34
参考文献	34
第 4 章 湖泊冰物候学	37
4.1 引言	37
4.2 大尺度气候变化对湖冰物候的影响	37
4.3 结冰和冰消时间对气温的敏感性	39
4.4 海拔对湖冰物候的影响	40
4.5 结语	41
参考文献	42
第 5 章 湖冰形成和衰亡模拟	45
5.1 引言	45

5.2	湖冰结构	46
5.3	湖冰的形成和消融	50
5.4	气候变化和冰情	54
5.5	结论	57
	参考文献	59
第 6 章	气候变化对湖泊热力学的影响	61
6.1	引言	61
6.2	湖泊	61
6.3	统计分析	63
6.4	冬季水温	63
6.5	夏季水温	65
6.6	热分层的时间	67
6.7	讨论	68
	参考文献	71
第 7 章	气候变化对湖泊热特征影响的模拟	75
7.1	引言	75
7.2	湖泊模型	75
7.3	PROBE 模型的运用地点	79
7.4	驱动湖泊模型的气候情景	80
7.5	模型验证	81
7.6	2071~2100 年的温度预测	82
7.7	讨论	84
	参考文献	85
第 8 章	气候变化对磷的供给与循环的影响	88
8.1	引言	88
8.2	地点选择与分析原理	89
8.3	观测到的天气变化对磷供应及再循环的影响	90
8.4	讨论	96
	参考文献	97
第 9 章	模拟气候变化对磷酸磷的影响	100
9.1	引言	100
9.2	GWLF 可溶解磷模型	101
9.3	区域概述	102
9.4	GWLF 磷模型的校正	103
9.5	模拟及不确定性	106
9.6	磷输出的年度变化	107
9.7	磷输出的季节模式	108
9.8	磷输出季节的变化	109
9.9	结语	111
	参考文献	112

第 10 章 气候变化对硝酸盐的供应和再循环的影响	116
10.1 引言	116
10.2 分析中涉及的地点	116
10.3 采样方法和统计分析	117
10.4 硝酸盐浓度的季节变化	117
10.5 冬、夏硝酸盐浓度的长期趋势	119
10.6 大尺度大气变化对氮通量的影响	123
10.7 讨论	124
参考文献	126
第 11 章 模拟气候变化对无机氮供应的影响	130
11.1 引言	130
11.2 模拟过程	131
11.3 DIN 通量的预计变化	135
11.4 讨论	139
参考文献	140
第 12 章 气候变化对流域溶解态有机碳通量的影响	145
12.1 引言	145
12.2 气候因素对 DOC 产生和迁移的影响	146
12.3 影响 DOC 产生和输移的其他因素	151
12.4 DOC 输出的长期趋势	152
12.5 DOC 浓度增加的驱动因素	153
12.6 地表水中高浓度 DOC 的生态意义	155
12.7 结论	155
参考文献	156
第 13 章 模拟气候变化对 DOC 的影响	162
13.1 引言	162
13.2 模拟方法	162
13.3 目前气候条件下 DOC 的模拟	166
13.4 模拟气候变化对 DOC 的影响	172
13.5 讨论	178
参考文献	180
第 14 章 气候变化对浮游植物季节性变化的影响	184
14.1 引言	184
14.2 天气变化对浮游植物季节性动态的影响	185
14.3 气候变化对浮游植物群落结构的影响	192
14.4 讨论	194
参考文献	195
第 15 章 气候变化对浮游植物季节性动态影响的模拟	201
15.1 引言	201
15.2 个案研究中使用的模型	202

15.3 CLIME 的个案研究	205
15.4 讨论	209
参考文献	210
第 16 章 大气环流变化对湖泊表层水温的影响	214
16.1 引言	214
16.2 欧洲天气分类	214
16.3 不同天气型的季节性变化	216
16.4 三个地区的湖泊水温数据分析	216
16.5 地区性天气类型和大气环流的关系	220
16.6 不同类型湖泊对区域天气变化的敏感度	221
16.7 讨论	221
参考文献	224
第 17 章 湖泊变量在区域和跨区域方面的一致性	227
17.1 引言	227
17.2 气候信息是如何传递给湖泊的?	227
17.3 短期的区域一致性	229
17.4 长期的区域一致性	231
17.5 长期的超区域一致性	239
17.6 结论	240
参考文献	241
第 18 章 气候变化对北欧湖泊的影响	247
18.1 引言	247
18.2 物理响应	249
18.3 水文	251
18.4 化学响应	252
18.5 生物响应	253
18.6 非气候人为驱动因素	255
18.7 讨论	255
参考文献	257
第 19 章 气候变化对英国和爱尔兰湖泊的影响	262
19.1 引言	262
19.2 英国和爱尔兰的湖泊分布	262
19.3 英国和爱尔兰的气候	263
19.4 英国和爱尔兰的气候变化情景	264
19.5 温和、湿润冬季的影响	265
19.6 温暖干燥夏季的影响	268
19.7 极端天气事件的影响	271
19.8 讨论	274
参考文献	276

第 20 章 气候变化对中欧湖泊的影响	282
20.1 引言	282
20.2 区域和湖泊	283
20.3 天气的历史变化	283
20.4 对气候变化的预测	284
20.5 全球尺度的天气变化的影响	285
20.6 总结和结论	293
参考文献	294
第 21 章 开发评估气候变化对湖泊的影响的决策支持系统	301
21.1 引言	301
21.2 未来气候变化分析	302
21.3 气候变化对湖泊影响的分析	304
21.4 CLIME-DSS 的结构	310
21.5 使用 CLIME-DSS 的案例	311
21.6 结论	316
参考文献	317
第 22 章 气候变化对社会经济的影响：水资源管理	319
22.1 引言	319
22.2 社会经济评估的方法	319
22.3 案例 1：气候变化引起水华暴发频率增加的社会经济评估	321
22.4 案例 2：气候变化对家庭供水水质的社会经济评估	323
22.5 讨论和结论	326
参考文献	327
第 23 章 气候变化和水框架指令	329
23.1 引言	329
23.2 气候变化的不确定性	329
23.3 讨论	336
参考文献	337
第 24 章 从水供应的角度看待气候变化的影响	340
24.1 引言	340
24.2 纽约市供水系统	341
24.3 纽约市所在流域的气候变化预测	343
24.4 气候变化对供水管理的影响	343
24.5 纽约市环境保护部门（NYCDEP）应对气候变化的方法	351
24.6 CLIME 项目合作的重要性	352
参考文献	354

第1章 绪 论

1.1 引 言

凛冽寒风掠过濯濯童山
无处可逃
污染的浅滩，冻结的湖泊

摘自 13 世纪威尔士诗歌 (Jones and Jarman, 1982) 中的词句，即为本书所要探讨的主题——气候问题。短短数句，展现了极端气候情景及其对河流水质以及湖泊物理特征的影响。这首诗可能创作于 13 世纪初期，那时英国正处于极度严寒的冬季 (Ogilvie and Farmer, 1997)。现在虽然极寒冬季很少出现，但暖冬和炎夏对湖泊和河流水质的影响正日益受到关注。过去 20 年来，欧洲很多湖泊的生态环境发生了极大的变化，大多数变化是流域内人为影响所致，少数变化是由于区域气候的变化 (George, 2002; Blenckner and Chen, 2003; Straile et al., 2003)。气候变化对北欧湖泊最重要的影响是无冰期的延长 (Weyhenmeyer et al., 1999, 2005)，而西欧湖泊受到的最重要影响则是冬季降水量的增加 (George et al., 2004) 以及夏季无风天数的频率的改变 (George et al., 2007)。

“气候变化对欧洲湖泊的影响” (CLIME) 项目得到欧盟委员会研究总理事会的资助，也是流域综合治理项目 “Catchmod” 的一个子课题 (Blind et al., 2005)。CLIME 项目的主要目标在于开发模型，以模拟湖泊对过去和未来气候变化的响应。模型经由长时间的多个地点的长期观测数据验证并由最新的区域气候模型的输出驱动 (Räisänen et al., 2004)。CLIME 项目的次要目标是，通过分析不同湖泊的年际变化数据，探讨这些变化与流域的局部气候变化以及区域气候变化之间的关联。CLIME 项目的期限为 3 年，已于 2006 年 12 月完成。项目完成以后，参与项目的科研人员通过参与国际会议、发表论文 (100 多篇)，对项目的成果进行了充分展示。本书将对该项目的研究成果进行综述，为气候变化对水生生态系统的影响研究提供支持。

1.2 气候变化与水框架指令

CLIME 项目主要为水框架指令 (WFD) 提供战略支持，WFD 标志着欧洲水资源管理模式的根本性改变。WFD 建立了一个统一的评估体系，对所有的水系统进行整体性评估。水框架指令的指导原则是，到 2015 年使所有的地下水和地表水都达到“良好的生态状况”。“良好”的定义为：具有良好的生态表现，其物理、化学、生物特征都与受到人为因素影响极小的水体的相关特征相吻合。WFD 制定方案之初，气候变化并未像今天这样受到如此重视。用于支持水框架指令的相关规程，在未来必须加以修

订，以便涵盖气候变化对水体的直接和间接影响。在目前的方案中，位于不同的欧洲地区的流域管理者需要明确湖泊的“自然变化”，这种自然变化预计会随着全球变暖而日益增大（Temnerud and Weyhenmeyer, 2008），因此，需要对界定湖泊生态状况的评价标准进行相应的修订。目前已经有大量有关气候变化对 WFD 的潜在影响的报道（Arnell, 2001; Wilby et al., 2006; Eisenreich et al., 2005）。CLIME 是首批探索气候的预期变化对水质以及水量影响的项目之一。2005 年，另一个欧盟项目（Eurolimpacs）在 CLIME 项目的基础上，进一步就全球变暖对河流、湿地以及湖泊的影响进行了评估（www.eurolimpacs.ucl.ac.uk）。

对于监管部门而言，关键的问题在于辨别湖泊的水质恶化原因是与流域管理有关，还是主要由于区域性的气候变化所致。

实际上，这就意味着，应首先确定补救措施最为有效的地点，然后为自然恢复能力较差的地点设定新的目标。图 1.1 表明，为特定湖泊所设定的水质目标，将随着气候变化引起的边界条件的新变化而改变。当这些边界条件固定时[图 1.1(a)]，在相当长一段时间内，为达到“良好的生态状况”而采取的措施是有效的，但当这些边界条件发生变化时[图 1.1(b)]，补救措施不得不追逐“移动的目标”，也因此，流域的治理者们需要重新修订为该湖泊治理所设定的目标。

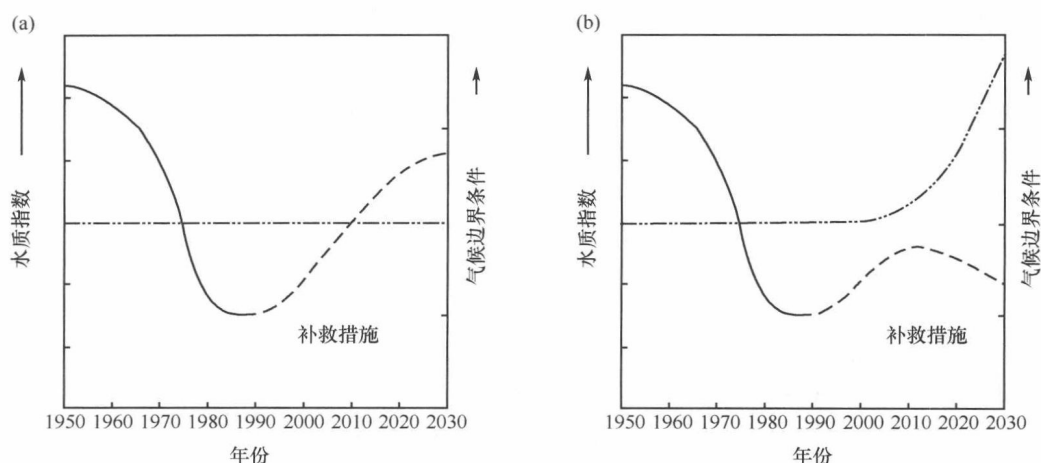


图 1.1 生态修复措施改善水质的影响示意图

(a) 局部气候无系统性变化的情况；(b) 局部气候发生连续变化的情况

对气候变化的响应表现明显的一个例子是瑞典的 Erken 湖（59°25' N, 18°15' E）。Erken 湖是一个中度富营养化湖泊，以往一年内至少有四个月被冰覆盖。自 20 世纪 60 年代以来的定期采样分析表明，水体中的营养物含量并未显著的增加（第 8 章）。然而，近年来无冰期的延长使磷循环进一步加强（第 15 章），导致夏季浮游植物量持续增加。图 1.2 显示的是在两个不同时期记录的该湖叶绿素 a 浓度的年际变化。在 20 世纪 70 年代晚期，该湖泊的无冰期大约是每年 230 天，夏季叶绿素浓度平均为 2.6 $\mu\text{g/L}$ ；到 20 世纪 90 年代晚期 [图 1.2(b)]，无冰期延长至每年约 260 天，夏季叶绿素 a 浓度平均为 4.4 $\mu\text{g/L}$ 。导致夏季叶绿素浓度增加的因素有：生长期延长、深水溶解氧消耗量的增加以及沉积物磷的再循环增强。这些变化因素也对浮游植物的种群结构及季节性动态产生了重要的影响。20 世纪 80 年代，硅藻春季水华发生时间要比 70 年代早；同时，夏季的蓝

藻丰度也是 70 年代的 5 倍 (Weyhenmeyer et al., 1999)。这种现象表明, 湖泊物理特征的小改变可以对湖泊的化学、生物性质产生不成比例的影响。无冰期延长几周导致的变化类似于人为富营养化的后果。淡水生态学家总是低估时间的重要性, 而时间是控制性的作用因素。大多数形成水华的藻类物种生长很慢, 因此, 夏初时超常的细胞分裂会导致后半年生物量的急剧增加。

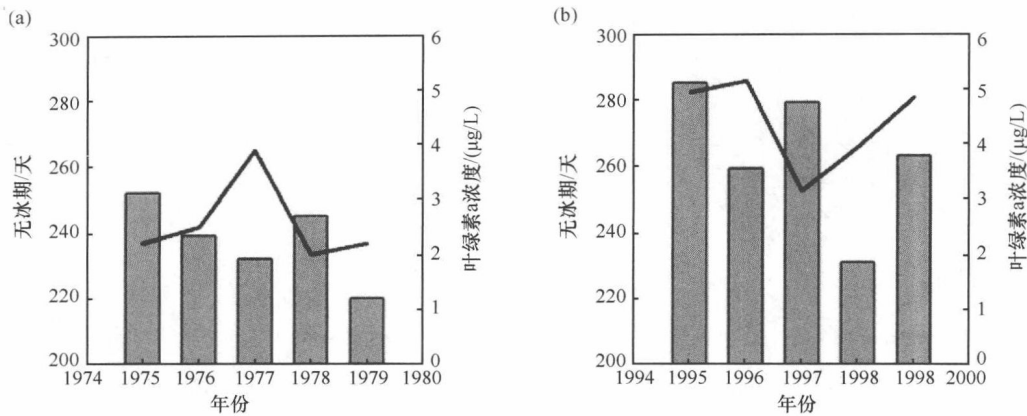


图 1.2 无冰期的延长对 Erken 湖夏季浮游植物生物量的影响
(a) 1970 年代; (b) 1990 年代。图中柱状为无冰期; 折线为浮游植物的生物量 (George, 2002, 有修改)

1.3 区域性的气候变化对水质的影响

有些水质问题可能与当地天气的系统性变动直接相关。例如在温暖无风的夏季, 蓝藻会迅速生长。过去, 曾认为“藻华”是富营养化的必然结果, 但现在发现, 天气变化也对藻类季节性的生长发挥着主要作用 (Paerl and Huisman, 2008)。由于蓝藻生长缓慢, 因此, 湖泊水体置换强度 (flushing rate) 的持续降低, 热分层强度的变化等因素也可能对其相对丰度产生极大的影响。另外, 有些物种会产生气空泡, 使藻类细胞浮于水面, 在低风速和没有紊流混合的情况下, 可在下风处聚集 (George, 1992)。

图 1.3 显示, 1989 年英格兰和威尔士的藻华发生频率的空间分布与夏季平均风速的空间分布相吻合。图 1.3 (a) 是根据国家河流管理局对水资源管理者的一次问卷调查所绘制的地图 (NRA, 1990)。图 1.3 (b) 是一张简化的风速图 (Hulme and Barrow, 1997)。1989 年的暖冬过后, 紧接着是一个异常的温暖无风的夏季。在这种情况下, 很多的湖泊和水库都有蓝藻水华的记录, 藻华频率最高的地点出现在风速较低的内陆地区。在更为温暖的 (未来) 世界, 由于蓝藻复苏得更早, 且稳定分层时期的延长会促进其生长, 因而发生藻华的概率也就随之增加。在 2003 年暖夏, 许多欧洲湖泊出现了严重的蓝藻水华, 并且有证据表明, 有些藻类的分布已超出其原本的地理分布边界 (Wiedner et al., 2007)。



图 1.3 (a) 1989 年英格兰和威尔士的蓝藻水华；(b) 1961 年至 1990 年期间，英格兰和威尔士夏季平均风速的空间分异 (Hulme and Barrow, 1997, 有修改)

1.4 项目结构

在 CLIME 项目中，来自 10 个国家的 17 位科研人员共同探讨了未来可能的气候变化对湖泊动态的直接和间接的影响。图 1.4 是项目参与者的地理分布情况；其中 15 位参与者来自欧盟成员国，其他两位来自瑞士和美国。

该项目致力于突破一直存在于气候学家、湖泊学家以及生态系统建模专家之间的障碍。图 1.5 显示的是该项目的主要组成部分：情景预测、归因分析、模拟、预测以及启示。在“情景设计”部分，来自瑞士和英国的气候学家们基于两个区域气候模型，以及两个温室气体排放场景，为分析和建模人员提供情景设计。在“归因”部分，对所选择的湖泊的历史数据进行了处理，并分析了年际差异与流域内的局部变化以及区域性的气候变化之间的关系。在“模拟”部分，建模人员运用一系列耦合的气候、流域和湖泊模型，探索气候变化对湖泊动态的潜在影响，并运用相同的模型对三个欧洲地区的预期气候变化进行了量化研究，且运用随机方法确定了与水质模拟有关的不确定性。在“预测”部分，运用决策支持系统 (CLIME-DSS) 对由分析人员和建模人员收集到的数据进行综合处理，并以非专业人员也可以理解的模式显示结果。

CLIME-DSS (CLIME 项目下的决策支持系统) 及其源代码现已公布，下载网址是：<http://geoinformatics.tkk.fi/twiki/bin/view/Main/CLIMEDSS>。“启示”部分介绍了预计的气候变化所带来的一些实际作用后果。其中包括：社会经济风险评价分析，水利产业所受影响战略性分析，以及气候变化对水框架指令执行情况的影响评估。