

黄 炜 赵来军 / 著

Lanzao Shuihua Xiangguan Yinsu Shibie Yuce Yu Zhili
蓝藻水华相关因素识别、预测与治理

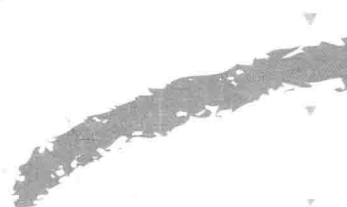


复旦大学出版社

黄 炜 赵来军 / 著

Lanzao Shuihua Xiangguan Yinsu Shibie Yuce Yu Zhih

蓝藻水华相关因素识别、预测与治理



复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

蓝藻水华相关因素识别、预测与治理/黄炜,赵来军著. —上海:复旦大学出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-309-11969-5

I. 蓝… II. ①黄…②赵… III. 蓝藻纲-藻类水华-生态防治 IV. X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 275938 号

蓝藻水华相关因素识别、预测与治理

黄 炜 赵来军 著

责任编辑/宋朝阳 王雅楠

复旦大学出版社有限公司出版发行

上海市国权路 579 号 邮编: 200433

网址: fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

门市零售: 86-21-65642857 团体订购: 86-21-65118853

外埠邮购: 86-21-65109143

上海肖华印务有限公司

开本 890 × 1240 1/32 印张 5.75 字数 123 千

2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 978-7-309-11969-5/X · 23

定价: 20.00 元

如有印装质量问题, 请向复旦大学出版社有限公司发行部调换。

版权所有 侵权必究

内 容 简 介

随着社会与经济的发展,国内外很多湖泊、水库进入了富营养化状态并发生了蓝藻水华。本书根据蓝藻水华反演图构建二元因变量,作为蓝藻水华暴发与否的指标,使用概率模型识别蓝藻水华暴发的显著相关环境因素。根据蓝藻水华面积和聚集强度构建蓝藻水华强度等级,基于恰当的时空精度,用多元线性回归模型识别蓝藻水华强度的显著相关环境因素。以蓝藻水华发生与否的指标为被预测变量,用 probit 短期预测模型预测蓝藻水华的暴发,取得了较高的预测准确度和空间、时间精度。全面分析了治理蓝藻水华的多种方法以及相关的问题。本书还利用湖泊流域内不同地区和不同治理手段削减营养盐的成本差异,考虑工业点源削减、城市污水面源削减以及生态浮床削减手段,构建了流域管理机构与流域内各地区之间的两层优化合作削减模型,实现湖泊流域蓝藻水华长效治理的多地区合作、多手段优化组合。关于上述各项研究内容,本书主要以太湖为例进行了实证研究。

前 言

随着社会与经济的发展,国内外很多湖泊、水库进入了富营养化状态并发生了蓝藻水华。本书探讨了蓝藻水华暴发和蓝藻水华强度的显著相关环境因素,对蓝藻水华进行了短期预测研究,提出了湖泊流域内多地区合作治理蓝藻水华的方法,并以太湖为例进行了实证研究。本书主要包括以下5个方面的研究内容。

1. 根据蓝藻水华反演图构建二元因变量,使用概率模型识别蓝藻水华暴发的显著相关环境因素。

本书根据蓝藻水华反演图判断蓝藻水华发生与否,首次构建了直接以蓝藻水华发生与否的指标为因变量,以水质、水文和气象3类共19项监测变量为自变量(即潜在相关环境因素),识别蓝藻水华暴发的显著相关环境因素的probit模型,并把该模型应用到太湖大贡山水域的蓝藻水华研究。该模型系统地识别出大贡山水域蓝藻水华暴发的显著相关环境因素:硝酸盐浓度、酸碱度、水深与大贡山水域蓝藻水华暴发的概率正相关;风速则与蓝藻水华暴发的概率负相关。在上述4个显著相关因素中,硝酸盐浓度与蓝藻水华发生概率的相关性最强。上述结论与本研究领域内的一般观点在整体上是是一致的,这说明了本模型的有效性。这些结论对湖泊(或水库)的蓝藻水华暴发的预测和预防具有参考价值。

2. 根据蓝藻水华面积和聚集强度构建蓝藻水华强度等级,基于恰当的时空精度用多元线性回归模型识别显著相关环境因素。

本书以蓝藻水华的强度等级为因变量,以3类环境监测变量为自变量,构建了识别水华强度等级的显著相关环境因素的多元线性回归模型,并把该模型应用到大贡山水域的蓝藻水华研究,解决了国内外现有的关于蓝藻水华强度研究中的强度指标的不合理选择问题以及时间和空间精度较低的问题。本书基于水华面积和聚集强度数据,用7级量表生成水华强度等级值,使因变量具有适度的宏观性,避免了使用叶绿素 a 浓度等类似的指标表示水华强度的不足。关于大贡山水域的实证分析表明:气温、硝酸盐浓度和风速在1%的显著性水平上与水华强度等级相关;气温、硝酸盐浓度与水华强度正相关,风速与水华强度负相关。上述结论与本研究领域内的一般观点一致,这说明了本模型的有效性。

3. 以蓝藻水华发生与否的指标为被预测变量,用probit短期预测模型预测蓝藻水华的暴发。

本书直接以蓝藻水华发生与否的指标为被预测变量,以上述两部分研究识别出的显著相关因素为预测变量,构建了蓝藻水华暴发的probit短期预测模型。大贡山水域作为案例被用于该预测模型的实证研究。结果表明,该预测模型的评价指标值比较好;平均相对误差为13.3%,与两个对照模型的平均相对误差相近或小于其误差;该模型在空间精度和时间精度方面具有显著优势。提前一天预测模型的准确性最高,预测周期加长时预测准确性降低;该预测模型的预测准确度和有效性评价指标高于或接近于将所有的可用监测变量都纳入预测模型时的预测准确度和评价指标。

4. 紧密结合水体富营养化治理和蓝藻水华治理两个角度,讨论了蓝藻水华治理方法。

本书给出了蓝藻水华及其综合治理的完整定义,紧密结合水体富营养化治理和蓝藻水华治理两个角度讨论蓝藻水华治理问题。前一部分涵盖以控制点源、面源污染为核心的陆上治理和以生态修复、生态调控为核心的水系治理两个方面,并分析了富营养化治理与蓝藻水华治理相辅相成的关系。在讨论蓝藻水华治理时,本书在物理、化学、生物治理方法和资源化利用这4个方面列举了各种常见方法,着重讨论了其中实用性较强的诸多方法,分别阐述其原理以及应用案例,并做分析和评价,给出应用建议或改进建议。国内外治理实践说明:没有一种单一的方法可以有效地治理蓝藻水华,必须综合运用物理、化学、生物治理技术,综合采用中短期和长期治理策略才能有效控制当前的蓝藻水华问题,并达到基本消除的目标。本书还讨论了关于蓝藻水华综合治理的案例,最后分析了治理工作的经济效益,以及当前我国蓝藻水华治理工作中的一些不足。

5. 利用不同地区和不同污染治理手段的营养盐削减成本差异,构建了两层优化合作削减模型,实现了蓝藻水华的多地区合作、多手段优化组合。

本书将生态削减、工业企业削减和城市污水处理厂削减3种治理手段结合起来,解决流域水体富营养化问题,提出了湖泊流域内营养盐削减指标的优化分配模型,寻求流域内各地区的最优削减量,通过转移费在各地区间为初始削减指标的转移进行补偿。本模型可以充分利用流域内地区间和治理手段间营养盐削减的成本差异,促进地区间营养盐的合作削减和不同治理手段的优化组合,从而优化资源配置,降低流域内

营养盐削减成本。转移费方法可以发挥横向转移支付的优势。实证研究表明:和现有的管理模式相比,若将此优化模型用于太湖流域 2005 年的氨氮削减,可节约削减成本 10 540.08 万元,节约高达 16.6%。

以上研究以一个较新的视角认识蓝藻水华暴发的机制,对蓝藻水华进行预测,探讨蓝藻水华的综合治理,并设计了治理蓝藻水华的长效手段(即营养盐削减)的一种优化方法。以上研究得到了湖泊-流域科学数据共享平台在数据方面的支持,得到了许多老师以及国内外许多期刊的同行评阅人的无私指点,得到了家人和亲友的大力支持和鼓励,得到国家自然科学基金项目(编号:70741028、70673012)、国家社会科学基金项目(编号:08CJY026)和 2010 年教育部“新世纪优秀人才支持计划”(编号:NCET-10-0938)的资助,也得到了上海工程技术大学的出版资助。在此,笔者一并致以衷心的感谢!本书凝聚了笔者数年的研究心血,但由于笔者的学识有限,书中难免会有瑕疵,敬请读者批评指正。

黄 炜 赵来军

2015 年 3 月 31 日

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 蓝藻水华的基本概念	001
1.2 对蓝藻水华的已有研究	009
1.2.1 对蓝藻水华的相关因素/影响因素的 研究	009
1.2.2 对蓝藻水华强度的研究	018
1.2.3 对蓝藻水华预测的研究	021
第 2 章 蓝藻水华暴发的显著相关环境因素识别模型	026
2.1 蓝藻水华暴发的潜在相关环境因素	026
2.2 模型构建	032
2.2.1 判断蓝藻水华暴发的方法	032
2.2.2 二元选择模型	042
2.2.3 蓝藻水华暴发的显著相关环境因素的 识别模型	045
2.3 太湖蓝藻水华暴发的显著相关环境因素的 识别研究	046
2.3.1 数据来源和处理	048
2.3.2 显著相关因素识别与模型评估	049

第3章 蓝藻水华强度的显著相关环境因素识别模型

.....	059
3.1 模型构建	059
3.1.1 数据粒度	059
3.1.2 蓝藻水华强度指标的构建	061
3.1.3 遥感反演的基本概念	062
3.1.4 模型结构	064
3.2 太湖蓝藻水华强度的显著相关环境因素的识别	066
3.2.1 模型拟合和分析	067
3.2.2 逐步回归过程中的回归结果比较	071

第4章 蓝藻水华 probit 短期预测模型

4.1 模型构建	076
4.2 太湖大贡山水域蓝藻水华暴发预测	079
4.2.1 数据处理	079
4.2.2 模型拟合、预测检验与准确性分析	080
4.2.3 纳入所有可用监测变量的预测模型	086
4.2.4 其他预测周期与预测准确度分析	088
4.3 关于蓝藻水华预测的进一步讨论	089

第5章 蓝藻水华与水体富营养化综合治理

5.1 水体富营养化治理	094
5.2 蓝藻水华治理	101
5.2.1 物理方法	101
5.2.2 化学方法	105
5.2.3 生物方法	109
5.2.4 综合治理	116
5.2.5 对蓝藻水华危机的应急措施	118

5.3 蓝藻水华治理工作的经济效益	119
5.3.1 经济效益评估思路	119
5.3.2 蓝藻的资源化利用	121
5.4 进一步的思考	122
第6章 湖泊流域内多地区合作治理蓝藻水华研究	125
6.1 湖泊富营养化问题及其解决思路	125
6.2 指令配额方法	132
6.3 基于削减指标转移的营养盐优化削减	134
6.3.1 优化削减方法的理论框架	135
6.3.2 建模方法	138
6.4 基于太湖流域的实证研究	143
6.4.1 关于指令配额方法和合作优化削减 方法的基础计算	143
6.4.2 合作优化削减方法	146
6.4.3 对优化削减指标方法的进一步检验	150
第7章 结论	155
7.1 研究成果	155
7.2 有待进一步研究的问题	158
参考文献	163
附录	170
附表1 大贡山水域数据示例	170
附表2 太湖各湖区的水质及营养状态	172
附表3 太湖流域保护区的水质达标状况(2014年1月)	173

第1章 绪 论

1.1 蓝藻水华的基本概念

在英文文献中蓝藻有各种称呼,如 Cyanophyta、Myxophyta、Cyanochloronta、Cyanobacteria、blue-green algae、blue-green bacteria、Cyanophyceae^{①②}。蓝藻是藻类生物,是简单、原始的单细胞生物。根据植物分类学,蓝藻类包含 150 个属、2 000 多种^③。蓝藻水华多数由以下 4 种蓝藻造成:水华鱼腥藻 (*anabaena flos-aquae*)、水华束丝藻 (*aphanizomenon flos-aquae*)、铜绿微囊藻 (*microcystis*

① Soil & Water Conservation Society of Metro Halifax. The blue-green algae (cyanobacteria)[OL]. [2007-09-20]. URL: <http://lakes.chebucto.org/cyano.html>.

② Staats, Natascha, Ben De Winder, Lucas J. Stal, Luuc R. Mur. Isolation and characterization of extracellular polysaccharides from the epipellic diatoms *Cylindrotheca closterium* and *Navicula salinarum*[J]. European Journal of Phycology, 1999, 34(2): 161-169.

③ Van Den Hoek, C, D. G. Mann H. M. Jahns (Eds.). Algae: an introduction to Phycology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 623.

aeruginosa)和颤藻(*oscillatoria*)^{①②③}。

蓝藻是一种原始而古老的原核生物,气温较高时(尤其在夏季)容易在富营养化湖泊、水库、河流中大量繁殖,在气象、水文条件适宜时上浮、漂移、聚集,有时在水面聚集成一层蓝绿色而有腥臭味的浮沫,这被称为蓝藻水华。Reynolds 等人将蓝藻水华定义为:分散在水柱中有浮力的浮游蓝藻在水体表面的聚集^④。澳大利亚和新西兰环境保护委员会将蓝藻水华定义为:在富营养化水体中蓝藻大量繁殖,水体中藻细胞叶绿素 *a* 浓度达 10 mg/m^3 或藻细胞达 1.5×10^4 个/mL,并在水面形成一层蓝绿色而有恶臭味的浮沫^⑤。Home 和 Goldman 则将蓝藻水华定义成一个更宽泛的概念和现象:蓝藻水华是指水体中的蓝藻快速大量繁殖,形成肉眼可见的蓝藻群体,或者导致水体颜色发生变化的一种现象,严重时可在水面聚集形成绿色的浮沫甚至藻浆^⑥。中国环境监测总站提供的“巢湖水华特征临时判别方法”如表 1.1 所示。蓝藻水华

① Soil & Water Conservation Society of Metro Halifax. The blue-green algae (cyanobacteria)[OL]. [2007-09-20]. URL: <http://lakes.chebucto.org/cyano.html>.

② Reynolds, C. S. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability[J]. *Freshwater Biology*, 1984, 14: 111-142.

③ 王崇,孔海南,王欣泽,何圣兵,郑向勇,吴德意.有害藻华预警预测技术研究进展[J].*应用生态学报*,2009(11): 2813-2819.

④ Reynolds, C. S, A. E. Irish, J. A. Elliott. The ecological basis for simulating phytoplankton responses to environmental change (PROTECH)[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 140(3): 271-291.

⑤ Australian and New Zealand Environment and Conservation Council. Australian water quality guidelines for fresh and marine waters, national water quality management strategy [R]. Canberra: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, 1992.

⑥ Home, A. J, C. R. Goldman. Limnology[M]. New York: McGraw Hill, 1994.

的一个场景如图 1.1 所示。水华 (water bloom 或 surface bloom) 一词也被用于大型水生植物群落, 而不只是蓝藻^①; 也可用于其他藻类, 例如 Smith 将水华定义为藻类大量聚积, 污染水体并使水体变色^②。

表 1.1 巢湖水华特征临时判别方法

水华特征	藻类密度 (万个细胞/升)	藻类覆盖湖面 面积比例 (%)	蓝藻水华特征
无水华	<200	≤ 5	肉眼基本识别不出水体 中有蓝藻存在
零星水华	≥ 200	≤ 10	出现零星蓝藻悬浮, 水 体表面无漂浮集聚
局部水华	≥ 500	≤ 40	水体表面有蓝藻集聚, 带 状或较散乱, 未形成完全 覆盖, 藻类厚度稀薄
区域性水华	$\geq 1\,000$	≤ 60	
全面性水华	$\geq 10\,000$	> 60	水体表层基本被蓝藻覆 盖, 藻类厚度大, 较浓稠

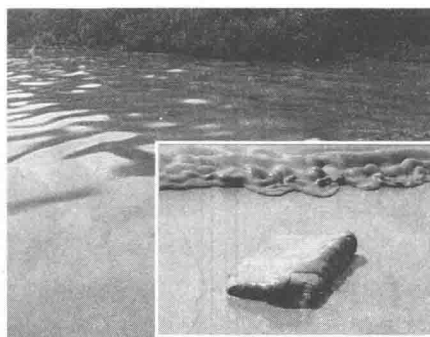
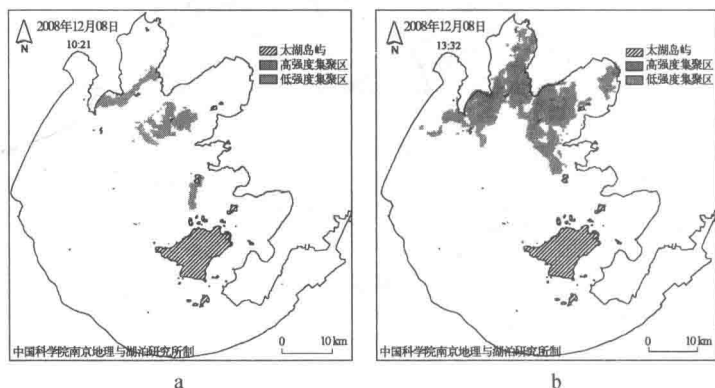


图 1.1 蓝藻水华场景示例

① Reynolds, C. S. The ecology of the planktonic blue-green algae in the North Shropshire meres[J]. Field Studies, 1971, 3: 409-432.

② Smith, G. M. The freshwater algae of the United States[M]. New York: McGraw Hill, 1950.

蓝藻暴发和蓝藻水华暴发有所区别。蓝藻暴发可以只是水体中的蓝藻大量增殖或聚集,即蓝藻丰度增大,但不一定覆盖水面;而蓝藻水华暴发则指蓝藻覆盖了某一(些)水域的水面——危害更大,例如使水体含氧量降低,造成鱼虾大量死亡。水华“暴发”(outbreak、break 或 breaking)指藻类突然地、大面积地覆盖水体表面。实地观测结果和卫星遥感图像、蓝藻水华反演图^①都表明,蓝藻水华可在几小时内迅速形成(或消失)。图 1.2 中的反演图说明了此特点。在图 1.2 中:图 a 和图 b 表明,2008 年 12 月 8 日,在约 3 小时内太湖北部暴发大面积蓝藻水华;图 c 和图 d 表明,2008 年 12 月 1 日,在约 5 小时内几乎整个太湖暴发大面积水华,变化之大远甚于 12 月 8 日;图 e 和图 f 表明,2008 年 12 月 9 日,在约一个半小时内太湖西南部的水华消失,而北部和中部的的水华加强;图 g 和图 h 表明,2009 年 6 月 23 日,在约 3 小时内太湖西部的蓝藻水华有所减轻。实际时间间隔更短,因为图 1.2 中的反演图是基于美国 EOS(中文名称为对地观测系统)项目的



①. 关于这两类图的概念和应用,笔者将在 2.2 节中进行讨论。

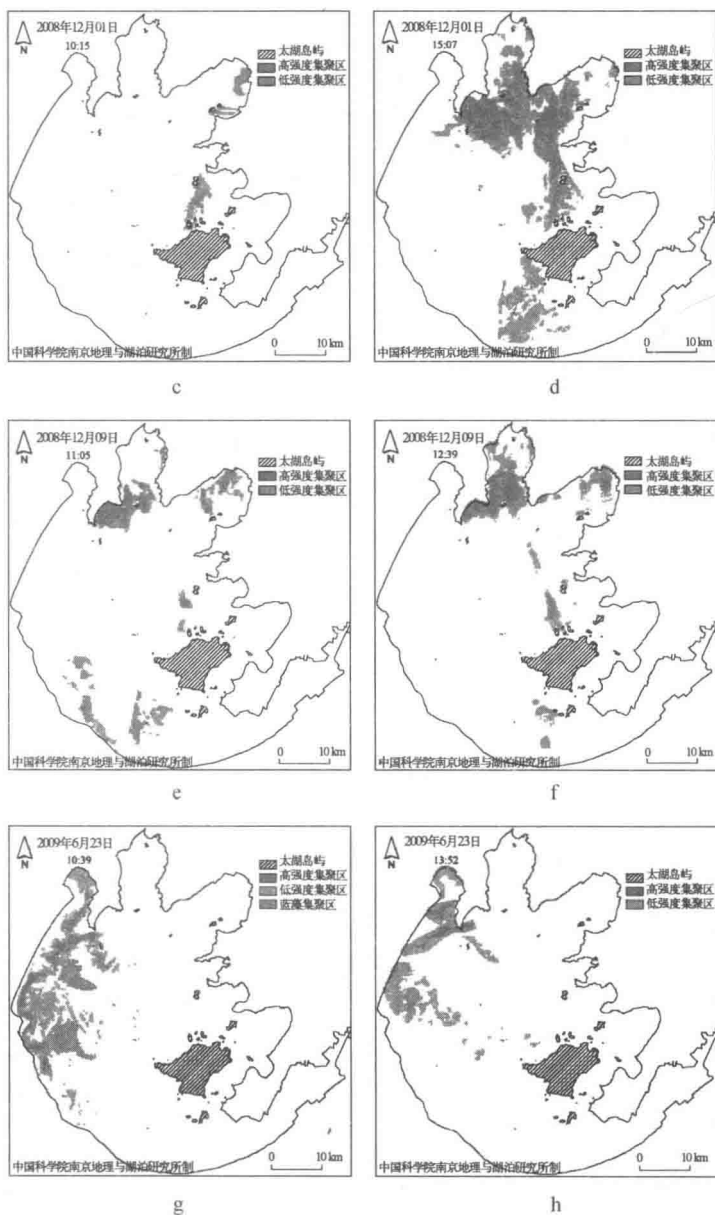


图 1.2 蓝藻水华暴发和减弱的突发性

MODIS^① 遥感影像制作的,而 EOS 项目的 Terra 卫星和 Aqua 卫星^②在一天里的过境时刻有一定的时间间隔,一般为 3 小时^③,从而拍摄的卫星遥感影像也有相应的时间间隔。

蓝藻水华多发生于夏、秋季富营养化的湖泊或水库中。近年来太湖蓝藻水华的暴发时间逐渐提前至 3、4 月,暴发的高频期为 6、7 月;2000 年以来蓝藻水华的暴发时间窗口有所增加,3—12 月都会发生^④。此时间规律适用于中国等北半球国家。在澳大利亚等南半球国家,蓝藻水华通常在 11 月到 4 月这 6 个月里发生^⑤。在全球范围,有害藻类水华的发生频率和地理分布范围一直呈上升趋势^⑥,以下是一些案例。近年来太湖蓝藻水华的发生频率和空间范围都大大增加^⑦;2003 年以来太湖蓝藻水华出现的次数不断增加,强度逐年增强^⑧。近年来,滇池每年都会发生不同范围、不同程度的蓝藻水

① 其英文全名为 Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer,中文名称为中分辨率成像分光辐射光谱仪。

② 这两颗卫星分别载有一套 MODIS,即有两套 MODIS 系统。

③ 孔维娟,马荣华,段洪涛,张寿选.太湖秋冬季蓝藻水华 MODIS 卫星遥感监测[J].遥感应用,2009(8): 80-84,88.

④ 王崇,孔海南,王欣泽,何圣兵,郑向勇,吴德意.有害藻华预警预测技术研究进展[J].应用生态学报,2009(11): 2813-2819.

⑤ Maier, Holger R, Graeme C. Dandy, Michael D. Burch. Use of artificial neural networks for modelling cyanobacteria *Anabaena* spp. in the River Murray, South Australia[J]. Ecological Modeling, 1998, 105: 257-272.

⑥ Jewett, E. B, C. B. Lopez, Q. Dortch, S. M. Etheridge, L. C. Backer. Harmful algal bloom management and response: assessment and plan [R]. Interagency Working Group on Harmful Algal Blooms, Hypoxia, and Human Health of the Joint Subcommittee on Ocean Science and Technology. Washington DC, 2008.

⑦ 孔繁翔,马荣华,高俊峰,吴晓东.太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J].湖泊科学,2009,21(3): 314-328.

⑧ 商兆堂,任健,秦铭荣,夏瑛,何浪,陈钰文.气候变化与太湖蓝藻暴发的关系[J].生态学杂志,2010,29(1): 55-61.