



中国生态系统研究网络丛书

太湖环境生态研究

(一)

蔡启铭 主编

气象出版社

太湖环境生态研究

(一)

蔡启铭 主编

1952.HS

97-98

W

气象出版社

内 容 简 介

本书是中国科学院南京地理与湖泊研究所多年来对太湖环境与生态方面的研究成果之一。本书主要对太湖水域的资源和环境条件及生态系统演替规律作了研究。内容有湖泊环境物理与化学因素研究;生物种群、生态与水体富营养化;湖泊环境生态信息分析以及对太湖的治理。

本书可供从事湖泊科学和环境科学的科技工作者及有关大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

太湖环境生态研究 (一)/蔡启铭主编. - 北京:气象出版社, 1998.5
ISBN 7-5029-2479-5

I.太… II.蔡… III.太湖-环境-综合研究 IV.X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 04616 号

太湖环境生态研究

蔡启铭 主编

责任编辑:潘根娣 终审:纪乃晋

封面设计:王群力 责任技编:陈 红 责任校对:李 新

气象出版社 出版

(北京海淀区白石桥路 46 号 邮编:100081)

北京市宏远兴旺印刷厂印刷

气象出版社发行 全国各地新华书店经销

开本:787×1092 1/16 印张:15 字数:396 千

1998 年 5 月第一版 1998 年 5 月第一次印刷

印数:1—700 定价:35.00 元

ISBN 7-5029-2479-5/P·0889

《中国生态系统研究网络丛书》编辑委员会

主 任： 孙鸿烈

委 员： (以下按姓氏笔画为序)

王明星 孙鸿烈 孙九林

陈宜瑜 沈善敏 陆亚洲

张新时 赵士洞 赵其国

钱迎青 唐登银

秘 书： 王群力

《太湖环境生态研究》编委会

主编 蔡启铭

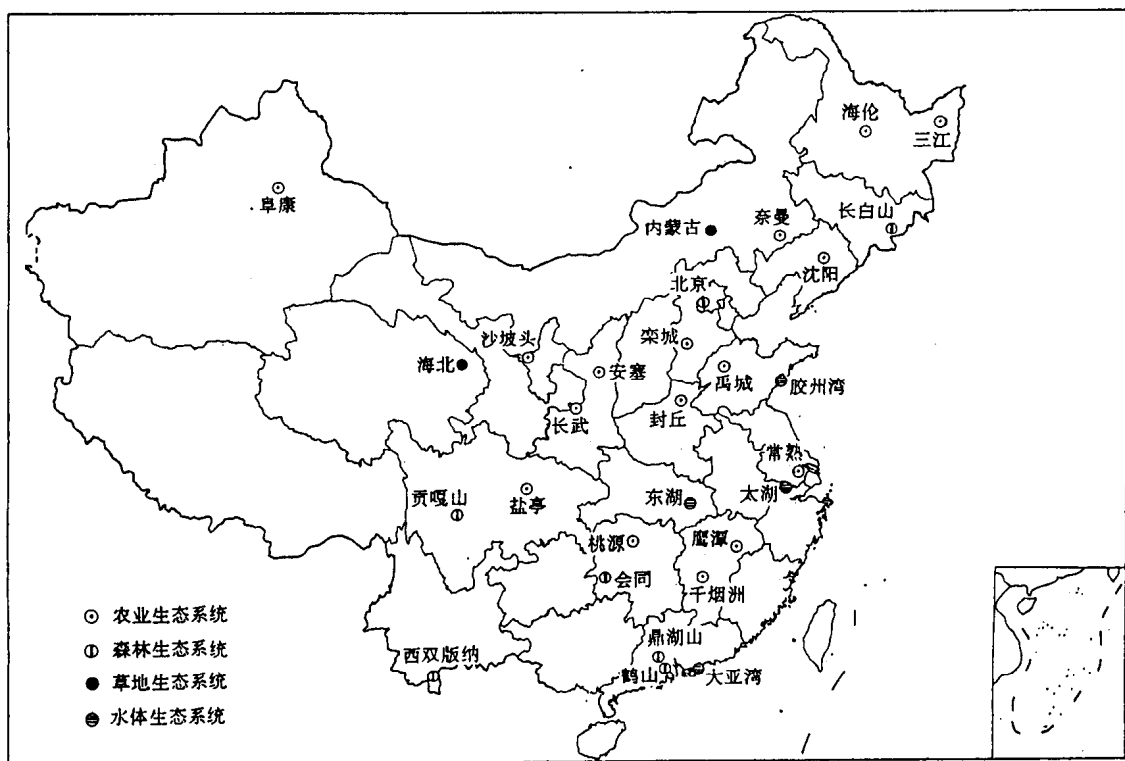
编委 (以姓氏笔划为序)

刘元波	叶宗秀	朱永春	余丰宁	李文朝
陈伟民	陈宇炜	范成新	高锡芸	蔡后建
蔡启铭	濮培民			

《中国生态系统研究网络丛书》序

中国科学院自 1949 年建院以来,陆续在全国各重要生态区建立了 100 多个以合理利用资源,促进当地农业、林业、牧业和渔业发展,以及观测和研究诸如冰川、冻土、泥石流和滑坡等一些特殊自然现象为目的的定位研究站。在过去几十年中,这些站无论在解决本地区资源、环境和社会经济发展所面临的问题方面,还是在发展生态学方面,都发挥了重大的作用。

自本世纪 80 年代以来,一方面由于地球系统科学的出现与发展,特别是由于国际地圈-生物圈计划(IGBP)的提出与实施;另一方面,由于日益严重的全球性资源、环境问题所造成的压力,使生态学家们提出了以从事长期、大地域尺度生态学监测和研究为目的的国家、区域乃至全球性网络的议题。就是在这种背景下,中国科学院从已有的定位研究站中选出条件较好的农田、森林、草原、湖泊和海洋生态系统定位研究站 29 个(见中国生态系统研究网络生态站分布图),并新建水分、土壤、大气、生物和水域生态系统 5 个学科分中心及 1 个综合研究中心,于 1988 年开始了筹建“中国生态系统研究网络(英文名称为 Chinese Ecosystem Research Network,缩写为 CERN)”的工作。目前,中国科学院所属 21 个研究所的千余名科技人员参与了该网络的建设与研究工作。



中国生态系统研究网络生态站分布图

网络筹建阶段的中心任务,是完成 CERN 的总体设计。1988~1992 年的 5 年间,在中国科学院、国家计委、财政部和国家科委的领导与支持下,来自我院各有关所的科技人员,详细研究了生态学的最新发展动向,特别着重研究了当代生态学对生态系统研究网络所提出的种种新的要求;了解了世界上已有的或正在筹建的各个以长期生态学监测和研究为目标的网络的设计和执行情况;特别是分析了“美国长期生态学研究网络(英文名称为 U. S. Long-Term Ecological Research Network,缩写为 U. S. LTER Network)”的发展过程,注意吸取了它的经验和教训;同时,结合我国的具体情况,经过反复推敲,集思广益,于 1992 年底完成了网络的设计工作,并开始建设。

与其他网络相比较,CERN 的设计有如下特征:在整个网络的目的性方面,强调网络的整体性和总体目标,强调直接服务于解决社会、经济发展与资源、环境方面的问题;在观测方面,强调观测仪器、设备和观测方法和标准化,以便取得可以互比的数据;在数据方面,强调数据格式的统一和数据质量的控制、数据共享和数据的综合与分析;在研究方法上,强调包括社会科学在内的多学科参与的综合研究,强调按统一的目标和方法进行的,有多个站参与的网络研究。

几年来,通过国内、外专家的多次评议,肯定了上述设计的先进性和可行性,这为 CERN 的总体目标和各项任务的实现奠定了可靠的基础。

CERN 的长期目标是以地面网络式观测、试验为主,结合遥感、地理信息系统和数学模型等现代生态学研究手段,实现对我国各主要类型生态系统和环境状况的长期、全面的监测和研究,为改善我国的生存环境,保证自然资源的可持续利用及发展生态学做贡献。它的具体任务是:

1. 按统一的规程对我国主要类型农田、森林、草原、湖泊和海洋生态系统的重要生态学过程和水、土壤、大气、生物等生态系统的组分进行长期监测;
2. 全面、深入地研究我国主要类型生态系统的结构、功能、动态和持续利用的途径和方法;
3. 为各站所在的地区提供自然资源持续利用和改善生存环境的优化经营样板;
4. 为地区和国家关于资源、环境方面的重大决策提供科学依据;
5. 积极参与国际合作研究,为认识并解决全球性重大资源、环境问题做贡献。

为了及时反映该网络所属各生态站、分中心和综合研究中心的研究成果,CERN 科学委员会决定从 1994 年起设立出版基金,资助出版《中国生态系统研究网络丛书》。我们希望该丛书的问世,将对认识我国主要类型生态系统的基本特征和合理经营的途径,对促进我国自然资源的可持续利用和国家、地区社会经济的可持续发展,以及对提高生态学的研究水平发挥积极作用。



1995 年 4 月 16 日

前 言

我国是一个多湖泊国家,面积大于 1km^2 的湖泊就有 2848 个,总面积为 80645km^2 ,约占全国国土面积的 0.8%。湖泊是重要的可多功能利用的地表水资源,我国湖泊的蓄水量有 7000 多亿 m^3 ,如果加上水库(人工湖泊),总蓄水量超过 11000 亿 m^3 。大的湖泊还具有较高的防洪、航运、养殖等多种功能。可见,湖泊与人类生存和社会发展息息相关,合理开发利用湖泊资源、保护湖泊生态环境是人类社会经济发展面临的重大课题。

太湖,是我国第三大淡水湖泊,地处人口稠密、工农业发达、经济发展迅速的长江三角洲地区,因此,它一方面给这一地区带来巨大利益,另一方面,其环境状况也受到人类活动的巨大压力。近年来不断加剧的太湖水体富营养化问题就已成为政府、人民和科学家十分关注和亟待解决的环境问题。

中国科学院南京地理与湖泊研究所长期以来一直十分重视太湖的环境与生态方面的研究工作,从 50 年代起便对它进行了多次全面深入的调查研究,积累和掌握了丰富的有关太湖的第一手资料。为了适应多种水体特征的水陆复合生态系统的综合研究需要,长期稳定地深入开展太湖研究工作,围绕着太湖我们还建立了多个野外观测试验站,它们是东太湖农业水体开发试验站、太湖湖泊生态系统研究站和天目山景观生态观测站,它们分别代表了草型、藻型水体和陆地生态系统特征。前所长屠清瑛先生一直十分重视太湖综合观测网的建设,特别是在太湖湖泊生态系统研究站的创建过程中付出了艰辛的努力。该站现在是中国科学院 29 个生态研究网络台站之一,也是我所的重要研究基地。自 1988 年建站以来,已完成台站的基本建设工程,具备了良好的湖泊研究工作条件和一支综合研究湖泊的科技队伍,在研究工作上已取得初步结果,许多论文已在各种期刊上发表,本集比较集中地反映了它们的最近研究工作进展,大部分工作是围绕着西太湖和梅梁湾水域开展的,希望能对这一水域的资源和环境条件及其评估、管理、以及生态系统演替规律等方面做出应有的贡献,也作为我们长期研究太湖的第一集出版物。

由于水平所限,建站后研究工作时间短,错误和不妥之处请有关专家和读者指正。

虞孝感

1997 年 8 月

目 录

《中国生态系统研究网络丛书》序

前言

绪论..... (1)

第一部分 湖泊环境物理与化学因素研究

太湖大气-水体系统谱辐射的数值模式及其应用	蔡启铭(5)
梅梁湾及大太湖水环境现状特征与富营养化趋势分析	高锡芸 陈宇炜 蔡后建(19)
太湖风生流及其对总磷分布影响的数值研究	马生伟 蔡启铭(30)
边界层气象条件对水温及水-气界面热交换影响的数值试验	
..... 余丰宁 朱永春 蔡启铭(43)	
梅梁湾及大太湖富营养化限制性营养盐研究	高锡芸 刘元波 陈宇炜(50)
太湖底泥蓄积和主要理化性质空间分布特征	范成新 季 江 隋桂荣(55)
太湖水体的光学特性及其参数化方案	俞 宏 蔡启铭(63)
太湖梅梁湾三维水动力学模型的研究(I)模型的建立及结果分析	朱永春 蔡启铭(74)
太湖梅梁湾三维水动力学模型的研究(II)营养盐随三维湖流的迁移规律	
..... 朱永春 蔡启铭(80)	
太湖北部梅梁湾水域水质聚类分析	刘元波 高锡芸(89)

第二部分 生物种群、生态与水体富营养化

太湖梅梁湾浮游植物动态及其初级生产力周年变化的研究	
..... 陈宇炜 高锡芸 M. Dokulil(98)	
太湖梅梁湖区浮游甲壳类及其摄食的研究	陈伟民 A. Nauwerck(109)
原生动物纤毛虫在太湖梅梁湾水域的分布与演替	蔡后建(117)
太湖梅梁湖区底栖动物的研究	陈伟民 郭晓鸣 B. Reeze(125)
太湖主要营养物质与浮游生物关系研究	范成新(134)
西太湖北部微囊藻时空分布及其与光温等环境因子关系的研究	陈宇炜 高锡芸(142)
微囊藻水华的漂移和降解对太湖水环境的影响	蔡后建 陈伟民(149)
浅水湖泊生态系统的多态理论及其应用	李文朝(158)
太湖梅梁湾三维藻类迁移模型研究	朱永春 蔡启铭(169)

太湖水体中的光照传输及水体初级生产力的计算..... 俞 宏 蔡启铭(178)

太湖水环境治理..... 濮培民 胡维平 王国祥等(188)

第三部分 湖泊环境生态信息分析

主成分监督分析及其在太湖北部夏季水质动态分析中的应用..... 余丰宁 蔡启铭(203)

水体叶绿素含量的 TM 遥感定量模型 余丰宁 蔡启铭 陈宇炜等(216)

CERN 台站数据文档文件编码与分类体系初探——以湖泊生态系统研究站为例
..... 刘元波(224)

绪 论

太湖是我国平原地区五大淡水湖之一,位于长江下游地区,界于北纬 $30^{\circ}55'42''\sim 31^{\circ}33'50''$ 、东经 $119^{\circ}53'45''\sim 120^{\circ}36'15''$ 之间,地跨江、浙二省,北临无锡,东连苏州,南濒湖州,西接宜兴、长兴,整个流域面积 36500km^2 。

太湖是一个大型浅水湖泊,湖泊面积 2338km^2 ,平均水深 1.9m ,最大水深 3.33m ,湖泊总蓄水量约 44.4 亿 m^3 。湖盆地势由东向西倾斜,深水区位于湖心略偏西,即大约在平台山以北水域。湖中岛屿和暗礁很多,最大的岛屿是洞庭西山。通常,以洞庭东山的东胶咀为界,其西为广阔的太湖湖面,俗称西太湖,其东为东北向的湖湾,俗称东太湖(图 1)。

气候上,太湖位于北亚热带,属季风、湿润气候。四季分明,热量充裕,雨水丰沛,光照充足。湖区年平均气温为 $15.3\sim 16^{\circ}\text{C}$,年平均降水量为 $950\sim 1250\text{mm}$,年日照时数约 $2000\sim 2200$ 小时。

太湖水源主要有三路:南路来自苕溪水系,西路来自南溪水系,北路来自江南运河。其出水口多分布于湖的东部和北部,主要由河墩港、胥口港、瓜泾口和太浦河等港渚下泄,再经吴淞江、黄浦江、望虞河、浏河等排入长江。

由此可见,太湖正好处于我国经济最发达的长江三角洲地区,是这一地区的重要淡水资源。长期以来,它已是上海、无锡、苏州等大中、城市的最重要的供水源地。且集供水、蓄洪、灌溉、养殖、旅游等多种功能于一体。因此,其水环境状况直接影响着这一地区的经济发展。但是,另一方面,由于近年来这一地区经济的迅速发展,相应的环境保护和治理措施没有跟上,进入太湖的主要河道和湖区的水质已日益变坏,特别是水体的富营养化,已成为太湖水环境的主要问题。根据监测,80 年代以来,太湖富营养化程度不断增加。目前,太湖的五里湖区已属重富营养化水体,梅梁湖区多种水质污染指标平均含量虽然低于五里湖,但也属中~富营养水体。连续多年监测显示:1981~1991 年 10 年间,太湖的总氮和总磷含量就分别增加了将近 2 倍和 3 倍,湖水中的藻类生物量(叶绿素 a)增加了 38 倍。相应地,随着水体的富营养化,太湖的生物种群、组成也发生了变化,蓝藻门中的微囊藻(主要是铜绿微囊藻和水华微囊藻)已成为藻类的优势种,浮游动物和底栖动物大量减少,鱼类趋于小型化。种种现象都已说明,太湖的水环境变化正在加剧,其生态系统自我调节功能和水体的自净能力正在逐渐衰退,太湖水质恶化造成城乡供水源的污染和短缺,已成为该地区经济发展中新的制约因素,控制太湖富营养化和综合治理太湖已是刻不容缓。

水体富营养化是指营养物质氮、磷等在水体中积累过多,造成水体从生产力低的贫营养状态变为生产力高的富营养状态的现象,它的危害在于降低水体透明度,使水质变坏,水体中蓝藻大量繁殖,甚至腐败,发臭,产生毒素,因而影响了供水水质和增加制水成本。富营养化的持续发展不仅恶化了水体的感官性状,而且破坏了水体生态系统的平衡状态,最严重时会导致水体丧失一切功能,使湖泊衰亡。

广义上来说,水体的富营养化实质上是一种有机物的污染问题,包括点、面排放以及降水等的外源污染及湖泊底泥释放产生的内源污染。湖泊富营养化是湖泊水环境在受到污染的情况下所发生的一系列生物、化学过程,并在光、热和水动力等物理过程影响下产生的综合结果,是由于水体营养结构和营养水平发生变化,使水体生态系统受到干扰,导致原有生物种群结构

被破坏,为蓝藻水华的大量爆发提供了合适的条件。因此,太湖富营养化问题是生态系统内部营养物质结构失调、其生物结构在环境外力作用下的演化问题。从能量观点来看,水环境中的动力来自太阳辐射,大部分物质所贮存的化学能也来自太阳辐射能,生物体通过光合作用形成自身有机物质也是通过太阳辐射能的作用。因此,研究水体富营养化问题从根本上说离不开研究太阳辐射能和动力学问题,深入研究湖泊的富营养化应该把能量学和物理、化学和生物过程结合起来加以综合研究。本书编辑的部分论文反映了这方面的研究结果。

太湖作为大型浅水湖泊,有如下特点值得注意:

(1) 湖面开阔,水浅,风浪较大。据观测,在一般天气条件下,太湖风浪在 0.5m 左右,当 5~6 级风时,波高可达 1m。浪大造成湖底底泥颗粒再悬浮。研究表明,太湖水中的悬浮粒是一个影响其光、热乃至生态过程的重要物理因素。

(2) 温热条件好、光照充足。尤其是夏季 7~8 月份,平均气温到达 28~29℃。太湖水温历年平均比气温高 1.3℃,即水温可达到 29~30℃,这正是微囊藻繁殖生长的最适宜温度,加上太湖夏季光照充足,使太湖水体的初级生产力常常很高。

(3) 太湖湖底淤泥甚薄,一般在 20~30cm 左右,可见,营养物在湖底不易淤积,湖底淤泥是内源性污染的主要来源。上述现象说明,湖底沉积物中的营养物质很容易返回湖水中,因此,太湖底泥对污染的贡献需要适当考虑。

(4) 太湖不仅水浅,而且湖底平坦,平均坡度仅有 19.7"。因此湖流一般不大,而且主要是风生流,只有在某些河口附近,吞吐流比较明显。一般湖流流速在 10cm/s 左右,在湖湾水域,湖流更小,约 5cm/s 左右。因此,水中营养物质和浮游藻类的扩散迁移受风浪的影响较大,在风的作用下,夏季藻类往往可以上下混合或者随风飘移而在某一区域形成堆积。

(5) 太湖周围地区有上海、无锡、苏州、常州、湖州等城市环绕,工农业发展迅速,人口密集,因此湖泊生态系统受人类活动的干扰和影响较大。近年来,由于水体营养结构和生态平衡被破坏,太湖水体生态系统已变得比较脆弱。

中国科学院南京地理与湖泊研究所在太湖的环境演变方面已做了大量的研究工作,在湖泊的自然状况、污染与富营养化调查研究方面都取得了丰富的成果。进一步深入的研究应该结合国民经济发展和生产需要,针对太湖水环境演化和治理技术中的较深层次的科学问题展开,以促进这一地区国民经济与环境生态保护的协调发展。

为了对太湖及其流域的水环境变化规律进行长期、系统的研究,探索我国发达地区环境与经济协调发展的途径。该所在太湖周围已相继建立了三个野外研究试验站,它们是太湖东山水体农业试验站、天目山景观生态观测站和太湖湖泊生态系统研究站。其中,太湖湖泊生态系统研究站(Taihu Laboratory for Ecosystem Research)位于梅梁湾湖区东南隅,行政区划属无锡市郊区大浮乡吴塘村,是中国生态系统研究网络(CERN)29 个野外台站之一,基本建设、仪器设备、实验设施等方面比较完善,并已形成一支多学科综合的研究队伍。太湖站于 1988 年建站,它的长期目标和主要任务是长期积累和收集太湖及其流域的资源、环境和生态资料,深入研究太湖生态系统的结构、功能和演替规律,能量和物质流转规律,以及湖泊生态系统中的各种理化、生物过程和人类活动的影响过程,建立环境变化预警预报指标体系,探索湖泊水环境污染治理、富营养化水体恢复和良性生态系统重建的途径,为国民经济建设和环境保护协调发展的决策提供科学依据。其近期重点研究的水域是太湖的梅梁湾湖区。

梅梁湾是太湖北部的一个重要湖湾,面积约 100km²,有两条河道——梁溪河和直湖港与它相通,是无锡市的主要饮用水源地。近年来,由于周围城镇的工业废水和生活污水大量排入

湖中,使得该湖区已成为太湖最严重的富营养化水域之一。据监测,仅1992年至1995年四年间,梅梁湾湖区的总氮和总磷含量又增加了1.3倍和1.8倍。蓝藻水华连年发生,持续时间5~10月不断,甚至在有些年份,全年均有大量蓝藻漂浮水中。在水华爆发季节,甚至湖区中心也能测到叶绿素a的浓度高达 $230\text{mg}/\text{m}^3$ 。因此,每到夏季,大量蓝藻繁殖、死亡,导致饮用水水质下降,水厂沙滤被堵塞,造成水产量减少,仅1990年7月5~29日,梅梁湾蓝藻的爆发面积就将近 100km^2 ,致使无锡市主要自来水厂减产,一百多家工厂相继被迫停产。梅园水厂源水蓝藻含量就有7.6亿个/L。蓝藻水华的频繁爆发已破坏了梅梁湾湖水作为饮用水源水的价值。自1991年以来,太湖站就已对该区以及太湖北部水域开展了水环境连续监测,监测内容包括水文气象、湖泊理化特征和生物种群结构等40多个项目。监测水域以梅梁湾为重点,从北向南自梁溪河到太湖中心和从东向西沿湖湾口取二个断面,设固定监测点10个(图1)。

多年来,已有多个科研项目在站区和围绕太湖执行和完成。主要的研究内容包括气象和水文动力学、物理湖泊学、湖泊化学、湖泊生物学、生态系统能量流转、初级生产力、水产养殖、湖水治理技术、水体遥感和数学模拟等。本书收录了它们的一部分新近研究成果作为《太湖环境生态研究》的第一集予以编辑出版。本集的内容较多地包括了梅梁湾的热力、光照、水动力、水体遥感以及水环境化学和生物等方面的研究论文,力图在定量模拟方面开拓一些新路子,而在湖泊治理方面的内容较少,希望在以后的续集中再出版。

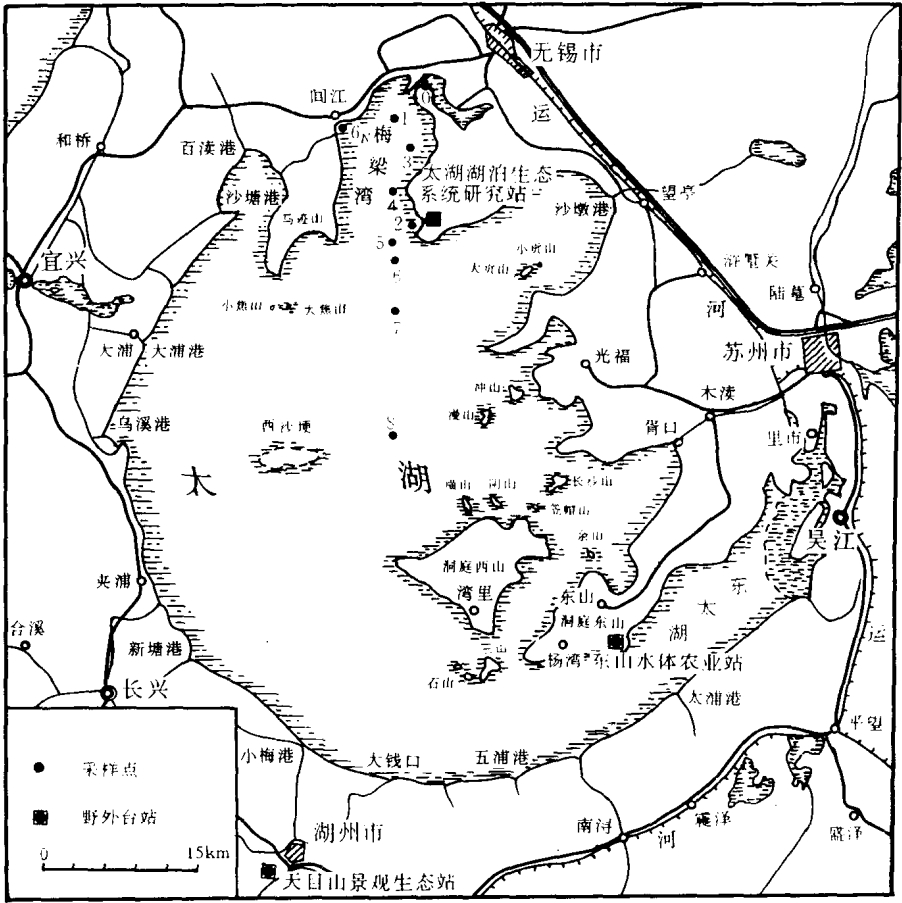


图1 太湖和梅梁湾常规监测点分布
Fig.1 Taihu Lake and regular sampling points in Meiliang Bay

第一部分

湖泊环境物理 与化学因素研究

太湖大气-水体系统谱辐射的数值模式及其应用

蔡启铭

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

Herman Gons

(荷兰皇家科学院生态研究所湖泊中心)

提 要 在坚实的物理基础上, 采用薄层累加法, 建立了一个包括大气与水体的联合系统在可见光波段的谱辐射数值模式。模式中考虑了大气中的分子、气溶胶、臭氧以及水汽和二氧化碳等的散射和吸收过程, 有风浪水面的反射和透射过程, 以及水体中的分子、黄质、非色素悬浮粒和浮游藻类的散射和吸收过程。经辐射仪同步观测检验表明, 本模式能很好地模拟计算太湖水体中各深度的光照谱分布。模式可用于研究水中各种物质、组成对光传输和分布的影响机理, 可应用于计算水中透明度和水体初级生产力。在水体遥感和湖泊富营养化研究方面也有很好的应用前景。

关键词: 数值模式 谱辐射 大气-水体系统 太湖

一、前 言

太阳辐射是水体生态系统的主要能量来源, 波长 400nm~700nm 的可见光是水体中植物进行光合作用的动力, 它直接决定着水体的初级生产力, 因此, 研究水体中的光学性质和变化规律是深入探索水体生态系统中各种过程的基础性工作。

目前, 国内外在这一领域中的大部分研究工作都把水体作为独立的对象来处理, 进入水体的光的性质直接地用仪器在水中测量获得, 或者借助于水面上的大气辐射数据, 建立某种模式来推算水下辐射。实际上, 太阳辐射从大气外界进入大气, 首先经过大气中各种物质的吸收、散射等作用再进入水体, 辐射在水体中还要受到水分子、黄质(可溶性有机质)、浮游生物以及其他悬浮粒的作用而发生变化。显然, 这种变化不仅表现为强度的改变, 而且辐射谱结构也会产生很大的变化。进入水体中的一部分辐射能还会被反射而返回大气(这是水体遥感问题中极为关心的一部分能量), 甚至逃逸到宇宙空间中去。返回大气的辐射能还会有一部分由于大气的逆向散射而回到水体。可见, 辐射在大气和水体中传输是一个十分复杂而又互相关联的过程, 要正确确定水体中的光辐射性质, 应把大气与水体作为联合系统进行研究。此外, 太湖是大型浅水湖泊, 水面开阔, 风浪较大, 水面常呈起伏不平的粗糙面, 模式还需考虑起伏风浪面对辐射的反射和透射的影响。

本模式从坚实的物理定律出发,综合考虑了上述所有物理过程,建立了一个光谱辐射在大气-水体联合系统中传输的数学模式,模式引用了大气辐射传输的研究成果,与水文光学模式不尽相同。本模式可用于计算水下光强分布和光谱特性;通过生物-光学模式,可估算水体初级生产力,模式在了解水下光场的影响因素和作用机理方面有很大的应用价值,也可应用于水体遥感研究。

二、数学模式介绍

太阳光辐射从大气上界进入大气-水体系统,影响光辐射的传输过程有以下几个:

(1) 进入大气的辐射在大气中要被衰减(一部分则被反射回太空)。衰减因素主要是大气中臭氧的吸收、分子散射、气溶胶粒子散射和吸收、水汽和二氧化碳等混合气体的吸收。它们与大气成份、空气湿度以及太阳高度角等因素有很大关系。

(2) 水-气界面的反射和折射,也即水表面的影响。由于风的作用,自然水面通常为风浪面,水面起伏的程度及其对光辐射的影响与风场状况的关系很大。

(3) 水体中各种物质对光辐射的吸收和散射。决定水中辐射的光谱性质的因素主要有以下几种:a)水分子;b)浮游生物,尤其是浮游藻类;c)水中可溶性有机质(Gilvin),主要是水中残废生物组织形成的腐殖酸、黄腐酸等;d)水中悬浮粒,包括有机和无机悬浮粒。对浅水湖泊,它的多少与风场造成的底质再悬浮有很大关系。

(4) 大气和水体间的多次反射和湖底反射。

因此,本模式完整地包括了大气、水体、水-气界面、底质以及其间各种物质的状况和它们与光场的相互作用过程。

1. 模式各层的参数化方案

本文在求解过程中将直接光和漫射光分开处理,模式中用薄层法按线性累加原理求解辐射传输过程^[1],重点在水体部分。

(1) 大气层辐射量的参数化方案

为了简化,本文只考虑无云的晴空大气,这也是最有利的光学遥感条件。已有许多晴空大气辐射参数化方案与实测资料符合得很好,本模式采用 Bird 的参数化方案^[2]。

a) 大气直接辐射透过率 $T_{a\lambda}$ 和反射率 $R_{a\lambda}$

大气层总的太阳直接辐射透过率可表示为大气中各种衰减成分的透过率之积,即

$$T_{a\lambda} = T_{r\lambda} T_{w\lambda} T_{o\lambda} T_{p\lambda} T_{u\lambda}$$

反射率

$$R_{a\lambda} = 1 - T_{a\lambda}$$

式中 $T_{r\lambda}$ 、 $T_{w\lambda}$ 、 $T_{o\lambda}$ 、 $T_{p\lambda}$ 和 $T_{u\lambda}$ 分别为空气分子的散射、水汽吸收、臭氧吸收、气溶胶衰减和混合气体吸收引起的透过率,它们分别根据下面的参数化方法求得:

$$T_{r\lambda} = \exp\{-M'/[\lambda^4(115.6406 - 1.335/\lambda^2)]\}$$

其中 M 为大气质量, M' 是经大气气压订正后的值:

$$M = [\cos\theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1}$$

$$M' = (p/1013)M$$

式中 λ 表示波长, p 为气压, θ_z 为太阳天顶角,它可由地理纬度,太阳赤纬和时间计算出。

$$T_{w\lambda} = \exp[-0.2485a_{w\lambda}WM/(1+20.07a_{w\lambda}WM)^{0.45}]$$

式中 W 是以 cm 为单位的垂直大气柱中的水汽含量, $a_{w\lambda}$ 为水汽的吸收系数。

$$T_{o\lambda} = \exp(-a_{o\lambda}O_3M_0)$$

式中 O_3 为大气中臭氧含量, $a_{o\lambda}$ 为臭氧的吸收系数, M_0 为臭氧的大气质量;

$$M_0 = (1 + h_0/6370)/(\cos^2\theta_Z + 2h_0/6370)^{0.5},$$

其中, h_0 是大气层中臭氧含量最大的高度。

气溶胶的透过率应为气溶胶的吸收和散射共同作用的结果, 所以

$$T_{p\lambda} = T_{pa\lambda}T_{ps\lambda}$$

式中气溶胶吸收和散射透过率 $T_{pa\lambda}$ 和 $T_{ps\lambda}$ 用下式参数化:

$$T_{pa\lambda} = \exp[-(1 - \omega_\lambda)\tau_{p\lambda_0}(\lambda_0/\lambda)^\alpha M],$$

$$T_{ps\lambda} = \exp[-\omega_\lambda\tau_{p\lambda_0}(\lambda_0/\lambda)^\alpha M],$$

式中 $\tau_{p\lambda_0}$ 是参照波长 λ_0 处气溶胶的光学厚度, 对郊外大气可取 $\alpha = 1.14$, ω_λ 为气溶胶的单次散射反照率, 可表示为

$$\omega_\lambda = 0.945\exp[-0.095[\ln(\lambda/0.4)]^2],$$

最后,

$$T_{u\lambda} = \exp[-1.41a_{u\lambda}M'/(1+118.3a_{u\lambda}M')^{0.45}],$$

其中, $a_{u\lambda}$ 是混合气体的吸收系数。

b) 大气漫射透过率 $t_{a\lambda}$ 和反射率 $r_{a\lambda}$

太阳直接辐射通过大气层后将出现一定的漫射分量。在晴空条件下, 这部分漫射分量实际上是由于大气分子散射和气溶胶散射的结果。因此, 漫射透过率应是这两种贡献之和, 即

$$t_{a\lambda} = T_{o\lambda}T_{u\lambda}T_{w\lambda}T_{pa\lambda}[0.5(1 - T_{r\lambda}^{0.95}) + T_{r\lambda}^{1.5}f_s(1 - T_{ps\lambda})]$$

和反射率

$$r_{a\lambda} = 1 - t_{a\lambda}$$

其中, 0.5 和 f_s 分别为分子散射和气溶胶散射向下半空间的散射率, f_s 可由下述参数化方案求得:

$$A_0 = \ln(1 - \langle \cos\theta_s \rangle),$$

$$A_1 = A_0[1.459 + A_0(0.1595 + 0.4129A_0)],$$

$$A_2 = A_0[0.0783 - (0.3824 + 0.5874A_0)A_0],$$

$$f_s = 1 - 0.5\exp[(A_1 + A_2\cos\theta_Z)\cos\theta_Z],$$

其中, $\langle \cos\theta_s \rangle$ 是大气中气溶胶散射角的平均余弦, 可取 $\langle \cos\theta_s \rangle = 0.65$ 。

c) 大气逆向反射率 $R_{a\lambda}^*$ 和 $r_{a\lambda}^*$

这里所说的逆向反射率 $R_{a\lambda}^*$ 和 $r_{a\lambda}^*$ 是指由下向上的(准)直接光和漫射光经大气散射后产生的向下散射量。太阳直接辐射经水面 Fresnel 反射后, 可视为由下向上的准直接光, 即使在有风浪的情况下, 直接辐射的水面反射光的散射角也不大。因此, 有

$$R_{a\lambda}^* = T_{u\lambda}T_{w\lambda}T_{pa\lambda}[0.5(1 - T_{r\lambda}) + (1 - f_s)T_{r\lambda}(1 - T_{ps\lambda})]$$

$$r_{a\lambda}^* = T_{u\lambda}T_{w\lambda}T_{pa\lambda}[0.5(1 - T_{r\lambda}) + (1 - f_s)T_{r\lambda}(1 - T_{ps\lambda})]$$

式中带撇号的量是取 $M = 1.8$ 时的计算值。

(2) 水面层的反射率和透射带