

附件 5

# 《水华遥感与地面监测评价技术规范（征求意见稿）》

## 编制说明

《水华遥感与地面监测评价技术规范》标准编制组  
二〇一七年八月

项目名称：水华遥感与地面监测评价技术规范

项目统一编号：2011-30

承担单位：中国环境监测总站、环境保护部卫星环境应用中心

编制组主要成员：何立环、吴传庆、于洋、彭福利、朱利、董贵华、  
刘海江、吴迪、赵焕

环境标准研究所技术管理负责人：张明慧、胡林林

环境监测司项目管理负责人：张宗祥

# 目 次

1	项目背景.....	1
1.1	任务来源.....	1
1.2	工作过程.....	1
2	标准制订的必要性分析.....	2
2.1	水环境变化面临严峻形势提出新的要求.....	2
2.2	环境保护与管理的需求.....	2
2.3	尚无水华评价技术规范.....	3
3	国内外相关评价标准研究.....	3
3.1	水华表征方法研究.....	3
3.2	水华地面监测评价研究进展.....	4
3.3	水华遥感监测评价研究进展.....	4
3.4	水华遥感与地面相结合评价研究进展.....	5
3.5	遥感与地面监测相结合的必要性.....	6
4	标准编制的原则.....	7
5	标准主要技术内容.....	7
5.1	标准的主要内容.....	7
5.2	标准主要原理.....	8
5.3	主要方法及依据.....	14
5.4	水华程度评价.....	17
6	与开题报告的差异说明.....	25
7	标准实施建议.....	25
8	参考文献.....	26

# 《水华遥感与地面监测评价技术规范》编制说明

## 1 项目背景

### 1.1 任务来源

根据《关于开展 2011 年度国家环境保护标准制修订项目工作的通知》（环办函〔2011〕312 号），按照《国家环境保护标准制修订工作管理办法》（环保总局公告 2006 年第 41 号）的有关要求，开展《水华遥感监测与评价技术规范》（本规范原名）制订工作。中国环境监测总站承担本标准的编制任务，合作单位为环境保护部卫星环境应用中心，项目立项时间为 2011 年，项目统一编号为 2011-30。

### 1.2 工作过程

#### 1.2.1 成立标准编制组和启动标准编制工作

2011 年，环境保护部科技司下达任务后，中国环境监测总站和卫星环境应用中心按有关文件精神，召集相关技术人员迅速组建了《水华遥感监测与评价技术规范》标准编制组，并根据课题相关要求，认真制定实施方案和工作计划，明确了编制组成员及分工。

#### 1.2.2 查询国内外相关标准和文献资料

根据工作计划进度安排，标准编制组系统地收集国内外文献资料，进行前期调研工作。包括收集整理有关的评价方法及国内外文献，尤其是水华特性表征指标及评价指标，以及不同监测方法和手段等，并分析这些评价方法中值得借鉴的经验。同时，分析了我国水环境监测的新形势和新特点，结合国家管理需求，基于我国目前现有能力基础以及近些年来在太湖、巢湖和滇池开展监测的实际情况，研究提出了本标准编制的原则、技术路线，完成开题报告和标准文本初稿等。

#### 1.2.3 开题论证，确定标准制订的技术路线

2013 年 12 月 6 日，环境保护部科技标准司在北京组织召开了课题开题论证会，论证委员会听取了标准编制组关于《水华遥感监测与评价技术规范》开题论证报告和标准初稿内容介绍，经质询、讨论，一致认为：1.编制组提交的开题论证报告和标准初稿内容完整、详细、规范。开题论证报告分析了国内外相关研究成果，广泛征求了有关单位和专家意见。相关技术在太湖、巢湖和滇池连续多年开展了试点监测，所选取的监测指标、监测技术及评价方法较合理，具有较强的可操作性。2.标准定位较为准确，技术路线基本合理，本标准的制定可以为藻类水华监测、评价提供技术指导。论证委员会通过该标准的开题论证，并提出如下修改意见和建议：进一步明确适用范围，优化监测与评价指标，增强本标准的可操作性；加强遥感监测技术方法相关内容；进一步吸收国内外成熟技术，完善报告内容。并将标准名称改为《水华遥感与地面监测评价技术规范》。

#### 1.2.4 编写标准征求意见稿和编制说明

根据论证委员会提出的修改意见，编制组进行了相关资料的收集，对标准文本草案进行了优化和完善。在标准编制期间，编制组多次召开讨论会，详细研究各指标筛选及评价方法，并以 2010 年以来太湖、巢湖和滇池水华监测数据为基础，对标准开展验证分析。对标准的科学性、可行性、可操作性以及验证结果与我国湖泊水华发生情况的趋势性进行多方论证。

2014 年 5 月，总站组织环境保护部卫星环境应用中心在北京召开《水华遥感与地面监测评价技术规范》研究工作讨论会。以本标准修订的开题论证报告为基础，初步确定了本规范的大纲内容和基本框架。

2014 年 6 月至 2015 年 6 月，总站多次与环境保护部卫星环境应用中心技术人员沟通、

讨论。通过全面的比较分析，编制组修改完善相关内容，形成规范文本草案和编制说明。

2016年3月，总站组织江苏省、安徽省、云南省环境监测中心（站）有关技术人员对2010年-2015年的蓝藻监测数据进行测算，对多年来的监测结果进行评价。经过对历史数据的统计分析进一步验证分级标准的科学性以及变化趋势描述的合理性。

2017年1月，总站组织召开本标准的内部审查会，与会专家对标准文本及编制说明提出了修改意见和建议。根据专家意见编制组再次对文本进行修改和完善。

2017年3月，环境保护部环境标准研究所在北京组织召开了本标准征求意见稿技术审查会，与会专家通过质询、讨论，一致通过本标准的征求意见稿和编制说明，并提出以下修改意见：一是统筹考虑地面与遥感评价，进一步完善“水华程度分级标准”；二是进一步明确监测、采样、评价结果表述等内容，提高标准的可操作性；三是完善标准文本和编制说明。建议修改完善后，按标准制修订管理办法相关要求公开征求意见。

## 2 标准制订的必要性分析

### 2.1 水环境变化面临严峻形势提出新的要求

水华是一种由水体富营养化引起藻类大量繁殖的自然生态现象。受全球变暖和人类活动影响，近年来世界各国淡水湖泊、水库、甚至河流水体富营养化进程加快，藻类大规模生长繁殖，不断出现水华现象。据统计，亚洲、欧洲、北美洲和非洲现阶段富营养化水体比例分别达到54%、53%、46%和28%。上世纪70年代以来，包括我国在内的许多国家，如美国、日本、韩国、澳大利亚、以及欧洲一些国家都有大量关于藻类水华的报道，水华的发生致使出现湖泊水质在短短几天内严重恶化，水体发黑发臭，大量鱼类死亡的现象。这使得水体富营养化及其引发的水华问题逐渐成为社会各界关注焦点，特别是水华问题，已经成为世界性的水污染公害。水华既是水污染的突出表现，同时也是水环境保护和管理的巨大难题。众多研究表明，水华产生藻毒素，会危及水中生物生命，威胁饮用水环境安全，从而给人们的生命安全和正常生活造成损害。

我国是一个湖泊众多的国家，共有天然湖泊2万多个，占国土面积的0.9%。自1980年以来，我国富营养化湖泊面积增加了近60倍，而25%的湖泊正面临富营养化的威胁，致使我国成为全球湖泊富营养化最为严重的国家之一。

我国公众对水华现象引起关注是源自于2007年的太湖蓝藻水华事件。根据有关部门监测结果，此次水华面积最大时达到了979平方公里，不仅形成了“湖泛”，造成水体发黑发臭，还导致无锡出现了短暂的饮用水供水危机。近年来，虽然大力治理，但是太湖、巢湖和滇池湖体中平均氮、磷含量仍然较高，水体富营养化明显，水华现象频繁出现。

面对严峻的形势，为了说清水环境变化的情况，分析水华发生的原因，本着防患于未然的目的，我国各有关部门和科研院所把如何对水华开展有效的监测、评价和预警，进而确保饮用水环境安全作为工作的重中之重。

### 2.2 环境保护与管理的需求

我国《国家环境保护“十二五”规划》明确提出统筹开展环境质量标准、环境监测规范、环境基础标准制（修）订规范、管理规范类环境保护标准等制（修）订工作。完善大气、水、海洋、土壤等环境质量标准，完善污染物排放标准中常规污染物和有毒有害污染物排放控制要求，加强水污染物间接排放控制和企业周围环境质量监控要求。推进环境风险源识别、环境风险评估和突发环境事件应急处置标准建设。2015年4月，国务院印发《水污染防治行动计划》，环境保护部印发了《水污染防治工作方案编制技术指南》。其中明确提出了要对流域水质提出质量目标清单，并分析黑臭水体原因等。制订《水华遥感与地面监测评价技术规范》旨在适应我国环境保护标准体系建设的新形势、新要求，提高我国环境监测、预警和应急能力，为控制污染物排放，保护水生态环境提供有力支撑。

实际上，环境保护部门的藻类监测起始于上世纪70年代的环境污染调查中水生生物监测，与我国的环境监测事业几乎同时起步。1986年原国家环境保护局颁布了《生物监测技术规范》（水环境部分）。到上世纪90年代中期，生物监测领域已由地表水水质监测发展到大气污染生物监测、工业固体废弃物生物毒性检测和工业废水综合毒性监测等。环境保护部自2004年启动了三峡库区水华敏感期预警和应急监测工作，2008年又先后启动了太湖、巢湖和滇池水华预警和应急监测工作，组织中国环境监测总站、环境保护部卫星环境应用

中心和相关地方的各级环境监测部门先后采用手工常规监测、自动在线监测和卫星遥感监测等手段, 密切跟踪监测“三湖一库”水华情况的发展, 及时进行预测和预警。湖库水华预警和应急监测工作初步实现了地面监测与遥感监测技术手段相结合, 为环境管理决策提供了重要的技术支撑。

### 2.3 尚无水华评价技术规范

在水华评价方面, 在全国范围内还没有形成一个针对水华特征的评价方法技术标准或技术规范。利用卫星遥感监测技术, 不同地区水环境不同, 水华藻类种类不同, 显示出的光谱特征不同; 不同的卫星遥感数据, 其空间分辨率、光谱分辨率、波段设置都有所不同。如何依据常用的可业务化的遥感数据源, 利用稳定可靠的水华识别技术来监测水华, 合理确定阈值, 尽量减少人为因素, 对保证水华监测结果的稳定性和可靠性具有重大意义。中国环境监测总站在 2008 年制定的“太湖、巢湖水华特征判定暂行方法”以及根据多年经验在 2011 年修订的《水华程度评价方法》(暂行) 和《水华规模评价方法》(暂行), 也仅在部分环境监测(中心)站使用, 没有在全国监测系统及行业内推行。因此, 为满足水华监测和评价的需要, 研究制定符合我国国情、科学实用的《水华遥感与地面监测评价技术规范》十分必要。

## 3 国内外相关评价标准研究

### 3.1 水华表征方法研究

建立科学合理的衡量标准来表征水华状态是水华评价的关键。水华的发生是一个集环境因素、生物因素、气象因素等共同作用的结果。且因藻类中蓝藻在生长繁殖方面受环境影响的复杂性以及具有伪空泡结构的生物学特性, 更难精准掌握其聚集的规律。所以, 在水华程度表征方面更是研究的技术难点。选择定性与定量相结合的方式, 能够相互补充。在定性评价方面, 应评价水体的营养状态。通常情况下, 处于富营养化的湖泊已经为藻类的生长奠定了物质基础, 在条件适宜时就可能引发水华现象, 给水资源利用带来巨大损失, 甚至危及水生生物和人类的身体健康与生命安全。湖泊富营养化是水华问题的根源, 这已是国内外各界人士公认的结论。二者之间的关系是互为因果、相互促进的。他们之间形成了一个正反馈的恶性循环, 亦即: 湖泊富营养化会诱发水华, 反过来水华藻类的死亡和分解又会进一步加剧富营养化程度, 如此循环往复不断恶化。所以, 在湖泊藻类水华评价方面, 应将湖泊富营养化程度作为藻类水华评价的重要参考。在定量评价方面, 评价指标的确定尤为重要。刘聚涛等建立的太湖蓝藻水华灾害程度分级体系和卢大远等提出的“水华警界值”概念对于评价水华特征具有很好的借鉴意义, 他们提出选择藻密度作为水华评价的主要指标。另外, 借鉴与蓝藻水华灾害性质和类型相似的赤潮灾害研究成果, 在赤潮灾害评价中, 通常采用赤潮面积、中毒人数和经济损失 3 个指标来划分。与赤潮灾害相比, 蓝藻水华暴发时, 对人类直接影响是蓝藻水华堆积腐烂形成异味, 严重时可能导致湖区水厂停水, 造成饮用水源危机。且水华面积直观、易获取的特点常常被选取作为水华灾害评价指标。

澳大利亚和新西兰环保委员会和农业资源管理委员会 2000 年发布的《淡水和海水质量导则》(Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality)提出, 以藻密度作为衡量水华对水体质量影响的参考指标。李颖等在 2014 年提出, 以藻密度作为水华评价的指标, 并且对滇池水体水华情况进行判别, 判别结果与《地表水环境质量标准》分级标准相吻合。另外, 基于多年对藻类复杂的生物学特性以及暴发机理的研究, 目前还很难明确水华暴发期间各因素的作用程度, 很难直接赋予明确的权重。所以, 选择藻密度和水华面积比例作为定量评价水华的基本特征指标, 既简单明了, 又易操作、实施。

综合研究权衡, 我们认为: 对于湖库藻类水华程度评价, 可以通过基于藻密度和水华面积比例两个指标进行评价的方式。利用藻密度和水华面积定量评价结果, 明确描述水华级别, 确定变化程度。此方法有以下几个优势: (1) 可以从藻类漂浮在水体表面的“显性水华”和藻类颗粒悬浮在水体当中的“隐形水华”角度, 对于水华情况进行探讨, 便于多角度评价。即使对于一些区域, 因受监测能力、监测手段的限制, 可对其中一种指标进行初步评价, 得出评价结果。(2) 符合藻类生物学自身特点, 因一些藻类没有像蓝藻一样的伪空泡, 或者蓝藻颗粒因外界环境因子影响, 无法漂浮在水体表面, 可以采取藻密度进行

评价,更能准确描述湖泊藻类现状。(3)简单易行。因藻类复杂的生物学特性,有关模型的建立及评价,未必能达到准确评价的效果,且过程复杂,容易出错。所以,选取藻密度和水华面积直接描述“水华程度”能够直观反映藻类真实状况,减少操作难度。

### 3.2 水华地面监测评价研究进展

水体是地球上生命的发源地,是各种水生生物生活和繁殖的重要场所,与人类的生产、生活有着极为密切的关系。几乎所有水体中都有种类繁多的生物生存。浮游藻类与其他水生生物相比,虽身体微小,但数量却极多,代谢活动强烈,因此在生态系统中起着极重要的作用。由于经济发展、人口膨胀与不合理的开发利用,生物所需的氮磷等营养物质大量进入湖泊、河流,促使越来越多的湖泊发生富营养化。水体出现富营养化时,浮游藻类大量繁殖,由于占优势的浮游藻类的颜色不同,所以水面往往呈现蓝色、红色、棕色等,这种现象在江河湖泊中称为“水华”,在海洋则称为“赤潮”。因此,湖泊的富营养化,主要是浮游藻类在水体中建立优势的过程。

由于藻类的群落结构及其生长量受水体生态环境的直接影响,它们对水体环境的变化极为敏感,其种类和数量的变化与吞食它们的生物的种类和数量以及环境要素的变化都有着密切的关系。因此,浮游藻类广泛地被应用于评价和监测水质,例如各种指示藻类、群落结构和功能、分泌的毒素等。在进行水体富营养化评价、水华或赤潮观测和发生机理研究时,浮游藻类的调查占有重要的地位。

针对蓝藻水华的现场监测研究,根据澳大利亚和新西兰环保委员会和农业资源管理委员会 2000 年发布的淡水和海水质量导则,当藻密度数超过 200 万个/L 时,其产生的藻毒素对人畜饮用安全就可能产生不利影响,应对藻类进行去除处理后才能供人畜使用,当藻密度数达到 1500 万个/L 时,不建议皮肤接触。

卢大远等调查研究 1992 年汉江下游突发水华时,提出了“水华警界值”、“指示因子”和“指示值”的概念。所谓“汉江水华警界值”,指的是当“藻类含量”或“藻密度”达到某一数值时,视为汉江水体异常,可能突发水华。他们将“汉江水华警界值”暂定为“藻密度”为  $5 \times 10^5$  个/L;

上海市青浦区《淀山湖蓝藻水华应急处置预案(试行)》规定,淀山湖沿线累计出现 1 平方公里蓝藻水华,实施 IV 级应急响应;累计出现 10 平方公里蓝藻水华,实施 III 级应急响应;出现蓝藻水华累计达 20 平方公里,实施 II 级应急响应;出现蓝藻水华累计超过 20 平方公里或暴发大规模的绿潮,实施 I 级应急响应。

### 3.3 水华遥感监测评价研究进展

许多国家针对蓝藻的遥感监测进行了专门立项研究,大量专家学者曾做过蓝藻水华遥感的研究。欧盟 1999 年曾经开展了蓝藻水华的检测、监测和预报的研究;美国佛蒙特州水资源与湖泊研究中心(The Vermont Water Resources and Lake Studies Center)曾专门立项支持蓝藻水华遥感监测项目。该项目利用 SPOT、MERIS 和 QuickBird 数据,基于主成分分析方法,对 Champlain 湖蓝藻分布进行了大范围监测,取得了较好的效果;Chang 等通过 Landsat TM 卫星遥感影像预测台湾 Techu 水库硅藻水华暴发,其准确性高达 74%;Kutser 通过研究表明高光谱传感器 Hyperion 能够用于蓝藻定量制图,具有精细光谱波段的 MERIS 和 MODIS,同样具有较好的探测蓝藻暴发的能力,能够用于蓝藻暴发期间的定量绘图。

一些学者通过反演藻青蛋白来监测蓝藻水华。Dekker 等(1993)采用了反射率基线的方法对藻蓝素进行监测,对澳大利亚东部城市水域中蓝藻进行详细的研究,该方法适于在高悬浮物和高溶解性有机碳水体中对蓝藻水华进行监测;Peña-Martínez(2004)利用 MERIS 波段比值对西班牙水库中的藻蓝蛋白浓度进行提取;Vincent(2004)利用 Landsat TM 监测了 Eric 湖的蓝藻素含量,使用藻青蛋白和叶绿素 a 的荧光比值来评估蓝藻素含量,将蓝藻素与 Landsat TM 波段比值进行回归得到了反演蓝藻素的模型,回归系数达到 77.6%;Simis 等(2005)和 Gons 等(2005)利用水体在 620nm 处的吸收和散射,提出了嵌套型光谱波段比值的方法反演藻青蛋白含量,该算法可以用于蓝藻为主的浑浊水体的藻青蛋白反演,Randolph 等(2008)利用该算法对美国印第安纳波利斯两个水库的蓝藻素进行反演得到了较好的结果,Yang and Pan(2006)利用该算法获取了中国太湖水体的藻蓝素,并做了误差分析。

李旭文等通过对太湖水体 TM 影像的分析,采用差值植被指数(DVI)建立了藻类叶绿素的经验反演模型,从而得到其空间分布信息;黄家柱和赵锐等成功利用 TM 数据监测 1998 年 8 月 11 日太湖蓝藻爆发情况;胡雯等利用 NOAA 卫星和 FY-1C/CAVHRR 数据监测巢湖蓝藻水华分布状况;杨顶田等利用 MODIS 数据对蓝藻分布进行了制图;马荣华等(2009)利用太湖水体蓝藻素实测数据,利用 MODIS250m 数据建立藻蓝素的估测模型并做了精度评价。一些学者采用一些光谱指数等方法对水体中的蓝藻水华进行识别。黄家柱等(1999)发现, TM 的 TM4(红)、TM3(绿)、TM1(蓝)3 个波段的假彩色合成图像上蓝藻区呈绯红色,与周围深蓝色、蓝黑色湖水有明显的区别,并利用这一特点对 1998 年 8 月 11 日太湖蓝藻暴发的强度、地点和分布范围进行了识别;王海君等(2005)基于 ASTER 数据比较了不同波段的灰阶显示图像、单波段密度分割、多波段假彩色合成的显示效果,认为可见光和近红外波段可以很好地区分蓝藻和湖水区域;马荣华等(2008)对 MODIS/Terra、CBERS、ETM 和 IRS P6 遥感影像的蓝藻水华提取模式进行了对比分析,最终选取近红外和红光波段的比值提取蓝藻水华信息。陈云等(2008)以 CBERS 数据为主要数据源,以 NDVI 为测试变量,运用 CART 算法确定分割阈值,通过构建决策树的方法提取蓝藻水华信息;徐京萍等(2008)利用 MODIS 植被指数数据对太湖蓝藻水华进行了遥感监测。结果发现,近红外和红光波段比值识别模式、NDVI 以及 EVI 识别模式都可以确定蓝藻水华分布范围。周立国等(2008)、李国砚等(2008)利用 MODIS 第 2 波段和第 1 波段地表反射率的比值,运用阈值法提取了蓝藻信息。段洪涛等(2008)利用不同遥感数据源,包括 MODIS/TERRA, CEBERS-2 CCD, ETM 和 IRS-P6 LISS3,结合蓝藻水华光谱特征,采用单波段、波段插值、波段比值等方法,提取不同历史时期太湖的蓝藻水华。

### 3.4 水华遥感与地面相结合评价研究进展

在一般意义上,人们将水华理解为大量的藻类漂浮在水面上。从表观现象上看,水华是瞬时的“暴发”。但水华有一个形成过程,其本质是藻类生物量在水体中逐渐增加的过程,“暴发”只是藻类在一定时间内漂浮与积聚,即位置改变的表观现象,而不是生物量的巨变。因此,对于水华在概念上的理解,有必要给出更准确的表述,以真正反映该现象的本质,使人们真正理解并能够正确对待水华问题。这就要从引起水华的最关键因素—藻类生物本身着手,进行形象客观准确的阐述。孔繁翔等认为,确切的水华定义或指标的确定对于研究水华形成机理十分必要。Home A J 等认为湖泊蓝藻水华是指湖泊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,严重时可在水面漂浮积聚形成绿色的藻席甚至藻浆。

近年来,在国内很多部门利用现场监测到的藻密度及利用遥感卫星手段观测到的藻类聚集面积情况作为判断水华情况的主要方法及手段,并对水华程度进行分级。如云南省昆明市在滇池蓝藻大规模暴发应急处置预案中规定了严重级蓝藻暴发和危害公共安全级蓝藻暴发的判定条件。严重级蓝藻暴发判定条件为:蓝藻较快滋生,且同时具备以下 3 个条件:(1)藻类生物量,当滇池湖体所有国控点位常规监测(每月一次)数据中,浮游植物(优势种群为微囊藻)平均生物密度大于 5000 万个/L 而小于 10000 万个/L 时;(2)水体富营养指数,当滇池湖体所有国控点位常规监测(每月一次)数据中,水体营养化指标(按规范,计算参数包含总氮、总磷、叶绿素 a、透明度和化学需氧量)大于 60 而小于 80 时;(3)卫星遥感判读,当滇池水体卫星照片运用遥感软件分析判定,藻类分布区域明显可见富集范围超过湖体水面 20%而小于 60%时。危害公共安全级蓝藻暴发判定条件为:(1)藻类生物量,当滇池湖体所有国控点位常规监测(每月一次)数据中,浮游植物(优势种群为微囊藻)平均生物密度大于 10000 万个/L 时;(2)水体富营养指数,当滇池湖体所有国控点位常规监测(每月一次)数据中,水体营养化指标(按规范,计算参数包含总氮、总磷、叶绿素 a、透明度和化学需氧量)大于 80 时;(3)卫星遥感判读,当滇池水体卫星照片运用遥感软件分析判定,藻类分布区域明显可见富集范围超过湖体水面 60%。

上海市青浦区《淀山湖蓝藻水华应急处置预案(试行)》规定,淀山湖沿线累计出现 1 平方公里蓝藻水华,实施 IV 级应急响应;累计出现 10 平方公里蓝藻水华,实施 III 级应急响应;出现蓝藻水华累计达 20 平方公里,实施 II 级应急响应;出现蓝藻水华累计超过 20 平方公里或暴发大规模的绿潮,实施 I 级应急响应。

刘聚涛等通过对太湖蓝藻水华灾害分析,借鉴赤潮灾害评价指标,采用蓝藻水华面积



和叶绿素 a 浓度作为灾害程度分级评价指标,应用层次分析法确定权重,结合隶属度函数,采用模糊综合评价建立太湖蓝藻水华灾度分级评价方法,定量描述蓝藻水华灾害程度,并进行了验证评价。

表 1 太湖蓝藻水华灾害程度分级体系

项目	小型	中型	大型	重大	特大
面积 (km <sup>2</sup> )	≤150	(150,400]	(400,600]	(600,900]	>900
Chla 浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	≤30	(30,50]	(50,80]	(80,120]	>120

江苏省环保厅提出了《太湖蓝藻水华状况评价及水源地藻类应急处置级别推荐标准》(试行),结合地面藻密度实测数据和 MODIS 卫星遥感监测数据将蓝藻水华暴发强度分为四级,即:“全面性水华”、“区域性水华”、“局部性水华”、“零星性水华”。

表 2 江苏省环保厅水华状况判断暂行方法

级别	描述	水华面积比例 (%)	藻密度 (万个/升)
一级	全面性水华	(60, 100]	(8000, +∞)
二级	区域性水华	(40, 60]	(5000, 8000]
三级	局部性水华	(10, 40]	(3000, 5000]
四级	零星性水华	(5, 10]	(0, 3000]

中国环境监测总站结合国家环境管理需求和环境监测工作实际,于 2008 年开始组织实施太湖和巢湖水华预警和应急监测工作,同时制定了《太湖、巢湖水华状况判断暂行方法》,并将其应用在实际当中。该暂行方法采用藻密度和水华面积(卫星遥感监测结果)两项指标来定量判断水华特征。其中,藻密度数据为实际监测所得,水华面积比例根据 MODIS 卫星遥感影像数据解译获得的水华面积和全湖水域面积计算而成。将水华特征分为五个级别,即“无水华”、“零星性水华”、“局部性水华”、“区域性水华”和“全面性水华”。

表 3 太湖、巢湖水华状况判断暂行方法

水华特征	藻密度 (个/升)	水华面积比例 (%)
无水华	(0, 2.0×10 <sup>6</sup> )	(0, 5]
零星性水华	[2.0×10 <sup>6</sup> , 5.0×10 <sup>6</sup> )	(5, 10]
局部性水华	[5.0×10 <sup>6</sup> , 1.0×10 <sup>7</sup> )	(10, 40]
区域性水华	[1.0×10 <sup>7</sup> , 1.0×10 <sup>8</sup> )	(40, 60]
全面性水华	[1.0×10 <sup>8</sup> , +∞)	(60, 100]

藻密度和卫星遥感得到的水华面积是水华遥感监测与评价技术规范中涉及的关键指标,水质参数是水华程度评价及水华发生状态、趋势的重要参考指标。

### 3.5 遥感与地面监测相结合的必要性

从藻类生长和水华形成的主导影响因子来看,水华暴发是由水体的物理、化学和生物过程等多种因素共同作用的结果,而且各要素之间关系复杂。要准确、及时地对藻类水华进行预警,将是一项庞大的系统工程,需要多项技术条件支撑。

卫星遥感监测技术具有宏观、动态等显著特点,在蓝藻水华监测上有着常规监测不可替代的优点。它既可以满足大范围蓝藻监测的需要,也可以动态跟踪蓝藻水华的发生、发展。因此,在预警监测过程中,可以利用 EOS/MODIS 遥感气象卫星影像资料进行解译,并运用光谱水质模型进行反演,结合太湖地区实时观测的风速、风向、光照、气温等资料,判断蓝藻移动方向、发生面积和距饮用水源地的距离。但是,卫星遥感监测技术受到影像质量、云层干扰等,尤其是全云覆盖或者阴雨天气,无法开展水华遥感监测。据环境保护

部卫星环境应用中心统计,自2010年至2016年,每年4-10月监测结果显示,太湖有效数据占总监测次数的比例约为57.5%—78.7%,巢湖有效数据占总监测次数的比例为60.6%—72.1%。所以,仅靠遥感监测手段,无法完全有效监测水华情况。

地面监测方法是通过显微镜对水样中藻类的形态进行观测和识别,通过显微镜统计藻类细胞数目或通过细胞体积估算细胞数目实现藻密度测量。这种方法较准确描述藻类数量,能够较好地应用于小型水体,但对于较大面积水域而言,该方法不仅耗时耗力,而且很难准确地反映蓝藻的空间分布特征和时间序列变化规律,具有一定的局限性。

所以采用卫星遥感监测与地面监测技术相结合的方式,既能发挥遥感监测手段宏观、动态监测水华变化的优点,又可通过现场监测方法,弥补遥感监测数据获取无法保证的弱点。两者结合,能够更加客观、准确描述水华情况。

## 4 标准编制的原则

标准编制组本着科学性、先进性和可操作性为原则,参考国内外水华监测的方式方法,以及结合我国多年来对藻类监测结果,不断深入研究和完善,制定本标准。不仅考虑到标准的科学性、而且考虑到可操作性。为满足湖库藻类监测以及预警提供基础,本标准的制定原则有:

### (1) 科学性原则

充分利用相关领域的科学原理,体现国内外相关领域的研究进展,吸取多年来监测工作所取得的成果和经验。

### (2) 普适性原则

充分考虑国内现有的技术和装备水平以及社会经济承受能力,适度选择监测指标和监测方法,适用于大多数地区开展工作。

### (3) 可操作性原则

规范工作流程简洁,便于对水华发生情况的定性和定量描述,便于实施与监督。

## 5 标准主要技术内容

### 5.1 标准的主要内容

本标准主要包括适用范围、术语和定义、监测内容、技术要求、质量控制以及评价方法等部分。

(1) 适用范围:本标准适用于我国淡水水域环境,针对湖泊和水库等开展的蓝藻水华遥感监测与藻类水华地面监测以及水华程度评价工作。

(2) 术语和定义:本标准重新定义了水华的含义,并将其内涵分为“显性水华”和“隐性水华”,即表现特征为水体表面有藻类聚集或藻类颗粒悬浮在水体当中。明确了以水体中藻密度的高低或水华面积比例的大小进行判定“水华程度”以反映水华发生的强弱特征。

(3) 监测内容:地面监测设置了藻密度和藻种构成两个核心指标,以及水温、pH、溶解氧、氨氮、总氮、总磷、高锰酸盐指数、透明度、浊度、电导率、叶绿素a、藻毒素等水环境监测相关的辅助指标。遥感监测设置了水华面积比例作为评价的核心指标。主要通过卫星遥感波段运算得到植被覆盖指数用以区分水华和水体。本标准推荐采用归一化植被指数NDVI用于水华遥感监测。对于不同大小的水域应选择不同分辨率的卫星进行监测,以更准确监测水面水华情况。

(4) 技术要求:地面监测指标选取0-0.5m水体进行采样,且对藻密度及藻类种类监测指标推荐了具体操作方法及方法来源,如表4。用来监测蓝藻水华的卫星遥感影像数据,应具有红光(630nm~690nm)和近红外(760nm~900nm)通道;还应准备水陆掩膜、云掩膜、水草掩膜及观测几何条件等辅助数据。选取的单幅或多幅拼接后的遥感影像数据,至少要包括监测水体90%以上的面积;在监测水体,云覆盖率小于50%。

表4 指标监测分析方法

监测指标	推荐方法	方法来源
藻密度	镜检	《水和废水监测分析方法》(第四版)
藻类种类	镜检	《水和废水监测分析方法》(第四版)

(5) 质量控制：依据本标准提供的对监测数据及解译数据的质量保证及控制措施做了具体规定。

(6) 评价方法：在水华特征监测指标筛选结果的基础上，为适应便于管理部门使用和便于公众理解的需求，开展湖库水华特征评价技术方法研究，包括评价指标选取、分级标准确立及变化趋势分析等关键技术环节。

## 5.2 标准主要原理

### 5.2.1 水华定义 Algae bloom

指淡水水体中藻类大量繁殖的一种自然生态现象，是水体富营养化的一种表现形式，表观特征为水体表面有藻类聚集或藻类颗粒悬浮在水体当中。淡水水体处于富营养状况时，适宜的温度、光照、气候和水文等条件容易诱发水华。

在一般意义上，人们将水华理解为大量的藻类漂浮在水面上，从表观现象上看，水华是瞬时的“暴发”。但是，水华的本质是藻类生物量在水体中逐渐增加的过程，这已得到国内外的普遍认同，本研究的结果也支持这一点。以2011年太湖藻密度数据为例，藻密度的日变化呈现连续分布，在连续时间点上几乎不出现跳跃性变化（图1）。而同时期遥感监测到的水华面积则呈现离散分布，相邻时间点上变化较大，特别是在藻密度相对较高的时期数据产生大幅变化（图2）。

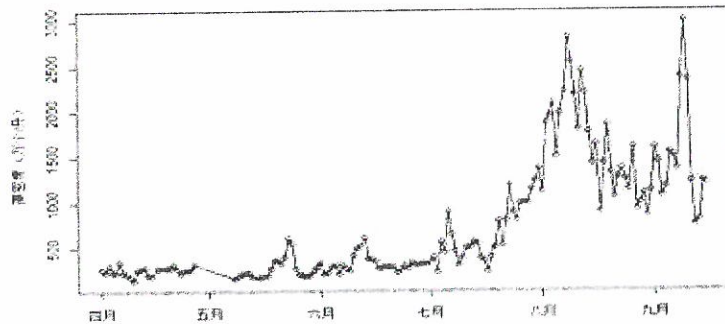


图1 2011年太湖藻密度变化

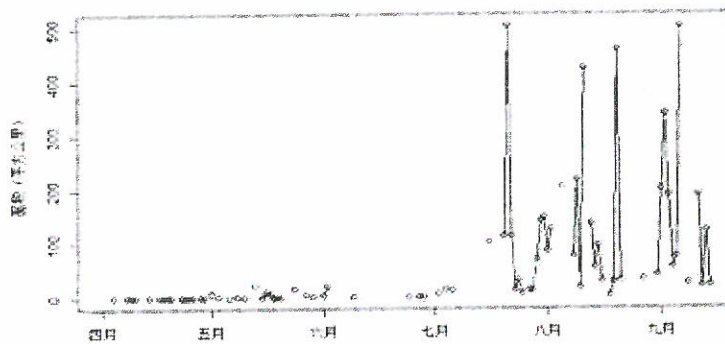


图2 2011年太湖遥感监测水华面积变化

遥感监测蓝藻水华易受云层影响而导致数据的缺失和水华程度被低估，影响我们对藻密度与水华情况的判断。所以，我们提取了无云时段的水华面积与藻密度数据，通过作图了解二者的相关性（图3）。从分析结果中可以发现，当藻密度低于500万个/L时，用遥感手段几乎监测不到水华。当藻密度高于500万个/L时，藻密度与水华面积之间无明显的线性关系。这一点与我们通常认为水华面积应随藻密度的升高而增加不吻合。

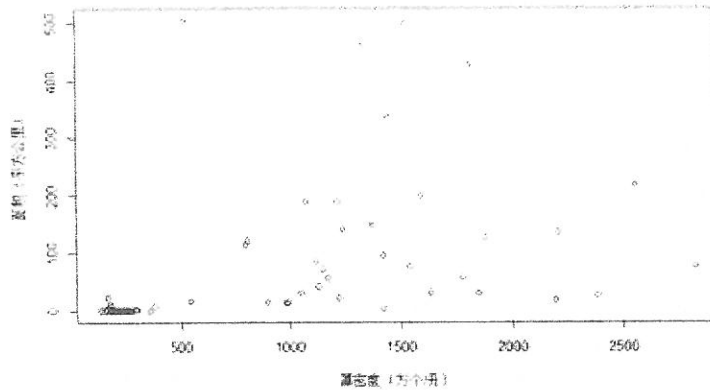


图 3 2011 年太湖无云时段水华面积与藻密度相互关系

国内外研究表明，以铜绿微囊藻为代表的水华多发生在每年的6~9月，此间日照量充沛，日照时间长，这与有关专家提出的相对长的光周期能增大藻类细胞密度的观点一致。实验还证明光照和气囊有很强的相关关系，Walsby研究了低光强和微囊藻、鱼腥藻的气囊积累及浮力增加的关系，认为低光照有利于气囊的积累，随着光强的增加，气囊会被溶解，含量减少；当光照充足时，蓝绿藻可通过碳水化合物的合成与分解调节其水中的浮力去获得最佳的生长条件。

孔繁翔等提出了蓝藻水华形成的四阶段理论和时间序列以及太湖蓝藻水华形成的空间格局。根据蓝藻种群的生态学特点，蓝藻的生长与水华的形成可以分为四个阶段，即越冬休眠、春季复苏、生长、上浮集聚，分别出现在11-2月、3-4月、4-9月和5-10月。

从以上数据分析及相关理论研究可以得出，水华“暴发”只是藻类在一定时间内、一定气象条件下的漂浮与积聚，即位置改变的表现现象，而不是生物量的巨变。基于这一观点，本研究认为应对水华的内涵进行补充，将水华分为“显性水华”和“隐性水华”。其中，显性水华指的是藻类漂浮在水面上，呈现为片状或丝带状的藻席；隐性水华则是指藻类沉在水面之下，但数量庞大，一旦条件适宜便可上浮聚集，一般表现为水中颗粒较多或水体呈藻浆状。水华内涵的补充研究进一步完善了水华的概念和分类，可清晰的解释遥感与地面现场监测数据趋势不一致的问题。这一研究成果为确立不同监测手段在监测技术体系中的独特作用提供了依据，为建立多手段协同监测，深入开展水华监测和预警体系奠定了理论基础。

## 5.2.2 卫星遥感监测

### 5.2.2.1 基本原理

利用卫星遥感监测蓝藻水华的主要原理是基于正常水体和水华的光谱差异。由于蓝藻体内含有大量的叶绿素，使得水体反射光谱在蓝波段和红波段存在较为明显的吸收峰，而在近红外波段具有类似于植被光谱曲线特征的陡坡效应，即在可见光波段反射率低，在近红外波段反射率却明显升高，通过对卫星遥感波段运算得到的植被指数可以区分水华和水体（图 4）。常见用于水华遥感监测的植被指数有比值植被指数 RVI，归一化植被指数 NDVI 和增强植被指数 EVI 等，具体指数国内外综述来源及计算公式可参见表 5。

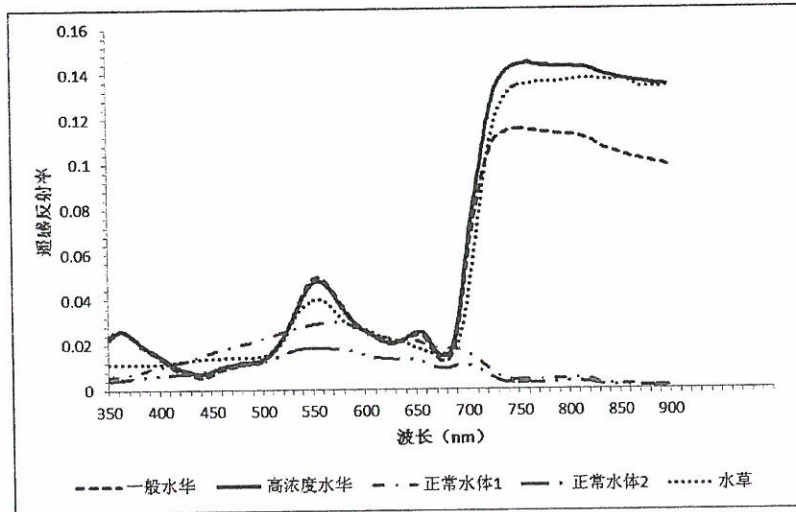


图4 蓝藻水华和正常水体的遥感反射率光谱曲线

表5 常用水华指数

指数名称	缩写	计算公式	取值范围	参考文献
归一化植被指数	NDVI	$\frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$	[-1,1]	Rouse 等,1972
增强型植被指数	EVI	$G \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + C_1 \rho_{red} - C_2 \rho_{blue} + L}$	[-1,1]	Huiqing Liu, AlfreHuete,1995
比值植被指数	RVI	$\frac{\rho_{nir}}{\rho_{red}}$	[0,30+]	Pearson 和 Miller,1972
浮游藻类指数 (floating algae index)	FAI	$\frac{R_{NIR} - R_{RED} - (R_{SWIR} - R_{RED})(\lambda_{NIR} - \lambda_{RED})}{\lambda_{SWIR} - \lambda_{RED}}$		Hu,2009,2010
蓝藻水华指数	CAI	$10 \times (R_{NIR} - R_{RED}) + 0.110577 \times (R_{SWIR} - R_{RED})$		郭望成,2011
荧光高度	FLH	$L_{678} - L_b$		Letelier,1996
线性大气抗阻指数	LGARI	$1.2 \frac{\hat{\rho}_{nir} - [\hat{\rho}_{green} - \lambda(\hat{\rho}_{blue} - \hat{\rho}_{red})]}{\hat{\rho}_{nir} - 5[\hat{\rho}_{green} - \lambda(\hat{\rho}_{blue} - \hat{\rho}_{red})]}$		吴迪,2011
高光谱水华指数				
藻青蛋白光谱指数	PSI	$\frac{R(peak2) - R(Vale1)}{R(peak2) + R(Vale1)}$		李俊生和吴迪等,2009

参数说明： $\rho$ 为反射率， $G$ 为增益因子，EVI中的 $L$ 为背景调节参数取1， $C_1$ 、 $C_2$ 为大气修正参数， $R$ 为去瑞利散射反射率，FAI中的 $\lambda$ 为波长， $\hat{\rho}$ 为大气瑞利和臭氧吸收校正后的表现反射率，LGARI中的 $\lambda$ 为大气控制校正因子； $nir/NIR$ 、 $SWIR$ 、 $red/RED$ 、 $blue$ 、 $green$ 分别代表近红外、短波红外、红、蓝、绿波段； $L_{678}$ 为678nm的归一化离水辐射率， $L_b$ 为基线值； $R(peak2)$ 是650nm附近的反射峰值， $R(Vale1)$ 是625nm附近的反射谷值。

#### 5.2.2.2 NDVI 方法确定的依据及局限性

根据编制组常年业务监测经验及国内外研究成果来看，NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)是目前监测业务中最常用并且效果较好的水华指数方法，具体依据如下：

(1) NDVI 方法只需有红波段和近红外波段两个波段设置，目前绝大部分光学遥感数据均有这两个波段设置，适用的遥感数据选择面最广；

(2) 计算公式简单，在应用到水华识别之前，已经广泛应用到植被遥感监测领域。当

然，NDVI 方法也有局限，主要就是随着大气环境的变化（尤其是气溶胶类型、气溶胶光学厚度变化），卫星观测几何的改变，以及发生水面太阳耀斑等，水体和水华的 NDVI 值有较大改变，水体与水华 NDVI 差值也有较大变动，利用 NDVI 方法来识别水华，需要通过人工确定阈值和图像拉伸来提高判读精度。当然，经过准确大气校正后获得的“地面 NDVI”，可以避免以上问题。NDVI 方法的另一个局限不能区分水华和水草，水草可以通过高光谱或者先验知识事先获得其空间分布，进行水华识别前可以先进行水草掩膜操作。

### 5.2.2.3 监测技术流程

按照水华监测的主要内容，参考环境保护部卫星环境应用中心蓝藻水华业务监测的技术规范，制定本标准蓝藻水华的监测技术流程，如图 5。

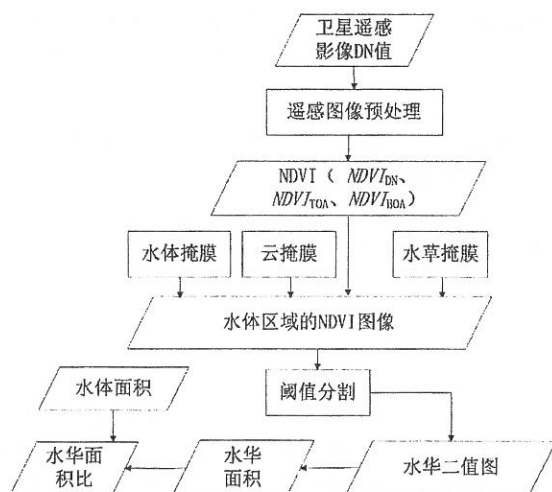


图 5 基于卫星遥感数据监测蓝藻水华技术流程图

### 5.2.2.4 监测数据的基本要求

因为水华判别选择 NDVI 指数方法，所以监测所用的遥感数据应具有红光（630nm-690nm）和近红外（760nm-900nm）通道，以满足 NDVI 的计算要求和保证计算精度；

遥感数据空间分辨率应取决于监测水体的大小，水体面积越小，空间分辨率越高。例如，对于太湖和巢湖，可以选择空间分辨率为 250 米的 MODIS 的第 1、2 波段数据，对于滇池，水体面积相对较小，可以选择空间分辨率为 30 米的环境一号 CCD 数据；

遥感数据时间分辨率需满足监测业务的需求。时间分辨率太低不能满足蓝藻水华应急监测和预警预测业务需求，目前，MODIS 数据重访周期为 1 天，环境一号 CCD 数据重放周期为 2-3 天，基本满足太湖、巢湖和滇池蓝藻水华预警监测的业务监测需求。

### 5.2.2.5 辅助数据的基本要求

在卫星遥感监测蓝藻水华之前，应准备水陆掩膜、云掩膜、水草掩膜及观测几何条件等辅助数据（水陆掩膜可考虑使用矢量叠加或者 NDWI 等方法生成，云掩膜可考虑使用红光波段阈值分割等方法生成，水草掩膜可考虑使用高光谱指数或者根据先验知识建立感兴趣区生成）。掩膜数据要求均经过几何校正，能够与计算 NDVI 的遥感影像空间匹配，掩膜数据为二值图栅格数据，数值设置为：水体为 1，陆地为 0，云、水草为 1，其他类型为 0。通过掩膜计算，获得不受云和水草干扰的水体和蓝藻水华区域，再通过水华指数识别出水华分布。

观测几何条件主要指卫星观测天顶角和方位角、太阳天顶角和方位角，是计算发射率和进行大气校正的输入条件之一。

### 5.2.3 水华地面监测

地面监测的主要指标包括核心指标和辅助指标（推荐同步监测）两部分。核心指标包括藻密度和藻种构成两部分。

辅助指标是水华发生原因、变化和趋势等分析的重要参考内容，为水环境管理、污染

源控制、环境规划等提供科学依据,对整个水环境保护、水污染控制以及维护水环境健康方面起着至关重要的作用。与藻类生长密切相关的辅助指标有:水温、pH、溶解氧、氨氮、总氮、总磷、高锰酸盐指数、透明度、浊度、电导率、叶绿素 a、藻毒素等。

### 5.2.3.1 核心指标

#### 5.2.3.1.1 藻密度

藻密度:指单位体积水样中藻类的细胞个数。单位:个/L。

藻类水华的爆发性繁殖最直接体现就是藻密度的快速增长,当藻类进入衰亡期时,大量死亡的藻类会被微生物分解,而在分解过程中会大大消耗水中的溶解氧,对其他水生动植物造成影响,严重破坏水生态系统,使水体中的生物多样性进一步减少,打破生态平衡,加速湖泊老化进程。而且,水华暴发也是直接影响湖库水生态安全的直接因素。

#### 5.2.3.1.2 藻种构成

藻种构成是描述水体中藻类种类组成成分。湖库中通常存在多种藻类,当某些环境因素发生改变时,可能对藻类的生长繁殖产生影响,对有些藻类是抑制作用,对有些是促进作用。

藻类优势种:指个体数占总数 30%以上的藻类。一般鉴定到属或种。

### 5.2.3.2 辅助指标

#### 5.2.3.2.1 水温

水温:指水样温度。单位:℃。

温度是促进藻类生长最基本的环境因子,它是藻类进行光合作用的必要条件,决定细胞内酶促反应的速率,并与植物的合成代谢及呼吸强度,以及对水中异养细菌等微生物的生理活性均有着密切的关系。对太湖、巢湖和滇池研究表明,水温的季节变化是水体中微囊藻水华出现季节波动的主要因子。徐宁等研究发现,水温在水华的形成和消散过程中起着重要的作用;在水华潜伏期,适宜的水温是水华藻类快速生长、繁殖的必要条件;水华一旦形成,稳定、适宜的水温对维持水华种群的高密度也非常重要,此时如果水温发生剧烈变化,将会立刻打破水体中藻类疯长的格局,引起藻类数量骤减,水华消失。BriandJF 等人研究表明,在混合藻类种群的河流中,温度 20℃时硅藻占优势;30℃时绿藻占优势;35~40℃时蓝藻占优势。

#### 5.2.3.2.2 pH 值

pH:是指溶液中氢离子的总数和总物质的量的比。表示溶液酸性或碱性程度的数值。

在碳源丰富的水体中,藻类光合作用影响 CO<sub>2</sub> 缓冲体系,从而影响水体 pH 值。最常见的是藻类大量吸收 CO<sub>2</sub> 引起水体 pH 值上升,同时部分藻类对水体中有机酸的吸收和重碳酸盐的利用,也会引起 pH 的升高;而藻类的呼吸作用产生的 CO<sub>2</sub> 溶于水促进 H<sup>+</sup> 的生成,会引起 pH 下降。但藻类的生长繁殖对 pH 的影响并不是无限制的,当 pH 达到一定值后,将反过来限制藻类的繁殖,过高的 pH 值会对藻类的光合作用产生抑制作用。

因而,各种藻类生长都有它适合的 pH 值范围,pH 会影响藻类的生长繁殖速度,甚至影响到种类的演替。

#### 5.2.3.2.3 透明度 (SD)

透明度:是指水样的清澈程度。单位:m。

透明度是水体能见程度的一个量度,目前也普遍被作为评价水体富营养化的一个重要指标。透明度的下降,会直接影响沉水植物和其他水生生物的生存,从而导致湖泊生态系统的恶性循环,加速湖泊富营养化趋势的发展。

潘继征在研究中指出,透明度与水深呈显著正相关(P<0.001),与悬浮物、总氮、溶解性总氮、总磷、溶解性总磷、叶绿素 a 和藻类等呈显著负相关(P<0.001),而与沉积物中的总有机碳、总氮、总磷相关性不显著(P>0.05)。多元逐步回归分析表明,总氮、藻类和悬浮物等 3 个因子与透明度的相关性最高。总氮是藻类生长繁殖所需的营养物质,因此可以认为藻类和悬浮物是影响透明度空间分布的主要因子,随着水体中藻类和悬浮物的增加,水体透明度下降。

#### 5.2.3.2.4 溶解氧 (DO)

溶解氧：单位体积水样中含有的分子态氧质量。单位：mg/L。

溶解氧是水生生物生理代谢的限制因子之一，其高、低在一定程度上可表征水生生物生长状况和水体污染程度。在藻类丰富的水体中，溶解氧主要来源于藻类的光合作用，由于浮游植物在光合作用中释放氧分子，从而使水体中溶解氧浓度升高，但在阳光强烈的白天水体溶解氧易出现过饱和而向空气中逸散，夜晚又由于藻类的呼吸作用导致溶解氧有所降低，所以溶解氧与叶绿素 a 在一定范围内存在显著正相关性。

#### 5.2.3.2.5 高锰酸盐指数 (COD<sub>Mn</sub>)

高锰酸盐指数：指在一定条件下，以高锰酸钾 (KMnO<sub>4</sub>) 为氧化剂，处理水样时所消耗的氧化剂的量。单位：O<sub>2</sub>, mg/L。

高锰酸盐指数通常被作为直接表示水体中有机物相对含量的指标，而藻类作为水库湖泊中最集中的有机体，其生长繁殖变化在一定程度上可以通过高锰酸盐指数得到体现。

#### 5.2.3.2.6 总氮及总磷

总氮：水中各种形态无机和有机氮的总量。单位：mg/L。

总磷：水中各种形态无机和有机磷的总量。单位：mg/L。

浮游植物群落结构和演替规律除与浮游植物的地域性分布、温度及盐度等有关外，还与氮磷等营养元素的浓度及其比例密切相关。浮游植物可以吸收不同形态的氮磷，另一方面，氮磷营养盐的改变会导致浮游植物群落结构的改变。根据 Redfield 比率，限制浮游植物生长的 N、P 原子比率为 16:1，当 N:P>16:1 时，P 成为藻类生长的限制因子；当 N:P<16:1 时，N 成为藻类生长的限制因子，这与李军、刘从强等人对太湖营养盐的研究相同。研究证明，在大多数淡水湖泊中，P 是藻类生长的限制因子，刘健康在东湖的调查表明其叶绿素的含量与总磷含量呈正比。Schindler 通过全湖实验发现湖泊中的叶绿素浓度依赖于湖泊中的磷含量，他推断磷限制了实验湖泊中的浮游植物生长。当处在磷限制的水体中，藻类细胞的磷含量随细胞生长率的下降而下降，而对磷的吸收能力却呈相反的趋势；当水体中的磷含量丰富时，大多数浮游植物可以吸收水体里过剩的磷，以多磷酸盐的形式贮存在细胞体内，以便在水体磷供应不足时加以利用。

目前，各国学者最为关注的是氮磷营养盐对水体中蓝藻水华的影响，且对此观点不一。有相当一部分学者认为，随着氮磷比的升高，蓝藻在浮游植物总生物量中的比例逐渐降低。大量的湖泊生态学研究都显示，低的氮、磷比值能诱导蓝藻的发育，蓝藻大量暴发时易产生水华。Takamura 的研究表明，氮磷比的提高是日本霞浦湖微囊藻水华消失的主要原因。在纽约的 Gocgre 湖，湖上层的氮磷比沿着北部呈现上升的梯度，而蓝藻的优势则呈现下降趋势。然而也有反的观点，Pearl 等认为在氮磷负荷都很高的富营养湖泊里，氮磷比理论并不太实用，由于氮和磷都不受限制，氮磷以外的营养元素或者其他环境因子可能对浮游植物起主导作用。Xie 等在中国武汉的东湖利用围隔试验研究氮磷比对微囊藻水华的影响后发现，氮磷比定律对于超富营养水体并不适用。

#### 5.2.3.2.7 氨氮

氨氮是指水中以游离氨 (NH<sub>3</sub>) 和铵离子 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 形式存在的氮。单位：mg/L。

水体中的氨氮是指以氨(NH<sub>3</sub>)或铵(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)离子形式存在的化合氨。氨氮是各类型氮中危害影响最大的一种形态，是水体中的主要耗氧污染物。氨氮中的非离子氨是引起水生生物毒害的主要因子，对水生生物有较大的毒害，其毒性比较盐大几十倍。同时氨氮是水体中的营养素，可为藻类生长提供营养源，增加水体富营养化发生的几率。

#### 5.2.3.2.8 电导率

水中存在着大量的无机酸、碱、盐等，它们都是以离子状态存在的，所以都具有导电能力。水中溶解的盐类越多，电导就越大。电导率可以推测水中离子的总浓度，描述藻类生存水体的离子状态。电导率便于进行自动测量。

#### 5.2.3.2.9 浊度

表征水中悬浮物对光线透过时所发生的阻碍程度。水中的悬浮物一般是泥土、砂粒、微细的有机物和无机物、浮游生物、微生物和胶体物质等。浊度与藻密度有一定的相关性，



便于进行自动测量。

#### 5.2.3.2.10 叶绿素 a

叶绿素 a 是植物光合作用中的重要光合色素。

#### 5.2.3.2.11 藻毒素

藻毒素化学性质相当稳定。在水中藻毒素自然降解过程是十分缓慢的，藻毒素有很高的耐热性，加热煮沸都不能将毒素破坏，也不能将其去除；自来水处理工艺的混凝沉淀、过滤、加氯也不易将其去除。

### 5.3 主要方法及依据

#### 5.3.1 遥感数据选择

选取的单幅或多幅拼接后的遥感影像数据，至少应包括监测水体 90% 以上面积，如果影像未覆盖的水体有大面积水华，会导致监测面积与实际水华面积相比过于偏小，该影像不应被用于水华监测；云层会干扰光学遥感对地表的观测，云层下的水华是无法监测或估算其面积的，根据具体业务需求，如果在监测水体内，云覆盖率大于 50%，该遥感影像可以作为无效数据不进行监测。

#### 5.3.2 遥感数据预处理

针对水华遥感监测的遥感数据预处理主要包括：空间裁剪或拼接、几何校正、辐射校正，以上预处理均可以利用成熟的商业遥感软件（例如 ENVI、ERDAS、PCI 等）专门的功能模块继续预处理。

一般来说，如果监测水体小于选择的遥感影像覆盖区域，需要进行空间裁剪，以利于后续数据的处理效率。在不影响空间制图和尽可能裁剪区域成较小范围的原则下，依据监测水体区域的左上角和右下角经纬度，对所选取的遥感影像进行空间裁剪，范围要略大于水体区域，空间裁剪有利于后续数据处理的效率。

如果监测水体大于所选择的遥感影像覆盖区域，通过相邻的多幅遥感影像拼接后可以包含监测水体，则需要空间拼接处理，以保证监测水体对象的完整性。图像拼接就是通过对相邻影像图的无缝拼接处理，把这些影像图相互间的重叠部分去掉，从而为在逻辑上将这些影像图整合成覆盖区域的一幅影像图创造条件。具体图像拼接方法可参考《生态环境遥感监测技术》（中国环境出版社，2013）关于图像镶嵌部分描述。

几何精校正和空间投影转换保证水华获取位置的几何准确度，也可为后续连续多时向水华监测提供相互匹配条件。根据目前业务需求和几何校正的普遍技术水准，基于参考影像或空间几何信息，开展几何精校正和空间投影转换，精度控制在 1 个像元内可以满足水华遥感监测需求。具体几何校正方法可参考《生态环境遥感监测技术》（中国环境出版社，2013）关于几何校正部分描述。

辐射定标，主要还是利用卫星遥感数据头文件提供的辐射定标系数，将各个波段的灰度值(digital number, DN)转换为各个波段的表观辐亮度值，其公式为：

$$L = \frac{DN - b}{g} \quad (1)$$

式中，L 为表观辐亮度；DN 为灰度值；b 为偏移量；g 为绝对定标系数增益。

需要注意的是，卫星遥感的辐射定标系数随着时间会有改变。辐射校正公式参考《航天光学遥感器辐射定标原理与方法》（科学出版社 2013，顾行发等编著）。

#### 5.3.2.1 大气层顶表观反射率计算

根据辐射定标获得的各波段表观辐亮度，按照以下公式可以得到各波段表观反射率：

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi L D^2}{F_0 \cos \theta_s} \quad (2)$$

式中， $\rho_{TOA}$  为大气层顶表观反射率（无量纲）， $\pi$  为常量（球面度 sr），L 为大气层顶入瞳的光谱辐射亮度（ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ），可以由公式（1）计算获得，D 为实际日地距离与平均日地距离的比值， $F_0$  为大气层顶的平均太阳光谱辐照度（ $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ ）， $\theta_s$  为太阳天顶角。L 和  $F_0$  均与传感器的具体波段有关，而 D 和  $\theta_s$  可以通过遥感过境的日期和时间以及

水体的经纬度计算获得。大气顶层表观反射率与辐射定标精度、卫星遥感数据 DN 值、观测地点经纬度、过境日期和时间有关，是未经过大气校正处理的遥感数据反映的真实物理量。

该计算公式参考自国家标准《卫星遥感影像植被指数产品规范》(GB/T 30115-2013)。

### 5.3.2.2 大气校正

可见和近红外波段的卫星遥感大气校正主要针对瑞利散射、水汽吸收及气溶胶的影响。可采用基于辐射传输模型的方法(如 6S 模型、Flash 大气校正模型等)进行大气校正,得到各波段地表反射率,也称为大气层底反射率  $\rho_{BOA}$ 。

具体大气校正方法可参考《生态环境遥感监测技术》(中国环境出版社, 2013)关于大气校正部分描述。

### 5.3.2.3 基于 DN 值的 NDVI 计算

$$NDVI_{DN} = \frac{DN(NIR) - DN(R)}{DN(NIR) + DN(R)} \quad (3)$$

式中:  $DN(NIR)$ —近红外波段的灰度值;

$DN(R)$ —红波段的灰度值;

$NDVI_{DN}$ 的取值范围为[-1, 1]。

### 5.3.2.4 大气层顶 NDVI 指数计算

大气层顶归一化植被指数 NDVI 的计算公式如下:

$$NDVI_{TOA} = \frac{\rho_{TOA}(NIR) - \rho_{TOA}(R)}{\rho_{TOA}(NIR) + \rho_{TOA}(R)} \quad (4)$$

式中,  $\rho_{TOA}(NIR)$  为近红外波段的大气层顶表观反射率,  $\rho_{TOA}(R)$  为红波段的大气层顶表观反射率,  $NDVI_{TOA}$  的取值范围为[-1, 1]。该指数直接由大气层顶反射率计算获得,虽然部分消除了大气的影晌,但大气层顶 NDVI 与具体的过境当天当地的大气气溶胶状况密切相关。

该计算公式参考国家标准《卫星遥感影像植被指数产品规范》(GB/T 30115-2013)关于大气层顶植被指数计算公式。

### 5.3.2.5 大气层底归一化植被指数计算

大气层底归一化植被指数又称为地面归一化植被指数 NDVI 的计算公式如下:

$$NDVI_{BOA} = \frac{\rho_{BOA}(NIR) - \rho_{BOA}(R)}{\rho_{BOA}(NIR) + \rho_{BOA}(R)} \quad (5)$$

式中,  $\rho_{BOA}(NIR)$  为近红外波段的大气层底表观反射率,  $\rho_{BOA}(R)$  为红波段的大气层顶表观反射率,  $NDVI_{BOA}$  的取值范围为[-1, 1]。该指数直接由地面反射率计算获得,如果大气校正足够准确的话,该指数与具体的过境当天当地的大气气溶胶状况无关,水华识别指数的阈值将保持稳定,对于 NDVI 识别水华,阈值可以为 0。该计算公式参考国家标准《卫星遥感影像植被指数产品规范》(GB/T 30115-2013)关于大气层底植被指数计算公式。

### 5.3.2.6 阈值分割和水华二值图计算

针对水体区域的  $NDVI_{DN}$  和  $NDVI_{TOA}$  数据,蓝藻水华的 NDVI 值要高于正常水体,由于未经过大气校正,判别蓝藻水华的 NDVI 阈值会随着不同影像发生变化,需要结合遥感图像目视识别或直方图统计加以确定,NDVI 高于阈值的为蓝藻水华;针对经过准确大气校正的水体区域的  $NDVI_{BOA}$  数据,判别水华区区别于正常水体的阈值可以设为 0, NDVI 高于 0 的像元为蓝藻水华。

蓝藻水华像元赋值为 1,其他地物(包括正常水体、云、陆地等)赋值为 0,获得水华二值图。

具体方法可参考《生态环境遥感监测技术》关于水华日常监测技术流程部分描述。

### 5.3.2.7 水华面积和水华面积比例计算

为了判断水华状况,需要获得水华分布的实际面积和水华面积占水体面积的比例。基于水华二值图可以统计水华像元总数量,水华像元数乘以该卫星遥感数据像元对应的实际面积,可以获得水华面积;基于无云条件下水体掩膜计算获得水体面积,水体像元数乘以

该卫星遥感数据像元对应的实际面积，可以获得水体面积；水华分布面积除以水体面积可以获得水华面积比例。

### 5.3.3 地面采样方法

因藻类生物在水中具有明显的垂直分布特征，所以，监测采样方法采用分层采样并制取混合样进行，通常样品采集分定量采样和定性采样两种。定量采样要求对样品的组成以及对各组份的含量需要用具体的数据来描述，所以对样品采集要求精确。主要参照《水和废水监测分析方法（第四版）》水生生物群落的测定中具体步骤进行。定性采样方法是从事物的内在规律性来研究事物的一种方法，通过对水环境指标的监测进行定性分析，对物质的组成有所了解。在定量采样的同时加入定性采样的方法能够更有效进行藻类群落的研究和评估。

### 5.3.4 地面监测频次

通过不同频次的采样方式，对藻类的生长趋势进行定期观测。因藻类的生物学特性，孔繁祥曾提出藻类水华形成过程可分为休眠、复苏、生长和上浮聚集的“四阶段理论”，即不同的时间藻类处于不同的生长阶段。故根据藻类生物学特点及气象条件情况，可将藻类监测的频次进行适当的调整。目前，本规范将水华监测频次归纳为常规监测、预警监测以及应急监测。常规监测的目的在于系统掌握监测区域藻类状况，了解其空间分布和时间分布特征。预警监测的目的在于及时掌握监测区域藻类生长和发展状况，以判断该区域是否存在水华，进而评估其程度和潜在威胁。应急监测的目的在于跟踪掌握监测区域藻类水华状况，评估其程度和潜在威胁，并判断发展态势。以期在科学规划监测频次的同时加强对水华的全面了解。

### 5.3.5 质量保证与质量控制

#### 5.3.5.1 卫星遥感影像数据质量

在进行水华遥感监测的数据处理之前，需要保证遥感影像原始数据的质量，检查波段有无条带，有无数据缺失，条带严重或数据缺失的遥感数据会严重影响水华遥感监测的识别精度；避免选择云层覆盖过多的数据，对于云层多的影像即使获得水华面积，也不能确定云层之下是否有水华存在，进而影响整体水华面积识别精度和水华评价精度；避免选择水体区域有大面积“耀斑”出现的遥感影像。在利用遥感反演水体水质和水华监测的时候，会受到水体镜面反射太阳光的影响，在水色遥感中，把太阳直射光在水体的镜面反射称为“耀斑”。当进入卫星传感器视场水体辐射信号大部分是直射太阳光的镜面反射时候，水体出现大面积“耀斑”现象，“耀斑”掩盖了水体的真实物理特性，严重干扰了水体水质参数的获取，此时不能进行水体水质参数遥感反演，也会影响水华遥感提取的精度。遥感影像的绝对辐射定标精度取决于定标系数的准确性，随着传感器的老化辐射定标系数一直在改变，处理监测数据时需要采用最接近卫星过境时刻发布的辐射定标系数。

数据质量保障依据来源于三湖一库蓝藻水华业务监测工作技术规范。

#### 5.3.5.2 卫星数据处理质量控制

为了保证水华提取指数的准确性，需要在空间配准、几何校正、云识别、水草识别、水陆区分等数据处理阶段进行质量控制，保证最终结果的可靠性。首先不同波段的数据几何配准精度要保证在一个像元之内；几何校正的精度控制在一个像元之内；另外，厚云较易识别，而薄云较难识别从而会影响水华的识别，云掩膜的精度会影响水华监测的精度；水陆混合像元会被误判为水华，所以水体掩膜准确性均影响水华监测的精度，需要控制精度在90%以上。

#### 5.3.5.3 水华遥感监测结果质量控制

一般以相近时间过境的高空间分辨率遥感影像获得的水华分布面积为相对真值，交叉验证采用的卫星遥感影像监测水华分布面积的精度。或者通过实地考察来辅助验证水华识别的精度，用来验证的同步点数量越多，结果可靠性越大。

#### 5.3.5.4 现场采样质量保证

(1) 制定合理的采样操作程序，在确定的采样时间、采样点、采样层次，用符合质量要求的设备采样，采水量尽量保持一致，保证采集的样品具有代表性和可比性。

(2) 保证所有监测设备处于良好的运行状态，并执行常规检查、维护及校准的操作规程，以确保野外数据的异质性和质量。

(3) 正确填写样品标签，包括样品编号、日期、水体名称、采样位置以及采集人姓名。

及时清洗所有接触过样品的采样设备，并仔细检查，防止采样污染。

(4) 样品运输过程中贮存温度不超过采样时的温度，必要时需准备冷藏设备，应仔细保管样品，以确保样品无破损、无污染，运输迅速。

(5) 按照要求分别保存各类样品，保存时检查固定液，必要时进行添加。

(6) 除了样品相关信息，采样时间、地点、水温、水文、气温、植被等也应有详细记录，确保样品数据的完整性。

#### 5.3.5.5 实验室分析质量保证

(1) 样品交接时应办理正式交接手续，由接收样品的工作人员记录其状态，检查是否异常或是否与相应检验方法中描述的标准状态有所偏离。

(2) 藻类鉴定和计数原始记录表应包括以下主要内容：浓缩或稀释倍数；两次（片）计数，对角线十格计数的详细结果；藻细胞总数、两次（片）计数误差；藻细胞浓度的计算结果；分析人、校核人签字等。

(3) 记录实验室分析过程中所取得的相应数据，并描述如何从原始数据到最终结果报告的过程、数据转换步骤。数据记录表须有记录人、校对人签字。

## 5.4 水华程度评价

### 5.4.1 评价指标

水华程度用于反映水华发生的强弱或轻重态势。水华程度评价指标为藻密度和水华面积占总水体面积比例。

### 5.4.2 评价方法

水华程度评价采用定量分级评价方法。依据藻密度和水华面积比例分别评价水华程度；当两项评价结果同时存在时，采用比较法综合评价水华程度。

### 5.4.3 水华程度分级标准

基于藻密度和水华面积比例评价，将水华程度分为五级，由轻到重顺序为：无明显水华、轻微水华、轻度水华、中度水华、重度水华。

#### 5.4.3.1 基于藻密度的水华程度分级标准

根据藻密度的高低评价水华程度，其分级标准及相应的特征描述见表 6。

表 6 基于藻密度评价的水华程度分级标准

藻密度 (个/L)	水华程度级别	特征描述
[0, 2.0×10 <sup>6</sup> )	无明显水华	水面无藻类聚集，水中基本识别不出藻类颗粒。
[2.0×10 <sup>6</sup> , 1.0×10 <sup>7</sup> )	轻微水华	水面有藻类零星聚集；或能够辨别水中有少量藻类颗粒。
[1.0×10 <sup>7</sup> , 5.0×10 <sup>7</sup> )	轻度水华	水面有藻类聚集成丝带状、条带状、斑片状等；或水中可见悬浮的藻类颗粒。
[5.0×10 <sup>7</sup> , 1.0×10 <sup>8</sup> )	中度水华	水面有藻类聚集，连片漂浮，未完全覆盖监测水体；或水中明显可见悬浮的藻类。
[1.0×10 <sup>8</sup> , ∞)	重度水华	水面有藻类聚集，连片漂浮，基本覆盖监测水体；或水中明显可见悬浮的藻类。

表 6“基于藻密度评价的水华程度分级标准”既适用于单个监测点位所代表水体的水华程度评价，也适用于部分或全部水体的水华程度评价。但在进行后者评价时，应以拥有能够代表相应水体状况的监测点位和监测数据为前提。在此基础上，根据不同级别水华程度的点位比例来判定这一监测水体的水华程度。具体评价方法如下：

(1) 当藻密度 < 2.0×10<sup>6</sup> 个/L 的监测点位占全部监测点位的比例高于 95% 时，判定监测水域水华程度为“无明显水华”；

(2) 当藻密度 ≥ 2.0×10<sup>6</sup> 个/L 且属于某一水华程度级别监测点位占全部监测点位的比例高于或等于 75% 时，判定监测水域水华程度为该级别；

(3) 当藻密度属于某一水华程度级别监测点位占全部监测点位的比例低于 75% 时，则

首先计算所有点位藻密度平均值，然后按该值所属水华程度级别判定监测水域的水华程度。  
5.4.3.2 基于水华面积比例评价的水华程度分级标准

根据水华面积比例的大小评价水华程度，其分级标准及相应的特征描述见表 7。

表 7 基于水华面积比例评价的水华程度分级标准

水华面积比例 (%)	水华程度	特征描述
0	无明显水华	水面未见明显水华；标准假彩色图像中水体呈现蓝色或蓝黑色。
(0, 10)	轻微水华	水面出现零星性水华；标准假彩色图像中水体内出现零星绯红色絮状斑块。
[10, 30)	轻度水华	水面出现局部性水华；标准假彩色图像中水体内局部出现绯红色絮状斑块。
[30, 60)	中度水华	水面出现区域性水华；标准假彩色图像中水体内出现区域性绯红色絮状斑块。
[60, 100]	重度水华	水面出现全面性水华；标准假彩色图像中水体内出现大范围绯红色絮状斑块。

表 7“基于水华面积比例评价的水华程度分级标准”适用于对整个水体水华程度的评价，监测水域应能够代表整个水体时才可进行评价。

#### 5.4.3.3 水华程度综合评价

当基于藻密度和水华面积比例的水华程度评价结果同时存在时，采用比较法进行水华程度综合评价，以其中的较重者作为水华程度最终评价结果，水华总体特征描述见表 6 和表 7。

#### 5.4.3.4 藻密度分级标准的确定

我国约有 2 万多个湖泊，占世界天然湖泊的 1/10，湖泊总水域面积达 7 万多平方公里，约占全国陆地总面积的 0.8%。据《中国环境质量报告》公布，截止 2013 年，全国监测的 60 个湖泊（水库）中，富营养化状态的湖泊（水库）占 25.0%。太湖、巢湖和滇池作为我国重要的淡水湖泊，均属于富营养状态湖泊，在 2010-2015 年太湖水体营养状态呈轻度富营养到中度富营养，以轻度富营养为主。巢湖营养状态为中营养-重度富营养，以轻度富营养为主。滇池呈轻度-重度富营养状态，以中度富营养为主。而藻类的发生与水体富营养化存在直接的关系，湖泊、水库等水体中过量的氮、磷等营养物质直接引起藻类及其他水生生物的繁殖，在贫营养或者中营养的水体中，较少出现水华现象。

针对我国湖库水华情况，选择太湖、巢湖和滇池作为分级的典型案例进行测算，其中将太湖、巢湖作为富营养化水平居中的代表，滇池作为富营养化相对较重的湖泊代表进行测算。借鉴已有的导则标准和专家意见，我们将 200 万个/L 作为分级标准的级别之一，当藻密度小于 200 万个/L 时，水华程度为“无明显水华”；大于 200 万个/L 时，水华程度为“轻微水华”。

根据近些年来的监测结果，巢湖水体中藻密度在 2010、2011、2012、2013、2014、2015 年数据均呈偏态分布，偏度依次为：1.54, 1.05, 1.42, 1.96, 2.28, 1.69，藻密度集中在 200-1000 万个/L，而对于大于 1000 万个/L 的出现频次位于长尾底部，数量明显降低（图 6）。另外，通过累计分布函数（是完整描述一个实数随机变量的概率分布，是概率密度函数的积分）对太湖历年监测数据进行测算，结果显示，在 4-9 月，太湖藻密度在 1000 万个/L 以下出现的频次累计占全部藻类出现频次比例的 75%，处于上四分位数位置（图 7）。所以，选择 1000 万个/L 作为“轻度水华”划分的界限。

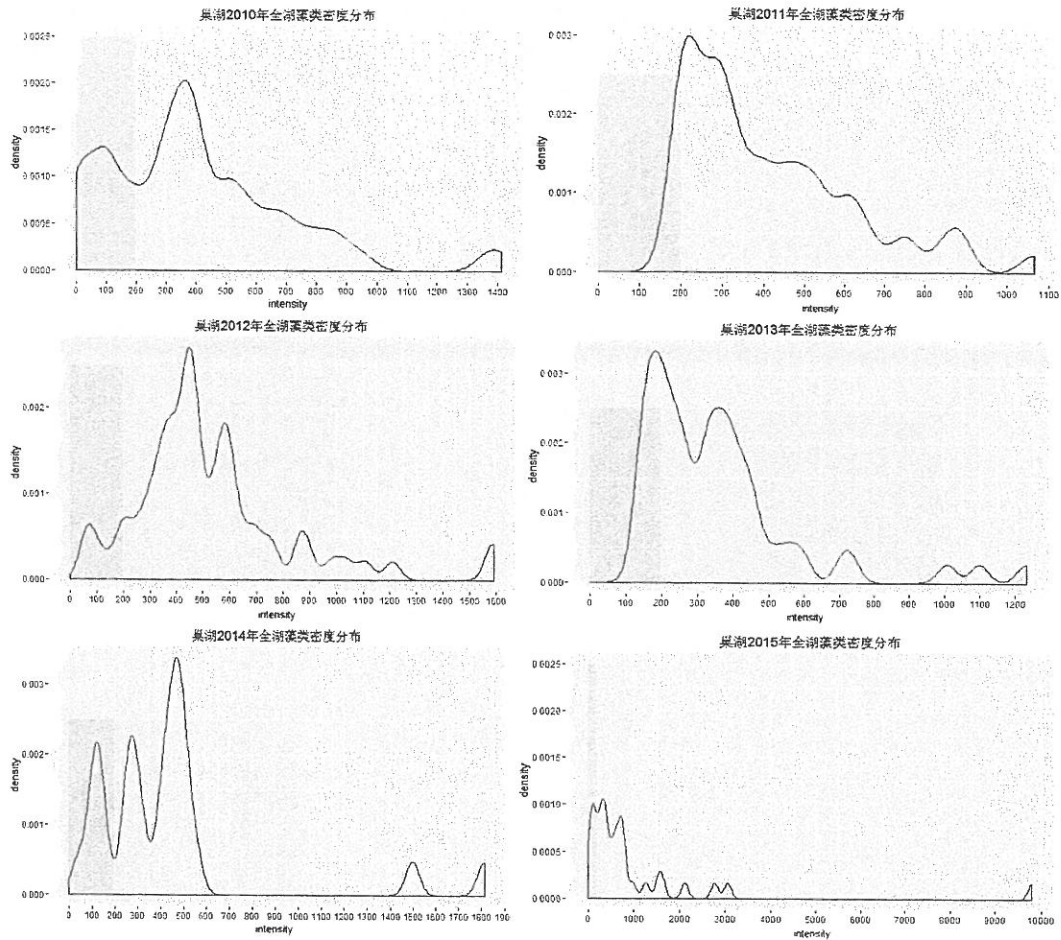


图 6 2010-2015 年巢湖藻密度分布

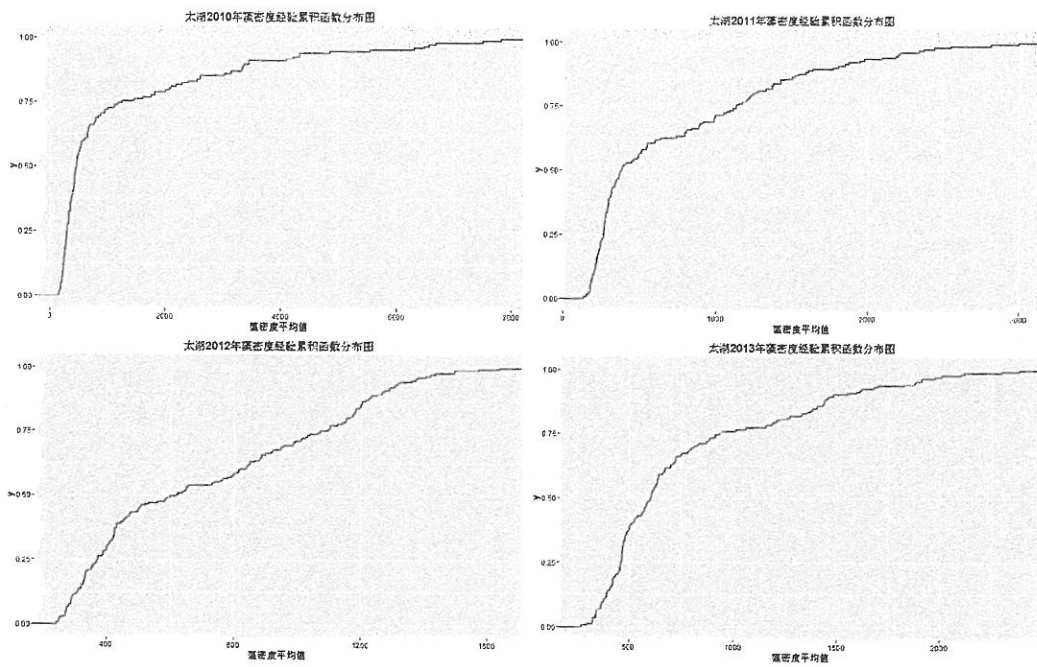


图 7 2010-2013 年太湖藻密度经验累积函数分布

滇池作为富营养程度较高的湖泊进行测算,在实际监测工作中发现,蓝藻密度达到 1000 万个/L 左右时,滇池湖面已可隐约观察到蓝藻飘浮带,意味着此时水文、气象、营养条件适宜蓝藻大量生长,有轻微的水华现象,但尚不足以称为水华暴发。当藻类数量达到 1 亿个/L 左右时,滇池湖面绿色的蓝藻飘浮带已非常明显,并且占据了 50% 以上的视野。另外,根据 2011-2015 年 4-9 月滇池藻密度测算,藻类在 5000 万个/L 以下出现的频次累计占全部藻类出现频次比例的 25%,处于下四分位数位置。故将 5000 万个/L 和 1 亿个/L 分别作为“中度水华”和“重度水华”划分的界限(图 8)。

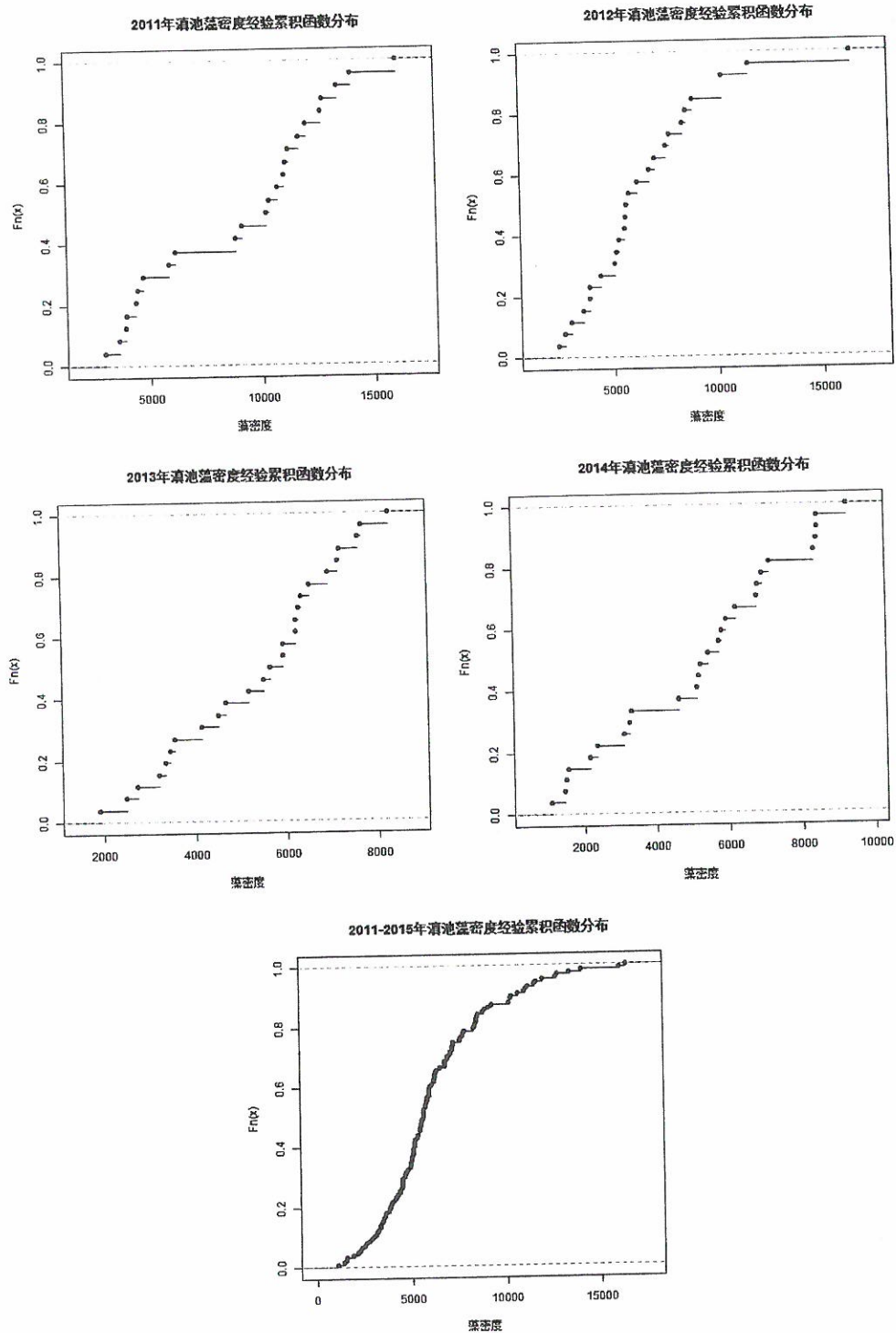


图 8 2011-2015 年滇池藻密度经验累积函数分布

#### 5.4.4 水华程度变化评价

##### 5.4.4.1 基本要求

开展不同时段水华变化评价时，必须满足以下条件，以保证数据的可比性。

(1) 评价指标必须相同。即，基于藻密度、水华面积比例、水华程度综合评价结果，分别进行不同时段水华比较和变化分析。

(2) 用于不同时段水华比较和变化分析的监测点位基本相同。

(3) 定性评价不同时段水华变化幅度和方向时必须以定量评价为依据。

##### 5.4.4.2 不同时段定量比较

不同时段定量比较是指同一监测点位或监测水域某一时段的水华状况与前一时段、上年同期或其他时段的水华状况进行定量比较和变化分析，比较内容包括藻密度、水华面积、水华程度、不同级别水华程度的频次比例等。

##### 5.4.4.3 水华程度变化评价

基于相同监测点位或监测水域，评价不同时段水华程度变化幅度和方向。将水华程度变化幅度和方向分为三类，分别是无明显变化、有所变化（加重或减轻）、明显变化（加重或减轻）。评价方法如下：

(1) 按下述方法评价。

①当水华程度等级不变时，则评价为无明显变化；

②当水华程度等级发生一级变化时，则评价为有所变化（加重或减轻）；

③当水华程度等级发生两级以上（含两级）变化时，则评价为明显变化（加重或减轻）。

(2) 按水华程度组合类别比例评价：

设 $\Delta G$ 为后时段与前时段“无明显水华-轻微水华”出现频次比例百分点之差； $\Delta D$ 为后时段与前时段“中度水华-重度水华”频次比例百分点之差。

①当 $|\Delta G - \Delta D| \leq 5\%$ 时，则评价为无明显变化；

②当 $5\% < |\Delta G - \Delta D| \leq 10\%$ 时，则评价为有所变化（加重或减轻）；

③当 $|\Delta G - \Delta D| > 10\%$ 时，则评价为明显变化（加重或减轻）。

##### 5.4.4.4 基于藻密度的水华程度变化测算结果

###### 5.4.4.4.1 太湖测算结果

(1) 太湖湖体

2010-2015 年 4-9 月对太湖藻密度进行监测，每年采样时间间隔均匀，在 2010-2015 年分别对太湖进行监测了 17 次、9 次、9 次、9 次、10 次和 12 次。水华程度评价结果如表 8：

表 8 2010-2015 年太湖基于藻密度的水华程度评价结果

水华程度频次比例 (%)	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
轻微水华	77.8	66.7	66.7	40	75	38.5
轻度水华	22.2	33.3	33.3	60	25	61.5

根据水华程度组合类别比例评价方法对不同年际间水华程度变化情况进行比较，结果显示（表 9）：2011 年与 2010 年相比明显加重；2012 年较 2011 年无明显变化；2013 年较 2012 年明显加重；2014 年较 2013 年明显减轻；2015 年较 2014 年明显加重。整体评价结果与实际情况较相符。从藻密度变化趋势看，2010-2015 年藻密度平均值分别为 629 万个/L、1036 万个/L、987 万个/L、1054 万个/L、754 万个/L 和 1100 万个/L，藻密度变化趋势与水华程度变化趋势基本一致。

表 9 2010-2015 年太湖基于藻密度的水华程度变化情况



水华程度	2011-2010年	2012-2011年	2013-2012年	2014-2013年	2015-2014年
$\Delta G-\Delta D$	-11.1	0.0	-26.7	35.0	-36.5

### (2) 沙渚饮用水源地

2010-2015年4-9月对太湖沙渚饮用水源地藻密度进行监测,采样时间为1次/天。在2010-2015年分别对太湖进行监测了154次、168次、183次、183次、183次和183次。水华程度评价结果如表10:

表10 2010-2015年太湖沙渚基于藻密度的水华程度评价结果

水华程度频次比例 (%)	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
无明显水华	59.7	45.8	45.4	26.8	4.9	12.0
轻微水华	27.9	43.5	42.1	67.8	63.4	41.0
轻度水华	12.3	10.7	12.6	5.5	31.7	47.0

根据水华程度组合类别比例评价方法对不同年际间水华程度变化情况进行比较,结果显示(表11):2011年与2010年相比无明显变化;2012年较2011年无明显变化;2013年较2012年有所减轻;2014年较2013年明显加重;2015年较2014年明显加重。整体评价结果与实际情况较相符。从藻密度变化趋势看,2010-2015年藻密度平均值分别为342万个/L、379万个/L、431万个/L、384万个/L、928万个/L和1141万个/L,藻密度变化趋势与水华程度变化趋势基本一致。

表11 2010-2015年太湖沙渚基于藻密度的水华程度变化情况

水华程度	2011-2010年	2012-2011年	2013-2012年	2014-2013年	2015-2014年
$\Delta G-\Delta D$	1.7	-1.8	7.1	-26.3	-15.3

### (3) 金墅港饮用水源地

2010-2015年4-9月对太湖金墅港饮用水源地藻密度进行监测,采样时间为1次/天。在2010-2015年分别对太湖进行监测了154次、168次、183次、183次、183次和183次。水华程度评价结果如表12:

表12 2010-2015年太湖金墅港基于藻密度的水华程度评价结果

水华程度频次比例 (%)	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
无明显水华	65.6	75.0	23.5	46.4	32.2	2.2
轻微水华	33.1	25.0	76.5	51.9	67.8	74.3
轻度水华	1.3	0.0	0.0	1.6	0.0	23.5

根据水华程度组合类别比例评价方法对不同年际间水华程度变化情况进行比较,结果显示(表13):2011年与2010年相比无明显变化;2012年较2011年无明显变化;2013年较2012年无明显变化;2014年较2013年无明显变化;2015年较2014年明显加重。整体评价结果与实际情况较相符。从藻密度变化趋势看,2010-2015年藻密度平均值分别为205万个/L、160万个/L、272万个/L、260万个/L、318万个/L和734万个/L,藻密度变化趋势与水华程度变化趋势基本一致。

表13 2010-2015年太湖金墅港基于藻密度的水华程度变化情况

水华程度	2011-2010年	2012-2011年	2013-2012年	2014-2013年	2015-2014年
$\Delta G-\Delta D$	1.3	0.0	-1.7	1.7	-23.5

(4) 渔洋山饮用水源地

2010-2015年4-9月对太湖渔洋山饮用水源地藻密度进行监测, 采样时间为1次/天。在2010-2015年分别对太湖进行监测了154次、168次、183次、183次、183次和183次。水华程度评价结果如表14:

表14 2010-2015年太湖渔洋山基于藻密度的水华程度评价结果

水华程度频次比例 (%)	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
无明显水华	75.3	93.5	77.6	36.1	65.0	60.1
轻微水华	24.7	6.5	22.4	63.9	35.0	39.9

根据水华程度组合类别比例评价方法对不同年际间水华程度变化情况进行比较, 结果显示(表15): 2011年与2010年相比无明显变化; 2012年较2011年无明显变化; 2013年较2012年无明显变化; 2014年较2013年无明显变化; 2015年较2014年无明显变化。整体评价结果与实际情况较相符。从藻密度变化趋势看, 2010-2015年藻密度平均值分别为160万个/L、104万个/L、128万个/L、253万个/L、180万个/L和207万个/L, 藻密度变化趋势与水华程度变化趋势基本一致。

表15 2010-2015年太湖渔洋山基于藻密度的水华程度变化情况

水华程度	2011-2010年	2012-2011年	2013-2012年	2014-2013年	2015-2014年
$\Delta G-\Delta D$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

5.4.4.4.2 巢湖测算结果

2010-2015年4-9月对巢湖藻密度进行监测, 每年采样时间间隔均匀, 在2010-2015年分别对巢湖进行监测了67次、53次、63次、57次、48次和32次。水华程度评价结果如表16:

表16 2010-2015年巢湖基于藻密度的水华程度评价结果

水华程度频次比例 (%)	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
无明显水华	28.4	5.7	7.9	24.6	14.6	25.0
轻微水华	68.7	92.5	84.1	70.2	77.1	50.0
轻度水华	3.0	1.9	7.9	5.3	8.4	21.4
中度水华	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6

根据水华程度组合类别比例评价方法对不同年际间水华程度变化情况进行比较, 结果显示(表17): 2011年与2010年相比无明显变化; 2012年较2011年有所加重; 2013年较2012年无明显变化; 2014年较2013年无明显变化; 2015年较2014年明显加重。整体评价结果与实际情况较相符。从藻密度变化趋势看, 2010-2015年藻密度平均值分别为394万个/L、419万个/L、532万个/L、513万个/L和1089万个/L, 藻密度变化趋势与水华程度变化趋势基本一致。

表17 2010-2015年巢湖基于藻密度的水华程度变化情况

水华程度	2011-2010年	2012-2011年	2013-2012年	2014-2013年	2015-2014年
$\Delta G-\Delta D$	1.1	-6.2	2.8	-3.1	-20.3

5.4.4.4.3 滇池测算结果

2010-2015年4-9月对滇池藻密度进行监测, 每年采样时间间隔均匀, 在2010-2015年分别对滇池进行监测了21次、24次、26次、26次、27次和30次。水华程度评价结果如表18:

表18 2010-2015年滇池基于藻密度的水华程度评价结果

水华程度频次比例 (%)	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年
--------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

轻度水华	19.0	29.2	26.9	38.5	37.0	40.0
中度水华	42.9	16.7	57.7	61.5	63.0	60.0
重度水华	38.1	54.2	15.4	0.0	0.0	0.0

根据水华程度组合类别比例评价方法对不同年际间水华程度变化情况进行比较, 结果显示(表 19): 2011 年与 2010 年相比明显减轻; 2012 年较 2011 年无明显变化; 2013 年较 2012 年明显减轻; 2014 年较 2013 年无明显变化; 2015 年较 2014 年无明显变化。整体评价结果与实际情况较相符。从藻密度变化趋势看, 2010-2015 年藻密度平均值分别为 9469 万个/L、8963 万个/L、6579 万个/L、5336 万个/L、5174 万个/L 和 5272 万个/L, 藻密度变化趋势与水华程度变化趋势基本一致。

表 19 2010-2015 年滇池基于藻密度的水华程度变化情况

水华程度	2011-2010 年	2012-2011 年	2013-2012 年	2014-2013 年	2015-2014 年
$\Delta G-\Delta D$	10.1	-2.2	11.6	-1.5	3.0

#### 5.4.4.5 基于水华面积比例的水华程度变化测算结果

##### 5.4.4.5.1 太湖测算结果

2010-2015 年 4-8 月对太湖水华面积进行监测, 受云层等气象因素影响, 在 2010-2015 年对太湖进行有效监测次数分别为 88 次、99 次、115 次、107 次、104 次和 85 次。水华程度评价结果如表 20:

表 20 2010-2015 年太湖基于水华面积比例的水华程度评价结果

水华程度频次比例 (%)	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
无明显水华	31.4	34.0	38.6	26.8	38.6	24.2
轻微水华	21.6	28.8	34.6	43.1	29.4	31.4
轻度水华	3.9	2.0	2.0	0.0	1.3	5.9
中度水华	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

根据水华程度组合类别比例评价方法对不同年际间水华程度变化情况进行比较, 结果显示(表 21): 2011 年与 2010 年相比明显减轻; 2012 年较 2011 年相比明显减轻; 2013 年较 2012 年无明显变化; 2014 年较 2013 年无明显变化; 2015 年较 2014 年明显加重。整体评价结果与实际情况较相符。另外, 从每年监测到的累计水华面积来看, 2010-2015 年累计监测到的水华面积分别为 5084 km<sup>2</sup>、3481 km<sup>2</sup>、2576 km<sup>2</sup>、2539 km<sup>2</sup>、3048 km<sup>2</sup> 和 6967 km<sup>2</sup>, 平均监测面积为 58 km<sup>2</sup>、35 km<sup>2</sup>、22 km<sup>2</sup>、24 km<sup>2</sup>、29 km<sup>2</sup> 和 74 km<sup>2</sup>。水华平均面积增大、减小的趋势与水华程度加重、减轻的评价结果基本一致。

表 21 2010-2015 年太湖基于水华面积的水华程度变化情况

水华程度	2011-2010 年	2012-2011 年	2013-2012 年	2014-2013 年	2015-2014 年
$\Delta G-\Delta D$	10.5	10.5	-3.3	-2.0	-12.4

##### 5.4.4.5.2 巢湖测算结果

2010-2015 年 4-8 月对巢湖水华面积进行监测, 受云层等气象因素影响, 在 2010-2015 年对巢湖进行有效监测次数分别为 84 次、102 次、110 次、102 次、102 次和 85 次。水华程度评价结果如表 22:

表 22 2010-2015 年巢湖基于水华面积比例的水华程度评价结果

水华程度频次比例 (%)	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
无明显水华	18.1	53.1	43.8	49.7	32.7	29.6
轻微水华	38.4	15.4	25.5	17.0	31.4	19.7

轻度水华	4.3	2.1	2.6	0.0	2.6	3.3
中度水华	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	3.3

根据水华程度组合类别比例评价方法对不同年际间水华程度变化情况进行比较, 结果显示(表 23): 2011 年与 2010 年相比明显减轻; 2012 年较 2011 年相比无明显变化; 2013 年较 2012 年无明显变化; 2014 年较 2013 年无明显变化; 2015 年较 2014 年明显加重。整体评价结果与实际情况较相符。另外, 从每年监测到的累计水华面积来看, 2010-2015 年累计监测到的水华面积分别为 1501 km<sup>2</sup>、982 km<sup>2</sup>、1161 km<sup>2</sup>、328 km<sup>2</sup>、1745 km<sup>2</sup> 和 3034 km<sup>2</sup>, 平均监测面积为 18 km<sup>2</sup>、10 km<sup>2</sup>、11 km<sup>2</sup>、3 km<sup>2</sup>、17 km<sup>2</sup>、36 km<sup>2</sup>。水华平均面积增大、减小的趋势与水华程度加重、减轻的评价结果基本一致。

表 23 2010-2015 年巢湖基于水华面积的水华程度变化情况

水华程度	2011-2010 年	2012-2011 年	2013-2012 年	2014-2013 年	2015-2014 年
△G-△D	11.3	1.4	-2.6	-2.6	-18.0

#### 5.4.4.5.3 滇池测算结果

2010-2015 年 4-8 月对滇池水华面积进行监测, 受云层等气象因素影响, 在 2010-2015 年分别对滇池进行监测了 28 次、50 次、52 次、65 次、31 次和 27 次。水华程度评价结果如表 24:

表 24 2010-2015 年滇池基于水华面积比例的水华程度评价结果

水华程度频次比例 (%)	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
无明显水华	19.6	26.0	10.0	13.5	53.2	59.1
轻微水华	33.3	41.6	47.8	50.0	10.6	2.3
轻度水华	2.0	5.2	0.0	4.2	2.1	0.0
中度水华	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

根据水华程度组合类别比例评价方法对不同年际间水华程度变化情况进行比较, 结果显示(表 25): 2011 年与 2010 年相比明显减轻; 2012 年较 2011 年相比有所加重; 2013 年较 2012 年有所减轻; 2014 年较 2013 年无明显变化; 2015 年较 2014 年无明显变化。整体评价结果与实际情况较相符。因滇池水域自 2014 年以来, 遥感数据获取频次不稳定, 且数量较 2010-2013 年明显减少, 累计水华面积及平均水华面积无可比性, 故不进行此部分分析。

表 25 2010-2015 年滇池基于水华面积的水华程度变化情况

水华程度	2011-2010 年	2012-2011 年	2013-2012 年	2014-2013 年	2015-2014 年
△G-△D	14.6	-9.8	5.8	0.3	-2.5

## 6 与开题报告的差异说明

本标准编制征求意见稿的主要技术内容与标准开题报告中的设想基本没有差异。

## 7 标准实施建议

本技术规范为现阶段水华遥感与地面监测和评价的指导性技术规范, 建议各地综合考虑实际情况进行实施。建议规范发布实施后, 根据实施情况及水华监测与评价的技术发展情况适时对本规范进行修订, 同步加强相关科学研究。

本技术规范执行过程中, 在利用遥感监测手段监测蓝藻水华时, 建议各地结合实际情况准确剔除水草和水上养殖区域, 避免误判为水华; 同时水华识别阈值尽量客观选取, 提高水华识别精度。在现场开展水华监测时, 建议同时监测水环境相关指标, 用于辅助进一步分析水华发生原因、趋势等。在进行水华程度评价时, 可分别基于藻类密度及水华面积比例进行水华程度评价。当二者同时存在时, 才可采用最大值法进行综合评价。

## 8 参考文献

- [1] 周云龙,于明.水华的发生、危害和防治[J].生物学通报.2004, 39(6).
- [2] 孔繁翔,高光.大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J].生态学报.2005, 25(3):589-595.
- [3] 孔繁翔,马荣华.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.
- [4] 秦伯强,王小冬等.太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策[J].地球科学进展.2007, 22(9)896-906.
- [5] 林启才,刘德富等.河流水华暴发成因分析及其生态恢复研究初探[J].人民长江.2007, 38(11):127-128.
- [6] 李英,蒋固政.水华成因分析与防治措施研究进展[EB/OL].2010,<http://wenku.baidu.com/view/f91a32360b4c2e3f57276300.html>.
- [7] 胡宗达,周元清.水华蓝藻毒素研究概述.云南环境科学[J].2004, 23(3):8-11.
- [8] 畜均康.蓝藻毒素及其检测方法的研究进展[J].上海环境科学,1996,9(15):38-41.
- [9] 卢大远,刘培刚等.汉江下游突发水华的调查研究[J].环境科学研究.2000, 13(2):28-31.
- [10] 况琪军,谭渝云等.汉江中下游江段藻类现状调查及水华成因分析[J].长江流域资源与环境.2000, 9(1)63-70.
- [11] 宋立荣,张婷,郑凌凌.水华蓝藻何以肆虐[J]. 生命世界, 2007(8): 36-41.
- [12] 李洪斌. 基于神经网络的藻类水华建模与预测研究[D]. 2007, 华中科技大学.
- [13] 沈强,胡菊香等.我国蓝藻水华发生格局及监控预警现状[J]. 河海大学学报.2010. (38)增刊 2: 373-377.
- [14] Harmful microalgae blooms (HAB); problematic and conditions that induce them [J]. Marine Pollution Bulletin, 2006. 53: p. 620-630.
- [15] 多吉利. 蓝藻水华的危害与治理[EB/OL]. 2011. <http://www.duojili.cn/article/1/200901056038.html>.
- [16] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [17] 于旭青. 富营养化水体中藻类突发性增长生长特性的研究[D]. 2009, 西南交通大学.
- [18] 过伟,王晔等. YSI6600 型水质多参数监测仪在太湖藻类监测中的应用[J].甘肃科技, 2008(23): 57-58.
- [19] 段婷婷.水源水中藻类监测及水质变化原因分析[D]. 2009, 西安建筑科技大学.
- [20] 徐云麟,李立新等.湖泊藻类生长动力学研究——以镜泊湖为例[J].北京大学学报(自然科学版), 1991(06): 725-737.
- [21] Bartram J, Burch M, et al. Situation assessment, planning and management// Chorus I, Bartram J, eds. Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management, London: Taylor & Francis, 1999: 179-209.
- [22] Phli F. Culverhouse. Human and machine factors in algae monitoring performance [J]. ECOLOGICAL INFORMATICS, 2007. 2: 361-366.
- [23] Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing. PhD Thesis. Amsterdam: Vrije Universiteit, 1993.
- [24] Katarzyna Izidorczyk et al. Establishment of an Alert Level Framework for cyanobacteria in drinking water resources by using the Algae Online Analyser for monitoring cyanobacterial chlorophyll a [J]. Water research 2009. 43: p. 989-996.
- [25] Steiberg CEW and Hartmann HM. Planktonic bloom forming cyanobacteria and the eutrophication of lake and rivers [J]. Freshwater Biol. 1988, 20: 279-287.
- [26] data [J]. International Journal of remote sensing. 2004(25): 3411-3422.

- [27]Cracknell A P, Newcombe S K, et al.. The ABDMAP (Algal bloom detection, monitoring and prediction) concerted action [J]. International journal of remote sensing. 2001, 22: 205-247.
- [28]Kutser T., Sipolgas L., Kallio K. Bio-optical Modeling and Detection of Cyanobacterial Blooms [J]. Baltic Sea Optics Workshop-Stockholm, 2001.
- [29]Peña-Martínez R, Domínguez J A and Ruiz-Verdú A. Mapping of photosynthetic pigments in Spanish inland waters using MERIS imagery, Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium, Salzburg, Austria. 6-10 September 2004. ESA SP-572 (Paris: European Space Agency), April 2005.
- [30]Randolph K, Wilson J, et al. Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll a and phycocyanin [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(11): 4009-4019.
- [31]Kutser T., Metsamaa L., et al.. Suitability of MODIS 250 m resolution band data for quantitative mapping of cyanobacterial blooms [J]. Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol. 2006, 55: 318-328.
- [32]Yang D, Pan D. Hyperspectral retrieval model of phycocyanin in case II waters [J]. Chinese Science Bulletin. 2006(51): 149-153.
- [33]Levine S, Morrissey L A. Detection of Cyanobacterial Blooms Using Remote Sensing. Vermont Water Resources and Lake Studies Center Annual Technical Report [EB/OL], 2004. [http://water.usgs.gov/wrri/AnnualReports/2004/FY2004\\_VT\\_Annual\\_Report.pdf](http://water.usgs.gov/wrri/AnnualReports/2004/FY2004_VT_Annual_Report.pdf).
- [34]Vincent R K, Qin X M, et al.. Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie. Remote Sens [J]. Environ. 2004, 89(3), 381-392.
- [35]Gons H, Hakvoort H, et al. Optical detection of cyanobacterial blooms [J]. Harmful Cyanobacteria, Aquatic Ecology Series, 2005(3): 177-199.
- [36]Simis S G H, Peters S W M, et al. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water [J]. Limnol. Oceanogr., 2005, 50(1): 237-245.
- [37]Reinart A., Kutser T. Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea [J]. Remote Sensing of Environment. 2006, 102: 74-85.
- [38]胡雯, 吴文玉, 等. 用 FY-1C/CAVHRR 数据估算巢湖蓝藻叶绿素的含量 [J]. 南京气象学院学报, 2002a, 25(1): 124-128.
- [39]胡雯, 杨世植, 等. NOAA 卫星监测巢湖蓝藻水华的试验分析 [J]. 环境科学与技术, 2002b, 25(1): 16-18.
- [40]黄家柱, 赵锐. 卫星遥感监测太湖水域蓝藻暴发 [J]. 遥感信息. 1999.4: 43-44.
- [41]李旭文, 季耿善, 等. 太湖梅梁湾蓝藻生物量遥感估算 [J]. 国土资源遥感. 1995.2: 23-29.
- [42]马荣华, 孔维娟, 等. 基于 MODIS 影像估测太湖蓝藻暴发期蓝藻素含量 [J]. 中国环境科学, 2009(29): 254-260.
- [43]黄家柱, 赵锐. 卫星遥感监测太湖水域蓝藻暴发 [J]. 遥感信息, 1999(4): 43-44.
- [44]王海君, 李云梅. 用 ASTER 数据监测梅梁湖湖区蓝藻分布的方法 [J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2005, 28(1): 103-106.
- [45]马荣华, 孔繁翔, 等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识 [J]. 湖泊科学, 2008, 20(6): 687-694.
- [46]陈云, 戴锦芳. 基于遥感数据的太湖蓝藻水华信息识别方法 [J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 179-183.
- [47]徐京萍, 张柏, 等. 基于 MODIS 数据的太湖藻华水体识别模式 [J]. 湖泊科学, 2008, 20(2).
- [48]周立国, 冯学智, 等. 太湖蓝藻水华的 MODIS 卫星监测 [J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 203-207.
- [49]李国砚, 张仲元, 等. MODIS 影像的大气校正及在太湖蓝藻监测中的应用 [J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 160-166.
- [50]段洪涛, 张寿选, 等. 太湖蓝藻水华遥感监测方法 [J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 145-152.
- [51]杨顶田, 潘德炉. 蓝藻的卫星遥感研究进展 [J]. 国土资源遥感, 2006, 4: 1-5.

- [52]ANZECC & ARMCANZ. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality [EB/OL]. (2000-10)[2014-10-5]. <http://www.doc88.com/p-6781172684772.html>.
- [53]GB 3838-2002.地表水环境质量标准[S].