

附件 19

《水生植被遥感监测技术规范（征求意见稿）》
编制说明

《水生植被遥感监测技术规范》

标准编制组

二〇二六年一月

项目名称：水生植被遥感监测技术规范

项目统一编号：2023-6

承担单位：生态环境部卫星环境应用中心、中国科学院空天信息创新研究院、
生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究
中心、生态环境部太湖流域东海海域生态环境监督管理局生态
环境监测与科学研究中心

编制组主要成员：赵焕、王晨、王雪蕾、贾兴、张浩彬、王玉、黄莉、申茜、
李瑞雯、李辈辈

卫星环境应用中心技术管理负责人：邵圆圆、吴传庆

生态环境监测司项目负责人：孔东星

目 录

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	1
2.1	水生植被遥感监测的重要性	1
2.2	相关生态环境标准和生态环境管理工作的需要	3
2.3	相关法律法规要求	4
3	国内外相关分析方法研究	5
3.1	主要国家、地区及国际组织相关分析方法研究	5
3.2	国内相关分析方法研究	6
3.3	文献资料研究	7
4	标准制订的基本原则和技术路线	10
4.1	标准制订（修订）的基本原则	10
4.2	标准制订（修订）的技术路线	10
5	标准主要技术内容	11
5.1	标准适用范围	11
5.2	术语和定义	11
5.3	监测内容与要求	13
5.4	技术流程与方法	14
6	与开题报告的差异说明	24
7	标准实施建议	24
8	参考文献	25

《水生植被遥感监测技术规范（征求意见稿）》 编制说明

1 项目背景

1.1 任务来源

生态环境部于2023年10月发布《关于开展2023年度国家生态环境标准项目实施工作的通知》（环办法规函〔2023〕340号）文件，下达了《湖库水生植被遥感提取与野外核查技术指南》标准制订任务，项目统一编号为2023-6。

本标准由生态环境部卫星环境应用中心（以下简称卫星中心）承担，参加单位包括：中国科学院空天信息创新研究院（以下简称空天院）、生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心（以下简称长江局监测科研中心）与生态环境部太湖流域东海海域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心（以下简称太湖局监测科研中心）。

1.2 工作过程

2023年10月，项目正式立项，卫星中心启动《湖库水生植被遥感提取与野外核查技术指南》研究工作，组建编制团队，邀请空天院、长江局监测科研中心、太湖局监测科研中心共同开展本标准制定工作，制定编制大纲与方案。

2023年10月至2024年7月，基于业务工作需要，调阅国内外相关资料，总结前期湖库水生植被遥感监测工作经验，编制《湖库水生植被遥感提取与野外核查技术指南（试行）》开题报告和草案初稿。

2024年7月至2025年5月，进一步修改标准草案和开题报告。

2025年6月18日，生态环境部生态环境监测司以线上形式组织召开了本标准的开题论证会。经质询与讨论，专家一致认为本标准定位基本准确，提供的材料齐全、内容完整，对国内外标准及文献进行了充分调研，技术路线合理可行。专家组一致同意通过开题论证，并建议标准名称更名为《水生植被遥感监测技术规范》。会后，标准编制组认真吸取专家意见与建议，经过多次内部讨论和修改完善，形成标准征求意见稿及编制说明。

2025年10月15日，监测司组织召开本标准的征求意见稿技术审查会，专家组通过听取汇报、审核资料，提出意见及建议，经质询、讨论，专家组一致同意通过技术审查。会后编制组根据专家意见进一步修改完善。

2 标准制订的必要性分析

2.1 水生植被遥感监测的重要性

我国湖泊水库众多，河流水系发达。然而，随着区域气候环境变化和人类活动干扰加剧，湖库萎缩和消亡严重、河流断流干涸、水质持续恶化、富营养化趋势逐渐加剧，水生态系统总体处于退化状态。鱼类资源下降，水生植被类型减少、面积减小，生物多样性降低。水生植被是水生态系统的重要组成部分，在维持水生态系统平衡、促进物质循环和净化等方面发

挥着积极作用，在水生态系统中起着稳定器的作用。水生植被在生长过程中，通过吸收底泥中的氮、磷等矿质营养物质，使水体无机氮、磷浓度大幅下降，从而促使叶绿素 a 浓度下降，抑制藻类生长，同时可降低水体流速和波浪强度，减少底泥的扰动，抑制沉积物再悬浮，加速水体中的悬浮物与藻体沉降等^[1]。

水生植被在维持河流、湖库生态系统稳定性方面发挥了重要作用。依据浅水湖泊稳态转换理论，水生植被的丰度与覆盖度决定湖泊稳态类型，其时空分布特征直接反映生态系统健康状况^[2]。水生植被的覆盖度及其变化趋势能够反映出湖泊生态系统的健康程度，当水生植物覆盖度达到一定程度时，湖泊一般可保持清水稳态，水生植物的恢复与自然拓殖往往是湖泊生态系统向好的一个明显标志，因此掌握水生植被的空间分布及动态信息是湖泊稳态研究和评价的关键和重要基础，也可为湖泊科学管理提供理论指导^[3]。在富营养化严重的湖泊中藻类逐渐替代高等植物成为湖泊中的优势种群，湖泊逐渐从草型湖泊演变为藻型湖泊，水生植被的衰亡程度可以反映出整个湖泊的富营养化程度，而历史的湖泊水生植被覆盖度，可以反映出湖泊的富营养化过程^[4]。水生植被繁茂的湖泊通常呈现清澈水质，属于典型的清水稳态，其生态系统结构相对健全，生态功能表现出更高的多样性^[5]。

水生植被在河流生态系统也扮演了重要的角色。水生植被的生长状况反映着河流生态系统整体环境的健康程度，已被广泛用作评估河流生态系统健康状况的指标。在群落结构与生物多样性方面，水生植被的覆盖率决定了河流中鱼类的生物多样性，两者呈正相关关系，适量的植被能够为鱼类提供良好的栖息环境，而过多或过少的植被则会抑制鱼类的生长和繁殖^[6]。在水文与地貌影响方面，水生植被能够改变水动力特性，增强河床稳定性，进而调控沉积物分布^[7]。水生植被的生长状况能够反映水体的物理和化学特性，由于水生植被的生长会受到水体透明度和水位波动等环境因素的限制，所以水生植被覆盖率越高，表明水体中的固体悬浮总量和水位波动较小^[8]。水生植物群落的多样性也能够反映人类活动对河流健康的负面影响，在人类活动影响较大的河流中，植物多样性显著降低。综合而言，水生植被能通过其生物特性反映河流的生态健康，还能通过与其物理环境的相互作用提供全面的生态评估信息。因此，掌握河流中水生植被的空间分布及动态信息在未来的河流生态系统恢复和管理中将发挥关键作用^[9]。

随着区域环境气候变化和人类活动干扰加剧，我国部分地区面临着湖泊数量减少，湖泊面积萎缩，河流断流干涸、湖库和河流水环境污染和富营养化逐步加剧等问题，水生植被的分布和面积都发生了巨大的变化。因湖库和河流内源污染物释放和外源污染物的排污，草食性鱼类啃食水生植被，水利工程调度未考虑水生植被正常生长的水文节律，采砂、水产养殖以及不合理的清淤工程对水生植被原生种子库造成破坏等因素，导致我国部分湖库和河流水生植被退化，水生植被覆盖度严重降低^[10]。为了恢复这些区域的水生植被，改善水生态系统健康，需要进行大面积、准确、快速的水生植被动态监测。

传统的调查手段主要为地面布设点位并观测水生植被物种、空间分布，通过空间插值获得河流和湖库水生植被空间分布，但地面实测费时费力，测量时间跨度较长，测量范围有限。相比传统的地面调查手段，遥感技术具有时效性强、分辨率高、资料获取快捷、长时间序列比对与评价明显、费用低廉的特点。利用遥感技术开展水生植被监测，一方面可以动态、大范围实时地监测水生植被分布状况，获取水生植被类型、面积、分布区域等信息，大大提高

水生植被监测的工作效率并确保监测结果的客观性和准确性；另一方面还可针对水生植被结果进行评估，在水生植被生长期间开展实时监测，为管理部门制定水生植被恢复措施提供有力技术支持。新的环境形势下，环境监管工作要更加科学、高效，遥感技术作为新兴技术手段，目前已逐渐在环境监测领域实现业务化应用，将其应用于水生植被监测，将进一步提高监测的准确性和效率。

为高效、准确利用遥感技术进行水生植被监测，对全国各级环境保护单位的管理人员、科研人员、监测人员提供相应的技术指导，迫切需要制定水生植被遥感监测技术规范，制定遥感数据源、遥感监测方法、野外核查等方面的统一标准，确保监测产品具有规范性、科学性与权威性，为各业务部门开展监测提供技术参考。

2.2 相关生态环境标准和生态环境管理工作的需要

党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央从中华民族永续发展的高度出发，创造性地提出了一系列新理念新思想新战略，形成了习近平生态文明思想，引领和推动我国生态环境保护发生历史性、转折性、全局性变化。2014年全国两会，习近平总书记强调“鱼逐水草而居，鸟择良木而栖”。

“十三五”时期，重点流域水环境综合治理工作有序推进，一批专项规划和重大治理工程顺利实施，全国第一批流域水环境综合治理与可持续发展试点工作全面启动，流域水环境综合治理模式加快创新。重点流域水环境质量总体稳定向好，水安全保障进一步增强，对推进全国生态文明建设，打赢污染防治攻坚战作出了重大贡献。但之后依然存在部分问题，重点流域水环境综合治理面临的结构性、根源性矛盾尚未根本缓解，水环境状况改善不平衡不协调的问题突出，与美丽中国建设目标要求和人民群众对优美生态环境的需要相比仍有不小差距。治理思路和方式亟待创新，新技术、新理念运用不足，环境改善成效尚不稳固，尤其是太湖、巢湖等湖泊蓝藻水华仍处于高发态势等。基于以上问题，为实现“十四五”规划的目标，即重要江河湖泊水功能区水质达标率持续提高、重点流域水环境质量持续改善，既要推动大江大河综合治理，又要聚焦重要湖泊保护治理，保证湖泊河流生态保护治理措施。

“有鱼有草”为“十四五”重点流域水生态环境保护规划的目标任务之一。2019年12月，生态环境部印发《重点流域水生态环境保护“十四五”规划编制技术大纲》，明确提出“有河有水、有鱼有草、人水和谐”的要求，对水生态系统严重受损，包括水下生态系统、河湖生态缓冲带受损等情况，要明确河湖生态缓冲带恢复、水生植被恢复等规模化生态保护恢复任务。2022年11月，生态环境部印发《美丽河湖保护与建设参考指标（试行）》，将“水生植物保护”作为6项参考指标之一，要求河湖岸带向水域内的水生植物得到有效保护。2023年3月，生态环境部联合发展改革委、财政部、水利部、国家林草局等部门印发《重点流域水生态环境保护规划》，要求“在湖泊开放水域开展水生植被恢复试点，探索建立人水和谐的生产生活方式和相应的环境管理体系”。

2022年9月8日，生态环境部印发《深入打好长江保护修复攻坚战行动方案》，从生态系统整体性和流域系统性出发，坚持生态优先、绿色发展，坚持综合治理、系统治理、源头治理，坚持精准、科学、依法治污，以高水平保护推动高质量发展，进一步夯实共抓大保护工作基础，努力建设人与自然和谐共生的绿色发展示范带。“十四五”期间在长江流域开

展水生生态试点，有利于落实山水林田湖草沙系统治理的科学理念，聚焦流域突出的问题，精准传导生态环境保护主体责任，通过解决流域的突出问题，推动长江经济带高质量发展，通过重点突破长江流域以带动全国的水生态保护修复。2022年4月，生态环境部印发《长江流域水生生态监测方案（试行）》，将“水生植被”作为湖泊水生生物监测重要指标。2023年6月，生态环境部联合发展改革委、水利部、农业农村部等部门印发《长江流域水生生态考核指标评分细则（试行）》，将“水生植被覆盖度”作为湖泊水生生态考核指标，引导地方因地制宜开展水生植被保护与恢复。

为贯彻落实上述重要文件精神，支撑重点流域水生态环境保护规划和长江流域水生态环境保护责任落实和目标考核，客观反映水生态环境保护修复成效，迫切需要出台水生植被遥感监测技术规范。

2.3 相关法律法规要求

水生植被监测已成为国家层面的重要要求，相关法律法规对此作出相关规定，为水生植被遥感监测标准的制订工作提供了根本遵循。

《中华人民共和国环境保护法》第三十条指出，开发利用自然资源，应当合理开发，保护生物多样性，保障生态安全，依法制定有关生态保护和恢复治理方案并予以实施。

《中华人民共和国水污染防治法》第二十九条规定，国务院环境保护主管部门和省、自治区、直辖市人民政府环境保护主管部门应当会同同级有关部门根据流域生态环境功能需要，明确流域生态环境保护要求，组织开展流域环境资源承载能力监测、评价，实施流域环境资源承载能力预警。县级以上地方人民政府应当根据流域生态环境功能需要，组织开展江河、湖泊、湿地保护与修复，因地制宜建设人工湿地、水源涵养林、沿河沿湖植被缓冲带和隔离带等生态环境治理与保护工程，整治黑臭水体，提高流域环境资源承载能力。

《中华人民共和国水法》第九条指出，国家保护水资源，采取有效措施，保护植被，植树种草，涵养水源，防治水土流失和水体污染，改善生态环境。

《中华人民共和国长江保护法》第三十六条规定，丹江口库区及其上游所在地县级以上地方人民政府应当按照饮用水水源地安全保障区、水质影响控制区、水源涵养生态建设区管理要求，加强山水林田湖草整体保护，增强水源涵养能力，保障水质稳定达标。第四十二条规定，国务院农业农村主管部门和长江流域县级以上地方人民政府应当制定长江流域珍贵、濒危水生野生动植物保护计划，对长江流域珍贵、濒危水生野生动植物实行重点保护。国家鼓励有条件的单位开展对长江流域江豚、白鱔豚、白鲟、中华鲟、长江鲟、鲸、鲟、四川白甲鱼、川陕哲罗鲑、胭脂鱼、鳊、圆口铜鱼、多鳞白甲鱼、华鲮、鲈鲤和葛仙米、弧形藻、眼子菜、水菜花等水生野生动植物生境特征和种群动态的研究，建设人工繁育和科普教育基地，组织开展水生生物救护。禁止在长江流域开放水域养殖、投放外来物种或者其他非本地物种种质资源。第五十八条指出，国家加大对太湖、鄱阳湖、洞庭湖、巢湖、滇池等重点湖泊实施生态环境修复的支持力度。长江流域县级以上地方人民政府应当组织开展富营养化湖泊的生态环境修复，采取调整产业布局规模、实施控制性水工程统一调度、生态补水、河湖连通等综合措施，改善和恢复湖泊生态系统的质量和功能；对氮磷浓度严重超标的湖泊，应当在影响湖泊水质的汇水区，采取措施削减化肥用量，禁止使用含磷洗涤剂，全面清理投饵、

投肥养殖。

《中华人民共和国黄河保护法》第三十一条指出，国务院林业和草原主管部门应当会同国务院有关部门、黄河流域省级人民政府，加强对黄河流域重要生态功能区域天然林、湿地、草原保护与修复和荒漠化、沙化土地治理工作的指导。第三十六条指出，国务院自然资源、林业和草原主管部门应当会同国务院有关部门和山东省人民政府，组织开展黄河三角洲湿地生态保护与修复，有序推进退塘还河、退耕还湿、退田还滩，加强外来入侵物种防治，减少油气开采、围垦养殖、港口航运等活动对河口生态系统的影响。

《生态环境监测条例》第四条规定“国家建立健全生态环境监测制度，完善生态环境监测规范和标准。开展生态环境监测应当遵守生态环境监测规范和标准”；第十六条规定“鼓励在生态环境监督监测中使用遥感监测等非接触式技术手段，提升监测效率，减少对正常生产经营活动等的影响”。

本标准制订严格衔接各项法律规定，兼顾生态保护、流域治理与技术适配性，确保标准内容合法合规、科学可行，为依法开展水生植被遥感监测、强化生态环境监管提供有力技术支撑。

3 国内外相关分析方法研究

3.1 主要国家、地区及国际组织相关分析方法研究

1998 年美国《湖泊和水库生物基准及生物评价技术指南》（Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria, Technical Guidance Document）中规定，可基于遥感影像确定水生植被分布范围，在范围内选择 3~10 个样带，样带内随机设置采样点，对浅水区水生植物覆盖度进行评估，并确定最主要物种^[11]。2022 年美国国家湖泊评估（National Lakes Assessment, NLA）系列技术规范中，包括现场操作手册（Field Operations Manual）、实验室操作手册（Laboratory Operations Manual）、质量保证项目计划（Quality Assurance Project Plan）、现场评估指南（Site Evaluation Guidelines）等，其中对水生植物的监测分为定性和定量两种方式^[12-15]。针对大型水生植物主要通过现场观测方法估计植物覆盖湖区面积的百分比，并按照不同范围（0%，<10%，10%~40%，40%~75%，>75%）进行分级，并将观测到的植物密度记录为缺失、稀疏、中等、重和非常高；在沿岸区内选取均匀间隔的地点，通过目视方法对不同沉水、挺水和浮叶植物覆盖百分比进行估算。针对浮游植物则开展定量监测，通过现场采集水样在实验室进行定量分析获得结果。

2025 年美国《长期资源监测程序—水生植物监测》（Long Term Resource Monitoring Procedures—Aquatic Vegetation Monitoring）中介绍了水生植被现场监测的规范化方法^[16]。植物采样通过现场观测和采样的方法，量化每个点位监测到的所有水生植物的物种组成和相对丰度。采样法通过每年在水深小于 2.5 米的范围内，分层随机抽样设计选取 450 个点位进行评估。在点位 2 米环形范围内进行目视评估，以 10%为增量估算非根生浮叶、根生浮叶和挺水植物等不同类型水生植物的覆盖度。

许多欧洲国家认为大型植物是水生态系统的重要组成部分，并将监测大型植物作为水生生态系统的监测分析方法。欧盟标准化委员会（CEN）中水分析标准委员会关于水生植物的监

测方法有两个文件，分别为《水质 流水中大型水生植物调查指南》（BS EN 14184-2014 Water quality-Guidance for the surveying of aquatic macrophytes in running waters）和《水质 湖泊中大型水生植物调查指南》（BS EN 15460-2007 Water quality-Guidance standard for the surveying of macrophytes in lakes），二者均是针对大型水生植物监测与评价的单项标准，对河流和湖泊中水生植物的采样分析方法进行了区分^[17,18]。其中《水质 流水中大型水生植物调查指南》提出分别设置参考点和监测点对河流中的大型水生植物进行调查。目前没有查到有专门针对水生植被遥感监测的技术标准。

表 1 国际水生植被监测相关标准清单

方法	文件名称	类型	发布年份	发布单位或组织
水生植被分布范围评估	Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria, Technical Guidance Document	文件	1998	美国环保署
湖泊中水生植物调查方法	Water quality-Guidance standard for the surveying of macrophytes in lakes (BS EN 15460-2007)	标准	2007	欧盟标准委员会
河流中水生植物调查方法	Water quality-Guidance for the surveying of aquatic macrophytes in running waters (BS EN 14184-2014)	标准	2014	欧盟标准委员会
水生植物监测（定性）	National Lakes Assessment (NLA) Field Operations Manual	手册	2022	美国环保署
水生植物监测（定量）	National Lakes Assessment (NLA) Laboratory Operations Manual	手册	2022	美国环保署
水生植物质量认证与评估	National Lakes Assessment (NLA) Quality Assurance Project Plan	手册	2022	美国环保署
水生植被现场点位选取方法	National Lakes Assessment (NLA) Site Evaluation Guidelines	手册	2022	美国环保署
水生植被现场采样规范化流程	Long Term Resource Monitoring Procedures—Aquatic Vegetation Monitoring	标准	2025	美国地质调查局

3.2 国内相关分析方法研究

目前没有专门针对水生植被遥感提取的技术标准，现有标准侧重于水生植物地面观测、河湖健康评价等方面，或者是有关遥感监测水华、温排水等污染现象的标准。

HJ 710.12—2016 中关于生物多样性（挺水植被、浮水植被、沉水植被等）观测技术的准则制定，包括观测仪器的使用、样本的采集、抽样方法、如何采集植被等内容^[19]。DB42/T 1771—2021 中河湖健康评价指标提到关于滨岸带植被覆盖率、大型水生植物（沉水植物、浮水植物、漂浮植物、挺水植物）覆盖度指标，并规定了相关样品采集和鉴定的具体步骤方法^[20]。HJ 710.1—2016 中对于陆生维管植物的观测原则、方法、技术要求进行了规定^[21]。DB11/T 1721—2020 中对水生生物调查技术进行了规范，包括大型水生植物的调查规范^[22]。HJ 1296—2023 中规定了湖泊和水库水生态监测中水生生物包括大型水生植物的监测点位布

设与监测频次、监测方法、质量保证和质量控制、评价方法等技术内容^[23]。HJ 1295—2023 中规定了河流（不包括河口）水生态监测中水生生物如着生藻类等的监测点位布设与监测频次、监测方法、质量保证和质量控制、评价方法等技术内容^[24]。

HJ 1098—2020 规定了淡水水体蓝藻水华遥感监测方法、地面监测方法、水华程度评价方法、遥感数据选择方法等，并对监测原理进行了明确^[25]。采用卫星遥感影像数据监测蓝藻水华主要是基于水体光谱与发生水华水体光谱的差异。蓝藻水华爆发时，藻类聚集在水体表面，因其对红光波段的强吸收导致产生的红光波段反射率较低，在近红外波段具有类似于植被光谱曲线特征的“反射峰平台效应”，近红外波段反射率较高。而水体对近红外波段有强烈的吸收作用，导致反射率较低。因此，通过计算植被指数可以区分水华和水体；遥感数据的选择：选取具有红光（630 nm~690 nm）和近红外（760 nm~900 nm）波段的卫星遥感影像数据。空间分辨率应取决于监测水体的大小，水体面积越小，空间分辨率要求越高。遥感影像数据至少覆盖监测水体 90%以上面积；在监测水体内，云覆盖率小于 50%。水陆掩膜、云掩膜、水生植被掩膜及观测几何条件等辅助数据坐标系及投影应与遥感影像数据保持一致。从反射率波形特征来看，水华和水生植被类似，因此该类监测体系与水生植被监测体系有较强的相关性，其中相关地面观测的方法可以借鉴水生植被野外核查技术。

全国标准信息公共服务平台数据显示：我国现行遥感相关的国家标准 61 项，其中基础类 20 项、方法类 33 项、管理类 4 项、产品类 4 项。现行遥感相关的行业标准 103 项，其中水生态环境监测领域相关标准 9 项（表 2）。

表 2 已发布水生态环境监测领域遥感相关行业标准

序号	标准号	标准名称	发布部门
1	HJ 1098—2020	水华遥感与地面监测评价技术规范	生态环境部
2	HJ 1213—2021	滨海核电厂温排水卫星遥感监测技术规范（试行）	生态环境部
3	HJ 1233—2021	入河（海）排污口排查整治 无人机遥感航测技术规范	生态环境部
4	HJ 1234—2021	入河（海）排污口排查整治 无人机遥感解译技术规范	生态环境部
5	HJ 1236—2021	集中式地表水饮用水水源地风险源遥感调查技术规范	生态环境部
6	QX/T 140—2011	卫星遥感洪涝监测技术导则	中国气象局
7	QX/T 207—2013	湖泊蓝藻水华卫星遥感监测技术导则	中国气象局
8	QX/T 561—2020	卫星遥感监测产品规范 湖泊蓝藻水华	中国气象局
9	HY/T 147.7—2013	海洋监测技术规程 第 7 部分：卫星遥感技术方法	国家海洋局

3.3 文献资料研究

通过查阅资料发现，利用遥感技术对陆地植被进行监测的研究和应用较为成熟，而对水生植被进行监测的研究和应用起步较晚，发展较缓慢。20 世纪 90 年代以来，国内学者开始探索应用遥感技术监测水生植被的时空变化特征和生长状态。研究人员发现，水生植被一般对近红外和红外波段敏感，蓝光、绿光和红光波段则在提取水体方面表现良好，因此多数研究主要基于上述波段构建水生植被提取的特征变量，构建了归一化差值植被指数（NDVI）、增强植被指数（EVI）、归一化水体指数（NDWI）、改进的归一化水指数（MNDWI）等^[26-29]。

针对太湖等重点区域,研究利用 HJ-1A/B 和 Landsat 影像,通过主成分变换和缨帽变换对原始影像进行图像增强处理,构建出浮水植被敏感光谱指数(FVSI)和沉水植被敏感指数(SVSI)^[30]。由于部分植被光谱特征相似,又因为受水环境影响,光谱信号较弱,因此难以从单一的光谱信息中对不同类群进行精确分类。研究人员通过引入物候特征构建的分类决策树模型,对太湖地区的水生植被进行监测,在不同传感器数据源下均实现了较高的分类精度^[31]。在莲花荡水系监测中,通过单因子污染指数法与水质标识指数法评价发现,丰水期水质显著优于平水期,揭示了物候特征与水生植被健康状况之间的密切联系^[32]。研究人员利用 1985—1986 年、1995—1996 年、2004—2006 年和 2014—2015 年多时相遥感影像数据与沉水植物的生活史差异,研究太湖近 30 年沉水植物优势种的演替模式^[33]。研究人员基于陆地卫星图像的新型三步分类算法(植被和水华指数(VBI)算法)在长江中下游湖泊进行了精度验证,精度较好^[34]。研究人员利用 MODIS NDVI 时序谱获取物候信息,对鄱阳湖不同湿生植被进行遥感分类^[35]。研究人员通过获取白沟河等区域的高分辨率多光谱影像并引入无人机载高像素航天数维 KP-6 多光谱相机,基于三种监督分类法对影像内白沟河的芦苇、荇菜和金鱼藻等水生植被物种进行分类,研究结果表明最大似然法的精度最高,总体精度为 92.8%^[36]。针对洪泽湖水域,结合优势种群生活史特征及物候差异,研究构建了沉水植被种群监测模型,成功将浮水/挺水植被与沉水植被剥离,分类精度分别达到 86.11%和 84.62%^[37]。基于上述分类方法,已经发展出了多种水生植被分类模型,如监督分类法,非监督分类法,决策树和支持向量机等。

近年来,国外学者分别基于不同的卫星遥感数据,构建和应用了多个水生植被提取指数,利用多种遥感分类方法,探讨和研究不同水生植被类群(挺水植被、浮水植被和沉水植被)的卫星遥感分类方法和长时序变化监测。主要研究和进展如下:(1)在遥感数据源的选择方面,根据研究水生态区域的大小、监测时间尺度、数据成本等考虑,用于水生植被监测的卫星数据源涉及不同传感器、不同时空分辨率,如用 Landsat TM/ETM+/OLI(30 m)数据,与 Sentinel-2 MSI(10m)数据,开展水生植被遥感监测^[38]。利用高分辨数据 QuickBird(2.4m)、WorldView-2(2m)等,体现出水生植被空间异质性^[39]。研究人员用 MODIS 图像对太湖湖水、蓝藻水华、大型植被和漂浮大型植被进行了区分。将多个光谱指数应用到乌兰苏海时间序列 Landsat 影像,研究了乌兰苏海水生植被和黄藻的季节和年际动态及其对气温的响应^[40]。研究人员采用三级分类的方法应用于 Landsat-8 和 Sentinel-2 影像上提取南非全国水葫芦分布情况。在其他数据源上,利用高分辨率 IKONOS 和 QuickBird 卫星图像在明尼苏达州当地土地和水资源测绘和分析方面开展评估,其中浮水和沉水植被群落的水生植被调查精度为 80%^[41]。利用高空间分辨率的 Quickbird 图像,识别位于安纳托利亚中部的大型浅水莫干湖的水生植被^[42]。利用搭载在无人机上的 RGB 相机进行成像,采用适应性余弦估计和光谱角映射算法进行藻类识别和覆盖率映射,研究成功识别了丝状藻类,正确识别率达 90%,并成功绘制了藻类覆盖率随季节变化的动态变化图^[43]。利用光学影像数据结合带有近红外(NIR)波段的消费级相机,估算河流中水生植被的深度^[44]。研究人员测试了基于地理对象的图像分析的适用性,包括针对 WorldView-2 图像利用决策树分类法进行分类^[45]。Sentinel-2 和 Landsat-8 传感器结合植被指数监测了底格里斯河中凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)的扩张,总体正确率可达到 89%^[46]。利用 Sentinel-2 卫星,获取西班牙瓜迪亚纳河的多光谱时间序列,

使用卷积神经网络（CNN）监测到了入侵水生植被最常见的区域^[47]。（2）在水生植被遥感分类特征研究方面，基于不同植被类群在卫星影像上的光谱响应，构建了一系列提取和区分不同类群的植被指数，其中，由于浮水植被和挺水植被具有典型的植被光谱特征，NDVI 成为最为主流的分类植被指数；而沉水植被由于其光谱受到水环境因子的影响，基于不同的水生生态环境和数据源，构建的提取指数往往不同，但主要用到的传感器波段仍是近红外波段和可见光波段。研究人员利用中分辨率成像光谱仪（MODIS）计算 NDVI 指数产品，并基于物候学的决策树方法，研究了 2000—2014 年主要湿地覆盖类型的时空变化^[48]。通过应用多种遥感植被指数（如 NDVI、NDAVI 等）基于 Sentinel-2 卫星影像分析浮萍在葡萄牙 Lis 河中的时空分布，研究发现 NDAVI 是监测水生植被的最佳指标^[49]。（3）在水生植被遥感分类方法方面，除了一些传统的遥感分类方法，如监督分类法、非监督分类法、决策树分类法、面向对象的分类方法等，还有利用支持向量机、随机森林等机器学习和深度学习的智能方法开展水生植被类群的分类。其中，决策树分类方法由于其简单、快速和易于表达等优点，一直是水生植被类群最为主流的分类方法。研究人员利用 Hymap 遥感影像使用决策树方法对美国加州三角洲的水生植被进行了物种识别^[50]。研究人员使用光学遥感技术结合对象级图像分析方法（OBIA），通过形状和纹理信息分析了清水浅流中三种水生植被的光谱可区分性^[51]。基于 HJ-1A/B 影像建立了一种新的决策树方法提取不同日期太湖的水生植被分布信息^[52]。利用近红外相机拍摄的高分辨率图像，结合专家知识和对象级图像分析对河流中的沉水植被进行分类，在两个站点上的分类准确率分别达到了 61%和 53%^[53]。比较了决策树、规则分类和随机森林算法在湿地植被分类中的表现，结果随机森林算法的表现优于其他分类方法，整体分类准确率超过 81%^[54]。综上所述，近年来随着遥感技术和计算机的快速发展，国内外学者逐渐倾向于使用遥感数据进行水生植被遥感监测，主流方向是针对不同水体构建或改进不同的算法以提高精度。

此外，水生植被的遥感监测与碳汇功能评估正在深度融合，共同构成应对气候变化研究的前沿领域。遥感技术已不再局限于绘制水生植被的二维分布图，研究范围从“在哪里”向“有多少”的转变。早期研究重点是利用遥感影像（如 Landsat 系列）识别和测绘红树林、盐沼等生态系统的空间范围。而当前的研究热点已转向利用多源遥感数据反演植被的三维结构参数（如冠层高度）和生物量，进而估算其碳储量。例如，研究人员结合使用无人机（UAV）或星载激光雷达（LiDAR）获取的精确高程数据，结合 Sentinel-2 等多光谱卫星提供的植被指数，通过机器学习模型（如随机森林）来估算地上生物量（AGB）和碳储量^[54]。此类技术有效融合 LiDAR 的垂直结构信息探测优势和光学影像的物种分类能力，极大地提升了碳储量估算的精度^[16]。

综上所述，在数据源方面，研究已从依赖主流的 Landsat 系列数据，扩展至融合 Sentinel 系列、无人机、高分辨率商业卫星乃至 LiDAR 等多源数据。在方法上，研究手段也从应用 NDVI 等传统光谱指数，发展为采用决策树、随机森林、支持向量机及深度学习等先进算法，以应对物种光谱相似和水体环境干扰的挑战。除监测水生植被空间分布外，前沿方向聚焦于评估水生植被的碳汇作用，通过融合 LiDAR 的垂直结构信息与光学影像的光谱特征，来估算地上生物量（AGB）和总碳储量，从而将遥感监测提升到了服务于碳汇功能量化评估的新高度。

本标准使用的方法充分借鉴国内外水生植被遥感提取方法，结合了不同类型水生植被的光谱特征，对水生植被遥感提取方法进行改进，同时规定了具体的野外核查方法。

4 标准制订的基本原则和技术路线

4.1 标准制订的基本原则

（1）适用性、可操作性原则：本技术规范的内容应具有普遍适用性，方法应具有可操作性，能够为环境监测及管理等相关业务部门开展全国河流湖库水生植被监测提供技术参考。

（2）科学性、先进性原则：本技术规范在编制过程中应积极借鉴和利用国内外相关研究成果，运用可靠的原理、成熟先进的技术和科学的方法，保证制定的技术规范具有科学性和先进性。

（3）经济技术可行性：本技术规范中采用的技术方法应经济可行，确保按照该技术规范开展水生植被遥感监测时，涉及的遥感数据源较易获取、方法较易实现，监测成本较低，经济可行。

4.2 标准制订的技术路线

本标准的技术路线遵循“资料调研—方法研究—试验验证—标准编制”的流程。通过广泛调研国内外相关标准、文献和技术方法，选择并优化遥感数据处理和信息提取技术方案，通过在太湖开展遥感监测与野外核查的实例应用，对方法的有效性和精度进行验证。最后，在试验验证的基础上，编制标准草案、征求意见稿、送审稿和报批稿。

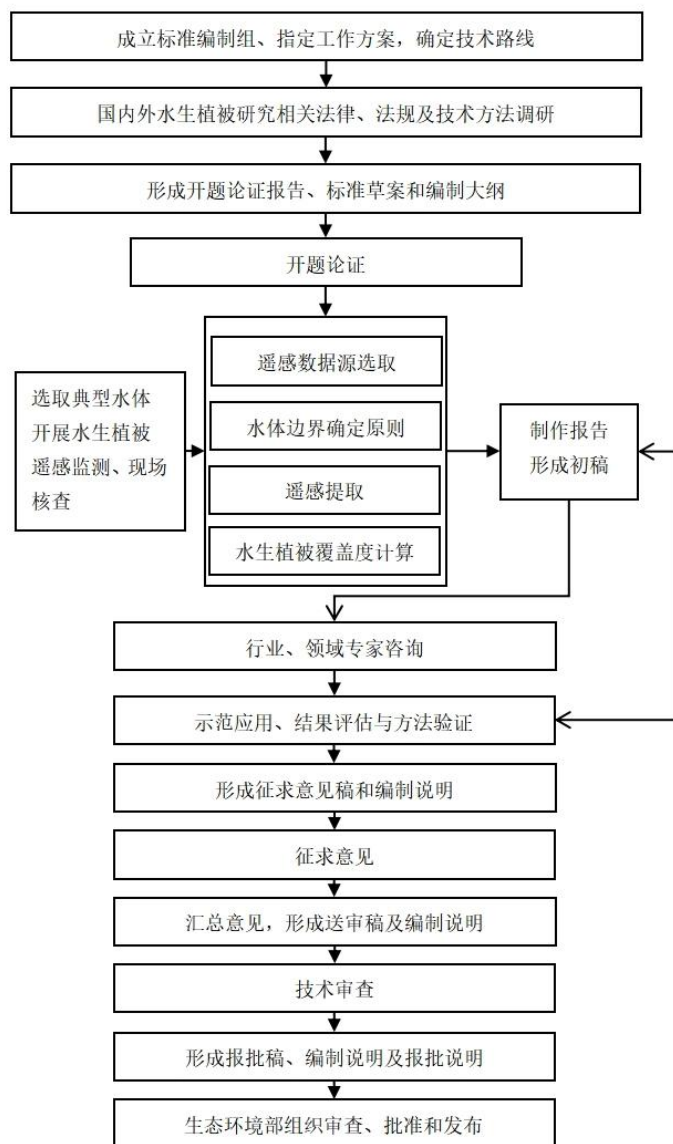


图 1 标准制订技术路线图

5 标准主要技术内容

5.1 标准适用范围

为服务国家水生态环境管理的核心需求，基于光学遥感数据针对我国湖泊、河流、水库等水体，开展水生植被遥感监测，为河流、湖泊和水库水生态状况监测与评价提供科学依据。

5.2 术语和定义

5.2.1 水生植被 aquatic vegetation

参照《生物多样性观测技术导则 水生维管植物》（HJ 710.12—2016）中相关定义，本标准修改为：生长于水体或与水体紧密联系的周边区域范围内的植被。

5.2.2 沉水植被 submerged vegetation

参照《生物多样性观测技术导则 水生维管植物》（HJ 710.12—2016）中相关定义，本标准修改为：在大部分生活周期中植株沉水生活、根生于底质中的水生植被，如马来眼子菜、金鱼藻、狐尾藻等。

5.2.3 浮水—浮叶植被 floating vegetation

参照《生物多样性观测技术导则 水生维管植物》（HJ 710.12—2016）中相关定义，本标准修改为：茎叶浮水，根固着或自由漂移的水生植被，如睡莲、浮萍、凤眼莲等。

5.2.4 挺水—湿生植被 emergent and hygrophilous vegetation

参照《生物多样性观测技术导则 水生维管植物》（HJ 710.12—2016）中相关定义，本标准修改为：茎叶高于水面的水生植被和生长在潮湿环境且不能较长时间忍受水分不足的水生植被，如芦苇、慈姑、荷花等。

5.2.5 遥感影像空间分辨率 spatial resolution of remote sensing image

本标准定义引自《摄影测量与遥感术语》（GB/T 14950—2009），是指单个遥感影像像元所覆盖的地面范围大小。

5.2.6 决策树 decision tree

本标准定义引自《农作物种植面积遥感监测规范》（NY/T 3527—2019），是指一种基本的分类与回归方法，其模型呈树状结构，在分类问题中，表示基于特征对实例进行分类的过程。

5.2.7 解译标志 interpretation indicator

参照《全国生态状况调查评估技术规范—生态系统遥感解译与野外核查》（HJ 1166—2021）相关定义，本标准修改为：能够直接反映和判别水生植被覆盖的影像特征，包括形状、大小、颜色、纹理、图案、位置及布局等直接标志。

5.2.8 目视解译 visual interpretation

参照《全国生态状况调查评估技术规范—生态系统遥感解译与野外核查》（HJ 1166—2021）相关定义，本标准修改为：根据水生植被解译标志，在遥感图像上定性、定量提取水生植被的类型、面积和分布等有关信息的方法。

5.2.9 最小制图单元 minimum mapping unit

参照《中尺度全球地表覆盖制图数据产品规范》（GB/T 43956—2024）相关定义，本标准修改为：水生植被覆盖的最小图斑，可以用像素数、面积等定义。

5.3 监测内容与要求

5.3.1 基本原理介绍

水生植被由于内部含有叶绿素，在遥感影像的近红外波段表现出强反射特性，形成“反射峰”；而水体在该波段则表现为强烈的吸收，反射率极低。利用水生植被和水体在近红外波段显示差异，开展水生植被遥感监测识别。

5.3.2 监测指标

湖泊、河流和水库等水体中水生植被空间分布位置、面积。

5.3.3 监测时间和频次

监测时间定为水生植被生长期，同一地区在不同年份应尽量保持监测时间的一致性。不同地区可结合目标水体中主要水生植被优势种的生活史和管理需求进行调整。

根据实际工作需要确定监测频次，条件允许时建议每周、每月、每季度或每年开展定期监测。

5.3.4 一般要求

(1) 坐标系

按照国务院关于推广使用 2000 国家大地坐标系的有关要求，原国土资源部（现自然资源部）确定，2018 年 6 月底前完成全系统各类国土资源空间数据向 2000 国家大地坐标系转换，2018 年 7 月 1 日起全面使用 2000 国家大地坐标系。

本标准所有矢量和影像数据均采用 CGCS 2000 地理坐标系。

(2) 计量单位

面积统计采用 km^2 ，保留小数点后两位，依据 GB/T 8170 进行处理。

(3) 最小制图单元

《自然保护地人类活动遥感监测技术规范》（HJ 1156—2021）和《自然保护地人类活动遥感解译审核与质量控制技术规程》规定，矿产资源开发、工业开发、旅游开发和能源开发等人类活动图斑不论大小均匀画，其他类型图斑最小起勾面积 2×2 个像元。

结合以上规定，对于水生植被遥感监测建议满足：水生植被最小制图单元需结合遥感影像空间分辨率确定，至少为 3×3 个像元，即 30 m 影像可识别的水生植被面积应大于 8100 m^2 ，10 m 影像可识别的水生植被面积应大于 900 m^2 ，2 m 影像可识别的水生植被面积应大于 36 m^2 。同时在水生植被提取和检查过程中，30 m 影像成图比例尺建议至少为 1:30000，10 m 影像成图比例尺建议至少为 1:10000，2 m 影像成图比例尺建议至少为 1:2000。

(4) 遥感影像需要选择监测区域覆盖度小于 10% 的数据。

5.4 技术流程与方法

5.4.1 技术流程

基于卫星遥感数据，监测水生植被的技术流程包括：卫星遥感数据准备、水体边界确定、水生植被遥感监测、野外核查、精度分析和水生植被覆盖度计算 6 个部分。技术流程详见图 2。

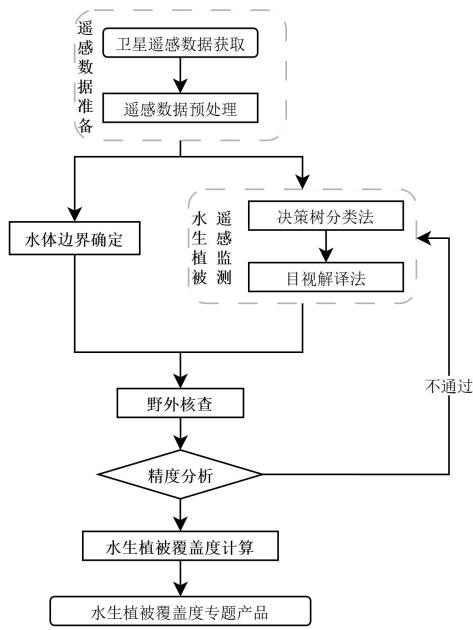


图 2 水生植被遥感监测技术流程图

5.4.2 卫星遥感数据准备

(1) 空间分辨率

遥感影像空间分辨率选择应考虑被监测水体的面积和形状，水体面积越小、水体宽度越窄，空间分辨率要求越高。首先考虑水体类型，对于湖库水体，优先使用 10 m 空间分辨率影像数据，结合时间分辨率等可根据实际情况放宽至 30 m 空间分辨率影像数据；对于河流水体，为保证监测结果的连续和统一，根据不同河段的水面宽度，推荐采用对应空间分辨率的影像数据，具体见表 3。

表3 不同水面宽度适用的卫星遥感影像空间分辨率

水面宽度（w）	空间分辨率
$w > 100\text{ m}$	10~30 m
$50 < w \leq 100\text{ m}$	优于 10 m
$20 < w \leq 50\text{ m}$	优于 5 m
$w \leq 20\text{ m}$	优于 2 m

(2) 影像波段选择

本标准中，遥感数据选取至少具有蓝光、绿光、红光、近红外波段的卫星遥感影像，可覆盖整个监测区域且监测区域上方云量小于 10%。因红边波段（690 nm~740 nm）和短波红外波段（1000 nm~3000 nm）是植被监测的特征波段，优先采用包含窄近红外波段和短波红外波段的 Sentinel 2 MSI 等影像。

（3）影像预处理

遥感技术作为一种远程获取地球表面信息的重要手段，被广泛应用于农业、林业、地质、气象等诸多领域。在这些应用中，遥感影像的预处理是一个关键环节，它直接关系到后续分析与应用的质量和效果。预处理的目的在于改进图像质量，消除各种噪声和误差，增强图像的可识别性，从而为后续的分析提供更准确的原始数据。本标准中遥感影像需开展辐射定标、大气校正和几何精校正等处理，辐射定标指将传感器记录的无量纲 DN 值（Digital Number）转换为具有实际物理意义的辐亮度或反射率，消除传感器自身系统误差带来的影响。大气校正指消除大气分子、气溶胶等对电磁波的吸收和散射影响，将传感器观测到的表观反射率校正为真实的地表反射率，这是进行不同时相、不同传感器数据对比分析的基础。几何精校正指对影像进行几何畸变校正和地理配准，使其与特定的地图投影坐标系对齐，确保提取出的水生植被图斑具有准确的地理空间位置。具体可参考 DD 2013-12（2014）和 TD/T 1055-2019 的相关要求执行。

5.4.3 水体边界确定

湖泊、河流和水库等水体边界是以基准年堤防工程内侧堤脚线或汛期平均水位为基础，保留湿地公园、生态修复区以及潜在生态修复区，最大程度剔除边界范围内的岛屿、建筑物、农田、林地等要素，得到较为完整的水体边界范围。

首次完成水体边界确定后，在无重大水文事件影响的常规年份下保持固定，以确保不同时期监测结果的可比性。当发生特定情况，如重大水利工程调度或生态修复工程等致使水体形态发生长期显著改变时，则需对水体边界进行重新划定与更新。

5.4.4 水生植被遥感监测方法选择

本标准对当前水生植被遥感监测领域常用的主要方法进行了系统梳理，依据方法的成熟度、可操作性和适用性，对目视解译法、决策树法、机器学习/深度学习法等水生植被遥感监测主要方法展开比较，并提出推荐技术方案。

目视解译法：依赖解译专家根据影像的颜色、纹理、形状、空间位置等特征进行人工判读和勾绘。优点在于精度高，尤其能胜任水陆交错带、水色复杂、植被类型混杂等算法难以处理的复杂场景；缺点是主观性强、效率低、劳动强度大，不适用于大范围、高频率的动态监测。

决策树法：主要指利用 NDVI、EVI、SVI 等指数构建决策树或规则集进行自动分类。优点是客观、高效、可重复性强，适合对大范围区域进行快速、标准化的监测。特别是决策树方法，其逻辑清晰、原理直观、实现门槛低，非常便于在各级业务单位推广和应用。缺点是分类精度受指数和阈值选择影响大，对光谱特征不明显或光谱易混淆的目标识别能力有限。

机器学习/深度学习法：如随机森林、支持向量机、卷积神经网络等。优点是能够学习复杂的非线性特征，分类精度潜力高；缺点是需要大量高质量的地面真值样本进行模型训练，

模型构建复杂且调试优化困难，计算成本高。

为研究不同监测方法在水生植被业务化监测中的适用性，以目视解译结果作为真值，利用 Sentinel 2 数据开展交叉验证。

（1）目视解译法与决策树法结果对比

在太湖研究区内均匀抽取 300 个验证点进行精度验证。结果显示，在 300 个验证点中，决策树法正确分类了 258 个点，其中存在将部分水生植被区域漏分为非水生植被的现象，也存在将水体错分为水生植被的现象，精度为 86%。作为对比，经过目视解译修正后的结果显示，在相同的 300 个验证点中，有 291 个点得到正确分类，精度达到 97%。这表明，目视解译的介入能显著修正决策树法的错分和漏分，大幅提升最终结果的准确性。

（2）机器学习/深度学习法与决策树法结果对比

采用相同区域的训练和验证样本，随机森林模型的表现优于决策树模型。在光谱特征较为混淆的区域，例如沉水植被与浑浊水体，决策树法出现了较多的错分，将部分浑浊水体误判为植被。而随机森林模型通过学习更复杂的特征组合，能更有效地进行区分。精度验证结果表明，在太湖，决策树法的精度为 86%，而随机森林模型的精度达到了 90%。但随机森林模型的构建过程需要大量的样本数据进行训练，且模型参数调试复杂，在业务化推广中的技术门槛相对较高。

（3）机器学习/深度学习法与目视解译法结果对比

将随机森林模型的提取结果与目视解译结果进行对比，可以发现二者在植被主体区域的吻合度很高。随机森林模型相较于决策树更接近目视解译的精度水平。然而，与经过专家修正后的目视解译最终成果相比，机器学习模型在处理水陆边界的模糊地带、识别形态不规则的细小植被斑块时，仍然存在一定的局限性。尽管机器学习方法精度潜力高，但在当前的业务化场景下，最高精度的成果获取仍需依赖专家的知识进行最终的校验和精化。

综合考虑业务化应用的效率、精度与推广的可行性，本标准建议采用“决策树分类法与目视解译法相结合”的技术路线。以技术门槛较低、易于业务化推广的决策树分类法作为大范围、自动化的初步提取手段，然后利用目视解译法对初步结果进行人工校验、修正和质量控制，特别是在关键区域和复杂区域。这种方法兼顾了自动化处理的效率和专家知识的准确性，是当前阶段最具实用性和可操作性的方法。

5.4.5 阈值确定方法

可采用自动化或半自动化的方法获取初始阈值。当图像的像元值分布呈现明显双峰结构，可采用最大类间方差法初步确定各水体的提取阈值。将基于初始阈值提取的二值图结果与假彩色合成影像叠加，进行目视对比分析。检查分类结果与影像上实际地物分布的吻合程度，判断是否存在明显的错分或漏分。如不完全重合，则需根据目视判读结果，结合先验知识，对阈值进行修正，直至分类结果与假彩色影像中的目标区域最大程度地吻合，获得最终精确的分类结果。

5.4.6 野外核查

（1）核查点位选取原则

点位选取应参照 GB/T 36296—2018 中的分层抽样方式，依据水体和水生植被分布区域

确定样本数量。选取时应优先考虑存疑图斑，并确保样本空间分布均匀。点位设计需考虑可达性。

在核查时间上，地面核查宜选取与卫星过境时间相近且天气晴朗、无云或少云的时间段。

（2）信息采集

现场核查需要携带定位拍照设备、核查记录表、赛氏盘、水草夹和无人机。

通过定位设备导航至核查点，以该点为中心设置 10m×10m 样方，识别并记录水生植被的优势种及类型（沉水、浮水—浮叶、挺水—湿生或无）。对于肉眼可识别的植被，需记录其分布范围并目视估算总覆盖度。

若样方内存在多种植被类型，表格中填写优势种及覆盖度，其余类型在备注中说明。无法判断优势种时，该核查点判定为无效，需重新选取点位。若样方内以沉水植被为主，则对打捞上来的每种沉水植被拍照记录，按顺序对照片编号，同时测量样方区域水体透明度与沉水植被顶部距水面距离。若船只无法抵达预设核查点，则用无人机飞至样方上空估算覆盖度。

现场拍照需规范执行：沿东南西北水平方向拍摄生境照片，并垂直向下拍摄水生植被（避免阳光反射），无人机应在样点正上方拍摄全貌与细节，所有打捞的沉水植被样本均需拍照留存并编号。

全部现场采集内容应详细填写至《水生植被野外现场核查记录表》。

（3）信息分析

通过分析遥感监测和地面情况，遥感监测结果主要分为水体和水生植被 2 种情况，地面情况主要为样方水生植被覆盖度大小、是否满足最小制图单元要求和样方内主要为沉水植被时其顶部距水面距离与透明度差值等多种情况，通过地面与遥感监测结果对比分析，筛选出核查正确的点位。

5.4.7 精度分析

本标准参考 GB/T 36296—2018 中关于抽样精度评估的技术框架与 GB/T 43956—2024 中地表覆盖数据总体分类精度优于 80% 的通用要求。考虑水生植被监测为水生植被与非水生植被的二分类识别场景，基于现有工作经验，结合工作需要，确定核查点位准确率不低于 80% 则满足精度要求。

5.4.8 水生植被覆盖度计算

水生植被覆盖度采用比值法计算。基于遥感影像提取的水生植被分布区，利用水生植被面积除以水体边界面积获得水生植被覆盖度（%）。

$$P = \frac{V}{W} \times 100\% \quad (1)$$

式中：P——水生植被覆盖度，%；

V——水生植被面积，根据水生植被矢量计算，km²；

W——水体边界面积，根据水体边界矢量计算，km²。

5.4.9 质量控制与保证

为确保水生植被遥感监测成果的规范性、准确性和可靠性，本标准建立了覆盖全流程的

质量保证与质量控制体系，对卫星遥感数据预处理、水生植被遥感监测、野外核查与精度等环节都提出了相关要求。

5.4.10 遥感提取结果与野外验证案例

以太湖为例，开展遥感监测与野外核查全流程工作，具体情况如下：
通过检查卫星影像数据，太湖区域 2023 年 9 月 10 日哨兵 2 号影像显示，监测区上方云量小于 10%，波段、空间分辨率与云量满足一般要求。

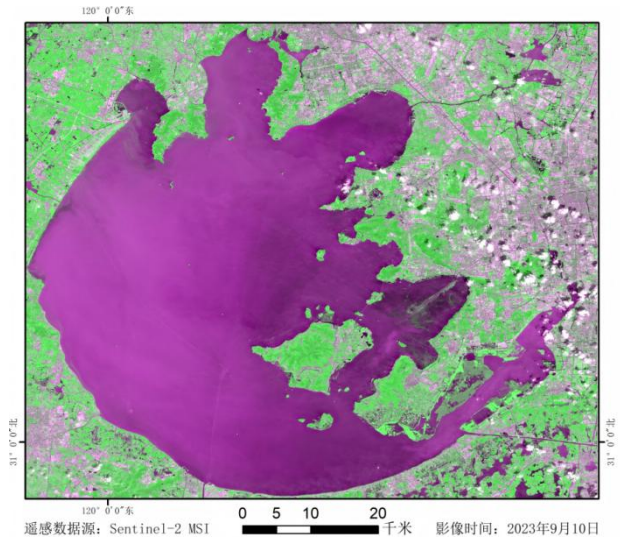


图 3 太湖区域遥感影像图

以 2023 年 9 月 10 日遥感影像为例，对边界内水生植被开展遥感监测。使用最大类间方差法计算 EVSI、FAI、NDVI 与 SVSI 指标的阈值分别为 0.0429、0.0272、-0.4018 与 0.1915，通过决策树方法结合目视解译得到水生植被空间数据分布见图 4。

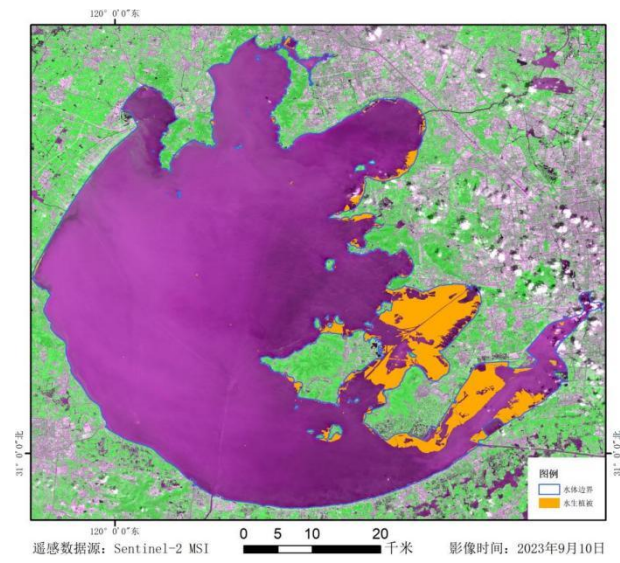


图 4 太湖区域水生植被遥感监测结果图

结合天气情况，编制组于 2023 年 9 月 25 日和 26 日前往太湖开展野外现场核查，共计核查点位 25 个，将核查点位与提取结果进行叠加，遥感监测结果精度为 91.3%，满足精度要求。具体空间分布情况与典型点位核查分析情况见图 5、表 4。

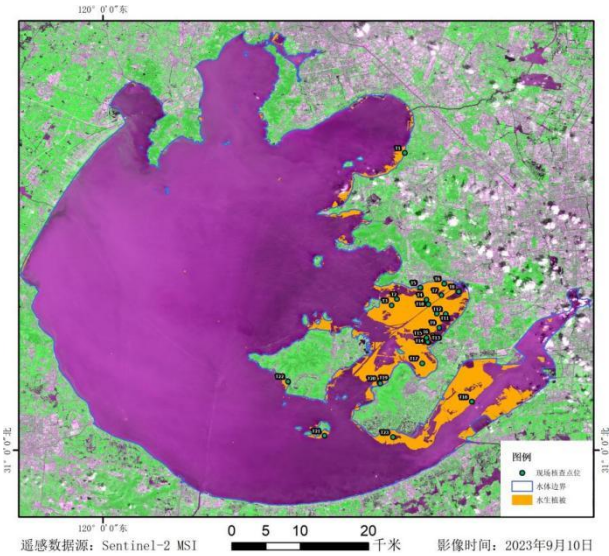


图 5 太湖区域水生植被现场核查点位空间分布图

表 4 太湖区域水生植被典型点位核查情况对照表

核查 点号	现场 覆盖度	遥感监 测结果	监测正确性	遥感影像	现场照片
T5	80.00%	有植被	正确		
T18	70.00%	有植被	正确		
T8	0	无植被	正确		

核查点号	现场覆盖度	遥感监测结果	监测正确性	遥感影像	现场照片
T9	0	无植被	正确		

5.4.11 成果形式及数据存档要求

(1) 监测数据应包括原始遥感数据、预处理后遥感数据、水生植被提取结果矢量数据、水体边界矢量数据，栅格数据采用标准 GeoTIFF (.tif) 格式，矢量数据采用 Shapefile (.shp) 格式。

(2) 专题图中应包含水生植被矢量结果、水体矢量边界与研究区影像（红-近红外-红假彩色合成），用于展示水生植被空间分布信息。图中需要有指北针、比例尺、数据源、影像时间等图例。

(3) 报告编制应包括监测区域、数据来源、提取方法、成果分析等内容。

(4) 所有栅格数据，包括预处理影像、指数计算结果和最终分类图，均应以 GeoTIFF (.tif) 格式归档；所有矢量数据应以 Shapefile (.shp) 格式归档。归档时，必须将构成 Shapefile 的所有文件打包成一个 .zip 压缩文件以确保文件的完整性，矢量属性表的字段命名必须清晰、规范，并附有独立的数据字典文件（如 PDF 或 TXT 格式）。数据字典需详细说明每个字段的名称、含义、数据类型、单位以及所使用的编码体系。

(5) 所有原始的纸质核查记录表均需使用扫描仪进行高保真数字化，扫描分辨率不低于 300 DPI，以确保所有手写信息清晰可辨，且必须保存为 PDF 格式。为便于后续的数据分析和检索，记录表中的核心信息（如点位序号、经纬度、植被类型、样方水生植被覆盖度、透明度等）应被转录至结构化的电子表格中（推荐使用 CSV 或 XLSX 格式）。归档时，扫描生成的 PDF/A 文件和数据化的电子表格文件必须一并保存。

现场拍摄的所有照片，包括生境照、植被垂直照、打捞植被照以及无人机航拍照片，均应以原始 RAW/JPG 格式进行归档，不得进行有损压缩或编辑，以最大限度保留原始信息。无人机航线拍摄结果应进行照片拼接并形成完整航拍图。

每一个野外核查样点应分配一个唯一的、在项目内不重复的 ID，所有与该样点相关的照片，其文件名必须遵循标准化的命名规则，在代表野外核查样点的矢量点图层的属性表中，必须包含一个名为 Field_ID 的字段，其值即为该样点的唯一 ID。

(6) 专题图应当以不低于 300 DPI 的分辨率保存为 JPEG/PNG 格式。监测报告、技术报告，须以 PDF 与 WORD 两种格式进行归档。

5.4.12 附录

共包括 3 个资料性附录。其中，附录 A 规定了挺水—湿生植被敏感指数 (EVS_I)，浮游藻类指数 FAI，归一化差值植被指数 NDVI，沉水植被敏感指数 SVS_I 和最大类间方差法等。

附录 A 中的亮度指数与绿度指数计算公式中缨帽变换对应不同传感器的系数见表 5。其中 B1~B12 为按照原始数据的波段序号，针对 TM 传感器利用 DN 值计算，其他传感器为地表反射率或大气层顶反射率结果。

附录 B 规定了水生植被野外现场核查记录表的具体内容。

附录 C 规定了水生植被遥感监测产品示例，明确了出图的相关信息和具体位置。

表 5 缨帽变换对应不同传感器系数表

卫星传 感器	系 数	波段范围 (nm)						来源
		B1 (450~520)	B2 (520~600)	B3 (630~690)	B4 (760~900)	B5 (1550~1750)	B7 (2080~2350)	
TM (DN)	C ₁	0.3037	0.2793	0.4743	0.5585	0.5082	0.1863	Crist, Eric P ,Cicone,et al.A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data---The TM Tasseled Cap[J].Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1984.
	C ₂	-0.2848	-0.2435	-0.5436	0.7243	0.0840	-0.1800	
卫星传 感器	系 数	波段范围 (nm)						来源
		B1 (450~520)	B2 (520~600)	B3 (630~690)	B4 (770~900)	B5 (1550~1750)	B7 (2080~2350)	
ETM+ (TOA)	C ₁	0.3561	0.3972	0.3904	0.6966	0.2286	0.1596	Huang C , Wylie B , Yang L ,et al.Derivation of a Tasseled Cap Transformation Based on Landsat 7 At-Satellite Reflectance[J].International journal of remote sensing, 2002(23-8).
	C ₂	-0.3344	-0.3544	-0.4556	0.6966	-0.0242	-0.2630	
卫星传 感器	系 数	波段范围 (nm)						来源
		B2 (450~510)	B3 (530~590)	B4 (640~670)	B5 (850~880)	B6 (1570~1650)	B7 (2110~2290)	
OLI (TOA)	C ₁	0.3029	0.2786	0.4733	0.5599	0.5080	0.1872	Baig M H A , Zhang L , Shuai T ,et al.Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J].Remote Sensing Letters, 2014, 5(5):423-431.
	C ₂	-0.2941	-0.2430	-0.5424	0.7276	0.0713	-0.1608	
OLI (SR)	C ₁	0.3690	0.4271	0.4689	0.5073	0.3824	0.2406	Zhai Y G, ROY D P, MARTINS V S, et al. Conterminous United States Landsat-8 top of atmosphere and surface reflectance tasseled cap transformation coefficients [J] . Remote Sensing of Environment, 2022, 274: 112992.
	C ₂	-0.2870	-0.2685	-0.4087	0.8145	0.0637	-0.1052	

卫星传 感器	系 数	波段范围 (nm)						来源
		B2 (458~523)	B3 (543~578)	B4 (650~680)	B8 (785~900)	B11 (1565~1655)	B12 (2100~2280)	
MSI (TOA)	C ₁	0.3510	0.3813	0.3437	0.7196	0.2396	0.1949	Shi T , Xu H .Derivation of Tasseled Cap Transformation Coefficients for Sentinel-2 MSI At-Sensor Reflectance Data[J].Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, 2019, 12(10):4038-4048.
	C ₂	-0.3599	-0.3533	-0.4734	0.6633	0.0087	-0.2856	

6 与开题报告的差异说明

与开题报告相比,本标准在编制过程中进行了一系列深化和拓展,主要技术内容差异及原因说明如下:

(1) 标准名称的调整

根据开题论证会专家意见,综合考虑标准的适用范围和业务工作需求,标准名称由《湖泊水生植被遥感提取与野外核查技术指南》变更为《水生植被遥感监测技术规范》。

(2) 文献研究深度的拓展

为体现标准的科学性和前瞻性,紧跟国际研究热点,将水生植被监测与国家“碳达峰、碳中和”战略目标联系起来,在文献研究部分,新增了“水生植被遥感监测与碳汇功能评估深度融合”的前沿趋势论述,指明了技术发展方向和应用潜力。同时概括总结了不同算法的优缺点和建议方法的确定理由。

(3) 野外核查方法的精细化

为提高野外核查的科学性和可操作性,减少主观判断误差,特增加了定量判别依据和更详细的布点规则。对沉水植被的野外核查,增加了测量沉水植被顶部距水面距离和透明度的现场指标;对核查点位的空间布设提出了更具体、量化的要求。

(4) 术语定义的严谨化

为了在遥感分类上与生物学定义更精准地对应,使术语更具科学严谨性,将“浮水植被”修订为“浮水—浮叶植被”。

(5) 数据管理要求的规范化

开题报告中未涉及数据管理。为保证监测全过程的规范性和数据的可追溯性、共享性,参照相关信息化标准,新增了“数据存档要求”相关内容,对遥感数据、野外核查数据、专题图及报告的格式、命名、存储和原数据等提出了详细要求,确保成果的长期可用和完整性。

综上所述,当前标准的技术内容在开题报告的基础上,更加聚焦业务化应用的可操作性、科学性和规范性,同时体现了技术的先进性和发展趋势,使其更为完善和实用。

7 标准实施建议

本标准现阶段水生植被遥感监测的指导性技术规范,建议各地综合考虑实际情况实施。

本标准执行过程中,建议各地结合实际情况绘制准确的水体监测边界,结合监测水体水生植被具体情况,选择最适合的监测时间、遥感数据源和指数阈值。在开展野外核查时,需同步监测透明度、沉水植被顶部距水面距离等相关指标,用于辅助分析水生植被分布的原因和变化趋势。

本标准由生态环境部生态环境监测司、法规与标准司组织制订,由生态环境部卫星环境应用中心、中国科学院空天信息创新研究院、生态环境部长江流域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心和生态环境部太湖流域东海海域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心联合起草,由生态环境部解释,建议尽快采用本标准。

8 参考文献

- [1] 罗菊花, 杨井志成, 段洪涛, 等. 浅水湖泊水生植被遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 2022, 26(1): 68-76.
- [2] 李文朝. 浅水湖泊生态系统的多稳态理论及其应用[J]. 湖泊科学, 1997, 9(2): 97-104.
- [3] 黄文钰, 吴延根, 舒金华. 中国主要湖泊水库的水环境问题与防治建议[J]. 湖泊科学, 1998, 10(3): 83-90.
- [4] 吴传庆, 盖嘉翔, 王桥, 等. 湖泊富营养化遥感评价模型的建立方法[J]. 中国环境监测, 2011, 27(5): 77-82.
- [5] 金惠淑, 鱼京善, 孙文超, 等. 基于 GOCI 遥感数据的湖泊富营养化监测研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(Z1): 271-274.
- [6] Ismail S N, Hamid M A, Mansor M. Ecological correlation between aquatic vegetation and freshwater fish populations in Perak river, Malaysia[J]. Biodiversitas Journal of Biological Diversity, 2018, 19(1): 279-284.
- [7] Dijkstra T J, Uittenbogaard E R. Modeling the interaction between flow and highly flexible aquatic vegetation[J]. Water Resources Research, 2010, 46(12): W12547.1-W12547.14.
- [8] Carhart AM, Kalas JE, Rogala J, et al. Understanding Constraints on Submersed Vegetation Distribution in a Large, Floodplain River: The Role of Water Level Fluctuations, Water Clarity, and River Geomorphology. Wetlands. 2021;41.
- [9] Cheng X, Chen L, Sun R, et al. Land use changes and socio-economic development strongly deteriorate river ecosystem health in one of the largest basins in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 616-617: 376-385.
- [10] 秦伯强, 高光, 朱广伟, 等. 湖泊富营养化及其生态系统响应[J]. 科学通报, 2013, 58(10): 855-864.
- [11] United States Environmental Protection Agency Office of Wetlands, Oceans and Watersheds. Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria Technical Guidance Document[R]. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1998. EPA 841-B-98-007.
- [12] United States Environmental Protection Agency Office of Water. Field Operations Manual: National Lakes Assessment 2022[R]. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2022. EPA 841-B-22-002.
- [13] United States Environmental Protection Agency Office of Water. Laboratory Operations Manual: National Lakes Assessment 2022[R]. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2022. EPA 841-B-22-003.
- [14] United States Environmental Protection Agency Office of Water. Quality Assurance Project Plan: National Lakes Assessment 2022[R]. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2022. EPA 841-B-22-001.

- [15] United States Environmental Protection Agency Office of Water. Site Evaluation Guidelines for the National Lakes Assessment 2022[R]. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2022.EPA 841-B-22-004.
- [16] LARSON D M, LUND E, CARHART A M, et al. Long Term Resource Monitoring procedures: Aquatic vegetation monitoring[R]. Reston, VA: US Geological Survey, 2025.
- [17] EN 14184:2014. Water quality - Guidance for the surveying of aquatic macrophytes in running waters[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2014.
- [18] EN 15460:2007. Water quality - Guidance standard for the surveying of macrophytes in lakes[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2007.
- [19] HJ 710.12-2016. 生物多样性观测技术导则 水生维管植物[J]. 2016.
- [20] DB42/T 1771-2021. 湖北省河湖健康评估导则[J]. 2021.
- [21] HJ 710.1-2016. 生物多样性观测技术导则 陆生维管植物[J]. 2016.
- [22] DB11/T 1721-2020. 水生生物调查技术规范[J]. 2020.
- [23] HJ 1296-2023. 水生态监测技术指南 湖泊和水库[J]. 2023.
- [24] HJ 1295-2023. 水生态监测技术指南 河流[J]. 2023.
- [25] HJ 1098-2020. 水华遥感与地面监测评价技术规范[J]. 2020.
- [26] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS [J]. NASA special publication, 1974,351:309.
- [27] McFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7):1425-1432.
- [28] KALY U, BRIGUGLIO L, MCLEOD H. Environmental Vulnerability Index (EVI) to summarise national environmental vulnerability profiles[J]. 1999.
- [29] Xu H. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005,5:589-595.
- [30] Luo J, Li X, Ma R, et al. Applying remote sensing techniques to monitoring seasonal and interannual changes of aquatic vegetation in Taihu Lake, China[J]. Ecological Indicators, 2016,60:503-513.
- [31] Jiang H, Zhao D, Cai Y, et al. A Method for Application of Classification Tree Models to Map Aquatic Vegetation Using Remotely Sensed Images from Different Sensors and Dates [J]. Sensors, 2012,12(9):12437-12454.
- [32] 孙雯, 封莉, 孙德智, 等. 宜兴市莲花荡水系水环境质量现状及其水质评价[J]. Advances in Environmental Protection, 2014,04:60-66.
- [33] 王琪, 周兴东, 罗菊花, 等. 近 30 年太湖沉水植物优势种遥感监测及变化分析[J]. 水资源保护, 2016,32(05):123-129+135.
- [34] Luo J, Ni G, Zhang Y, et al. A new technique for quantifying algal bloom, floating/emergent

- and submerged vegetation in eutrophic shallow lakes using Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 287: 113480.
- [35] 韩杏杏. 基于长时序光学遥感数据的鄱阳湖湿地景观格局时空动态研究[D]. 武汉大学, 2017.
- [36] 高敏, 谢娅, 李潇屹, 等. 基于大面阵无人机多光谱遥感的水生植被精细分类研究[J]. *南京信息工程大学学报*, 2025,17(03):414-422.
- [37] 汪政辉. 基于物候特征的洪泽湖水生植被类群遥感监测研究[D]. 西北师范大学, 2019.
- [38] Villa P, Bresciani M ,Bolpagni R, et al. A rule-based approach for mapping macrophyte communities using multi-temporal aquatic vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,171:218-233.
- [39] Wolter P T, Johnston C A, Niemi G J. Mapping submergent aquatic vegetation in the US Great Lakes using Quickbird satellite data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(23):5255-5274.
- [40] Qing S, A R , Shun B, et al. Distinguishing and mapping of aquatic vegetations and yellow algae bloom with Landsat satellite data in a complex shallow Lake, China during 1986–2018[J]. *Ecological Indicators*, 2020,112:106073-106073.
- [41] Sawaya K E, Olmanson L G , Heinert N J ,et al.Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003,88(1-2):144-156.
- [42] Dogan O K, Akyurek Z, Beklioglu M. Identification and mapping of submerged plants in a shallow lake using quickbird satellite data[J]. *Journal of environmental management*, 2009,90(7):2138.
- [43] Flynn F K, Chapra C S. Remote Sensing of Submerged Aquatic Vegetation in a Shallow Non-Turbid River Using an Unmanned Aerial Vehicle[J]. *Remote Sensing*, 2014,6(12):12815-12836.
- [44] Visser F, Buis K, Verschoren V, et al. Depth Estimation of Submerged Aquatic Vegetation in Clear Water Streams Using Low-Altitude Optical Remote Sensing[J]. *Sensors*, 2015,15(10):25287-25312.
- [45] Timothy W, Bartolo Renée. Mapping Aquatic Vegetation in a Tropical Wetland Using High Spatial Resolution Multispectral Satellite Imagery[J]. *Remote Sensing*, 2015,7(9):11664-11694.
- [46] Kadhim A L A, A. R A, A. A M A, et al. Using Vegetation Indices for monitoring the spread of Nile Rose plant in the Tigris River within Wasit province, Iraq[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021,(prepublish):100471.
- [47] RODRIGUEZ-GARLITO EC, PAZ-GALLARDO A, PLAZA AJ. Mapping the Accumulation of Invasive Aquatic Plants in the Guadiana River, Spain, Using Multitemporal

- Remote Sensing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023,20:1 – 5.
- [48] Han X, Feng L , Hu C, et al. Wetland changes of China's largest freshwater lake and their linkage with the Three Gorges Dam[J]. Remote Sensing of Environment, 2017.
- [49] Romeu G , P. I L D. Monitoring Duckweeds (*Lemna minor*) in Small Rivers Using Sentinel-2 Satellite Imagery: Application of Vegetation and Water Indices to the Lis River (Portugal)[J]. Water, 2022,14(15):2284-2284.
- [50] Hestir E L, Khanna S, Andrew M E, et al. Identification of invasive vegetation using hyperspectral remote sensing in the California Delta ecosystem[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(11):4034-4047.
- [51] Visser F, Wallis C, Sinnott M A. Optical remote sensing of submerged aquatic vegetation: Opportunities for shallow clearwater streams[J]. Limnologica, 2013,43(5):388-398.
- [52] Juhua L, Ronghua M, Hongtao D, et al. A New Method for Modifying Thresholds in the Classification of Tree Models for Mapping Aquatic Vegetation in Taihu Lake with Satellite Images[J]. Remote Sensing, 2014,6(8):7442-7462.
- [53] Fleur V, Kerst B, Veerle V, et al. Mapping of submerged aquatic vegetation in rivers from very high-resolution image data, using object-based image analysis combined with expert knowledge[J]. Hydrobiologia, 2018,812(1):157-175.
- [54] Tedros B, Charles L, Qiusheng W, et al. Decision-Tree, Rule-Based, and Random Forest Classification of High-Resolution Multispectral Imagery for Wetland Mapping and Inventory[J]. Remote Sensing, 2018,10(4):580.