

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

团体标准

T/EERT XXXX—2025

地表水环境碳汇光学遥感监测技术规范

Technical Specification for Optical Remote Sensing Monitoring of
Carbon Sinks in Surface Water Environment

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

2025 – XX – XX 发布

2025 – XX – XX 实施

浙江省生态与环境修复技术协会 发布

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 工作流程 2

5 监测指标 3

6 遥感数据获取与处理 5

7 遥感监测产品标准与表达 7

8 遥感反演估算模型与方法 8

附录 A（资料性） 内陆水体水质参数地面采样记录表19

附录 B（资料性） 水质反演模型的基本信息汇总表 20

附录 C（资料性） OCx 算法的分量系数表21

附录 D（资料性） Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v6) 算法流程表22

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件中的某些内容可能涉及专利，文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由浙江大学海南研究院、浙江大学提出。

本文件由浙江省生态与环境修复技术协会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：浙江大学海南研究院、浙江大学、清华大学深圳国际研究生院、浙江科技大学、浙江农林大学暨阳学院、浙江水文管理中心、浙江省应急管理科学研究院、江苏华高软件技术有限公司、浙江中誉生态环境科技有限公司。

本文件主要起草人：张霄宇、张开、朱宇晨、邓水光、王梦琦、尚永衡、廖然、江彬彬、杜泳、陈浙梁、王俊、傅姣琪、邬柯、卜岩枫。

本文件为首次发布。

引 言

随着高空间分辨率、高/多光谱以及高时相卫星和无人机光学遥感观测技术的发展，面向水体观测的卫星和无人机光学遥感监测技术已经逐渐成熟，可以实现对地表河流、湖泊水库、河口港湾等各类不同形状的大中小型地表水体的环境质量、富营养化程度、生态系统健康，以及水资源量动态变化的业务化观测。近年来，受人类活动、全球变暖和极端气候事件的影响，由于富营养化导致的水体藻类旺发等突发性生态环境事件风险加剧，超负荷碳储存已经成为地表水环境安全的巨大隐患，而极端干旱事件则进一步加剧了水资源短缺问题。

为了满足对碳达峰、碳中和目标提供量化评估支撑的迫切需求，本标准基于卫星和无人机光学遥感技术的水环境监控能力，在充分理解水体碳源碳汇转换机制的基础上，制定标准化的碳汇监测技术流程。本文件同时为积极贯彻《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国水污染防治法》，适用于水环境安全监控和预测预警、富营养污染防治，地表水资源管理和保护等业务。

依据GB 3838—2002《地表水环境质量标准》、GB/T 32453—2015《卫星对地观测数据产品分类分级规则》第5章对地观测数据分类分级原则，以及HJ 91.2《地表水环境质量监测技术规范》，结合人类活动和全球变化背景下水环境安全监控需求和碳中和背景下的双碳指标监测需求，制定以下体系分级原则：以水体碳汇总量为目标层指标，依碳形态要素划分准则层指标，并结合光学遥感可获取的物理与生物光学参数细化为指标层指标。该分级体系遵循“目标可量化、要素可分解、参数可观测”的原则，旨在实现地表水碳汇的系统化监测与科学评估，为水环境管理、碳排放核算及“双碳”战略实施提供技术支撑。

地表水环境碳汇光学遥感监测技术规范

1 范围

本文件规定了地表水环境碳汇光学遥感监测的工作流程、监测指标、遥感数据获取与处理、遥感监测产品标准与表达、遥感反演估算模型与方法等内容。

本文件适用于我国各类地表水域（如河流、湖泊、河口、港湾、水库、池塘、沟渠等）的水环境碳汇监测工作，适用于水体储碳、固碳能力及碳汇量的遥感估算。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 3838 地表水环境质量标准
- GB/T 32453 卫星对地观测数据产品分类分级规则
- HJ 91.2 地表水环境质量监测技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

碳汇 carbon sink

水体中能够吸收并储存二氧化碳（CO₂）等温室气体的物质和过程，主要包括溶解态和颗粒态碳源的转化和储存。指在水体中长期储存的碳元素，包括无机碳和有机碳。

3.2

储碳 carbon storage

指在水体中长期储存的碳元素，包括无机碳和有机碳。储碳可发生在水体表层、水体沉积物或水生生物体内，是碳循环的重要环节。

3.3

固碳 carbon sequestration

指通过物理、化学或生物过程将大气中的二氧化碳固定到水体中或水生生态系统中的过程。固碳通常是实现储碳的前提和机制，对于减缓气候变化具有重要意义。

3.4

光学遥感 optical remote sensing

采用卫星、无人机等平台，利用光学传感器捕捉水体及其周围环境的信息，能够提供水体的水环境质量参数，以及水体边界等数据和信息，广泛应用于地表水环境监测和碳汇估算中。

3.5

无机颗粒碳 inorganic particulate carbon

指水体中以无机颗粒形态存在的碳量，主要指碳酸盐类矿物颗粒等无机形式的碳，常用计量单位：mg C/L（毫克碳每升）。

3.6

有机颗粒碳 organic particulate carbon

指水体中以颗粒形态存在的有机碳总量，主要包括浮游植物、沉积物及其有机残留物中的碳，常用计量单位：mg C/L（毫克碳每升）。

3.7

溶解无机碳 inorganic dissolved carbon

指水体中以溶解态形式存在的无机碳总量，通常以碳酸根离子（ CO_3^{2-} ）和碳酸氢根离子（ HCO_3^- ）的形式存在，是水生植物和藻类生长的重要营养盐之一，常用计量单位： mg C/L （毫克碳每升）。

3.8

溶解有机碳 organic dissolved carbon

指水体中以溶解态形式存在的有机碳总量，主要包括自然有机物和人为污染物中的有机碳，溶解有机碳对水环境质量和水体生态健康有显著影响，常用计量单位： mg C/L （毫克碳每升）。

3.9

叶绿素 a chlorophyll a

化学分子式为 $\text{C}_{55}\text{H}_{72}\text{MgN}_4\text{O}_5$ ，是估算浮游植物生物量的重要指标，是评价水体富营养化水平和估算初级生产力的重要参数，也是光学遥感的重要探测指标，常用计量单位： mg/m^3 或者 $\mu\text{g/L}$ （毫克每立方米或者微克每升）。

3.10

浮游植物种群 phytoplankton population

指水体中微小的植物性浮游生物群体，能够通过光合作用固定二氧化碳。浮游植物的数量和种群结构是水体生态系统健康的关键指标之一。

3.11

悬浮泥沙 suspended sediments

指水体中以悬浮状态存在的固体颗粒物，这些颗粒物在水体中可导致浑浊，影响水质。悬浮泥沙的浓度是评估水体浑浊度和水质状况的重要指标，同时也是估算无机颗粒碳的中间介质，常用计量单位： mg/L （毫克每升）。

3.12

黄色物质 chromophoric dissolved organic matter

指水体中能够吸收特定波长光的溶解性有机物，是水体溶解有机碳的重要储库，通常呈现黄色或棕色，影响水体的颜色和透明度。黄色物质主要来自于植物性有机物分解或污染物，常用计量单位： m^{-1} （每米吸收率）。

3.13

水表温度 surface water temperature

指水体表面层的温度。水表温度对水体的生物活动、溶解氧的溶解度以及化学反应速率有重要影响。常用计量单位： $^{\circ}\text{C}$ （摄氏度）。

3.14

色度 chroma

指水体的颜色，是水体中溶解性物质和悬浮物反射光的结果。色度常用于评估水体的污染程度或自然特征。常用计量单位：platinum-cobalt (Pt-Co) 数值。

3.15

浊度 turbidity

指水体中悬浮物对光的散射程度，通常由悬浮颗粒物、微生物、藻类等引起。浑浊度是评估水体清洁度和水质的重要指标。常用计量单位：NTU（Nephelometric Turbidity Unit，浊度单位）。

3.16

水位 water level

指水体表面相对于某一参考面的高度。水位的变化反映了水体的蓄水状况和可能的水文变化，是水资源管理的重要指标。常用计量单位： m （米）。

3.17

水面面积 water surface area

指水体在地表上所覆盖的水平投影面积，反映了水体的空间分布范围，是水体动态变化和水资源评估的重要参数。常用计量单位： km^2 （平方千米）。

4 工作流程

地表水碳汇光学遥感监测工作流程如图1所示，其中水质参数地面采样记录表见附录A中表A.1，水质反演模型的基本信息汇总表见附录B中表B.1。

5 监测指标

5.1 构建原则

5.1.1 科学性和系统性

指标体系的构建和级别划分应符合地表水环境标准要求，分级结构清晰，能反映不同级别指标之间的内在特征与联系。

5.1.2 全面性

所选碳汇要素和指标应充分考虑影响水环境要素的各方面因素，并能够充分反映水体的碳储存状况。

5.1.3 可操作性

各指标应具有明确的定义，所需数据可被准确测量与统计；基于卫星和无人机的光学遥感碳汇产品，其精度应满足不同指标类别的定量估算与评价分级需求，并符合现行国家及国际标准；方法简便、结果易于理解，可被各类用户广泛采纳和应用。

5.1.4 可扩展性和兼容性

体系制定首先考虑目前使用广泛、可标准化程度高的主流遥感监测产品，同时考虑未来一定时期出现新类别和等级划分的可能性，具备可扩展性；与现行使用的国家地表水环境质量的指标体系、碳源碳汇要素具有明确的映射关系，能方便地与国内外相关分类分级方案接轨。

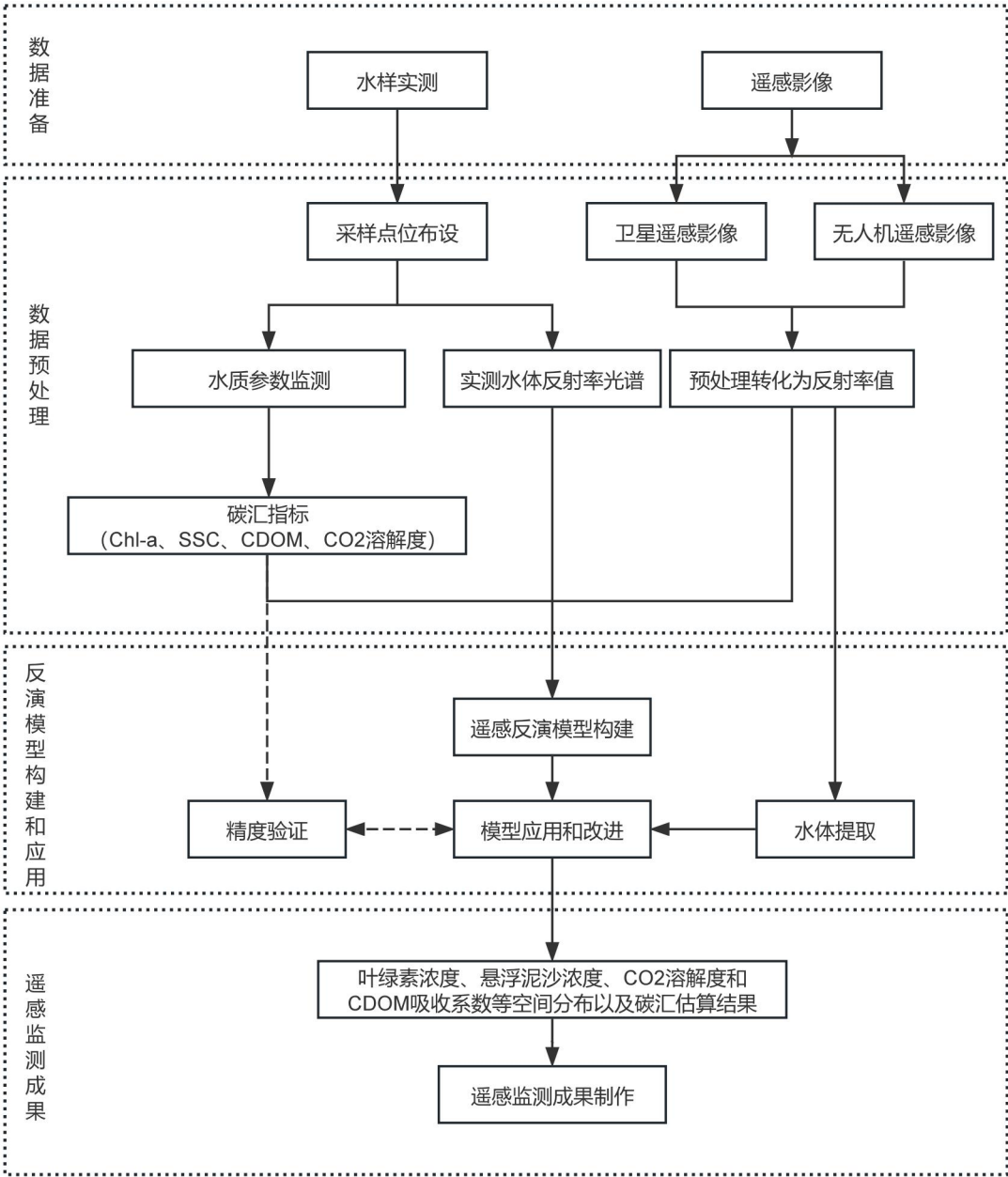


图 1 地表水环境碳汇光学遥感监测工作流程图

5.2 指标分级

- 5.2.1 基于卫星和无人机光学遥感探测的地表水环境碳汇监测指标体系分为三级体系。
- 5.2.2 一级指标为水体碳汇总量，是目标层指标。
- 5.2.3 在一级指标的基础上，依据水体中碳汇要素进一步细分为六个二级指标，分别是水体物理特征、碳汇总量、溶解态无机碳总量、溶解态有机碳总量、颗粒态无机碳总量和颗粒态有机碳总量，这些二级指标构成了指标体系的准则层。
- 5.2.4 依据卫星和无人机光学遥感技术对于碳汇要素的可获得性，对二级指标进一步细化为三级指标层，包括水表温度、水体面积、CO₂溶解度、黄色物质（CDOM）、悬浮泥沙（SSC）、叶绿素 a 及浮游植物种群结构。其中，水表温度影响 CO₂在水体中的溶解能力，是估算水体碳汇量的重要物理参数；水体面积则是用于估算水体体积并进而获得碳汇指标的重要计量参数。

5.2.5 地表水环境碳汇光学遥感监测指标体系见表 1。

目标层	准则层	指标层	遥感估算原理
一级指标	二级指标	三级指标	
水体碳汇总量	水体物理特征	水表温度	利用热红外波段进行热辐射反演，通过亮温计算水表温度
		水体面积	利用多光谱遥感影像提取水体范围，进而估算水体的实际面积
	碳汇总量	$Q=C_{total}\times V=(\sum C_{DIC}+\sum C_{DOC}+\sum C_{PIC}+\sum C_{POC})\times V$	不同碳汇要素指标的单位浓度和水体体积的乘积。其中水面面积通过卫星遥感影像的陆水边界信息来计算，采用库容-水位-面积曲线法来获取水体的体积
	溶解态无机碳（DIC）总量	CO ₂ 溶解度	结合遥感获取水面温度和气压数据，来进行水体中CO ₂ 的估算
	溶解态有机碳（DOC）总量	黄色物质/CDOM	CDOM在短波长范围内（紫外至蓝光区域）表现出强烈的光吸收特性。常用特征吸收波长为440 nm开展水体中CDOM浓度和分布的监测
	颗粒态无机碳（PIC）总量	悬浮泥沙/SSC	根据悬浮来进行水体中碳酸盐类矿物的监测，间接进行水体中颗粒态无机碳的估算
	颗粒态有机碳（POC）总量	叶绿素a	根据叶绿素a在蓝绿波段的吸收特征构建遥感反演算法来开展叶绿素a的遥感估算，根据叶绿素a和颗粒有机碳的相关关系进一步估算颗粒有机碳
		浮游植物种群结构	根据藻类所含特征性光合色素的光谱吸收特征来构建遥感反演算法。例如，蓝藻中的藻蓝素在620 nm~630 nm具强吸收特征；绿藻中的叶绿素b在455 nm和640 nm~645 nm有吸收峰，通过多波段组合或光谱分解方法提取不同藻类特征，实现藻类种群结构的遥感探测

表 1 碳汇监测指标体系

6 遥感数据获取与处理

6.1 遥感数据类型

6.1.1 高分辨率卫星影像

优选具备较高空间和光谱分辨率的卫星数据，能获取可见光、近红外和短波红外等多光谱信息，重访周期短、覆盖范围广，可支持中大尺度水体范围提取、水质要素反演及碳汇变化的长期动态监测与分析。

6.1.2 无人机遥感影像

通过搭载高光谱传感器获取厘米级高分辨率影像，飞行路径和时间灵活可控，适合重点水域的精细化碳汇监测、卫星数据验证及短期快速变化的补充观测。

6.1.3 辅助遥感数据

辅助遥感数据包括但不限于数字高程模型（DEM）和气象卫星数据等，可提供地形、大气状况等背景信息，用于影像的大气与几何校正及结果精度提升。

6.2 获取方式

6.2.1 遥感数据来源包括但不限于卫星影像（如 Sentinel-2、Landsat 系列、高分系列、资源系列等）、

无人机影像等遥感平台。

6.2.2 遥感数据的选择应根据研究区域的尺度、监测目标以及时间需求进行优化，以确保数据的时空分辨率满足碳汇要素监测的需求。

6.2.3 具体的遥感数据收集应遵循以下原则：

- a) 数据来源：选择具有高时空分辨率的遥感数据，卫星数据优先考虑高分辨率数据（如欧空局的 Sentinel—2，中国的高分—2 号等），无人机数据可提供更高精度的影像。
- b) 数据质量：选择云量少、影像清晰度高的影像，避免季节性或气象条件影响的影像。

6.3 遥感影像预处理

6.3.1 几何校正

6.3.1.1 对影像进行几何校正，消除由于影像采集角度、平台移动等因素造成的几何畸变。

6.3.1.2 使用标准地图投影对影像进行配准。

6.3.2 辐射校正

对影像进行辐射校正，消除传感器特性、观测角度等因素对影像辐射值的影响，确保数据具有可比性。

6.3.3 大气校正

进行大气校正，消除大气中的水蒸气、气溶胶等对光谱信息的影响，确保获取地物的真实反射率。

6.3.4 水体提取

遥感影像经预处理后进行水体面积的提取。常用的方法包括基于 NDWI(归一化水体指数)、MNDWI（修改的归一化水体指数）等遥感指数，结合阈值分割或分类方法，准确提取水体区域，确保水体边界的精确性。

6.3.5 数据融合

6.3.5.1 根据观测要素精细化程度的要求，可开展多源遥感数据融合（如高分辨率和多/高光谱卫星遥感影像的融合、无人机和卫星遥感影像融合等）和同化（如开展和气象数据的同化等），通过数据融合和同化技术提高产品的时空分辨率和精细程度。

6.3.5.2 基于多时相和长时序遥感数据，可有效描述水环境和碳存储的动态变化，并提供全时段监测能力。

6.4 遥感影像反演

6.4.1 碳汇指标遥感反演

6.4.1.1 通过对预处理后的遥感影像进行分析，提取与碳汇相关的水环境指标，包括光合有效辐射（PAR），水表温度和水体面积等。

6.4.1.2 水体中用于估算不同碳汇的指标主要包括叶绿素、悬浮泥沙、CO₂、CDOM，通过光谱反射特征、波段指数以及与现场数据的回归模型来估算，同时采用相关的水环境指标，进行碳汇关键指标的遥感获取。

6.4.1.3 常见的碳汇要素包括水体中溶解无机碳（DIC）、溶解有机碳（DOC）、颗粒有机碳（POC）、颗粒无机碳（PIC）等，根据碳汇关键指标的提取，用于估算不同形态的碳汇量。

6.4.2 碳汇总量核算

6.4.2.1 基于水体遥感信息提取后得到的碳汇要素数据，通过碳汇核算模型计算水体的碳吸收和储存量。

6.4.2.2 在碳汇总量核算过程中，将水体面积与碳汇指标浓度等关键数据相结合，从而实现对碳汇能力的定量化分析。

6.4.3 数据分析

基于水体的不同形式的碳储量，开展水体碳汇总量评估并开展分析、预测预警。

6.5 数据质量控制

6.5.1 数据准确性检查

对原始数据进行准确性检查，确认影像的几何、辐射、大气等校正是否符合要求。

6.5.2 数据一致性检查

通过与地面观测数据或已有的高质量遥感数据对比，确保遥感数据在时间和空间上的一致性。

6.5.3 质量评估指标

6.5.3.1 使用多种评价指标，如均方根误差（RMSE）、平均绝对误差（MAE）、平均绝对百分比误差（MAPE）和决定系数（ R^2 ）等进行数据质量评估，并结合 1:1 散点图、残差分布图进行可视化分析，综合评价模型的准确性与稳定性。

6.5.3.2 可按水质参数、时间和空间分区对结果分类比较，用于识别适用性与局限性，并为模型优化提供依据。

6.5.4 异常值处理

识别并处理遥感影像中的异常像元和噪声信息，避免其对碳汇核算精度造成干扰。

7 遥感监测产品标准与表达

7.1 分类要求

遥感监测产品应根据监测要素、空间尺度、时间周期、数据来源及产品类型进行分类，并在成果报告和数据产品中予以标注。分类应遵循以下原则：

- 按监测要素分类：包括水体范围、水质参数（如叶绿素 a、悬浮物、溶解有机物浓度等）、碳汇量等主要监测指标；
- 按空间尺度分类：可分为全球 / 全国尺度、省级尺度、市县级尺度、园区 / 社区尺度等，不同尺度对应不同的空间分辨率要求；
- 按时间周期分类：可分为月度、季度、半年、年度监测产品，必要时增加旬或日监测产品；
- 按数据来源分类：包括高分辨率卫星遥感产品、无人机遥感产品及多源数据融合产品，需注明主要数据源及处理方法；
- 按产品类型分类：分为栅格影像产品（GeoTIFF 等）、矢量边界产品（Shapefile、GeoJSON 等）和统计分析报告等。

7.2 图件要求

7.2.1 产品分辨率

按照碳汇要素遥感监测估算的精度要求，可结合卫星对地观测遥感数据的时空分辨率和观测要素，生成全球 / 全国尺度（优于 10 km）、省级尺度（优于 3 km）、市县级尺度（优于 1 km）和园区 / 社区尺度（优于 10 m）的遥感监测产品。

7.2.2 时间分辨率

可以对地表水环境碳汇要素进行月度、季节、半年和年度监测。

7.2.3 图例设置

7.2.3.1 图例应与监测变量属性一致，分级宜为 5~9 级，标注应包括变量名称、单位（SI）和数值范围。

7.2.3.2 布局应与图件主体协调，不遮挡重要信息，并在不同设备和打印条件下清晰可辨。

7.2.3.3 配色应简洁、易区分，避免相近色。

7.3 遥感影像专题图制作

7.3.1 专题图制作要求

- 遥感影像专题图制作应满足以下要求：
- a) 专题图必须完整反映监测目标的空间分布特征，并在图面上明确标注坐标格网、比例尺、图例、指北针、标题及数据来源；
 - b) 专题图应根据不同监测要素设置合理的分类与色彩分级方案，确保图件的可读性和对比性；
 - c) 专题图制作应采用统一的制图规范和符号体系，保证不同产品间的一致性和可比性；
 - d) 制作过程中应注明数据处理方法、时间尺度、空间分辨率及投影坐标系等信息，以便追溯与再利用。

7.3.2 产品输出与可视化

- 7.3.2.1 将碳汇要素的遥感影像产品输出为标准化格式（如 GeoTIFF、NetCDF 等），并通过地理信息系统（GIS）或遥感软件进行可视化展示，便于进一步分析和决策支持。
- 7.3.2.2 生成的产品至少包括以下类型：水体碳汇总量分布图、碳汇密度空间分布图、碳汇变化趋势等信息。

7.4 空间数据格式要求

在遥感影像处理和产品制作过程中，空间数据应遵循统一的格式要求，以确保数据的一致性和可互操作性。

7.4.1 空间数据具体格式要求

- 空间数据具体格式要求为：
- a) 坐标系：平面坐标系采用 2000 国家大地坐标系，适用于全国范围的数据处理；
 - b) 高程基准：采用“1985 国家高程基准”，保证高程数据的准确性；
 - c) 投影方式：采用“经差 3 度分带高斯克吕格”投影方式，适用于大范围的空间数据转换和分析。

8 遥感反演估算模型与方法

8.1 地表水环境常用的遥感反演估算模型

8.1.1 地表水环境常用的遥感反演估算模型见表 2。

表 2 地表水环境常用的遥感反演估算模型与方法汇总表

序号	反演指标名称	波段	反演估算模型与算法	参数	卫星传感器种类	参考文献
1	表层水温	——	Air2water	T_a 大气温度、 T_h 参考水温	MODIS	Piccolroaz, S. et al. (2013).
2	叶绿素 a (Chl-a)	443/555 /670nm	经验算法/CI 和 OCx 混合算法/QAA 半解析算法	$Rrs/a_0 - a_4$ (详见附录 C) / $a_{ph}(\lambda)$ 、 $a_w(\lambda)$ (详见附录 D)	MODIS / VIIRS/ OLCI/ SeaWiFS / MERIS / CZCS/ TM/ETM+/OLI	NASA/Le et al. (2009)
3	黄色物质 (CDOM)	443/560 /665nm	基于遥感反射率与特定波长下的 CDOM 吸收系数的经验模型/QAA 半解析算法	$Rrs/a_g(\lambda)$ 、 $a_w(\lambda)$ 、 $a_{dg}(\lambda)$ 、 $a_{ph}(\lambda)$ (详见附录 D)	OLI / MSI	Mabit et al. (2022)/Zhu & Yu, (2013)
4	溶解有机碳 (DOC)	530 / 670nm	经验模型/基于 CDOM 吸收系数与 DOC 相关性的经验模型	$Rrs/300, 355, 440$ 和 $443nm$ 等处 CDOM 吸收系数	OLI / MSI	王艳楠, 2022/徐健, 2018
5	颗粒态有机碳 (POC)	555 / 865nm	经验模型/基于 Chl-a 与 DOC 相关性的经验模型	$Rrs/Chl-a$	GOCI/OLCI/MODIS	Dong Liu et al. (2023)
6	悬浮泥沙浓度 (SSC)	570/664/750nm	经验模型	Rrs	CCD	YU Zhifeng et al.(2012)
7	CO ₂ 溶解度 (pCO ₂)	——	多参数拟合模型	Chl-a、ZSD、Tw、iPAR、AccuPAR 和 Drs (详见 8.2.2.2 节)	OLCI	Tianci Qi et al.(2023)

8	浮游植物类群/蓝藻和绿藻有害藻类	550 / 620nm	经验模型	Chl-a/Rrs	MERIS	中国科学院南京地理与湖泊研究所
注1：未特别标注的“经验算法”均指基于遥感反射率（Rrs）单波段或多波段组合与实测数据之间建立的回归关系；表中列出了各指标的典型经验算法。						
注2：波段列中“——”表示无特定固定波段，该类指标的反演主要依赖于其他衍生参数，即通过原始波段数据经计算或模型推导出的、具有明确物理意义的中间变量。						

8.1.2 各类水域主要监测指标的常用遥感反演算法及其应用产品汇总表见表3。

表3 各类水域主要监测指标的常用遥感反演算法及其应用产品汇总表

监测指标	模型公式	适用水体	应用机构/产品
CO ₂ 溶解度	McSAA-pCO ₂ 半解析模型	开阔大洋及近岸海域	自然资源部第二海洋研究所/SatCO ₂
	多参数拟合经验模型	内陆湖泊水体	Tianci Qi et al.(2023)
水表温度 (SST)	NASA拓展的分裂窗算法	海洋或大型湖泊	NASA
	Air2water算法	内陆湖泊	Piccolroaz, S. et al. (2013)/Air2water
	NOAA算法：多通道SST算法即MCSST（multi-channel SST）、非线性算法即NLSST（non-linear SST）	海洋或大型湖泊	NOAA/AVHRR
	单窗算法	沿海或近岸水体	单窗算法
	微波遥感反演模型	开阔大洋及近岸海域	微波遥感反演
溶解态有机碳 (DOC)	陈灏经验模型	长江河口	华东师范大学
	王艳楠经验模型	内陆湖泊水体	王艳楠, 2022
	徐健经验模型	内陆湖泊水体	徐健, 2018
黄色物质 (CDOM)	光谱斜率模型	开阔大洋及近岸海域	NASA/SeaDAS
	波段比值经验模型	内陆湖泊水体	Mabit et al. (2022)/波段比值法
	QAA_v6-CDOM半解析模型	内陆湖泊水体	Zhu & Yu (2013) /QAA_v6-CDOM半解析方法
	尚盈辛经验模型	内陆湖泊水体	尚盈辛, 中国科学院大学, 2020
颗粒态有机碳 (POC)	NASA经验模型	开阔大洋及近岸海域	NASA/SeaDAS
	张杰经验模型	内陆湖泊水体	Zhang Jie et al. (2014)
	刘东经验模型	内陆湖泊水体	Dong Liu et al. (2023)
叶绿素a (Chl-a)	NASA 模型：CI算法、OCx算法、CI和OCx混合算法	开阔大洋、中低浑浊水体	NASA/SeaDAS
	OC4ME算法NN-CHL算法	清澈至中等浑浊水体	ESA/SNAP
	荧光峰算法	近岸水体	Beck et al. (2012) /荧光峰算法
	反射峰算法	由浮游植物主导的内陆及近岸水体	Matthews et al. (2012) /反射峰算法
	多波段经验模型	内陆湖泊水体	Le et al. (2009) /多波段法
悬浮泥沙浓度 (SSC)	半解析模型	近岸混浊水体（黄河口和近海邻域）	华中师范大学/半解析算法
	黄金铭经验模型	内陆湖泊水体	黄金铭, 内蒙古农业大学(2022)
	俞志峰经验模型	内陆湖泊水体	Yu Zhifeng et al.(2012)
浮游植物种群结构	蓝藻丰度经验模型	湖泊水体	中国科学院南京地理与湖泊研究所/蓝藻丰度
	蓝藻丰度经验模型、蓝藻生物量模型	湖泊水体	NASA/蓝藻生物量
	波段组合模型、XGBoost 回归法构建模型	中国东部海域	华东师范大学/浮游植物类群
	硅藻半解析模型	沿海二类水体	南京信息工程大学/硅藻

8.2 主要监测指标估算方法

8.2.1 CO₂溶解度

8.2.1.1 MeSAA-pCO₂ 半解析模型

计算方法参见公式（1）~（3）：

$$pCO_2 = pCO_{2@Hmix} + \Delta pCO_{2@bio} \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$pCO_{2@Hmix} = LUT(TA_0, DIC_0, NTA_{35}, NDIC_{35}, SST, Salinity) \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$\Delta pCO_{2@bio} = -117.5 \times [\log(chla) - \log(0.2)] \cdots \cdots \cdots (3)$$

式中：

pCO_2 ——目标像元的大气平衡分压，单位：μatm；

$pCO_{2@Hmix}$ ——保守混合模型下由盐度/总碱度和温度决定的 pCO_2 ，单位：μatm；

$\Delta pCO_{2@bio}$ ——生物/局地化学过程引起的偏差，单位：μatm；

LUT ——基于保守混合模型构建的查找表；

TA_0 ——淡水端元的总碱度端元值，单位：μmol·kg⁻¹；

DIC_0 ——淡水端元的溶解无机碳浓度端元值，单位：μmol·kg⁻¹；

NTA_{35} ——海水端元（通常为盐度35）的总碱度端元值，单位：μmol·kg⁻¹；

$NDIC_{35}$ ——海水端元（通常为盐度35）的溶解无机碳浓度端元值，单位：μmol·kg⁻¹；

SST ——海表温度，单位：℃；

$Salinity$ ——海表盐度，单位：psu。

8.2.1.2 多参数拟合经验模型

计算方法参见公式（4）：

$$pCO_2 = f(Chl-a, ZSD, Tw, iPAR, AccuPAR, Drs) \cdots \cdots \cdots (4)$$

输入： $Chl-a$ 、 ZSD 、 Tw 、 $iPAR$ 、 $AccuPAR$ 、 Drs

输出： pCO_2

式中：

$Chl-a$ ——叶绿素 a 浓度，单位：μg/L；

ZSD ——透明度，单位：m；

Tw ——表层水温，单位：℃；

$iPAR$ ——入射光合有效辐射，单位：μmol·m⁻²·s⁻¹；

$AccuPAR$ ——穿透水体的有效光照，单位：μmol·m⁻²·s⁻¹；

Drs ——气体交换扰动参数。

8.2.2 水表温度（SST）

8.2.2.1 NASA 拓展的分裂窗算法

计算方法参见公式（5）：

$$SST = aij_0 + aij_1 BT_{11\mu m} + aij_2 (BT_{11\mu m} - BT_{12\mu m}) T_{sfc} + aij_3 (\sec(\theta - 1) (BT_{11\mu m} - BT_{12\mu m}) + aij_4 (mirror) + aij_5 (\theta^*) + aij_6 (\theta^2)) \cdots \cdots \cdots (5)$$

式中：

aij ——根据月份与纬度分区设定的一组系数，可在NASA官网查阅；

SST ——水表温度，单位：℃；

$BT_{11\mu m}$ ——11μm通道的亮度温度，单位：K；

$BT_{12\mu m}$ ——12μm通道的亮度温度，单位：K；

T_{sfc} ——参考海表温度（SST），单位：℃；

θ ——传感器天顶角，单位：°；

θ^* ——若像素位于扫描线前半部分，则天顶角为负，单位：°；

$mirror$ ——镜像边编号（0或1）。

注：此外，NASA还确立了基于短波红外（3 μm~4 μm）和三个波段（3.9 μm、11 μm和12 μm）海表温度热辐射的组合来推算反演海表温度。

8.2.2.2 Air2Water 算法

计算方法参见公式（6）~（8）：

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{\delta} \left(a_1 + a_2 T_a - a_3 T_w + a_5 \cos \left(2\pi \left(\frac{t}{t_y} - a_6 \right) \right) \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$\delta = \exp \left(-\frac{T_w - T_h}{a_4} \right) \text{ if } T_w \geq T_h \dots\dots\dots (7)$$

$$\delta = \exp \left(-\frac{T_h - T_w}{a_7} \right) + \exp \left(-\frac{T_w}{a_8} \right) \text{ if } T_w < T_h \dots\dots\dots (8)$$

式中：

t ——一年中的第几天（儒略日）；

t_y ——一年中的总天数（通常为365或366）；

T_a ——大气温度，即空气温度，单位：℃；

T_w ——湖泊表层的水温，单位：℃；

δ （delta）——无量纲参数，表示湖泊表层体积与参考体积的比例；

T_h ——参考水温，用于表示湖泊深层水体的温度，通常固定为4℃，也可作为待优化参数，单位：℃；

$a_1 \sim a_8$ ——模型的八个可调参数，用于拟合特定湖泊的温度响应行为。

8.2.2.3 NOAA 算法

8.2.2.3.1 多通道 SST 算法参见公式（9）：

$$T_s = \alpha + \beta T_i + \gamma (T_i - T_j) + \delta (T_i - T_j) (1 - \sec(\theta)) \dots\dots\dots (9)$$

式中：

T_s ——待计算的水体表面温度，单位：℃；

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ——算法的待定系数，可在NOAA官网查阅；

T_i ——中红外通道的亮度温度，单位：℃；

T_j ——热红外通道的亮度温度，单位：℃；

注：如AVHRR数据第3、4、5通道的亮温，MODIS数据第 20，22，23，以及 31，32 波段。

θ ——天底角，单位：°。

8.2.2.3.2 非线性算法参见公式（10）：

$$T_s = \alpha + \beta T_i + \gamma (T_i - T_j) T_{\text{guess}} + \delta (T_i - T_j) (1 - \sec(\theta)) \dots\dots\dots (10)$$

式中：

T_{guess} ——水表温度的最初估计值，可用MCSST结果代替，单位：℃。

8.2.2.4 单窗算法

应设置3个输入参数，分别为地表发射率、大气透射率和有效平均大气温度。大气透射率可利用LOWTRAN-7程序模拟大气状态获取，有效平均大气温度可利用当地气象观测站数据计算获取。计算方法参见公式（11）~（13）。

$$T_s = \frac{1}{\epsilon} \{ a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D] T_{\text{sensor}} - D T_a \} \dots\dots\dots (11)$$

$$C = \epsilon \tau \dots\dots\dots (12)$$

$$D = (1 - \tau) [1 + (1 - \epsilon) \tau] \dots\dots\dots (13)$$

式中：

a ——经验系数，值为-67.355351；

b ——经验系数，值为0.458606；
 ε ——地表发射率；
 τ ——大气总透射率；
 T_s ——是地表真实温度，单位：K；
 T_{sensor} ——传感器（星上）亮度温度，单位：°C。
 T_0 ——近地面大气温度，单位：°C；
 T_a ——有效平均大气温度，单位：°C。

8.2.2.5 微波遥感反演模型

计算方法参见公式（14）：

$$T(\theta) = T_{Atm}^{\uparrow}(\theta) + \tau[eT_s + (1 - e)(\Omega T_{Atm}^{\downarrow}(\theta) + \tau T_c)] \quad (14)$$

式中：

θ 指入射角，单位：°；
 $T(\theta)$ ——辐射计观测的亮度温度，单位：°C；
 T_s ——海洋表面温度，单位：°C；
 T_c ——宇宙背景辐射，单位：°C；
 $T_{Atm}^{\uparrow}(\theta)$ ——大气上行辐射亮度温度，单位：°C；
 $T_{Atm}^{\downarrow}(\theta)$ ——大气下行辐射亮度温度，单位：°C；
 e ——海面比辐射率；
 τ ——大气透过率；
 Ω ——海面散射校正因子。

8.2.3 溶解态有机碳（DOC）

8.2.3.1 陈灏经验模型

计算方法参见公式（15）~（17），其中夏季溶解态有机碳计算方法参见公式（15），其他季节溶解态有机碳计算方法参见公式（16）：

$$DOC = 0.18 \times a_{CDOM}(300) + 1 \quad (15)$$

$$DOC = 0.2 \times a_{CDOM}(300) + 0.71 \quad (16)$$

$$a_{CDOM}^*(300) = 135.5 \times e^{(-235.6 \times S_{275-295})} + 0.8683 \times e^{(-2.56 \times S_{275-295})} \quad (17)$$

式中：

DOC ——溶解有机碳浓度的浓度，单位：mg/L；
 $a_{CDOM}^*(300)$ ——CDOM在300 nm处的归一化吸收系数，是 $a_{CDOM}(300)$ 与DOC的比值，单位： $L \cdot mg^{-1} \cdot m^{-1}$ ；
 $S_{275-295}$ ——在275~295 nm光谱波段之间的光谱斜率，单位： nm^{-1} 。

8.2.3.2 王艳楠经验模型

计算方法参见公式（18）~（19）：

$$DOC = 0.916a_{CDOM}(355) + 1.219 \quad (18)$$

$$DOC = 0.559a_{CDOM}(355) + 2.3 \quad (19)$$

式中：

$a_{CDOM}(355)$ ——在波长355 nm的CDOM吸收系数，单位： m^{-1} ；
 DOC ——溶解有机碳浓度的浓度，单位：mg/L。

8.2.3.3 徐健经验模型

计算方法参见公式（20）：

$$a_{CDOM}(355) = 0.787DOC + 0.984 \dots \dots \dots (20)$$

式中:

$a_{CDOM}(355)$ ——在波长355 nm的CDOM吸收系数, 单位: m^{-1} ;

DOC ——溶解有机碳浓度的浓度, 单位: mg/L 。

8.2.4 黄色物质 (CDOM)

8.2.4.1 光谱斜率模型

计算方法参见公式 (21):

$$a_{CDOM}(\lambda) = a_{CDOM}(440) \cdot e^{-S(\lambda-440)} \dots \dots \dots (21)$$

式中:

$a_{CDOM}(\lambda)$ ——在波长 λ 处的CDOM吸收系数, 单位: m^{-1} ;

S ——光谱斜率, 单位: nm^{-1} 。

8.2.4.2 波段比值经验模型

计算方法参见公式 (22):

$$a_{CDOM}(440) = 20 \times \log_{10} \left(\frac{R_{rs}(665)}{R_{rs}(560)} + 1 \right)^{1.8} \dots \dots \dots (22)$$

式中:

$a_{CDOM}(440)$ ——在波长440 nm的CDOM吸收系数, 单位: m^{-1} 。

8.2.4.3 QAA_v6-CDOM 半解析模型

计算方法参见公式 (23) ~ (25):

$$a(443) = \frac{(1-u(443))(b_{bw}(443)+b_{bp}(443))}{u(443)} \dots \dots \dots (23)$$

$$a_p(443) = 0.63b_{bp}(560)^{0.88} \dots \dots \dots (24)$$

$$a_{CDOM}(443) = a(443) - a_w(443) - a_p(443) \dots \dots \dots (25)$$

式中:

$a(443)$ ——在波长443nm处的总吸收系数, 单位: m^{-1} ;

$a_p(443)$ ——在波长443nm处的颗粒物吸收系数, 单位: m^{-1} ;

$b_{bw}(\lambda)$ ——波长 λ 处的纯水的后向散射系数, 单位: m^{-1} ;

$b_{bp}(\lambda)$ ——波长 λ 处的颗粒物的后向散射系数, 单位: m^{-1} ;

$u(\lambda)$ ——无量纲。

注: $b_{bw}(\lambda)$ 、 $b_{bp}(\lambda)$ 、 $u(\lambda)$ 的取值参见附录D。

8.2.4.4 尚盈辛经验模型

贫营养水库CDOM计算方法参见公式 (26), 中营养水库CDOM计算方法参见公式 (27), 富营养水库CDOM计算方法参见公式 (28):

$$a_{CDOM}(355) = 3.72R_{rs}(681)/R_{rs}(706) - 3.48 \dots \dots \dots (26)$$

$$a_{CDOM}(355) = 2.29R_{rs}(767)/R_{rs}(404) + 0.31 \dots \dots \dots (27)$$

$$a_{CDOM}(355) = 38.99R_{rs}(407)/R_{rs}(522) - 22.53 \dots \dots \dots (28)$$

式中:

$a_{CDOM}(355)$ ——在波长355 nm的CDOM吸收系数, 单位: m^{-1} ;

$R_{rs}(\lambda)$ ——在波长 λ 处的水体遥感反射率, 单位: sr^{-1} 。

8.2.5 颗粒态有机碳 (POC)

8.2.5.1 NASA 经验模型

计算方法参见公式 (29)：

$$POC = 203.2 \times \left(\frac{R_{rs}(443)}{R_{rs}(555)} \right)^{-1.034} \dots\dots\dots (29)$$

式中：

POC ——颗粒态有机碳，单位：mg/L；

$R_{rs}(\lambda)$ ——在波长 λ 处的水体遥感反射率，单位：sr⁻¹。

8.2.5.2 张杰经验模型

计算方法参见公式 (30)：

$$POC = 9.734 \times (R_{rs}(865)/(R_{rs}(555)) + 0.3553 \dots\dots\dots (30)$$

式中：

POC ——颗粒态有机碳，单位：mg/L；

$R_{rs}(\lambda)$ ——在波长 λ 处的水体遥感反射率，单位：sr⁻¹。

8.2.5.3 刘东经验模型

计算方法参见公式 (31) ~ (35)。其中 $FAI \leq 0.0139$ 时，计算方法参见公式 (32)； $FAI > 0.0139$ 时，计算方法参见公式 (33)。

$$POC = 0.0599 \times [Chl - a] \dots\dots\dots (31)$$

$$[Chl - a] = 65.1462 \times [a_{ph}(674)]^{1.0418} \dots\dots\dots (32)$$

$$[Chl - a] = 1351.48 \times SI + 62.37 \dots\dots\dots (33)$$

$$FAI = R_{rc}(865) - R_{rc}(665) - \frac{(865-665)}{(1020-865)} \times (R_{rc}(1020) - R_{rc}(665)) \dots\dots\dots (34)$$

$$SI = \frac{\exp(R_{rc}(665)) - \exp(R_{rc}(865))}{\exp(R_{rc}(665)) + \exp(R_{rc}(865))} \dots\dots\dots (35)$$

式中：

$Chl-a$ ——叶绿素 a 浓度，单位：μg/L；

$R_{rc}(\lambda)$ ——中心波长为 λ 处的瑞利校正带反射率，单位：

FAI ——表示水体叶绿素荧光信号强度；

SI ——基于指数函数计算的光谱指数；

$a_{ph}(674)$ ——是674 nm处的浮游植物吸收系数，使用专为湖泊开发的改进准分析算法远程估计，单位：m⁻¹。

8.2.6 叶绿素 a (Chl-a)

8.2.6.1 NASA 模型

8.2.6.1.1 当 $chl a \leq 0.25 \mu g/L$ 时，应采用 CI 算法，计算方法参见公式 (36) ~ (37)：

$$CI = R_{rs}(\lambda_{green}) - [R_{rs}(\lambda_{blue}) + \frac{\lambda_{green} - \lambda_{blue}}{\lambda_{red} - \lambda_{blue}} * (R_{rs}(\lambda_{red}) - R_{rs}(\lambda_{blue}))] \dots\dots\dots (36)$$

$$chl a = 10^{(a_{0CI} + a_{1CI} * CI)} \dots\dots\dots (37)$$

式中：

$chl a$ ——叶绿素 a 浓度，单位：μg/L；

a_{0CI} ——经验系数，值为-0.4287；

a_{1CI} ——经验系数，值为230.47；

$R_{rs}(\lambda)$ ——在波长 λ 处的水体遥感反射率，单位：sr⁻¹。

λ_{green} ——绿色波段中心波长, 单位: nm;

λ_{blue} ——蓝色波段中心波长, 单位: nm;

λ_{red} ——红色波段中心波长, 单位: nm。

8.2.6.1.2 当 $chl a \geq 0.35 \mu\text{g/L}$ 时, 应采用 OCx 算法, 计算方法参见公式 (38):

$$\log_{10}(chl a) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i (\log_{10}(\frac{R_{rs}(\lambda_{blue})}{R_{rs}(\lambda_{green})}))^i \dots\dots\dots (38)$$

式中:

a_i ——经验系数, 取值参见附录C。

8.2.6.1.3 当 $0.25 \mu\text{g/L} < chl a < 0.35 \mu\text{g/L}$ 时, 应采用 CI 和 OCx 混合算法, 计算方法参见公式 (39):

$$chl a = \frac{chla_{CI}(t_2 - chl a * a_{CI})}{t_2 - t_1} + \frac{chla_{OCx}(chl a * a_{CI} - t_1)}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots (39)$$

式中:

t_1 ——经验系数, 值为0.25;

t_2 ——经验系数, 值为0.35。

注: 对于 CI 算法, 所有传感器的蓝色、绿色和红色波段分别使用最接近 443 nm、555 nm 和 670 nm 的波段。对于 OCx 算法, $R_{rs}(\lambda_{blue})$ 是多个输入 R_{rs} 值中的最大值, 系数 $a_0 - a_4$ 是特定于传感器的。标准处理中算法的 OCx 分量使用的系数见附录 C 中表 C.1。

8.2.6.2 OC4ME 算法

计算方法参见公式 (40) ~ (41):

$$\log_{10}[Chl] = \sum_{x=0}^4 (A_x \log_{10} R_j^i)^x \dots\dots\dots (40)$$

$$R_j^i = \max\left(\frac{R_{rs}(443)}{R_{rs}(555)}, \frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)}, \frac{R_{rs}(510)}{R_{rs}(555)}\right) \dots\dots\dots (41)$$

式中:

$R_{rs}(\lambda)$ ——在波长 λ 处的水体遥感反射率, 单位: sr^{-1} ;

R_j^i ——在波段 i 与基准波段 j 处的遥感反射率比值;

A_0 ——经验系数, 值为0.4502748;

A_1 ——经验系数, 值为-3.259491;

A_2 ——经验系数, 值为3.522731;

A_3 ——经验系数, 值为-3.359422;

A_4 ——经验系数, 值为0.949586。

8.2.6.3 NN-CHL 算法

欧洲航天局 (ESA) 为 Sentinel-3 OLCI 开发的神经网络算法, 用于反演水体中的叶绿素-a 浓度等参数。该算法已集成在 SNAP 软件和 C2RCC 插件中, 用户可直接使用。

8.2.6.4 荧光峰算法

计算方法参见公式 (42):

$$FLH = L_2 - L_1 - (L_3 - L_1) \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{(\lambda_3 - \lambda_1)} \dots\dots\dots (42)$$

式中:

$L_i (i = 1, 2, 3)$ ——MERIS 波段 i 处的离水辐亮度, 单位: $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$;

λ_i ——波段 i 的中心波长, 单位: nm。

注: 波段2的中心波长位于叶绿素荧光峰附近, 波段1和3决定基线位置。

8.2.6.5 反射峰算法

计算方法参见公式（43）~（44）：

$$MPH = R_{BRmax} - R_{BR664} - \left[\left(R_{BR885} - R_{BR664} \frac{(\lambda_{max} - 664)}{(885 - 664)} \right) \right] \dots\dots\dots (43)$$

$$Chla = 5.24 \times 10^9 MPH^4 - 1.95 \times 10^8 MPH^3 + 2.46 \times 10^6 MPH^2 + 4.02 \times 10^3 MPH + 1.97 \dots\dots (44)$$

式中：

$Chla$ ——叶绿素浓度，单位：μg/L；

λ_{max} ——Bottom of Rayleigh反射率最大值 R_{BRmax} 对应的波长；

R_{BR664} ——664 nm处的Bottom of Rayleigh反射率；

R_{BR885} ——885 nm处的Bottom of Rayleigh反射率。

8.2.6.6 多波段经验模型

计算方法参见公式（45）~（46）：

$$\left[\frac{1}{R_{rs}(\lambda_1)} - \frac{1}{R_{rs}(\lambda_2)} \right] / \left[\frac{1}{R_{rs}(\lambda_4)} - \frac{1}{R_{rs}(\lambda_3)} \right] = \frac{a_{chla}(\lambda_1) + a_v(\lambda_1) - a_v(\lambda_2)}{a_v(\lambda_4) - a_v(\lambda_3)} \dots\dots\dots (45)$$

$$Chla = 0.0097 \times \left(\frac{R_{rs}^{-1}(662) - R_{rs}^{-1}(693)}{R_{rs}^{-1}(740) - R_{rs}^{-1}(705)} \right) - 0.1268 \dots\dots\dots (46)$$

式中：

$a_{chla}(\lambda)$ —— λ 处叶绿素的吸收系数，单位： m^{-1} ；

$a_w(\lambda)$ —— λ 处纯水的吸收系数，单位： m^{-1} ；

注：计算方法见附录D中的QAA算法流程图。

8.2.7 悬浮泥沙浓度（SSC）

8.2.7.1 半解析模型

计算方法参见公式（47）~（48）：

$$\log_{10}(SSC_{turbid}) = \sum_{i=1}^3 \beta_i \times w_i \times \frac{R_{rs}(\lambda_i)}{R_{rs}(560)} + \beta_0 \dots\dots\dots (47)$$

$$w_i = \frac{R_{rs}(\lambda_i)}{R_{rs}(\lambda_1) + R_{rs}(\lambda_2) + R_{rs}(\lambda_3)}, i = 1, 2, 3 \dots\dots\dots (48)$$

式中：

SSC_{turbid} ——悬浮泥沙浓度，单位：mg/L；

β_{0-3} ——算法的经验系数；

w_{1-3} —— $R_{rs}(\lambda_i)/R_{rs}(560)$ 的权重系数；

$R_{rs}(\lambda_{1-3})$ ——665 nm、740 nm和865 nm的水体遥感反射率，单位： sr^{-1} 。

8.2.7.2 黄金铭经验模型

计算方法参见公式（49）：

$$SSC = -128.32 \left(\frac{R_{rs}(750)}{R_{rs}(570)} \right)^2 + 326.18 \left(\frac{R_{rs}(750)}{R_{rs}(570)} \right) - 17.022 \dots\dots\dots (49)$$

式中：

SSC ——悬浮泥沙浓度，单位：mg/L；

$R_{rs}(\lambda)$ ——在波长 λ 处的水体遥感反射率，单位： sr^{-1} 。

8.2.7.3 俞志峰经验模型

计算方法参见公式（50）~（51）：

$$SSC = 0.4023e^{(46.457X)} \dots\dots\dots (50)$$

$$X = (R_{rs}(567) + R_{rs}(664))R_{rs}(664)/R_{rs}(567) \dots\dots\dots (51)$$

式中:

SSC——悬浮泥沙浓度, 单位: mg/L;

$R_{rs}(\lambda)$ ——在波长 λ 处的水体遥感反射率, 单位: sr^{-1} 。

8.2.8 浮游植物种群结构

8.2.8.1 蓝藻丰度经验模型

计算方法参见公式(52):

$$PC: Chl-a = 0.027 \times \exp \left(2.89 \cdot \frac{R_{rs}(550)}{R_{rs}(620)} \right) \dots\dots\dots (52)$$

式中:

PC: Chl-a——蓝藻丰度, 即藻青蛋白(Phycocyanin)与叶绿素a(Chlorophyll-a)的浓度比值;

$R_{rs}(\lambda)$ ——在波长 λ 处的水体遥感反射率, 单位: sr^{-1} 。

8.2.8.2 蓝藻生物量模型

8.2.8.2.1 蓝藻生物量计算方法参见公式(53)~(54):

$$SS(\lambda) = \rho_s(\lambda) - \rho_s(\lambda_-) + \{\rho_s(\lambda_-) - \rho_s(\lambda_+)\} \frac{(\lambda - \lambda_-)}{(\lambda_+ - \lambda_-)} \dots\dots\dots (53)$$

$$CI = -SS(681) \dots\dots\dots (54)$$

式中:

$SS(\lambda)$ ——光谱形状指标, 用来描述在中心波段 λ 处, 光谱曲线相对于相邻两个参考波段 λ_+ 和 λ_- 的偏离程度;

CI—— $SS(665) < 0$ 时, 为蓝藻生物量, 单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$;

ρ_s ——针对瑞利散射和气溶胶影响校正后的水体遥感反射率;

λ ——中心波段, 单位: nm;

λ_+ 和 λ_- ——相邻的参考波段, 单位: nm。

8.2.8.2.2 开发蓝藻评估网络(CyAN), 提供GeoTIFF格式产品数据集, 以数字(DN)形式提供, 计算方法参见公式(55):

$$Cl_{cyano} = 10^{(DN \cdot 0.011714 - 4.1870866)} \dots\dots\dots (55)$$

式中:

Cl_{cyano} ——蓝藻细胞浓度, 单位: cells/mL (细胞数/毫升);

注: 该范围为10000至7000000个细胞每毫升。DN形式说明, 0表示低于CI检测限阈值(灰色), 1—253是数据, 254——土地(棕色), 255——无数据(黑色-例如, 多云像素)。

8.2.8.3 浮游植物类群

8.2.8.3.1 波段组合模型计算方法参见公式(56)~(57):

$$X = \frac{R_n(490) + R_n(620)}{R_n(560)} \quad (R^2 = 0.76) \dots\dots\dots (56)$$

$$\lg C_p = -1.93X + 2.75 \quad (\text{硅藻}) \dots\dots\dots (57)$$

式中:

R_n ——归一化遥感反射率;

$\lg C_p$ ——浮游植物Chla浓度的对数。

8.2.8.3.2 基于奇异值分解的XGBoost回归法构建模型计算方法参见公式(58)~(59):

$$U_{\text{applicaxion}} = R_{\text{rsstandandized}}^{\text{application}} V \Lambda^{-1} \dots\dots\dots (58)$$

$$\lg C_p = a + b_1 u_1 + b_2 u_2 + \dots + b_n u_n \dots\dots\dots (59)$$

式中：

$\lg C_p$ ——浮游植物Chla浓度的对数。

U ——正交矩阵，列向量为左奇异向量，代表建模数据的主成分；

Λ ——奇异值矩阵，由矩阵 $R_{\text{rsstandandized}}^{\text{application}}$ 分解得到，为对角矩阵；

V ——正交矩阵，列向量为右奇异向量。

注： U 为 $M \times M$ 矩阵； Λ 为 $M \times N$ 矩阵； V 为 $N \times N$ 矩阵。 Λ 中的奇异值按由大到小顺序排列在对角线上。

8.2.8.4 硅藻半解析模型

计算方法参见公式（60）~（62）：

$$a_{\text{ph}} = Q_a^* \sum_{i=1}^n a_{\text{ph},i,\text{sol}} \dots\dots\dots (60)$$

$$a_{\text{ph}} = Q_a^* \sum_{j=1}^m a_{\text{gaus}}(\text{peak}_j) e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \text{peak}_j}{\sigma_j} \right)^2} \dots\dots\dots (61)$$

$$C_{\text{dia}} = A a_{\text{gaus}}(628)^B \dots\dots\dots (62)$$

式中：

a_{ph} ——不同浮游植物种群吸收之和，单位： m^{-1} ；

Q_a^* ——归一化吸收系数，单位： $\text{m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ ；

$a_{\text{ph},i,\text{sol}}$ ——溶解状态下第 i 个种群的吸收系数；

a_{gaus} ——第 j 个中心波段处的高斯峰值，单位： m^{-1} ；

peak_j ——第 j 个高斯波段的中心波长，单位： nm ；

σ_j ——第 j 个高斯波段的半波宽，单位： nm ；

C_{dia} ——硅藻浓度，单位： mg/L ；

$a_{\text{gaus}}(628)$ ——628 nm处的高斯峰值，单位： m^{-1} ；

A ——幂函数拟合参数，数值为114.39；

B ——幂函数拟合参数，数值为1.0761。

附 录 A
(资料性)
内陆水体水质参数地面采样记录表

内陆水体水质参数地面采样记录表见表A.1。

表 A.1 内陆水体水质参数地面采样记录表

[illegible]

实施单位：

记录人:

审核人：

日期： 年 月 日

天气情况:

附 录 B
(资料性)
水质反演模型的基本信息汇总表

水质反演模型的基本信息汇总表见表B.1。

表 B. 1 水质反演模型的基本信息汇总表

序号	反演指标名称	模型类别 (经验模型/半解析模型/解析模型)	卫星传感器种类	波段选择 (单波段/波段组合)	模型公式	相关系数	误差精度	备注
示例	叶绿素a	经验模型	MERIS	$[Rrs^{-1}(663)-Rrs^{-1}(711)] \times Rrs(749)$	$Chl-a=212.92 \times [Rrs^{-1}(663)-Rrs^{-1}(711)] \times Rrs(749) + 30.2$	r=0.92	RMSE=11.02 g/L	参考文献: Kun Shietal., 2013

附 录 C
(资料性)
OCx 算法的分量系数表

OCx算法的分量系数表见表C.1。

表 C. 1 OCx 算法的分量系数表

传感器	算法	波段比值（蓝/绿）	系数a ₀	系数a ₁	系数a ₂	系数a ₃	系数a ₄
SeaWiFS	OC4, CI	$R_{rs}(443 > 489 > 510)/R_{rs}(555)$	0.32814	-3.20725	3.22969	-1.36769	-0.81739
MODIS	OC3M, CI	$R_{rs}(443 > 488)/R_{rs}(547)$	0.26294	-2.64669	1.28364	1.08209	-1.76828
VIIRS-SNPP	OC3_VIIRS_SNPP, CI	$R_{rs}(443 > 486)/R_{rs}(551)$	0.23548	-2.63001	1.65498	0.16117	-1.37247
VIIRS-NOAA20	OC3_VIIRS_NOAA20, CI	$R_{rs}(445 > 489)/R_{rs}(556)$	0.28153	-2.65472;	1.30882	1.31521	2.08622
VIIRS-NOAA21	OC3_VIIRS_NOAA21, CI	$R_{rs}(445 > 488)/R_{rs}(555)$	0.24765	-2.54926	1.55323	0.39485	1.54632
PACE OCI	OC4, CI	$R_{rs}(442 > 490 > 510)/R_{rs}(555)$	0.32814	-3.20725	3.22969	-1.36769	0.81739
MERIS	OC4E, CI	$R_{rs}(443 > 489 > 510)/R_{rs}(560)$	0.42487	-3.20974	2.89721	-0.75258	-0.98259
OCTS	OC4O, CI	$R_{rs}(443 > 489 > 516)/R_{rs}(565)$	0.54655	-3.51799	3.39128	-0.91567	-0.97112
GOCI	OC4, CI	$R_{rs}(412 > 443 > 489)/R_{rs}(555)$	0.28043	-2.49033	1.53980	-0.09926	-0.68403
HAWKEYE	OC4, CI	$R_{rs}(447 > 488 > 510)/R_{rs}(556)$	0.32814	-3.20725	3.22969	-1.36769	-0.81739
OLCI	OC4, CI	$R_{rs}(443 > 490 > 510)/R_{rs}(560)$	0.42540	-3.21679	2.86907	-0.62628	-1.09333
CZCS	OC3, CI	$R_{rs}(443 > 520)/R_{rs}(555)$	0.31841	-4.56386	8.63979	-8.41411	1.91532

附录 D
(资料性)

Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v6) 算法流程表

Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v6) 算法流程表见表D.1。

表 D. 1 QAA_v6 算法流程表

	$r_{rs}(\lambda) = R_{rs}(\lambda)/(0.52 + 1.7 R_{rs}(\lambda))$	
	$u(\lambda) = \frac{-g_0 + \sqrt{(g_0)^2 + 4g_1 * r_{rs}(\lambda)}}{2g_1},$ $g_0 = 0.089, g_1 = 0.1245$	
	IF Rrs (670) < 0.0015sr ⁻¹ (QAA_v5)	(else)
2	$\chi = \log \left(\frac{r_{rs}(443) + r_{rs}(490)}{r_{rs}(55x) + 5 \frac{r_{rs}(670)}{r_{rs}(490)} r_{rs}(670)} \right)$ $a(\lambda_0) = a(55x) = a_w(\lambda_0) + 10^{h_0+h_1\chi+h_2\chi^2}$	$a(\lambda_0) = a(670)$ $= a_w(670) + 0.39 \left(\frac{\text{Rrs}(670)}{\text{Rrs}(443) + \text{Rrs}(490)} \right)^{1.14}$
3	$b_{bp}(\lambda_0) = b_{bp}(55x) = \frac{u(\lambda_0) \times a(\lambda_0)}{1 - u(\lambda_0)} - b_{bw}(55x)$	$b_{bp}(\lambda_0) = b_{bp}(670) = \frac{u(\lambda_0) \times a(\lambda_0)}{1 - u(\lambda_0)} - b_{bw}(670)$
4	$\eta = 2.0 \left(1 - 1.2 \exp \left(-0.9 \frac{r_{rss}(443)}{r_{rs}(55x)} \right) \right)$	
5	$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^\eta$	
6	$a(\lambda) = (1 - u(\lambda))(b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda))/u(\lambda)$	
7 & 8	$\zeta = 0.74 + \frac{0.2}{0.8 + r_{rs}(443)/r_{rs}(55x)}$ $\xi = e^{S(442.5-415.5)}, S = 0.015 + \frac{0.002}{0.6 + r_{rs}(443)/r_{rs}(55x)}$	
9 & 10	$a_g(443) = \frac{a(412) - \zeta a(443)}{\xi - \zeta} - \frac{a_w(412) - \zeta a_w(443)}{\xi - \zeta}$ $a_{dg}(\lambda) = a_g(443)e^{-S(\lambda-443)}, a_{ph}(\lambda) = a(\lambda) - a_{dg}(\lambda) - a_v(443)$	