

面向高浑浊水体遥感反射率反演的HY-1 C/D影像大气校正算法研究

白若枫^{1,2}, 张翊², 龚芳², 何贤强^{1,2}

1. 上海交通大学 海洋学院, 上海 200240;

2. 自然资源部第二海洋研究所 卫星海洋环境监测预警全国重点实验室, 杭州 310012

摘要: 悬浮颗粒物浓度较高的近岸高浑浊水体具有强后向散射和近红外波段离水信号难以忽略的独特光学特性。这一特性显著增加了水体—大气耦合辐射传输的复杂性, 导致在分离大气程辐射与水体离水辐射时精度严重下降, 成为制约高浑浊区域水质参数定量遥感反演精度的主要障碍。传统的高浑浊水体的大气校正算法往往是基于短波红外、紫外等通道的数据外推求解气溶胶散射, 并在此基础上进行大气校正实现水体遥感反射率(R_{rs})的反演。然而无论是基于哪种参考波段进行外推, 随着外推光谱距离的增加, 气溶胶反射率 ρ_a 估算结果的误差会难以避免地增大; 此外, 由于强吸收性气溶胶在蓝紫光(350—420 nm)谱段的吸收作用影响, 会给这谱段的 R_{rs} 反演结果带来误差, 单一参考波段外推算法难以解决。针对上述问题, 本文以HY-1C/D卫星水色水温扫描仪COCTS (Chinese Ocean Color and Temperature Scanner)与紫外成像仪UVI (Ultra-Violet Imager)载荷数据为例, 提出了联合紫外和近红外通道作为参考波段的光谱内插大气校正算法。同时, 通过水体固有光学量(IOPs)参数之间的关系模型, 建立了紫外通道 R_{rs} 贡献的校正模型, 进而提高了光谱内插大气校正算法的反演精度。结果表明, 这一方法有效地提高了全波段 R_{rs} 的反演精度, 并且能够提升 R_{rs} 反演结果的有效数据覆盖率。

关键词: HY-1C/D卫星, 高浑浊水体, 大气校正, 遥感反射率, 水体固有光学量

中图分类号: TP79/P237.9/P2

引用格式: 白若枫, 张翊, 龚芳, 何贤强. 2026. 面向高浑浊水体遥感反射率反演的HY-1 C/D影像大气校正算法研究. 遥感学报, 30(6): 1713–1726

Bai R F, Zhang X, Gong F and He X Q. 2026. Atmospheric correction algorithm for HY-1 C/D images for remote sensing reflectance inversion of high-turbidity water. National Remote Sensing Bulletin, 30(6): 1713–1726 [DOI: 10.11834/jrs.20264496]

1 引言

水色遥感大气校正理论研究至今已有超过40年的历史, 其原理是基于卫星观测的大气顶TOA (top of atmosphere) 辐亮度数据, 通过剔除大气分子散射、气溶胶散射辐射和水面白帽反射等贡献, 获得携带水体光学组份信息的 R_{rs} 结果。由于离水辐亮度(L_w)信号一般仅占卫星接收辐亮度的10%左右, 水色遥感对大气校正精度提出了苛刻的要求。一般大气分子瑞利散射等贡献可以通过矢量辐射传输模型计算获得, 因此, 大气校正的难点主要在于对气溶胶散射贡献的精确估算。

水色遥感大气校正算法的奠基性工作主要是由美国迈阿密大学物理系Gordon教授完成, 并且随着Gordon和Wang (Gordon和Wang, 1994; Gordon等, 1997)理论框架的提出, 标志着基于以近红外通道为参考波段的大洋清洁水体大气校正算法的成熟, 并已在国际主流卫星数据中实现了业务化应用。

而对于近海高浑浊水体, 由于高浓度悬浮颗粒物产生的强烈散射作用, 近红外波段离水辐亮度较大, 导致近红外算法高估了气溶胶散射辐亮度, 从而出现“过校正”(离水辐亮度出现负值)的情况。此外, 与开阔大洋的气溶胶类型相比,

收稿日期: 2024-10-31; 预印本: 2026-03-31

基金项目: 浙江省自然科学基金(编号:LDT23D06021D06)

第一作者简介: 白若枫, 研究方向为二类水体大气校正。E-mail: brf100@sjtu.edu.cn

通信作者简介: 张翊, 研究方向为水色卫星遥感。E-mail: zhangxuan@sio.org.cn

受到陆源输入的影响，近岸海域的气溶胶类型往往包含一定的沙尘、烟煤和黑碳粒子，因此在蓝紫光区间具有较强的吸收性（Song等，2022），这使得基于弱吸收或非吸收性海洋型气溶胶模型的大气校正算法计算结果会高估气溶胶散射贡献，并导致反演的离水辐亮度结果偏低，从而增加了高浑浊水体大气校正的难度。针对该问题，基于高浑浊水体离水辐射光谱特征开发的短波红外算法（SWIR-AC）（Wang和Shi，2005；Wang，2007）和紫外算法（UV-AC）（He等，2012）均是通过寻找特定的低离水辐射光谱区间作为大气校正的参考波段，进而将参考波段的气溶胶反射率外推到可见光范围的“暗像元”算法。然而这种基于单一参考光谱区间外推的算法，会随着外推光谱距离的增加，气溶胶估算误差也难以避免地会系统性增大。例如Oo等（2008）基于传统近红外算法和短波红外算法，通过SeaDAS查找表进行近岸遥感影像的处理，并以SeaBASS实测数据为参考评估了443 nm、488 nm与551 nm通道的反演结果精度，结果显示不确定度随波长的减小而增大，即传统外推算法的反演误差会随着外推距离的增大而变大。在国产卫星数据的应用中同样存在类似的问题，Chen等（2021）从多源水色遥感产品数据融合的角度，利用SeaDAS 7.5.3对中国海洋卫星数据服务系统发布的HY-1C/COCTS Level-1级数据进行处理并获得 R_{rs} 产品，并评估了其在清洁水体中的不确定性；Mao等（2022）基于MOBY实测数据集对HY-1C/D卫星 R_{rs} 结果精度进行了评估；许玉壮等（2023）则基于HY-1C的L2A级 R_{rs} 产品对近海水体对应产品进行真实性检验，分析了COCTS在不同水体情况下的误差情况及成因。以上研究主要针对基于光谱外推法的大气校正算法，因此， R_{rs} 的反演结果同样难以避免受到外推距离变大带来的误差放大影响。

近年来，随着水色卫星遥感器技术的不断发展，以及对高精度大气校正结果的需要，越来越多的水色遥感载荷具备了更宽的光谱覆盖范围，这为高浑浊水体大气校正算法的改进提供了基础。例如，Bai等（2023）基于日本的GCOM-SGLI数据，以1个紫外和2个短波红外通道联合作为参考波段，通过紫外和短波红外通道两端内插实现对气溶胶贡献估算的大气校正算法（UV-SWIR-AC），从而有效避免了单一光谱区间外推导致的误差放

大问题。鉴于此，本研究拟以典型高浑浊水体——杭州湾水域为例，通过与水体光谱特性相结合的方法，基于国产水色卫星数据，构建从光谱两端内插的大气校正算法替代传统的单一参考波段外推的算法，以期国产海洋水色卫星HY1C/D数据提供高精度大气校正算法。

2 材料与方法

2.1 研究区及数据源

中国于2018年9月和2020年6月相继发射了海洋水色卫星HY-1C（降交点地方时10:30 AM±30 min）与HY-1D（降交点地方时1:30 AM±30 min），实现了上、下午卫星组网观测，其上搭载有水色水温扫描仪COCTS（Chinese Ocean Color and Temperature Scanner）与紫外成像仪UVI（Ultra-Violet Imager）。COCTS、UVI具体参数设置如表1所示。

表1 HY-1C/D卫星COCTS与UVI载荷通道设置
Table 1 Channel parameters setting of COCTS and UVI payloads for HY-1C/D satellite

载荷	中心波长/ μm	星下点空间分辨率/m
UVI	0.355	550
UVI	0.385	550
COCTS	0.412	1100
COCTS	0.443	1100
COCTS	0.490	1100
COCTS	0.520	1100
COCTS	0.565	1100
COCTS	0.670	1100
COCTS	0.750	1100
COCTS	0.865	1100
COCTS	10.800	1100
COCTS	12.000	1100

随着HY-1C/D卫星在轨运行积累了大量观测数据，为了提高其在近岸高浑浊水体反演中的应用效果，本文将建立适用于HY-1C/D数据的基于光谱内插的高浑浊水体大气校正算法。由表1可知，HY-1C/D卫星由于缺乏短波红外通道，无法直接使用UV-SWIR-AC算法。此外，Bai等（2023）的算法完全忽略紫外通道离水辐射信号强度也导致校正结果存在系统性误差。因此，本研究将UVI与COCTS载荷的数据相结合，以两个紫外通道和1

个近红外通道作为参考波段, 并参考水体IOPs参数关系模型建立了适用于HY-1C/D卫星数据的光谱内插大气校正算法。

本研究使用了2021年1—8月HY-1C/D卫星的COCTS与UVI载荷的L1B数据验证基于内插的大气校正算法的反演效果, 并对UVI载荷的2个紫外通道数据进行重采样处理, 保证各通道数据具备相同的空间分辨率。

本研究选择位于中国浙江省东北部, 连接钱塘江与东海的杭州湾水域作为研究区(图1)。作为中国东部沿海重要半封闭海湾, 这一区域受钱塘江径流和东海潮汐共同作用, 呈现典型的高浑浊水体特征, 悬浮物浓度高(200—1000 mg/L)(邵宇杰等, 2020), 能够较好地验证算法的适用性。

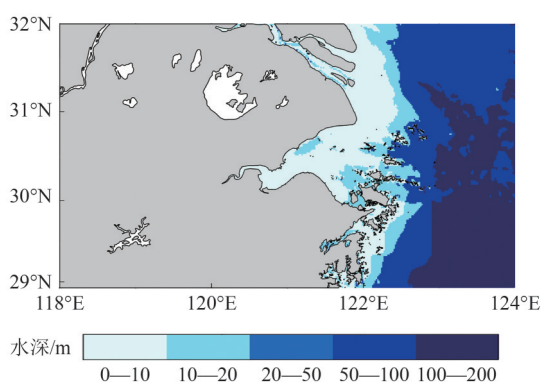


图1 研究区杭州湾位置

Fig. 1 Location of Hangzhou Bay in the study area

2.2 光谱内插大气校正算法原理

卫星传感器接收到的辐亮度(L_T)由以下部分组成:

$$L_T = L_r + L_a + L_{ra} + t \times L_{wc} + t \times L_w + T \times L_g \quad (1)$$

式中, L_r 为纯大气分子瑞利散射辐亮度; L_a 为纯气溶胶散射辐亮度; L_{ra} 为气溶胶与大气分子耦合作用辐亮度; L_{wc} 为海面白帽反射辐亮度; L_w 为海面离水辐亮度; L_g 为太阳耀斑辐亮度; t 和 T 分别为大气漫射和直射透过率。 L_r 可以通过大气矢量辐射传输模型预先生成的查找表进行精确计算, L_{wc} 可通过海面风速进行估算, L_g 可以通过太阳入射和卫星观测几何进行太阳耀斑掩膜和估算。因此, 大气校正的关键在于气溶胶散射辐亮度的精确计算。

He等(2012)针对GOCI卫星(光谱区间为412—865 nm), 根据高浑浊水体紫外通道离水辐亮度较低的特征提出了紫外算法(UV-AC), 有效实现高浑浊水体的大气校正处理。UV-AC算法假设412 nm下 R_{rs} 为0, 从而获得该通道的气溶胶反射率:

$$\rho(\lambda) = \frac{\pi \times L}{F_0 \times \cos\theta} \quad (2)$$

$$\rho_a(412) = \rho_{rc}(412) = \rho_T(412) - \rho_r(412) \quad (3)$$

式中, θ 为太阳天顶角, ρ_{rc} 为瑞利散射校正后的反射率。在此基础上根据气溶胶散射的光谱关系式外推至近红外通道, 获得 $\rho_a(NIR)$:

$$\rho_a(NIR_L) = \rho_a(412) [\varepsilon(NIR_s, NIR_L)]^{\frac{NIR_L - 412}{NIR_L - NIR_s}} \quad (4)$$

$$\varepsilon(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\rho_a(\lambda_1)}{\rho_a(\lambda_2)} \quad (5)$$

继而假设可见光通道气溶胶反射率与近红外气溶胶反射率相同, 最终实现大气校正。

因此在本文中为了实现内插大气校正算法的应用, 需要获得 $\rho_a(355)$ 和 $\rho_a(865)$ 两个参数作为前置条件。其中 $\rho_a(355)$ 基于“暗像元”原理以瑞利散射校正后的反射率代替:

$$\rho_a(355) = \rho_{rc}(355) = \rho_T(355) - \rho_r(355) \quad (6)$$

$\rho_a(865)$ 则参考式(4), 基于355 nm波段数据外推获得:

$$\rho_a(864) = \rho_a(355) [\varepsilon(750, 865)]^{\frac{865 - 412}{865 - 750}} \quad (7)$$

从而在此基础上实现从紫外和近红外通道的内插处理。

需要说明的是, 对于高浑浊水体光谱信号特征而言, 紫外通道的 R_{rs} 并不能完全视为0, 因此以紫外通道作为“暗像元”的得到的 $\rho_a(UV)$ 必然存在系统性误差。而短波红外通道由于纯水的强烈吸收作用, 即使在高浑浊水体, 离水辐亮度仍然可近似为0。因此, 对于UV-SWIR-AC算法, 尽管紫外通道的气溶胶反射率估算结果存在误差, 但是由于短波红外通道的结果相对准确, 最终内插后得到的可见光区间 R_{rs} 结果受到的影响仍然较小。而对于HY-1C/D卫星数据而言, $\rho_a(NIR)$ 是由 $\rho_a(UV)$ 外推所得, 以此为基础进行的内插校正必然存在较大误差, 由于对 ρ_a 部分的高估, 最终得到的 R_{rs} 结果往往较实际情况偏低(参考第3节的

图5),但其整体的光谱谱型变化趋势则与真值基本一致。

为了提高内插算法在HY-1C/D卫星数据的反演精度,需要对紫外通道的 R_{rs} 贡献进行校准。根据现有生物光学模型可知,离水辐射信号特征可以反映水体中各IOPs参数间的关系,因此可以通过初步内插的结果计算出接近真实情况的IOPs关系,继而再通过构建基于IOPs参数的紫外 R_{rs} 估算模型实现对大气校正反演精度的提高。

2.3 水体IOPs参数关系模型构建

根据水光学原理,水体的吸收系数 a 与后向散射系数 b_b 之间的比值可表征为如下:

$$\frac{a}{b_b} = \frac{a_w + a_{ph} + a_{TSM} + a_g}{b_{bw} + b_{bph} + b_{bTSM}} \quad (8)$$

式中, w 、 ph 、 TSM 和 g 分别代表纯水、浮游植物、悬浮物和有色溶解有机物(CDOM)。为了优化IOPs参数关系的计算模型,这里参考Lee等(1999, 2002)提出的联系表观光学量 R_{rs} 与固有光学量IOPs之间关系的QAA模型,主要关系式如下:

$$r_{rs} = \frac{1}{\gamma \times Q + \frac{T}{R_{rs}}} \quad (9)$$

$$r_{rs} = g_1 \times u^2 + g_0 \times u \quad (10)$$

$$u = \frac{1}{\frac{a}{b_b} + 1} \quad (11)$$

式中, T 取0.52, $\gamma \cdot Q$ 取1.7。系数 g_0 与 g_1 ,尽管在模型计算的过程中被设定为固定值($g_0 = 0.0895$, $g_1 = 0.1247$),但是对应不同的水体条件实际上会有所变化。基于反演得到的 R_{rs} 结果反过来估算系数 g_0 与 g_1 ,能够提高参考波段尤其是紫外通道 R_{rs} 数据的校正精度,进而提高内插算法对气溶胶反射率的计算精度,最终降低反演误差。

通过式(6)可知,参数 $\frac{a}{b_b}$ 的计算包含较多的未知变量。为了优化IOPs参数间的计算流程,本文首先通过引入比例系数 k 与 s 将对 $\frac{a}{b_b}$ 的求解转换为对 $b_{bph} + b_{bTSM}$ 的求解,而后者随波长均呈指数函数分布(Morel和Gentili, 1991),2个系数的定义如下:

$$k = \frac{a_{ph} + a_{TSM}}{b_{bph} + b_{bTSM}} \quad (12)$$

$$s = \frac{a_g}{k \times (b_{bph} + b_{bTSM})} \quad (13)$$

为了获得比例系数 k 与 s 的计算模型,本文结合前期构建的覆盖紫外的水体光谱模拟数据集(Bai等, 2020),获取了它们随波长变化的分布特征,如图2所示,其中具体的参数设置见表2。图2针对比例系数 k 与 s 分别展示了它们在不同水体要素浓度下的变化趋势,从中可以看出上述2个系数随波长的变化特征分别与叶绿素吸收系数(Bricaud等, 1995; Fischer和Fell, 1999)和纯水吸收系数(Pope和Fry, 1997; Smith和Baker, 1981)的变化特征相似,这为它们计算模型的建立提供了理论基础。根据模拟数据集中的相关参数,本文建立的比例系数 k 与 s 的计算模型如下:

$$k(\lambda) = k(670) \times a_{ph}^*(\lambda) \times f(\lambda) \quad (14)$$

$$f(\lambda) = a \times \lambda^2 + b \times \lambda + c \quad (15)$$

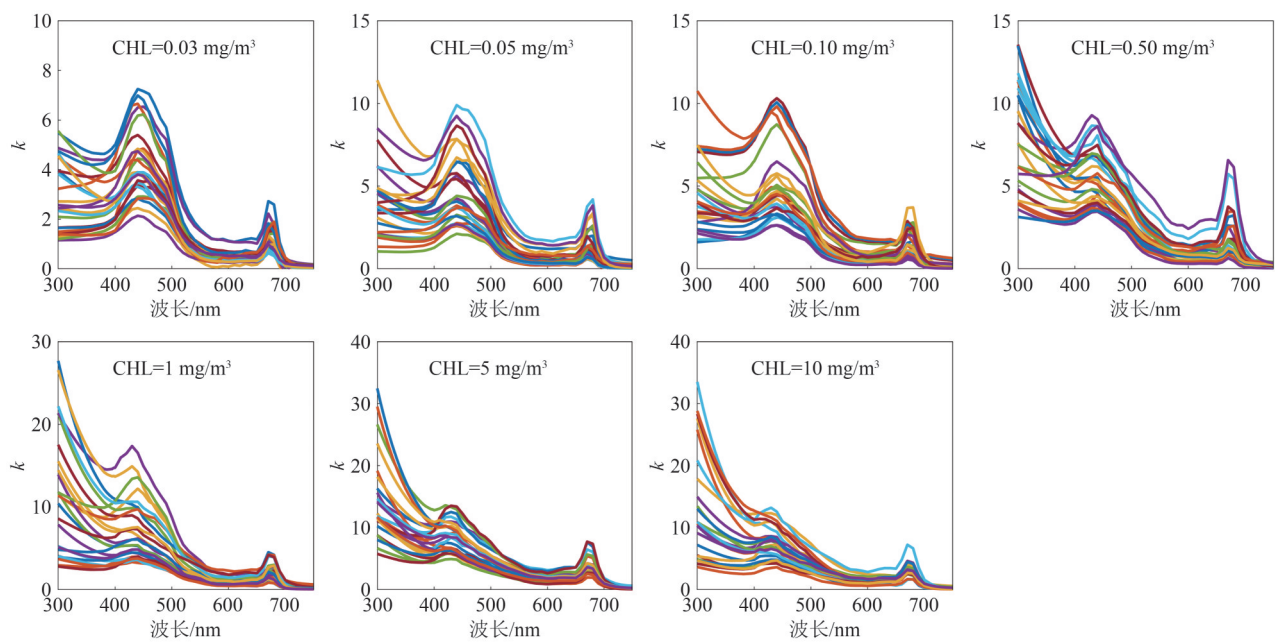
式中, a_{ph}^* 代表浮游植物的比吸收系数, a 、 b 和 c 分别取值 $3.115E-5$ 、 -0.03876 和 12.94 。

$$s(\lambda) = s(355) \times \exp(-0.021 \times (\lambda - 355)) + s(750) \times \exp\left(-\left(\frac{\lambda - 750}{47}\right)^2\right) \quad (16)$$

对比式(12)与式(14)可知,系数 k 是依赖单一波段的 $k(670)$ 结果计算所得,因此直接对比特定波长下 k 值的模拟结果与真值即可说明其计算模型的精度;而系数 s 是依赖2个波段 $s(355)$ 与 $s(750)$ 结果的高斯函数模型计算所得,这里采用波段比值的方法,建立 $\ln \frac{S(355)}{S(750)}$ 与 $\ln \frac{R_{rs}(355)}{R_{rs}(750)}$ 之间的关系式,通过展示波段比值间的线性关系说明该计算模型的精度。图3即上述2个系数的计算模型在不同条件下的对比情况,可见上述模型具有较好的反演精度。

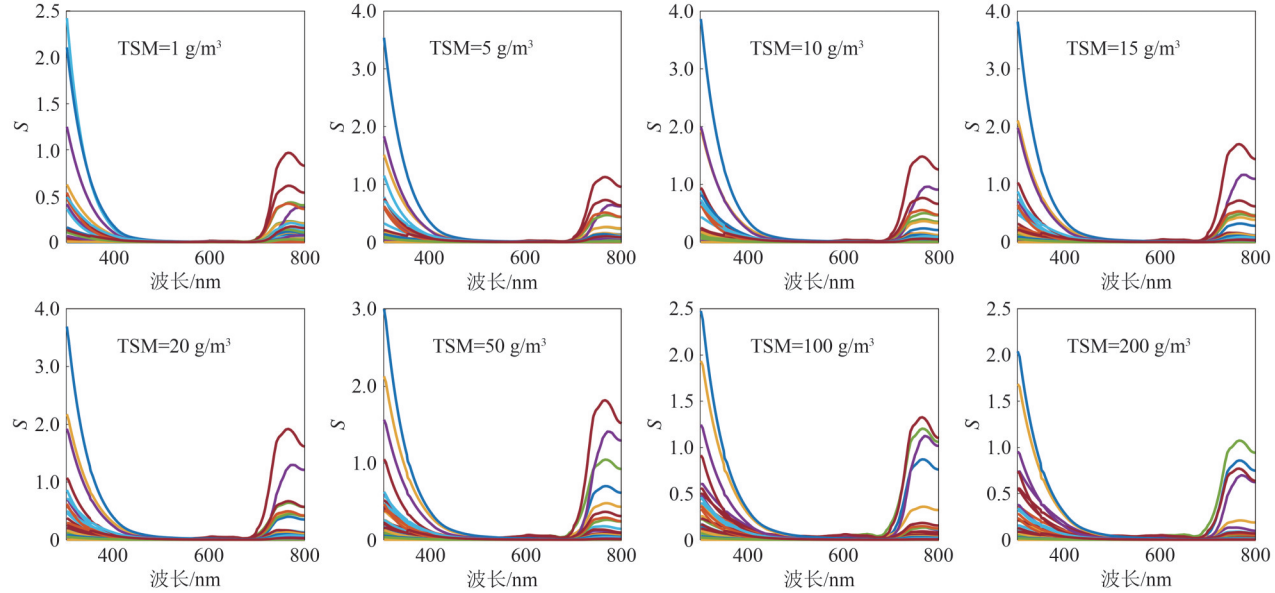
3 处理流程与结果分析

在完成了内插大气校正算法原理的原理介绍以及水体IOPs参数关系模型构建的基础上,本节进一步以HY-1C/D卫星数据为基础进行了算法处理流程的阐述并对反演结果进行了验证与分析,从而说明该算法的适用性。



(a) 比例系数 k 随波长的变化特征

(a) The variation characteristics of the coefficient k with wavelength



(b) 比例系数 s 随波长的变化特征

(b) The variation characteristics of the coefficient s with wavelength

图2 基于水体光谱特性模拟数据集获得的比例系数 k 和 s 在不同CHL和TSM浓度条件下随波长变化的分布特征
Fig. 2 Distribution characteristics with wavelength of coefficient k and s under different concentrations of CHL and TSM conditions obtained from the simulated dataset of water spectral characteristics

表2 模拟数据集的输入参数设置

Table 2 Input parameter settings of the simulated data set

参数	数值
太阳天顶角/(°)	30
海表风速/(m/s)	5
波长范围/nm	300—800
叶绿素浓度/(mg/m ³)	0.03; 0.05; 0.10; 0.50; 1.00; 5.00; 10.00
悬浮物浓度/(g/m ³)	1; 5; 10; 15; 20; 50; 100; 200
CDOM吸收系数光谱斜率 S_g	0.010—0.020

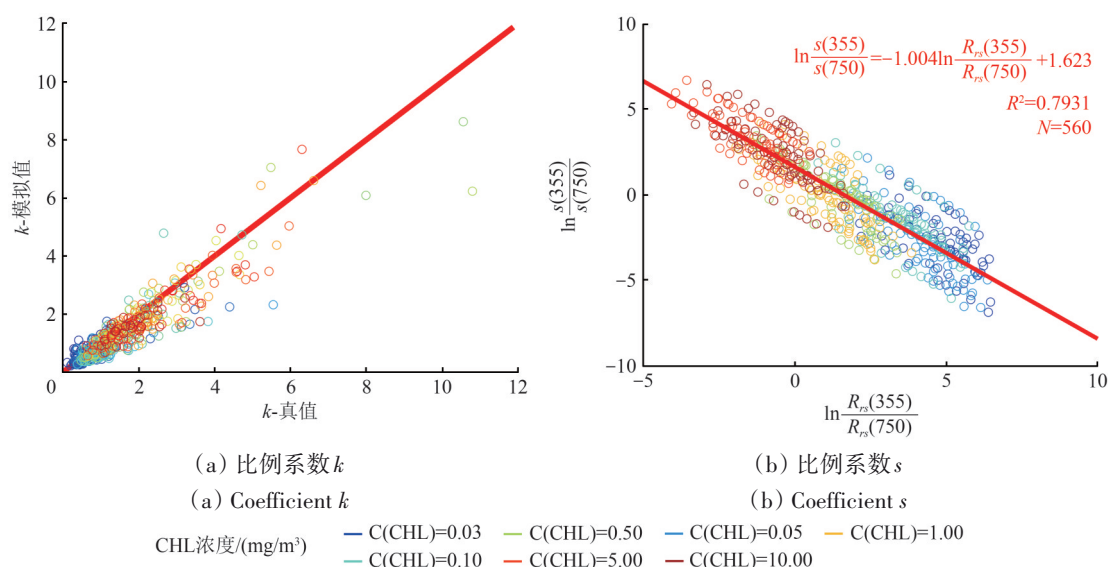


图3 水体光谱特性模拟数据集获得的比例系数 k 和 s 计算模型在不同CHL浓度条件下条件下的反演精度
Fig. 3 Inversion accuracy of the two coefficient calculation models obtained from the water spectral characteristics simulation dataset under different conditions

3.1 算法处理流程说明

以杭州湾水域为例, 基于HY-1C/D卫星数据的内插算法处理流程如下:

(1) 根据“暗像元”算法原理和2.2节的思路, 假设两个紫外通道的 R_{rs} 为0, 可以获得 $\rho_{rc}(355)$ 、 $\rho_{rc}(385)$ 和 $\rho_{rc}(865)$ 3个参考波段瑞利校正后的反射率, 并将其作为对应波段的气溶胶反射率进行计算, 得到气溶胶散射结果。参考UV-SWIR-AC算法, 需要基于参考波段的气溶胶散射具体数值大小, 对当前气溶胶类型进行区分, 从而筛选合适的拟合函数进行计算。根据上述3个参数的结果, 本文将求解的结果按照光谱形状分为4个气溶胶类型, 图4展示的是2021年7月14日HY-1C卫星在杭州湾水域的气溶胶类型分类结果和对应谱形, 分别对应以下情况:

1) 弱吸收性气溶胶, 以水溶性和海盐性气溶胶粒子为主, 反射率随波长增加呈幂函数下降, 参考Bai等(2023)的工作, 计算气溶胶反射率的拟合函数如下, 其中系数 a 、 b 和 c 由参考波段结果计算获得:

$$\varepsilon(\lambda, \lambda_{NIR}) = a \times \lambda^b + c \quad (17)$$

2) 强吸收性气溶胶, 以灰尘和烟煤性气溶胶粒子为主, 蓝紫光区间受到强吸收作用的影响导致气溶胶反射率下降, 拟合函数为分段函数, 分别适用于紫外—红光(620 nm)、红光—近红外区间:

$$\varepsilon(\lambda, \lambda_{NIR}) = a_1 \times \lambda^2 + b_1 \times \lambda + c \quad (18)$$

$$\varepsilon(\lambda, \lambda_{NIR}) = a_2 \cdot \lambda + b_2 \quad (19)$$

3) 远洋性气溶胶或云团像元, 水汽分子含量高, 相对湿度较大, 气溶胶反射率随波长增加而上升, 拟合函数同式(15);

4) 陆地或滩涂混合干扰像元, 近红外通道的气溶胶反射率远高于可见光和紫外通道, 计算公式如下:

$$\varepsilon(\lambda_{UV1}, \lambda) = \frac{\rho_a(UV_1)}{\rho_a(UV_2)} \quad (20)$$

需要说明的是上述第4种分类结果的近红外区间信号并不是真正的气溶胶反射率, 而是地表陆地覆盖贡献, 因此需要按混合像元处理。

图4的分类结果显示, 这一景遥感影像对应的杭州湾水域除了南岸存在一定量的滩涂区域外, 绝大多数区域属于弱吸收性气溶胶类型, 这可能与夏季雨水较多, 提高了水溶性和海盐性气溶胶粒子占比的原因有关。此外也存在一部分强吸收性气溶胶类型的区域, 其分布较为集中, 这也为内插算法验证强吸收性气溶胶的处理能力提供了数据支持。

在此基础上本文结合UV-SWIR-AC算法采用不同的拟合函数类型, 对全通道的气溶胶反射率进行内插计算, 最终反演到各通道 R_{rs} 结果, 并与“海天一洲”平台实测数据进行对比。与此同时, 本文将现场实测光谱作为真值, 带入HY-1C数据并正演至TOA, 进而计算出真值对应的气溶胶反射率结果, 加以辅助对比。图5展示的分别是初步

得到的 R_{rs} 反演结果与实测光谱对比情况, 以及 ρ_a 结果与正演的气溶胶反射率的对比情况。可以看出, 初步内插反演的 R_{rs} 结果整体偏低。此外根据图5的对比情况可知, 尽管当前的 R_{rs} 反演结果整体偏低, 但是其整体的光谱形状与真值具有较好的一致性。

(2) 利用初步内插得到的 $R_{rs}(865)$, 带入式(7) — (9), 得到 $\frac{a}{b_b}(865)$ 。由于在近红外通道下, 浮游植物、悬浮物和CDOM的吸收系数远小于纯水的吸收系数, 在忽略前者的条件下得到 $b_{bph} + b_{bSPM}(865)$ 的结果; 同理可得到 $b_{bph} + b_{bSPM}(750)$ 的结果。

(3) 由于 b_{bph} 与 b_{bSPM} 参数随波长均呈指数函数分布, 可由步骤(2)中近红外通道的结果外推出 $b_{bph} + b_{bSPM}(565)$ 与 $b_{bph} + b_{bSPM}(670)$ 。

(4) 利用初步内插得到的 $R_{rs}(565)$ 和 $R_{rs}(670)$ 结果, 带入式(7) — (9), 得到 $\frac{a}{b_b}(565)$ 和 $\frac{a}{b_b}(670)$, 再将步骤(3)的结果带入计算, 联立此2个方程即可获得比例系数 k 和 s 的大小。需要说明的是, 步骤(1) — (4) 目的在于对 k 和 s 的求解, 在此过程中沿用了Lee等(2002)给出的 g_0 和 g_1 系数,

这对 $a \div b_b$ 的数值大小会产生一定误差, 但是对作为IOPs参数间比值关系的 k 和 s 影响较小, 因此此处直接沿用。

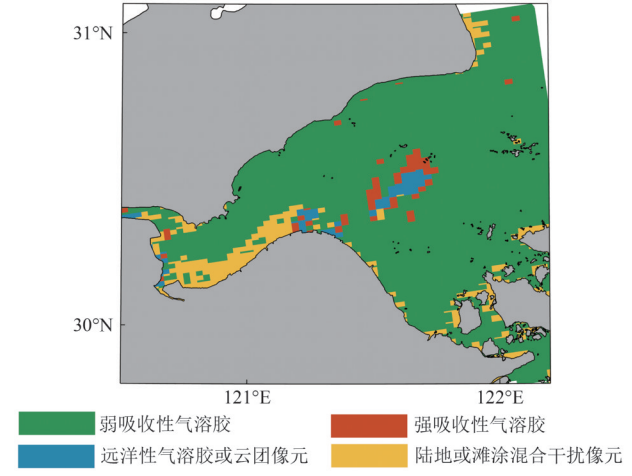


图4 基于HY-1C卫星2021年7月14日杭州湾水域数据以紫外和近红外通道的瑞利校正后的反射率计算结果所表征的光谱形状特征的4种气溶胶类型分类结果

Fig. 4 Spectral characteristics represented by the Rayleigh-corrected reflectance results of the ultraviolet and near-infrared channels were used to divide into four aerosol types based on the regional data of Hangzhou Bay from the HY-1C satellite on July 14, 2021

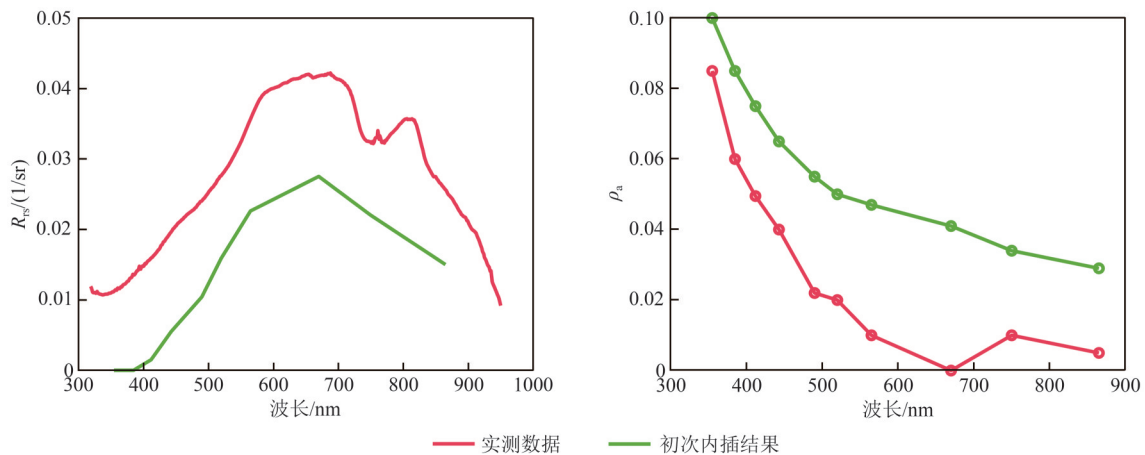


图5 基于HY-1C卫星2021年7月14日数据利用内插算法初步得到的 R_{rs} 和 ρ_a 值与“海天一洲”平台实测值的对比

Fig. 5 The comparison of the preliminary R_{rs} and ρ_a values obtained by the interpolation algorithm with the measured values of the “Haitian Yizhou” platform based on the data of the HY-1C satellite on July 14, 2021

(5) 此步骤是基于以上结果, 计算水体像元对应的新的 g_0 和 g_1 系数。先假定2个紫外通道 R_{rs}

大小近似相等, 亦即 $a \div bb(355)$ 与 $a \div bb(385)$ 大小相等:

$$\frac{a_w + k(355) \cdot (b_{bph} + b_{bSPM}) + s(355) \cdot k(355) \cdot (b_{bph} + b_{bSPM})}{b_{bw} + b_{bph} + b_{bSPM}(355)} = \frac{a_w + k(385) \cdot (b_{bph} + b_{bSPM}) + s(385) \cdot k(385) \cdot (b_{bph} + b_{bSPM})}{b_{bw} + b_{bph} + b_{bSPM}(385)} \quad (21)$$

以 g_0 和 g_1 作为未知数, 将初步内插得到的 $R_{rs}(412)$ 、 $R_{rs}(443)$ 和 $R_{rs}(490)$ 结果代入 QAA 模型得到对应表达式, 联立以上 4 个方程即可求解 $b_{bph} + b_{hSPM}(355)$ 、 $b_{bph} + b_{hSPM}(385)$ 、 g_0 和 g_1 这 4 个未知数。

图 6 展示的是通过以上步骤反演的杭州湾水域 g_0 和 g_1 经验系数的分布结果图。从图 6 中可知, 这一区域 g_0 的取值范围 0.06—0.14, g_1 的取值 0.1—0.4; 与 Lee 等 (2002) 给出的结论 (大洋水体中 $g_0 = 0.095$, $g_1 = 0.08$; 近岸水体中 $g_0 = 0.084$, $g_1 = 0.17$) 相比, 反演得到的 g_0 结果与模型数据范围较为接近, 而 g_1 结果则处于较高水平。此外根据式 (8) — (9) 可知, 参数 $u < 1$, 因此作为一次项系数的 g_0 对整体数值大小的影响大于二次项系数的 g_1 ; 对比后续反演的各通道 R_{rs} 结果可知, g_0 的分布与 R_{rs} 的分布特征接近, 在杭州湾区域动态变化幅度较小,

因此从这个角度可以证明经验系数的空间分布与最终的反演结果的空间分布具有较好的一致性。需要注意的是, 这里的 g_0 和 g_1 仅为估算得到的经验系数, 其目的为更好地估算紫外通道的 R_{rs} , 当前其空间分布也受到卫星数据的信噪比的影响, 如图 6 (a) 中存在的条带状分布和图 6 (b) 中滩涂边缘与岛屿边缘的低值区, 这需要未来加强数据预处理的优化工作。

(6) 在此基础上, 完成了紫外波段的 $R_{rs}(355)$ 和 $R_{rs}(385)$ 的贡献校正, 继而重复步骤 (1) 的流程即可获得二次内插的结果。图 7 展示的就是前后 2 次内插结果与实测数据的对比情况, 可以看到, 在提升了紫外通道的气溶胶反射率的计算精度后, 外推的近红外结果也随之改善, 进而提高了全波段内插后的反演精度, 证明了这种进行紫外通道 R_{rs} 的贡献校正的内插算法在 HY-1C/D 卫星数据上的适用性。

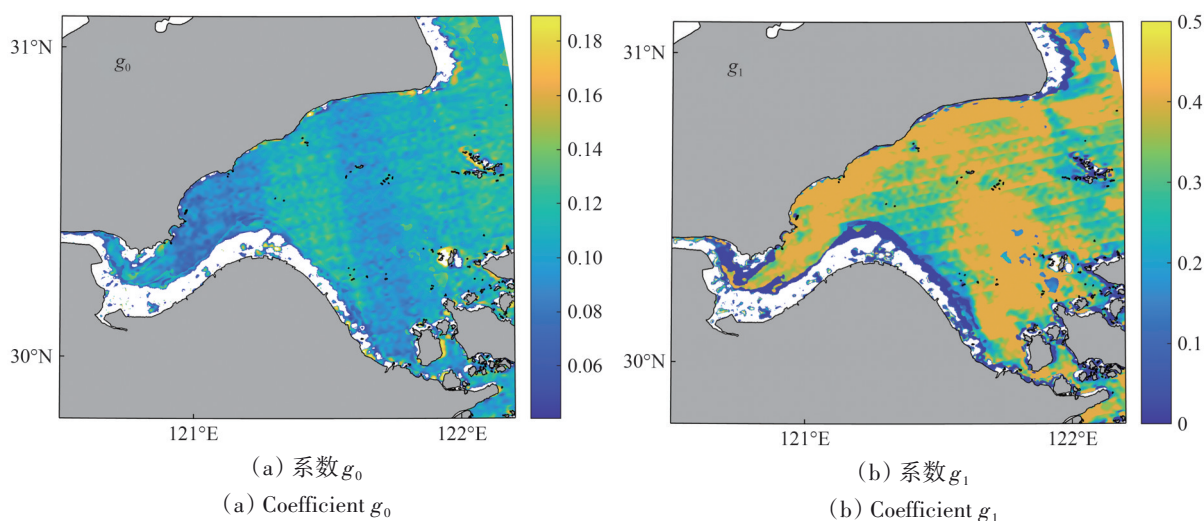


图 6 基于 HY-1C 卫星 2021 年 7 月 14 日数据反演得到的杭州湾水域 QAA 模型下系数 g_0 与 g_1 的分布图
Fig. 6 Distribution of coefficient g_0 and g_1 under the QAA model of Hangzhou Bay region based on the data of HY-1C satellite on July 14, 2021

需要说明的是, 本研究提出的算法虽然是通过二次内插处理得到最终的反演结果, 但并不能完全等同于迭代算法。常见的迭代算法是一种通过重复执行特定步骤逐步逼近问题解的方法, 其主要特点是具有重复性操作、逐步逼近收敛以及有明确的终止条件等, 而本研究是从相似的 R_{rs} 谱型具有相同的 IOPs 参数关系的角度出发, 利用初次内插的

结果计算出 QAA 模型中的 g_0 和 g_1 参数, 建立了紫外通道 R_{rs} 的贡献校正模型, 并在此基础上提高了紫外参考波段气溶胶反射率的估算精度以及后续大气校正精度。若继续进行迭代处理, g_0 和 g_1 参数以及后续的 R_{rs} 反演结果并不会产生明显改变, 因此这一算法并不具备逐步逼近收敛以及有明确的终止条件的特征, 亦即无需进行后续迭代处理。

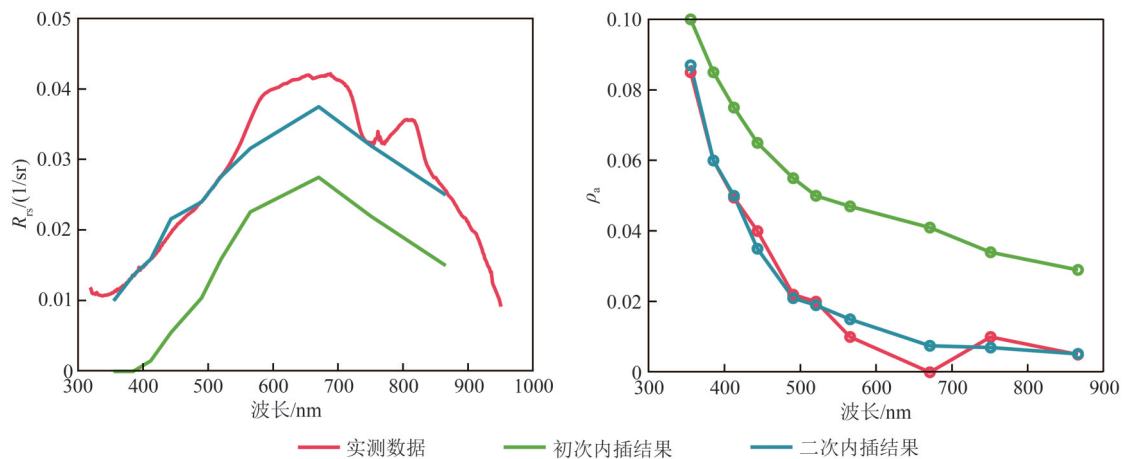


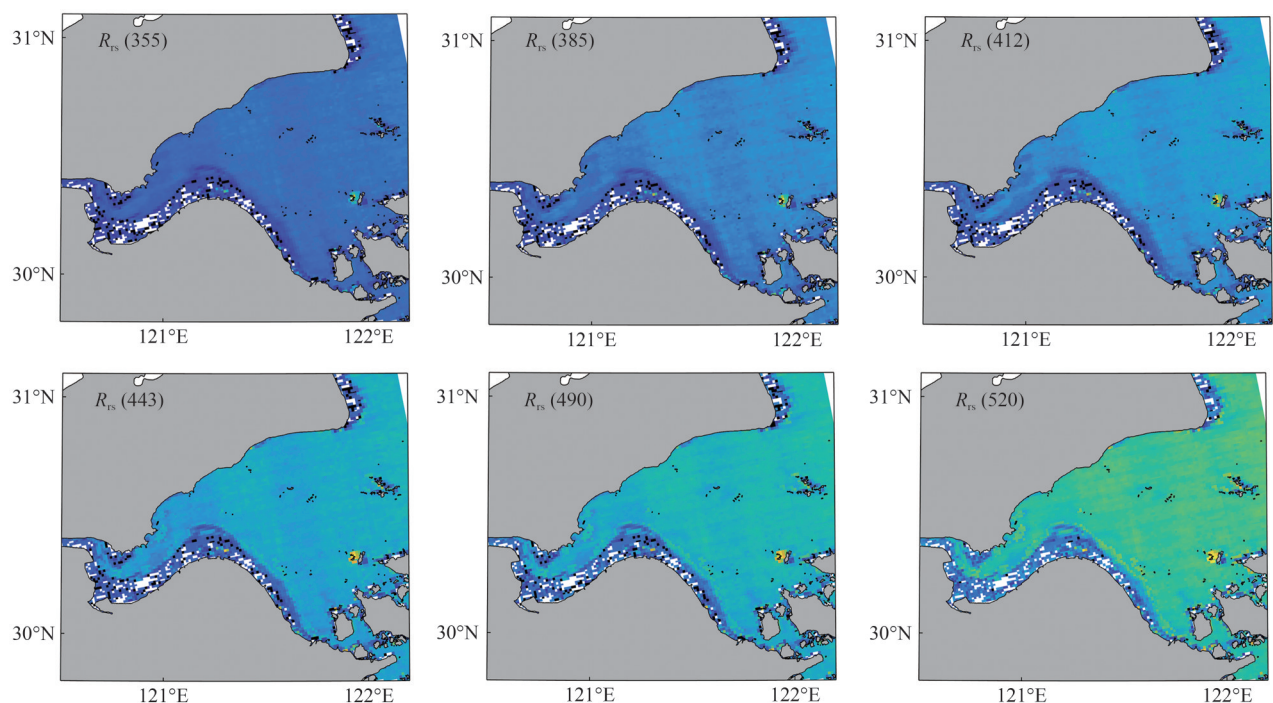
图7 基于HY-1C卫星2021年7月14日数据利用初步内插和二次内插得到的 R_{rs} 和 ρ_a 结果与“海天一洲”平台实测数据的对比

Fig. 7 Comparison of the R_{rs} results and ρ_a results obtained by preliminary interpolation and secondary interpolation with the measured data of the "Haitian Yizhou" platform based on the data of the HY-1C satellite on July 14, 2021

3.2 反演结果分析

图8是根据这一算法反演的杭州湾水域各通道 R_{rs} 结果的分布图,可以看出整体的有效数据覆盖率比较高,较好地克服了近岸高浑浊水体“过校正”的情况,并且相对明显地表征出了高浑浊水体蓝紫光区间离水辐射弱、红光—近红外区间离水辐射强的特点。此外,对于不同气溶胶类型的处理结果,其反演结果的分布也不存在明显的跳变,说明内插算法拥有同时处理强弱吸收性气溶胶类型的能力。需要说明的是,在杭州湾南岸的区域, R_{rs} 的反演结果呈现紫外—红光区间偏低,

红光—近红外区间偏高的特征。这是由于不同地物间的光谱响应差异导致,根据李楠(2020)的研究,杭州湾滩涂区域的反射信号在红光—近红外区间比水体像元高,而在紫外—红光区间二者较为接近,因此在内插处理的过程中滩涂地区的气溶胶反射率较高,使得紫外—红光区间的 R_{rs} 结果较低,而在红光—近红外区间由于滩涂区域的大气顶信号明显较大,因此尽管气溶胶反射率高于水体区域,但整体扣除之后仍然处于较高水平,因此最终红光—近红外区间的 R_{rs} 结果仍高于水体区域。这一光谱信号特征也往往被用于滩涂区域的遥感影像识别研究之中(Chen等,2014)。



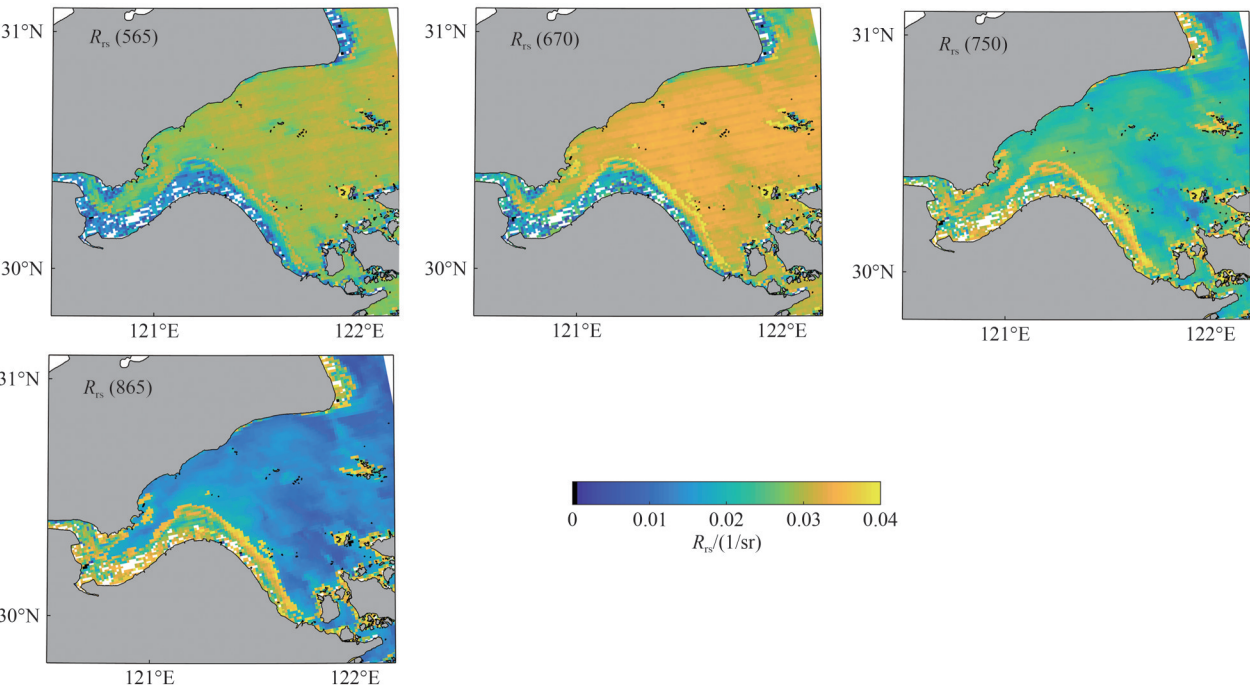


图8 基于HY-1C卫星2021年4月19日杭州湾水域数据反演得到的各通道 R_{rs} 结果分布图

Fig. 8 Distribution R_{rs} results of each channel of Hangzhou Bay region based on the data of HY-1C satellite on July 14, 2021

为了进一步验证算法的实际应用效果，本文以2021年1—12月期间杭州湾跨海大桥海中平台——“海天一洲”平台（许玉壮等，2023）所获得的实测水体光谱数据为参考，其 R_{rs} 结果如图9所示。

该数据集的监测时间间隔为15 min，将卫星过境时间前后3 h内的实测数据参与验证，并筛选出晴空条件下的HY-1C/D遥感匹配影像进行校正处理，得到了各通道的对比验证结果，如图10所示。

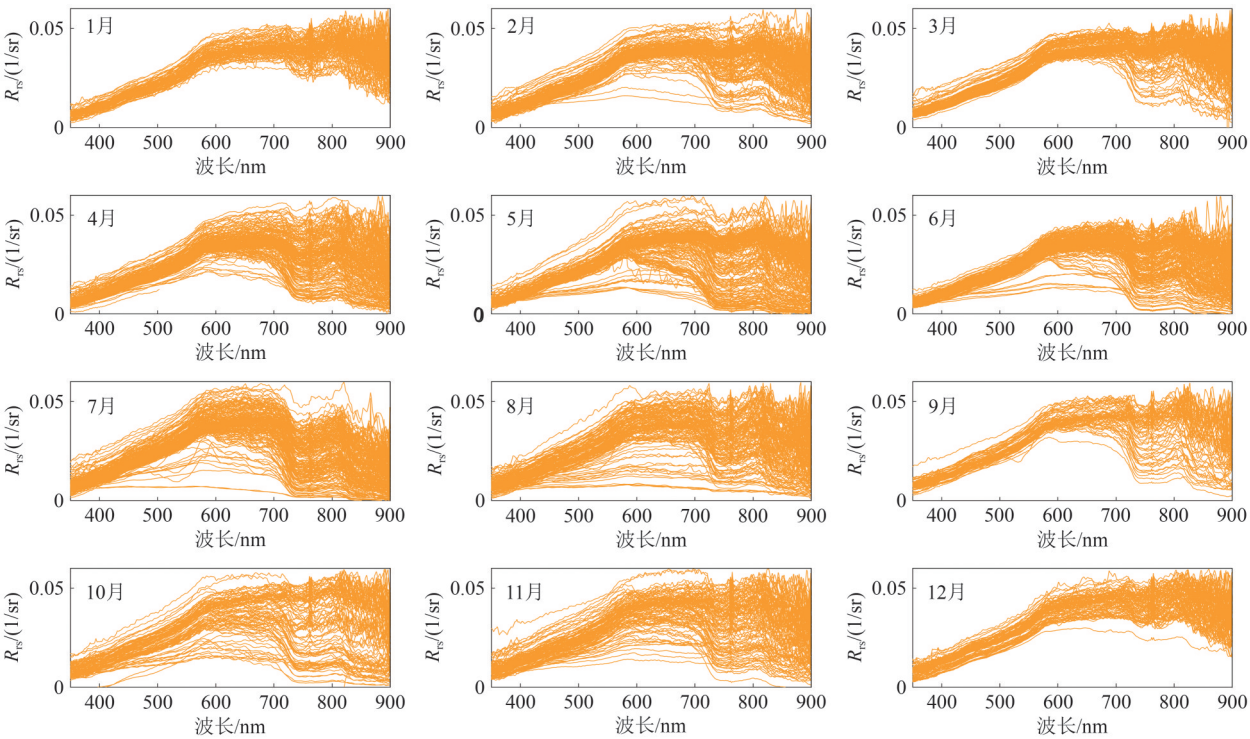


图9 杭州湾海中平台(“海天一洲”)实测的每月 R_{rs} 数据

Fig. 9 Monthly R_{rs} measured data from the Hangzhou Bay Offshore Platform (“Hai Tian Yi Zhou”)

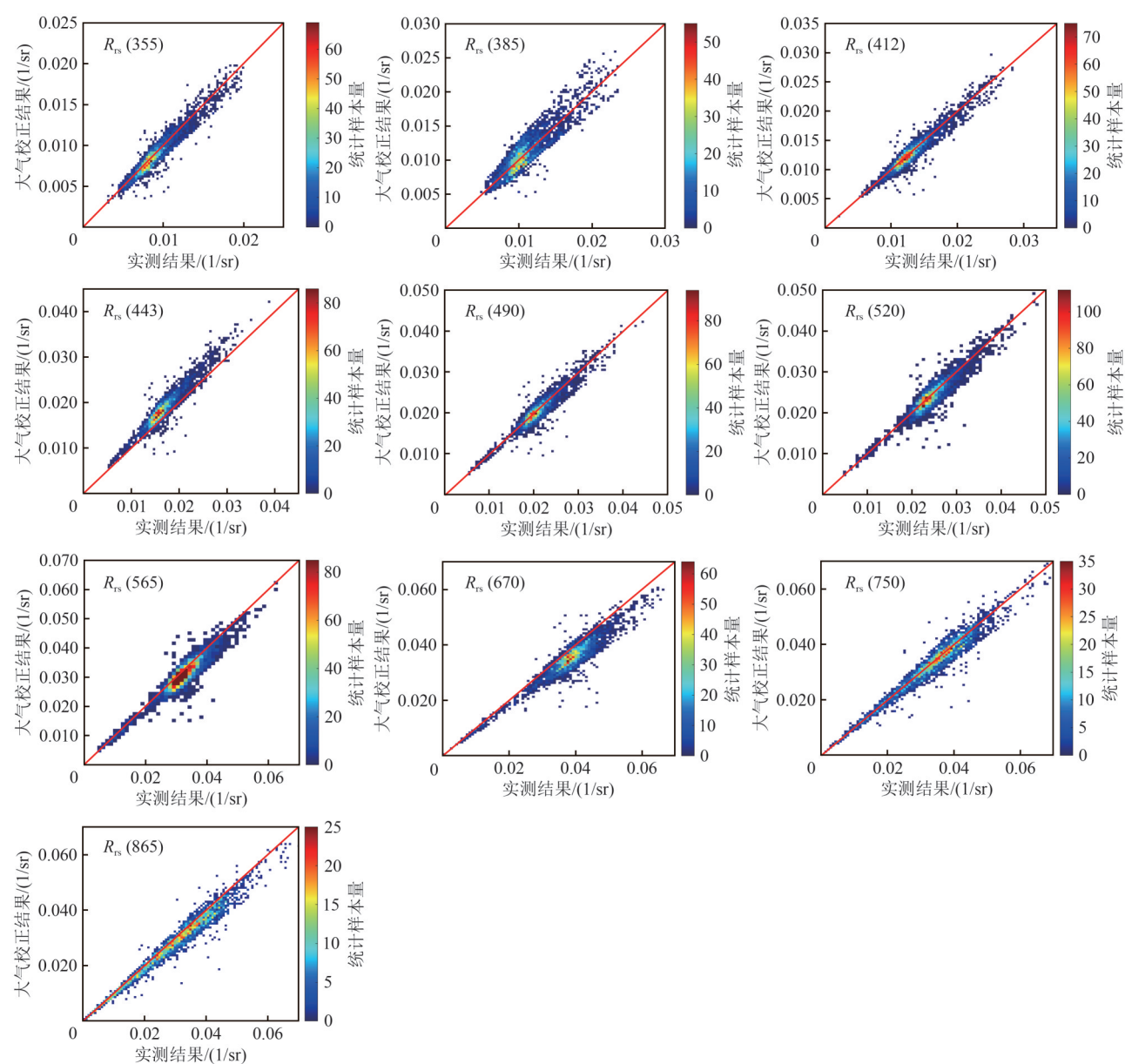


图 10 基于 2021 年 1—8 月 HY-1C/D 数据反演的各通道 R_{rs} 结果与“海天一洲”平台实测数据的对比验证情况
Fig. 10 Comparison of each band R_{rs} between HY-1C/D and "Haitian Yizhou" platform data from January to August 2021

表 3 紫外通道离水信号贡献校正前后各通道 R_{rs} 反演结果
RMD 对比情况

Table 3 The RMD of inversion R_{rs} of each band before and after water-leaving signal contribution correction of

UV bands		
中心波长/nm	初次校正结果 RMD/%	二次校正结果 RMD/%
355	88.32	6.6
385	80.6	9.94
412	69.09	5.06
443	42.05	11.59
490	44.23	5.06
520	38.23	5.06
565	32.75	6.08
670	32.79	9.09
750	32.39	5.07
865	46.35	6.46

以平均相对误差 RMD 为参照对比了各通道初步内插和二次内插结果的差异。RMD 的具体定义如下：

$$RMD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - Y_i|}{Y_i} \times 100\% \quad (22)$$

式中， X_i 和 Y_i 分别为反演结果和用于作为真值的检验（精度评价）数据值， n 为检验数据样本大小。从图 10 可以看出，本算法二次内插校正获得的通道 R_{rs} 反演结果具有较高的精度，RMD 在 15% 以下，证明了提高紫外通道气溶胶反射率的反演精度对优化大气校正效果的重要性。

此外，以杭州湾水域为代表，经统计内插算法在实测数据匹配验证时间范围内，非云像元的

有效数据平均覆盖率为91.26%，而官方外推算法处理结果的有效数据平均覆盖率为31.98%，进一步说明内插算法在高浑浊水体中的适用性。

4 结 论

本文以杭州湾为代表的高浑浊水体为例，基于HY-1C/D卫星的UVI、COCTS载荷数据，构建了内插大气校正算法。该算法以2个紫外通道和1个近红外通道作为参考波段获得对应气溶胶反射率，并通过参考波段决定的气溶胶反射率谱形，按照气溶胶吸收性的强弱进行分类，并建立不同的拟合函数实现基于内插的大气校正。主要结论如下：

(1) 基于“暗像元”假设的初步内插结果相较实际数据偏低，这是由于HY-1C/D缺乏短波红外通道的数据，并且紫外区间离水辐射信号实际不为0而带来的系统性误差共同导致；

(2) 基于初次内插反演的光谱形状与实际光谱形状接近，反映了水体IOPs参数的光学特性；

(3) 通过对QAA模型中 g_0 和 g_1 参数的反演，而建立的紫外通道 R_{rs} 的贡献校正模型，提高了紫外参考波段气溶胶反射率的估算精度，在此基础上进行的二次内插校正处理显著提升了整体反演精度。

此外，本文针对的HY-1C/D卫星由于缺少短波红外通道，因此需要基于紫外通道的数据计算出近红外通道的气溶胶反射率进而实现内插反演。未来，随着中国新一代海洋水色卫星HY-1E数据的逐渐完善，拥有完整的紫外—短波红外通道观测能力的HY-1E卫星数据将不再面临短波红外参考波段数据缺失的问题，但本文提出的通过对紫外 R_{rs} 贡献校正进而提高大气校正反演精度的方法依然有效。

志 谢 感谢国家卫星海洋应用中心提供HY-1C/D卫星UVI、COCTS载荷Level-1B数据产品；感谢自然资源部第二海洋研究所杭州卫星地面站和遥感实验室提供卫星数据和实测数据处理帮助！

参考文献(References)

Bai R F, He X Q, Bai Y, Gong F, Zhu Q K, Wang D F and Li T. 2023.

Atmospheric correction algorithm based on the interpolation of ultraviolet and shortwave infrared bands. *Optics Express*, 31(4): 6805-6826 [DOI: 10.1364/OE.478810]

Bai R F, He X Q, Bai Y, Li T, Zhu Q K and Gong F. 2020. Characteristics of water leaving reflectance at ultraviolet wavelengths: radiative transfer simulations. *Optics Express*, 28(20): 29714-29729 [DOI: 10.1364/OE.401855]

Bricaud A, Babin M, Morel A and Claustre H. 1995. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research*, 100(C7): 13321-13332 [DOI: 10.1029/95JC00463]

Chen L F, Jin Z Y, Michishita R, Cai J, Yue T X, Chen B and Xu B. 2014. Dynamic monitoring of wetland cover changes using time-series remote sensing imagery. *Ecological Informatics*, 24: 17-26 [DOI: 10.1016/j.ecoinf.2014.06.007]

Chen S G, Du K P, Lee Z, Liu J Q, Song Q J, Xue C, Wang D S, Lin M S, Tang J W and Ma C F. 2021. Performance of COCTS in global ocean color remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(2): 1634-1644 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3002460]

Fischer J and Fell F. 1999. Simulation of MERIS measurements above selected ocean waters. *International Journal of Remote Sensing*, 20(9): 1787-1807 [DOI: 10.1080/014311699212489]

Gordon H R, Du T and Zhang T M. 1997. Atmospheric correction of ocean color sensors: analysis of the effects of residual instrument polarization sensitivity. *Applied Optics*, 36(27): 6938-6948 [DOI: 10.1364/AO.36.006938]

Gordon H R and Wang M H. 1994. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics*, 33(3): 443-452 [DOI: 10.1364/AO.33.000443]

He X Q, Bai Y, Pan D L, Tang J W and Wang D F. 2012. Atmospheric correction of satellite ocean color imagery using the ultraviolet wavelength for highly turbid waters. *Optics Express*, 20(18): 20754-20770 [DOI: 10.1364/OE.20.020754]

Lee Z, Carder K L and Arnone R A. 2002. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, 41(27): 5755-5772 [DOI: 10.1364/AO.41.005755]

Lee Z, Carder K L, Mobley C D, Steward R G and Patch J S. 1999. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. *Applied Optics*, 38(18): 3831-3843 [DOI: 10.1364/AO.38.003831]

Li N. 2020. Long-term remote sensing dynamic monitoring and ecological assessment of coastal wetland in Hangzhou Bay. Nanjing: Nanjing Forestry University (李楠. 2020. 杭州湾滨海湿地长时间尺度遥感动态监测及生态评估. 南京: 南京林业大学) [DOI: 10.27242/d.cnki.gnjlu.2020.000002]

Mao Z H, Zhang Y W, Tao B Y, Chen J Y, Hao Z Z, Zhu Q K and

- Huang H Q. 2022. The atmospheric correction of COCTS on the HY-1C and HY-1D satellites. *Remote Sensing*, 14(24): 6372 [DOI: 10.3390/rs14246372]
- Morel A and Gentili B. 1991. Diffuse reflectance of oceanic waters: its dependence on sun angle as influenced by the molecular scattering contribution. *Applied Optics*, 30(30): 4427-4438 [DOI: 10.1364/AO.30.004427]
- Oo M, Vargas M, Gilerson A, Gross B, Moshary F and Ahmed S. 2008. Improving atmospheric correction for highly productive coastal waters using the short wave infrared retrieval algorithm with water-leaving reflectance constraints at 412 nm. *Applied Optics*, 47(21): 3846-3859 [DOI: 10.1364/AO.47.003846]
- Pope R M and Fry E S. 1997. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, 36(33): 8710-8723 [DOI: 10.1364/AO.36.008710]
- Shao Y J, Hu Y K, Zhou B, Chen F, He X Q, Wang G J, Yuan X H, Zhou Y L and Yu Z F. 2020. Remote sensing monitoring of suspended sediment concentration based on GF-4 satellite in the Hangzhou Bay. *Haiyang Xuebao*, 42(9): 134-142 (邵宇杰, 胡越凯, 周斌, 陈芳, 何贤强, 王国军, 袁小红, 周亚丽, 于之锋. 2020. 基于GF-4卫星的杭州湾悬浮泥沙浓度遥感监测研究. *海洋学报*, 42(9): 134-142) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2020.09.014]
- Smith R C and Baker K S. 1981. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm). *Applied Optics*, 20(2): 177-184 [DOI: 10.1364/AO.20.000177]
- Song Z G, He X Q, Bai Y, Wang D F, Gong F, Zhu Q K, Li T and Li H. 2022. Effect of the vertical distribution of absorbing aerosols on the atmospheric correction for satellite ocean color remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4206212 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3151219]
- Wang M H. 2007. Remote sensing of the ocean contributions from ultraviolet to near-infrared using the shortwave infrared bands: simulations. *Applied Optics*, 46(9): 1535-1547 [DOI: 10.1364/AO.46.001535]
- Wang M H and Shi W. 2005. Estimation of ocean contribution at the MODIS near-infrared wavelengths along the east coast of the U. S.: two case studies. *Geophysical Research Letters*, 32(13): L13606 [DOI: 10.1029/2005GL022917]
- Xu Y Z, He X Q, Bai Y, Zhu Q K and Gong F. 2023. Validations of the HY-1C COCTS remote sensing reflectance products in coastal waters. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(1): 14-25 (许玉壮, 何贤强, 白雁, 朱乾坤, 龚芳. 2023. HY-1C卫星COCTS近海水体遥感反射率产品真实性检验. *遥感学报*, 27(1): 14-25) [DOI: 10.11834/jrs.20235004]

Atmospheric correction algorithm for HY-1 C/D images for remote sensing reflectance inversion of high-turbidity water

BAI Ruofeng^{1,2}, ZHANG Xuan², GONG Fang², HE Xianqiang^{1,2}

1. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

Abstract: The HY-1C/D satellites, equipped with the Chinese Ocean Color and Temperature Scanner (COCTS) and an ultraviolet imager (UVI), offer spectral capabilities—including ultraviolet (UV, 350—400 nm) and near-infrared (NIR, 745—885 nm) bands—that are widely used in traditional atmospheric correction for turbid waters. However, atmospheric correction over turbid waters (Case-II water) remains challenging given limitations in traditional algorithms. Most existing methods rely on extrapolating aerosol scattering data from short-wave infrared (SWIR) or NIR reference bands, but errors in aerosol reflectance (ρ_a) inevitably amplify with increasing extrapolation distance. Additionally, strong absorption by aerosols in blue-violet bands (350—420 nm) introduces significant uncertainties in remote sensing reflectance (R_{rs}) retrievals, which cannot be resolved by single-reference-band approaches. This study aims to address these issues by proposing a new interpolation-based atmospheric correction algorithm for HY-1C/D satellite data, leveraging UV and NIR bands to improve accuracy across the entire spectrum, particularly in problematic shorter wavelengths.

To thoroughly validate the algorithm's accuracy, this study selected Hangzhou Bay—a representative highly turbid water body—as the test site. Given that the reference bands' water-leaving radiance is not completely negligible, initial calibration of R_{rs} (UV) contributions was required. This study first developed a R_{rs} (UV) estimation model based on inherent optical properties (IOPs) parameters, utilizing a pregenerated simulated dataset of water spectral characteristics. Afterward, aerosol reflectance ρ_a (UV) for HY-1C/D satellite data was obtained under the “dark pixel” assumption. Subsequently, ρ_a (NIR) was derived by extrapolating from ρ_a (UV) using aerosol scattering spectral relationships. The image data were then classified on the basis of aerosol reflectance characteristics at both spectral ends (UV and NIR), and initial interpolation functions were constructed to produce preliminary correction results. The first-round interpolation results were incorporated into the R_{rs} (UV) estimation model to obtain higher-precision ρ_a (UV) values. The same procedure was repeated for a second interpolation, completing the entire atmospheric correction process.

This study employed in-situ measurements from the “HTYZ” platform in Hangzhou Bay to validate the accuracy of the retrieval results. The single-day comparison revealed that after improving the calculation accuracy of ρ_a (UV), the second interpolation significantly enhanced retrieval precision. To further evaluate the algorithm’s practical performance, we conducted a comprehensive validation using long-term time-series data from January 2021 to December 2021. The results demonstrated that the relative mean deviation (RMD) across all spectral channels remained below 15%, confirming the algorithm’s applicability for HY-1C/D satellite data processing.

This study developed an interpolation-based atmospheric correction algorithm specifically for highly turbid waters, using Hangzhou Bay as a representative case study, on the basis of data from the UVI and COCTS payloads aboard the HY-1C/D satellites. Comparative validation with long-term in-situ water spectral measurements demonstrated that the secondary interpolation correction algorithm achieved significantly improved retrieval accuracy after obtaining more precise ρ_a (UV) values. Owing to the absence of SWIR channels on the HY-1C/D satellites, the algorithm had to derive aerosol reflectance in the NIR channel from UV channel data to enable the interpolation-based retrieval. Looking ahead, while China’s next-generation ocean color satellite HY-1E, with its complete UV-SWIR spectral coverage, will eliminate the current limitation of missing SWIR reference bands, the methodology proposed in this study—which enhances atmospheric correction accuracy through R_{rs} (UV) contribution correction—remains valid and applicable.

Key words: HY-1C/D satellite, turbid water, atmospheric correction, remote sensing reflectance, IOPs

Supported by Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LDT23D06021D06)