

海洋与湖沼
Oceanologia et Limnologia Sinica
ISSN 0029-814X, CN 37-1149/P

《海洋与湖沼》网络首发论文

题目： 基于红(R)绿(G)蓝(B)三波段的典型港湾透明度反演研究
作者： 朱元励, 毛铭, 郭然, 杜萍, 陶邦一, 江志兵, 曾江宁
收稿日期： 2023-10-30
网络首发日期： 2024-03-14
引用格式： 朱元励, 毛铭, 郭然, 杜萍, 陶邦一, 江志兵, 曾江宁. 基于红(R)绿(G)蓝(B)三波段的典型港湾透明度反演研究[J/OL]. 海洋与湖沼.
<https://link.cnki.net/urlid/37.1149.P.20240314.1542.004>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于红(R)绿(G)蓝(B)三波段的典型港湾透明度反演研究*

朱元励^{1,2} 毛铭^{1,2} 郭然^{1,3} 杜萍^{1,2,4,5} 陶邦一⁶ 江志兵^{1,2,4,5} 曾江宁^{1,2,4,5}①

(1. 自然资源部第二海洋研究所 自然资源部海洋生态系统动力学重力实验室 浙江杭州 310012; 2. 浙江省近海海洋工程环境与生态安全重点实验室 浙江杭州 310012; 3. 浙江工商大学环境科学与工程学院 浙江杭州 310012; 4. 浙江省海洋科学院 海洋空间资源管理技术重点实验室 浙江杭州 310012; 5. 自然资源部长三角海洋生态环境科学野外观测研究站 浙江舟山 316021; 6. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室 浙江杭州 310012)

摘要 基于卫星遥感的透明度(SD)反演方法已经在大洋、近海、湖泊等不同水体开展了广泛应用。富营养化河口港湾等水体具有水域面积小且受陆地影响大等特点,并且在此类水体开展环境监测具有时效性要求。受时间空间分辨率以及云层覆盖、大气校正等影响,基于卫星遥感方法在河口港湾等小水域进行透明度反演会受到一定的应用限制,因此在此类特征水体建立一种高效便捷的透明度反演方法作为卫星遥感方法的有益补充就十分迫切。本研究尝试通过无人机和智能手机应用程序 HydroColor APP 搭载的普通光学相机构建基于红(R)绿(G)蓝(B)三波段的象山港透明度反演方法。结果表明,无人机和 HydroColor 的红蓝波段比值(R/B)和红绿灯波段比值(R/G)与透明度具有显著负相关,相关系数 R 为 -0.88 至 -0.93 ($n = 16, p < 0.001$)。根据相关性分析结果构建透明度反演模型并基于独立数据库对模型进行精度评估。结果显示(1)指数反演模型要优于线性经验模型,(2)基于 R/G 反演模型要优于 R/B 模型,(3) HydroColor 反演模型要优于无人机反演模型。通过以上结果分别构建基于无人机 DJI-R/G 和 HydroColor-R/G 最优透明度指数反演模型。DJI-R/G 模型平均相对误差和均方根误差为 29%和 0.3 m, HydroColor-R/G 模型为 21.9%和 0.27 m。以上结果表明,通过无人机和手机获取 RGB 信息均可用于对象山港透明度进行反演。该方法的建立为快速便捷开展河流港湾等水体的水质监测和赤潮防控提供了新的技术支持。

关键字 透明度; RGB; 遥感反演; 无人机; 手机 APP; 象山港

中图分类号 X87 doi: 10.11693/hyhz20231000226

水体透明度(Secchi depth, SD)直接反映水体的浑浊程度,随水体中悬浮物和胶体浓度增加而降低。在一类水体中,悬浮物一般以藻类为主导,藻类越多其透明度越低,因此透明度是评估赤潮、富营养化程度以及海洋污染的关键指标(郭倩君等, 2021)。在二类水体中,除藻类外,悬浮泥沙也会对透明度产生显著影响。同时透明度反映的水体光照条件也是制约藻类初级生产力的主要因子(Falkowski and Wilson, 1992)。因此,透明度研究在一、二类水体中都有重要意义。

基于透明度盘(塞氏盘)测定透明度(m)是比较常用的现场测量方法,具体是指用直径为30 cm左右的塞氏盘垂直放入水中直到刚刚看不见为止,透明度盘“消失”的深度就叫透明度(Tyler, 1968)。现场测量虽然精度较高,但存在因光照条件差异或观测人员判定标准不同造

* * 浙江省基础公益研究计划, LGF21D060001 号; 浙江省科技计划项目, 2024C03235 号; 国家重点研发计划, 2021YFC3101702 号; 浙江省自然科学基金, LY22D060006 号。朱元励, 博士, E-mail: ylzhu@sio.org.cn

① 通信作者: 曾江宁, 研究员, 博士生导师, E-mail: jiangningz@126.com

收稿日期: 2023-10-30, 收修改稿日期: 2024-02-04

成数据不具备可比性等问题,且无法满足对水体长时间大范围动态监测需求。卫星遥感技术具有宏观、快速和周期性的特点,可以高效获取大范围的水体透明度分布特征,弥补了透明度传统监测方法的缺陷(禹定峰等,2015)。目前已有较多利用卫星遥感资料对海水透明度进行反演的相关研究,主要有经验方法和半分析算法2种。经验方法通过在遥感数据与原位透明度测量值之间进行回归分析来估测。比如Prasad *et al* (1998)在加州沿岸流区域建立了基于490 nm和555 nm两波段归一化离水辐亮度比值的透明度经验算法。杨雷等(2021)基于Sentinel-2卫星数据建立了4波段组合的胶州湾透明度经验算法。经验方法最大的优点是模型构建简单、易于实现,但会随区域或时间改变存在变异,限制其大范围应用。半分析算法通过分析光在水体中的辐射衰减,采用理论模型和经验参数相结合的方式实现参数反演(Lee *et al*, 2015)。虽然半分析算法反演精度较高,但其在构建过程中可能会存在的不合理假设会影响反演结果,且半分析算法构建相对复杂,所需参数较多,广泛应用会受到一定限制。

象山港地处浙江北部沿海,是一个纵长约为62.8 km、平均宽度8.9 km的狭长型半封闭海湾(图1),是浙江省重要的水产养殖基地和渔业资源产地。近年来,沿港高强度开发和水产养殖带来的水体富营养化对海域生态环境造成极大的压力,严重威胁水域生态环境健康和水产养殖安全(曾江宁等,2011)。透明度作为象山港水质监测的重要参数之一,对环境变化如赤潮发生起到重要的指示作用。由于象山港被陆地包围、水域面积较小且呈狭长形,使用高时间分辨率卫星如MODIS其像元信息易受陆地影响,而使用高空间分辨率卫星如Landsat,受天气影响每年获得的影像数有限。因此基于卫星遥感建立象山港透明度反演方法存在一定困难。常规监测方法频度较低,往往在赤潮发生前或发生时无法及时获取现场观测数据做出预警。因此,迫切需要在象山港开发一种快速便利且易于掌握的透明度监测方法。

无人机遥感较卫星遥感具有成本低、灵活机动、实时性强和云下高分辨率成像等突出特点,且无需考虑大气校正,特别适用于针对某特定区域快速掌握其环境变化并做出相应决策的监测管理需求(李忠强等,2014)。通过搭载多光谱或高光谱传感器,基于卫星平台所开发的模型算法可以直接应用于无人机遥感反演。但是,多光谱或高光谱传感器价格目前还比较昂贵(几万-几十万),限制了其大规模展开应用。因此,基于普通光学数码相机红(R)、绿(G)、蓝(B)三波段传感器建立水体透明度反演方法是高效便捷开展无人机遥感环境监测的关键。

除无人机外,随着智能手机的普及和宽带通讯网络的发展,基于智能手机搭载的相机(R、G、B波段)开发水质反演应用程序(Application, APP)也成为较易开展水环境监测的技术手段之一。基于智能手机拍摄的照片监测水质状况具有简单易操作的特点,是常规水面采样和遥感监测水质方法的有效补充。近几年来国内外已有一些利用智能手机 APP 进行水质监测的

相关研究。例如中科院空天信息创新研究院水环境遥感团队设计和开发的“观水色”APP，利用照片计算的色度角、福莱尔指数(FUI)、纯度指数，构建了透明度、营养状态、黑臭水体监测模型(李俊生等，2022)。美国缅因大学研发了一款 HydroColor 智能手机 APP，将手机相机作为一个 3 波段的遥感光谱辐射计，计算红、绿、蓝 3 个波段的水体离水反射率并在此基础上估算水体浊度和悬浮物浓度(Leeuw and Boss, 2018)。虽然该 APP 还存在一些缺陷(李俊生等，2022)，但作为目前唯一可以计算离水反射率的手机 APP 其在水质监测具有较大的应用前景。

通过上述调查分析，本研究尝试基于普通无人机和智能手机搭载相机的R、G、B三波段构建象山港透明度的经验反演模型，进而提供消费型无人机以及智能手机在水质监测及赤潮预警领域的潜在应用可能。

1 材料与方法

1.1 采样时间和地点

本研究以象山港作为主要观测区(图 1)，基于大疆无人机 DJI(精灵 Phantom 4 Pro v2.0)和苹果 iPhone 手机 APP(HydroColor v2.2, University of Maine)的 RGB 光谱信号开展透明度遥感反演研究。采样时间集中在上午 9 点至下午 4 点且无云层遮挡时间段，采样点水深范围为 5~32 m。从 2022 年 6 月至 2023 年 9 月不定期在象山港进行数据采集，共采集无人机光谱数据 35 组，采集 HydroColor 光谱数据 46 组。其中无人机数据主要使用小船采自港底 5 个站位(图 1)；HydroColor 数据采集自象山港 10 个站位，因此数据总量多于无人机。整个数据集分成训练用数据集和验证数据集，其中同时采集了 HydroColor 和无人机光谱数据的 16 组数据用于两个平台光谱数据对比以及透明度反演模型构建。独立采集的 19 组无人机光谱数据和 30 组 HydroColor 数据分别用于评估反演模型精度。其中用于模型构建的采样点信息见表 1。除采集 RGB 光谱外，每一个站点同步测量瞬时光照强度(PAR, $\mu\text{Ein}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$, Li-cor)和使用塞氏盘测量水体透明度 SD (m)，其中建模用透明度数据变化范围为 0.4~2.5 m。

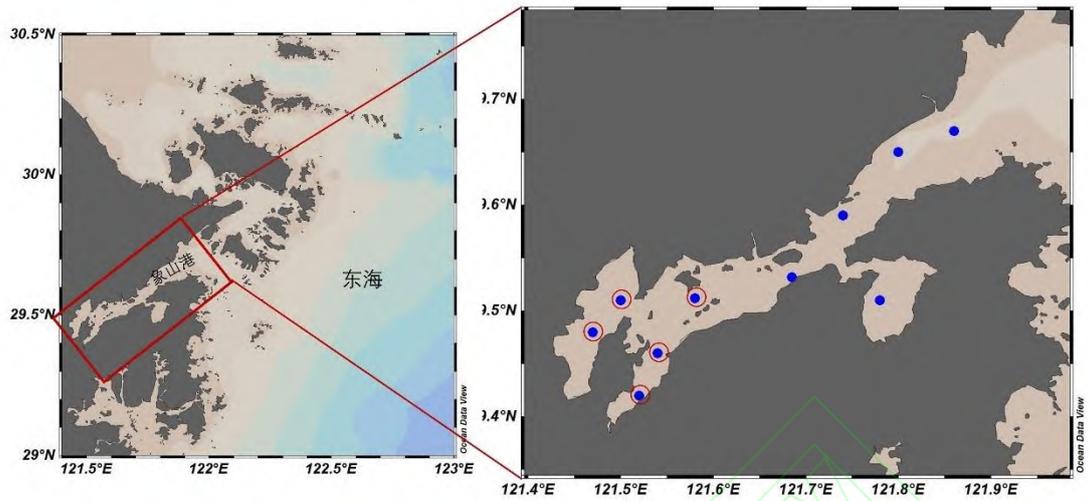


图 1 象山港地理位置及主要采样点分布图(红圈表示无人机和手机 APP 同步观测站位)

Fig.1 Geographic location of Xiangshan Bay and the map of sampling sites. Red circles indicate stations where DJI drone and HydroColor data were parallely measured

表 1. RGB 三波段透明度反演模型训练数据集

Tab.1 The training dataset for developing RGB bands-based transparency model

数据号	日期	时间	HydroColor	DJI	PAR/($\mu\text{Ein}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$)	SD/(m)
1	2022.6.27	10:32	√	√	1240	1.3
2	2022.9.07	09:37	√	√	554	0.8
3	2022.9.07	10:13	√	√	1025	0.7
4	2022.9.07	10:56	√	√	1430	1.7
5	2022.9.07	11:21	√	√	980	0.5
6	2022.9.07	11:45	√	√	960	1.2
7	2023.1.04	10:38	√	√	630	2

8	2023.1.04	10:00	√	√	820	2.1
9	2023.1.04	11:31	√	√	850	2.5
10	2023.1.04	11:49	√	√	800	1.3
11	2023.9.08	12:00	√	√	1240	0.45
12	2023.9.09	10:20	√	√	1260	0.7
13	2023.9.09	10:56	√	√	1260	1.5
14	2023.9.09	12:00	√	√	1400	1.6
15	2023.9.09	12:32	√	√	1310	0.9
16	2023.9.09	13:10	√	√	1240	0.4

1.2 RGB 数据的获取和处理

1.2.1 无人机 RGB 数据获取和处理

精灵 Phantom 4 Pro 无人机内置 1200 万像素数码相机, 视场角 94°, 单张照片尺寸为 4000 × 3000 像素。数码相机分别感应蓝光(410 nm~550 nm), 绿光(470 nm~620 nm)以及红光(590 nm~700 nm)3 个可见光波段的上行辐照度, 并使用 RGB 颜色系统将辐照度信息记录到像素矩阵中, 该矩阵有 256 个不同的数值编号(0~255, DN 值), 代表每一个色带亮度。

数据获取时, 无人机悬停在目标上空约 50 m 处, 摄像头垂直向下, 待机身稳定后拍摄目标物照片并保存为原始图像编码数据图片格式(DNG-RAW 格式)。根据以上飞行设置并结合搭载光学相机参数可以计算得到无人机影像的单个象元空间分辨率约为 5 cm。为保证不同图像数据 DN 值间的可比性, 相机的光圈和感光值 ISO 统一设为 2.8 和 100, 仅曝光时间(快门速度)可调。因此, 在图像获取过程中, 相机会自动调整快门速度来补偿环境光的变化。

保存后的 DNG 格式图像数据使用 Darktable (v3.8.1)软件打开并提取图像中心区域的 RGB 数据值。此外, 为去除由拍摄环境光差异对 DN 值造成的影响, 需要对每一景影像中像元 RGB-DN 值进行辐射校正处理。具体方法是原始像元 DN_0 乘上与光强相关的校正系数,

最终消除环境光差异对 DN 值影响，得到 DN_t 。根据相关研究报告(Cheng *et al*, 2020)，RGB 三个波段的校正系数计算公式分别为： $f(R) = 1.7 \times I_0^{-0.82}$ ； $f(G) = 2.06 \times I_0^{-0.86}$ ； $f(B) = 2.17 \times I_0^{-0.92}$ ，其中 I_0 为环境光强。因此，辐射校正后的“真实”DN 值， $DN_t = DN_0 \times f$ 。

1.2.2 HydroColor 手机应用软件 RGB 数据获取和处理

HydroColor APP 进行 RGB 数据获取时，需分别对 18%反射率的灰板，天空以及水体进行拍摄用以获取标准板辐亮度(L_c)，天空辐亮度(L_s)和传感器(手机摄像头)与水面之上总辐亮度 L_t 进行离水反射率(R_{rs} , sr^{-1})的计算(图 2)。此外，为最大程度降低水面反射，三张像片需要以固定的角度拍摄。软件中提供罗盘和倾斜计帮助用户获取准确的拍摄角度，当符合角度要求后图片中间取景框变成绿色(图 2)，具体来说，水体图像的拍摄角度为距天底角 40° 以及距太阳平面 135° 。APP 详细介绍和使用方法可参阅 Leeuw and Boss(2018)。

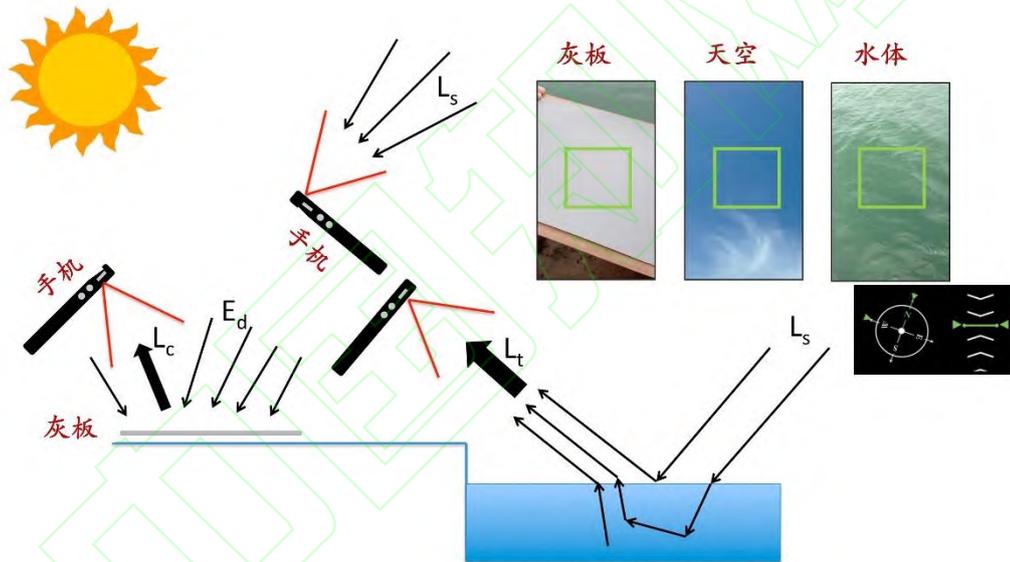


图 2 HydroColor APP 离水反射率采样示意图(改编自 Leeuw and Boss, 2018)

Fig.2 Schematic of HydroColor APP remote sensing reflectance sampling (modified from Leeuw and Boss, 2018)

1.3 统计分析和模型精度评价

斯皮尔曼相关性分析用于分析各参数间相关性。评价反演模型的精度指标选择平均相对误差(mean relative error, MRE)和均方根误差(root mean squared error, RMSE)，具体计算方法如下：

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{d_m - d_p}{d_m} \right| \right)}{n} \times 100\%$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (d_m - d_p)^2}}{n}$$

式中 d_m 为第 m 个实测值； d_p 为对应的第 p 个遥感反演值； n 为样本数。

统计分析使用 SPSS 19 软件完成，绘图使用 Ocean Data View 和 Excel 软件完成。

2 结果与分析

2.1 HydroColor 和 DJI 无人机 RGB 光谱比较

通过对比 HydroColor(HydroColor-Rrs)和大疆无人机(DJI-DN)同步获取的 16 个数值的平均光谱发现，两者总体特征较一致，平均光谱呈现出波段值蓝光 < 红光 < 绿光的特点，但 DJI 各个波段的变异要大于 HydroColor (图 3)。波段相关性分析结果显示，尽管单波段的 HydroColor-Rrs 和 DJI-RGB-DN 数值之间相关性较弱(蓝： $R=0.523$ ；绿： $R=0.497$ ；红： $R=0.396$ ； $n=16$)，但红蓝比值(R/B)和红绿比值(R/G)两者存在显著相关($R=0.97$ 和 $R=0.94$ ， $n=16$ ， $P<0.001$)。表明基于 R/B 和 R/G 比值建立的反演模型可同时适用于手机和无人机平台。

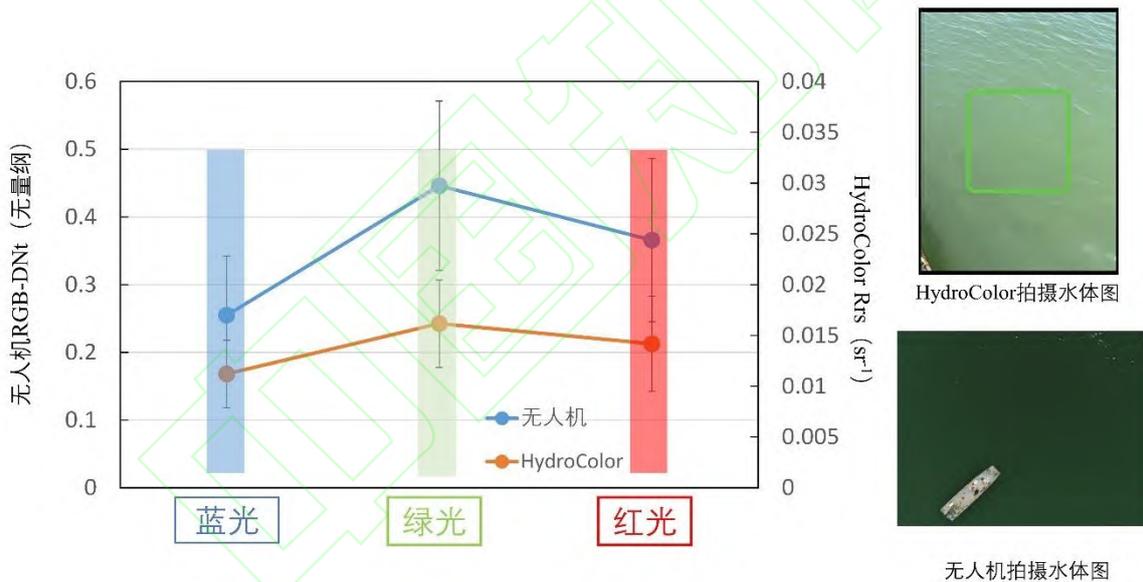


图3 研究区 HydroColor 和 DJI 无人机 RGB 光谱均值和拍摄示例图像

Fig.3 Average RGB spectral and example pictures of HydroColor and DJI drone in the study area

2.2 透明度反演算法构建

基于表 1 数据库中 16 组数据进行斯皮尔曼相关性分析，结果发现透明度分别和 HydroColor- R_{rs} 以及 DJI -DN 的 R/B 和 R/G 比值呈极显著负相关(表 2)。随后分别绘制 R/B 和 R/G 与透明度的散点图并构建相关性经验模型(图 4)。结果显示基于 DJI-DN 和 HydroColor- R_{rs} 构建的透明度指数方程 R^2 均高于线性方程(图 4)，因此本研究用 R/G 和 R/B 的指数方程构建基于 DJI 无人机和 HydroColor APP 方法的透明度反演模型，具体模型见表 3。

表 2. HydroColor 和大疆无人机红蓝、红绿波段比值和透明度的相关性分析

Tab. 2 Correlations between R/B and R/G band ratios and SD for HydroColor and DJI drone

	HydroColor-RB	HydroColor-RG	DJI -RB	DJI -RG
透明度/m	-0.92	-0.93	-0.88	-0.91
	n=16	n=16	n=16	n=16
	$P < 0.001$	$P < 0.001$	$P < 0.001$	$P < 0.001$

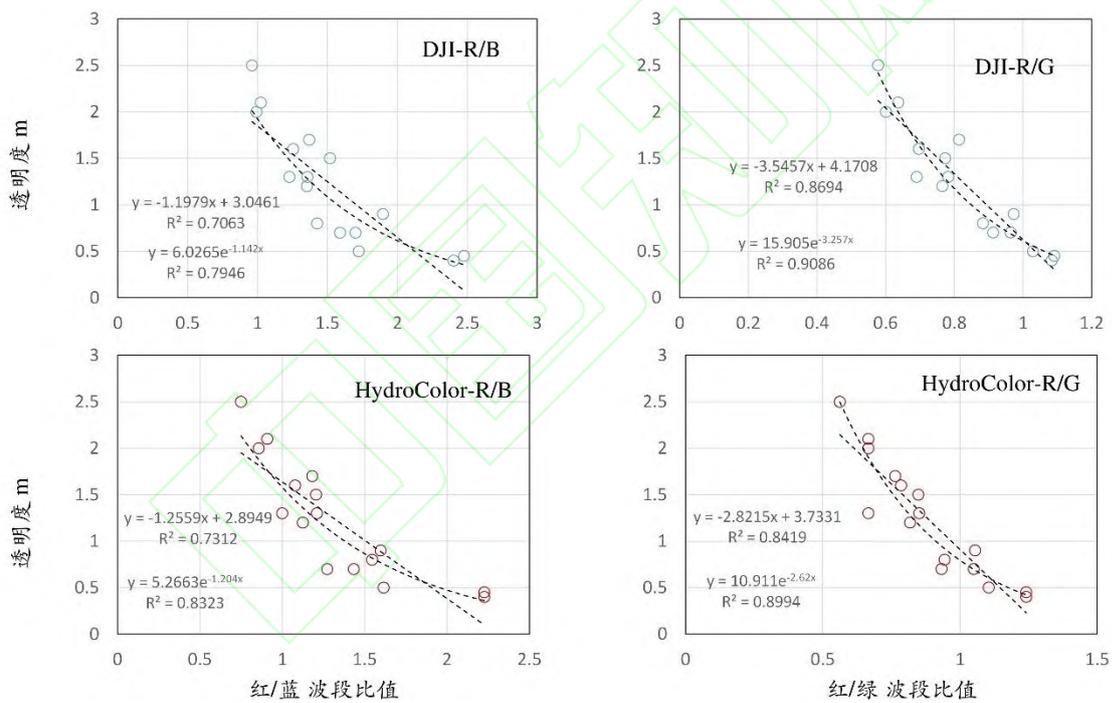


图 4 DJI-DN 和 HydroColor 红蓝(R/B)、红绿(R/G)波段比值与透明度的散点图

Fig.4 Scatter plots of DJI-DN and HydroColor red-to-blue (R/B) and red-to-green (R/G) band ratios vs. SD

2.3 反演模型精度验证

基于独立数据集对上述构建模型进行精度验证,其中用于验证无人机透明度反演模型的数据 19 个(透明度范围 0.3~1.8 m),用于 HydroColor 透明度反演模型验证的数据 30 个(透明度范围 0.6~2.5 m)。数据采集于象山港不同时间和地点。透明度反演模型的精度验证见表 3 与图 5。总体上两类模型的反演效果都比较好,预测值和实测值相关性较高且集中在 1:1 线

附近(图 5)。具体分析发现基于 R/G 的反演模型要优于 R/B，HydroColor 透明度反演模型要优于 DJI。因此，本研究中表现最优的透明度反演模型为 HydroColor-R/G 模型， $R^2 = 0.72$ ， $MRE = 21.9\%$ ， $RMSE = 0.27$ m。DJI-R/G 模型平均相对误差和均方根误差为 29%和 0.3 m。

表 3 透明度经验模型和精度验证结果

Tab. 3 Validation results of empirical transparency models

模型参数	模型公式	MRE/%	RMSE/m
DJI-R/B	$SD = 6.0265e^{-1.142x}$	41.7	0.34
DJI-R/G	$SD = 15.905e^{-3.257x}$	29	0.30
HydroColor-R/B	$SD = 5.2663e^{-1.204x}$	24.3	0.29
HydroColor-R/G	$SD = 10.911e^{-2.62x}$	21.9	0.27

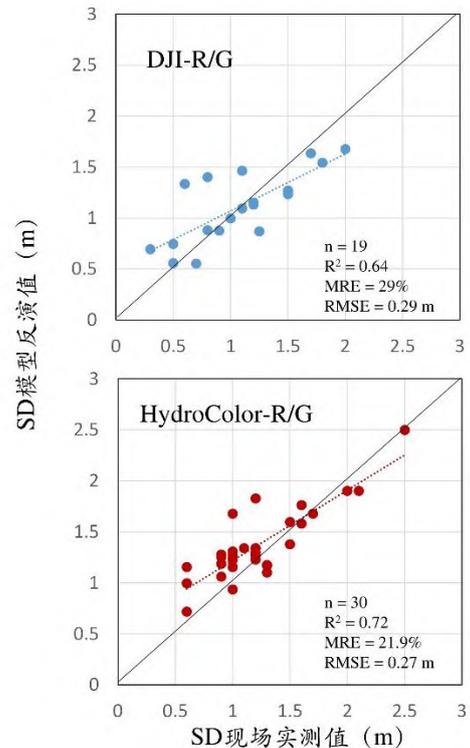
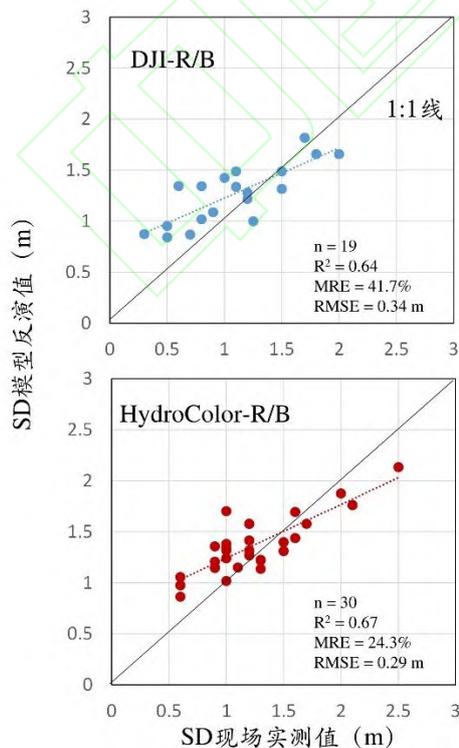


图5 实测透明度与模型反演透明度对比图

Fig.5 Comparison of measured SD and model estimated SD

3 讨论

作为专业仪器设备的有益补充,消费型无人机和智能手机由于其广泛普及的特点在环境监测领域具有巨大的应用前景(李忠强等, 2014; Goddijn and White, 2006)。本研究首次尝试在无人机和智能手机两个平台建立水体透明度反演模型并通过独立数据库对模型进行验证,获得了较高的反演精度,反演模型模拟值和观测值 R^2 为 0.64~0.72, MRE 为 21.9%~41.7%, RMSE 为 0.27 m~0.34 m(表 3, 图 5)。李俊生等(2022)通过将手机 RGB 波段数码值计算获得色度角并与透明度建立反演算法,拟合度 R^2 为 0.77, 与本研究中 0.64~0.72 的模拟值和观测值决定系数接近。此外与卫星方法建立的透明度反演模型比较,计算得到的 MRE 和 RMSE 也较接近。如丛丕福等(2011)基于 MODIS 数据对辽东湾海水透明度进行反演,反演精度平均 MRE 为 13%。姜琳琳等(2022)基于哨兵 3 OLCI 影像开发了渤海透明度遥感反演方法,其中波段比值模型中最优的是基于 510/620 nm 为参量的一次项反演模型,这与本研究中基于 R/G 比值构建模型方法一致。510/620 nm 的线性模型在渤海湾数据计算的 MRE 为 17.9%, RMSE 为 0.52 m。

本研究中基于 HydroColor 建立的反演模型总体上精度要优于无人机反演模型,主要原因有 2 点,1) 是可能由于验证 2 个模型所用的透明度数据范围有差异。验证 HydroColor 的透明度数据变化范围为 0.6~2.5 m, 大于验证 DJI 模型透明度数据范围(0.3~1.8 m); 2) 是可能得益于 HydroColor 可以相对简单的计算获得离水反射率,而无人机获得的信号除水体本身外可能还存在其它干扰(如水体表面反射信号)的影响(Shang et al, 2017)。因此如何改进观测和计算方法,如借助传统方式测量遥感反射率作为真值,验证 HydroColor 的测量,以及评估无人机信号中非水的占比以更好地构建模型进而提高反演精度是本研究下一步的工作重点。

研究结果表明透明度分别和 R/B 和 R/G 比值均呈极显著负相关关系(表 2)。透明度主要由下行光在水体中的漫射衰减系数(K_d , m^{-1})决定(Aas et al, 2014; Lee et al, 2015), K_d 越大,透明度就越小。在基于卫星遥感的研究中,Shi (2014)分析太湖 MERIS 影像数据发现在可见光范围内红光波段比蓝光波段和 K_d 呈现出更高的正相关系数,主要原因是红光光谱与水体中的悬浮物紧密关联,而悬浮物浓度通常是决定 K_d 大小最主要因子。因此,红光波段会与透明度呈负相关。基于 R/G 反演模型要优于 R/B 模型,这也与此前的许多研究结果一致

(Zhang et al, 2012; Zheng et al, 2016), 再次表明 R/G 与 K_d 的相关性在呈绿色水体中要更加紧密(Aas et al, 2014)。

但需要指出的是, 当透明度较小时($SD < 1$ m), 研究中建立的算法均对透明度有一定程度的高估(图 5)。主要原因是象山港中水体透明度较小时, 主要是受到港外泥沙输入的影响。因此此时水体中决定光衰减的主要悬浮物质不再是浮游植物, 而是非浮游植物颗粒。研究表明非浮游植物颗粒与近红外波段后向散射具有较强的相关性, 而在可见光波段由于光谱受多因素影响(如, 浮游植物、CDOM、泥沙悬浮物等), 较难对水体中泥沙悬浮物单独反演(Zhang et al., 2008)。在非常浑浊的水体, 研究也发现小于 700 nm 波长的光谱信息很难用于估测水体光衰减系数 K_d (Zhang et al, 2012), 因此在泥沙含量较高水域基于可见光波段反演透明度可能会造成一定的误差。在未来研究中获取一定数量高泥沙悬浮物站位的 RGB 数据后, 尝试建立新的透明度反演算法, 并设定阈值进行算法切换, 提高透明度的反演精度。

本研究最主要的目的是通过普通无人机/手机平台的 RGB 波段构建简便、快捷、有效的透明度反演模型。研究表明无人机和手机在水质监测中具有一定的应用前景。虽然智能手机和无人机目前已经较为普及, 且研究已证明 HydroColor 可适用于不同手机型号和系统(Leeuw and Boss, 2018), 但由于在实际应用过程中手机 APP 需有携带灰板拍摄, 无人机平台需后续对数据进行辐射校正, 并且由于无人机遥感图像在采集过程中, 传感器高度和姿态角的变化、大气折光、地球曲率、地形起伏、地球旋转和传感器本身结构性能等都会引起图像几何变形, 在使用多景无人机影像进行大范围空间监测时还会涉及几何校正、图像拼接等处理过程, 因此本研究建立的方法目前仍主要面向具有一定专业技术和应用需求的人员。此外, 手机 APP 方法仍算是一种现地测量手段, 但相较于透明度盘现场测定的优势在于应用该方法具有统一标准, 不会因操作人员判定标准不同或环境差异影响数据结果, 因此获得的数据理论上具有更好的可比性。但我们认识到本研究还处于初步阶段, 目前获得的数据还比较有限, 比如数据多是同一天不同时刻采集的, 在季节跨度上并不广, 因此建立的方法是否存在季节性差异还需进一步验证。

4 结论

本研究通过同步采集现地透明度数据和无人机及手机 RGB 数据, 开发了基于无人机和手机 APP 象山港水体透明度反演模型。基于 R/G 波段比值的象山港水体透明度反演模型在无人机和手机两种平台上都具有较高的反演精度 ($RMSE = 0.3$ m 和 $RMSE = 0.27$ m)。研究

结果提供了一种便捷高效监测水体透明度的技术手段,可作为常规现场监测和卫星遥感水质反演方法的有益补充,为开展湖泊港湾区域水质研究提供了新的思路和方法。但由于构建及验证模型的数据还比较有限,尤其是缺乏高泥沙悬浮物水体数据,使得在泥沙主导透明度区域的反演结果存在一定的不确定性,有待于补充大量现场实测数据对模型进行进一步的改进。此外在未来研究中,可尝试基于 RGB 波段开展其它环境参数(如叶绿素等)的反演,扩大无人机及手机平台在环境监测中的应用。

参 考 文 献

- 丛丕福, 曲丽梅, 韩庚辰, 等, 2011. 辽东湾海水透明度的遥感估算模型[J]. 地球科学进展, 26(3):295-299.
- 李忠强, 唐伟, 张震, 等, 2014. 无人机技术在海洋监视监测中的应用研究[J]. 海洋开发与管 理, 7:42-44.
- 李俊生, 高敏, 张兵, 等, 2022. 智能手机影像支持的水质监测算法与应用[J]. 测绘学报, 51(4):568-576.
- 杨雷, 禹定峰, 霍礼辉, 等, 2021. Sentinel-2 的胶州湾水体透明度遥感反演[J]. 红外与激光 工程, 12(50):88-94.
- 禹定峰, 邢前国, 施平, 2015. 内陆及近岸二类水体透明度的遥感研究进展[J]. 海洋科学, 39(7):136-144.
- 郭倩君, 黄月群, 董堃, 等, 2021. 水体富营养化评价方法研究[J]. 环境保护前沿, 11(2):178-185.
- 姜琳琳, 王龙霄, 王林, 等, 2022. 基于 Sentinel-3 OLCI 影像的渤海透明度遥感反演研究[J]. 光谱学光谱分析, 4(42):1209-1216
- 曾江宁, 潘建明, 梁楚进, 等, 2011. 浙江省重点港湾生态环境综合调查报告[M]. 北京:海洋 出版社, 1-9.
- AAS E, HØKEDAL J, SØRENSEN K, 2014. Secchi depth in the Oslofjord-Skagerrak area: theory, experiments and relationships to other quantities[J]. Ocean Science, 10(2):177-199.
- CHEN K, CHAN S, LEE J, 2020. Remote sensing of coastal algal blooms using unmanned aerial vehicles. Marine Pollution Bulletin, 152:110889.
- FALKOWSKI P G, WILSON C, 1992. Phytoplankton productivity in the North Pacific ocean since 1900 and implications for absorption of anthropogenic CO₂[J]. Nature, 358(6389):741-743.
- GODDIJN L M, WHITE M, 2006. Using a digital camera for waterquality measurements in Galway Bay[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 66(3-4):429-436.
- LEE Z, SHANG S, HU C, *et al*, 2015. Secchi disk depth: A new theory and mechanistic model for underwater visibility[J]. Remote Sensing of Environment, 169:139-149.
- LEE U W T, BOSS E, 2018. The HydroColor app: Above water measurements of remote sensing reflectance and turbidity using a smartphone camera[J]. Sensors, 18(1):256.
- PRASAD K S, BERNSTEIN R L, KAHRU M, *et al*, 1998. Ocean color algorithms for estimating water clarity (Secchi depth) from SeaWiFS[J]. Journal of Advanced Marine Science and Technology Society, 4:301-306.

- SHANG S, LEE Z, LIN G, *et al*, 2017. Sensing an intense phytoplankton bloom in the Western Taiwan strait from radiometric measurements on a UAV[J]. *Remote Sensing of Environment*, 198:85-94.
- SHI K, ZHANG Y, LIU X, *et al*, 2014. Remote sensing of diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation in Lake Taihu using MERIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 140: 365–377.
- TYLER J E, 1968. The Secchi disc[J]. *Limnology and Oceanography*, 13:1-6.
- ZHANG B, LI J S, SHEN Q, *et al*, 2008. A bio-optical model based method of estimating total suspended matter of Lake Taihu from near-infrared remote sensing reflectance[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 145: 339–347.
- ZHANG Y L, LIU X, YIN Y, *et al*, 2012. A simple optical model to estimate diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation in an extremely turbid lake from surface reflectance[J]. *Optics Express*, 20(18):20482-20493.
- ZHENG Z B, REN J L, LI Y M, *et al*, 2016. Remote sensing of diffuse attenuation coefficient patterns from Landsat 8 OLI imagery of turbid inland waters: a case study of Dongting Lake[J]. *Science of Total Environment*. 573:39-54.

ESTIMATING TRANSPARENCY IN TYPICAL BAY USING THE RED (R), GREEN (G), AND BLUE (B) SPECTRAL BANDS

ZHU Yuan-Li^{1,2}, MAO Ming^{1,2}, GUO Ran^{1,3}, DU Ping^{1,2,4,5}, TAO Bang-Yi⁶,

JIANG Zhi-Bing^{1,2,4,5}, ZENG Jiang-Ning^{1,2,4,5}

(1. Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China; 2. Key Laboratory of Nearshore Engineering Environment and Ecological Security of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China; 4. Key Laboratory of Ocean Space Resource Management Technology, Zhejiang Academy of Marine Sciences, Hangzhou 310012, China; 5. Observation and Research Station of Marine Ecosystem in the Yangtze River Delta, Ministry of Natural Resources, Shouhang 316021, China; 6. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou 310012, China)

Abstract Satellite remote sensing-based transparency (SD) inversion methods are prevalent for vast water bodies like oceans, offshore areas, and lakes. However, estuaries and bays—characterized by significant land influence and smaller water expanses, in addition to the time requirement—pose challenges due to constraints like temporal or spatial resolution and cloud interference. This underscores the need for a robust SD inversion approach tailored for these regions. The study aimed to devise an SD inversion method for Xiangshan bay using both a UAV and the HydroColor APP on smartphones, focusing on the Red (R), Green (G), and Blue (B) bands. We observed that the UAV and HydroColor's red-to-blue (R/B) and red-to-green (R/G) band ratios had a strong negative correlation with SD, with correlation coefficients R between -0.88 and -0.93 ($n=16$, $P < 0.001$). After developing the SD inversion model grounded on these correlations, we assessed its accuracy using an independent dataset. The findings revealed that: the exponential inversion model was more effective than the linear empirical one. Models based on R/G outperformed those on R/B. The HydroColor inversion model surpassed the UAV-based model. The most efficient SD inversion approach were found at two platforms to be the DJI-R/G and HydroColor-R/G exponential models, boasting an average relative error of 29% and 21.9% as well as a root-mean-square error of 0.3 m and 0.27 m, respectively. In conclusion, leveraging RGB data from UAVs and smartphones can yield accurate SD inversions. This novel approach offers a fast and efficient method for water quality assessment and red tide monitoring in rivers, bays, and similar water bodies.

Key words transparency; RGB; remote sensing inversion; UAV; smartphones APP; Xiangshan bay