

doi: 10.6046/zrzyg.2022009

引用格式: 李恺霖, 廖廓, 党皓飞. 内陆与近岸水体的色度学遥感研究进展[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(1): 15–26. (Li K L, Liao K, Dang H F. Recent progress in chromaticity remote sensing of inland and nearshore water bodies[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1): 15–26.)

内陆与近岸水体的色度学遥感研究进展

李恺霖, 廖廓, 党皓飞

(福建省气象科学研究所, 福州 350007)

摘要: 水色是人眼受悬浮颗粒物、叶绿素和可溶性有机物等多种物质复合影响的水体颜色最直观的感知, 是具有悠久历史的水环境参量。水色对于研究内陆与近岸水体的生态具有十分重要的意义。随着色度学的研究及高光谱卫星遥感技术的进步, 发展出水色的色度学方法。通过系统回顾内陆与近岸水体色度学研究的发展过程, 从表观光学量和固有光学量 2 个角度阐述了色度学方法从理论到实际应用的情况。并介绍了卫星遥感数据的色度学处理方法。色度学方法是水色定量表达的技术方法, 是水色研究的重要分支, 也是对水色组分研究的扩展和补充, 具有广阔的应用前景。未来, 为了进一步提高色度学方法在内陆与近岸水体中的应用, 需要加强水体生物-光学数据集的建设。从表观光学量和固有光学量 2 个维度开展色度学研究。同时加强国产卫星色度学方法的研究, 扩展水色产品类型。

关键词: 色度学; FU; 水色组分; 卫星遥感

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-035X(2023)01-0015-12

0 引言

水色是人眼对悬浮颗粒物、叶绿素和可溶性有机物等多种物质组成的水体颜色最直观的感知。海洋水色是表征海洋环境的重要要素, 也是鉴别水质的重要参量, 它与海水的化学成分、物理性质、海洋动力状态, 尤其与海水中的悬浮物和有色可溶性物质都具有极密切的关系。1890 年, Forel 把湖水从蓝到黄绿分成了 11 个等级, 2 a 之后德国人 Willi Ule 把刻度扩展了 10 个, 颜色从绿到棕色^[1]。自从这 2 种刻度结合以后, 就成为了目前熟知的 FU (Forel-Ule) 色度标比色皿。1889 年 11 月澳大利亚洪堡浮游生物探险队利用 FU 进行了观测记录。自此, FU 色度标尺已成为测定海洋、湖泊和河流颜色的最常用、最简单的色度标尺。整个 20 世纪, 甚至在出现了现代光谱辐射计之后, 在全球范围内的观测依旧使用 FU 方法。它被海洋学家和湖泊专家广泛用于分类各种类型的水域。归档的 FU 记录是除了盐度、温度和透明度之外最古老的有关于海洋信息的记录, 它包含全球各地和很久以前关于水质变化的

信息, 因此也包括关于叶绿素浓度的间接信息。这些记录为我们提供了对海洋和湖泊更长远理解^[1]。因此对于水色的研究及海洋生态环境有着重要的意义。

海水颜色的定量研究最早由印度物理学家 Raman 提出^[2], 经过研究发现海水的蓝色不是由于反射天空颜色所引起的, 而是海水本身的一种性质。海水对长波的吸收最大, 而对短波的吸收较弱, 因此短波容易发生散射和折射。故对于可见光波段来说, 海水对红色光的吸收率最大, 对橙色光的吸收率次之, 对蓝色和紫色光吸收率最小。人眼对紫光不敏感, 对蓝光比较敏感, 因此海水绝大多数呈现出蓝色。影响海水颜色的主要物质有 3 种: 叶绿素、有色可溶性有机物 (colored dissolved organic matter, CDOM) 和黄色物质等。由于其存在与相互作用改变了海水对光的散射与吸收, 因此海水会呈现出不同的颜色。Raman 的发现为水色研究从现象到机理提供了充分的理论依据^[2]。

随着光谱技术和卫星遥感技术的发展, 目前大多采用光谱与遥感方法进行水色观测, 主要通过反演, 而不是真彩色的方法得到水色组分, 因此 FU 色

收稿日期: 2022-01-12; 修订日期: 2022-05-22

基金项目: 中国气象局创新发展专项“基于风云卫星的‘海上丝绸之路’海雾业务化监测关键技术研究”(编号: CXFZ2022P010) 和华东区域气象科技协同创新基金项目“葵花-8 卫星海雾(白天)业务化监测技术研究”(编号: QYHZ202110) 共同资助。

第一作者: 李恺霖(1989-), 男, 工程师, 主要从事遥感应用研究。Email: likailing2008@126.com。

通信作者: 廖廓(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事生态遥感研究。Email: 85832679@qq.com。

度标尺在近十几年中较少使用。但该尺度具有稳定和观察结果可重复的优点^[3]。过去主要的障碍在于没有建立起 FU 色度标尺与高光谱或遥感仪器之间的关系。Wernand 等^[1-5]通过一系列的研究发展出基于色度学的水色定量表达的技术,使历史悠久的 FU 观测重新焕发生机,这项技术将成为水色研究的重要分支,是对水色组分研究的扩展和补充。本研究从表观光学量(apparent optical properties, AOP)和固有光学量(inherent optical properties, IOP) 2 个维度开展色度学研究。

1 基于 AOP 的色度学表达

1.1 水体颜色表达的理论基础

随着人们对于颜色的认识逐渐形成了色彩理论。为了能够定量表征颜色而发展出了色度学,色度学是一种颜色的科学测量方法或者颜色测量系统,最先由国际照明委员会(International Commission on illumination, CIE)在 1931 年提出,色度学被认为是科学的一个分支,涉及到用电磁光谱上辐射功率所表示的数字化的颜色,即用标准颜色来评价未知颜色的一种技术^[2]。目前应用于水色研究的色彩空间包括 LAB, RGB, CIE - XYZ 和 HSB 等。

1.1.1 RGB 颜色系统

RGB 是目前最常见的颜色系统。RGB 颜色空间基于颜色的加法混色原理,从黑色不断叠加红、绿、蓝的颜色,最终可以得到白色光。大多数扫描仪和 CRT 显示器的呈色空间均为 RGB 模式。RGB 模式给彩色图像中每个像素的 RGB 分量分配一个从 0(黑色)到 255(白色)范围的强度值,虽然只是自然界中可见光的一部分,但足以在计算机上呈现千变万化的数字图像。然而,由于这种颜色模型在使用过程中受显示设备限制,造成使用不方便。为了克服这种问题,从而引入了 CIE - XYZ 颜色系统。

1.1.2 CIE - XYZ 颜色系统

CIE 根据人眼视觉特性进行了大量的颜色混合匹配实验,建立了全部光谱三刺激值即“标准色度观察者”^[6],1931 年 CIE 给出了光谱三刺激值,后根据此光谱三刺激值绘制出 CIE1931 标准色度系统色品图。CIE - XYZ 系统中选择了 3 个理想的原色 X , Y 和 Z 代替了 RGB 系统中的 3 个原色 R , G 和 B ,使得色度系统中光谱的三刺激值 X , Y 和 Z 全为正值。RGB 与 CIE - XYZ 之间的转换关系为:

$$X = 2.7689R + 1.7517G + 1.1302B, \quad (1)$$

$$Y = 1.0000R + 4.5907G + 0.0601B, \quad (2)$$

$$Z = 0.0000R + 0.5650G + 5.5934B, \quad (3)$$

式中: X , Y 和 Z 分别为色度坐标; R , G 和 B 分别为红、绿、蓝原色。 X , Y 和 Z 所形成的范围将整个光谱色轨迹包含在内,经过一系列的色度坐标变换得到二维 CIE - XYZ 系统的色度图(图 1)。

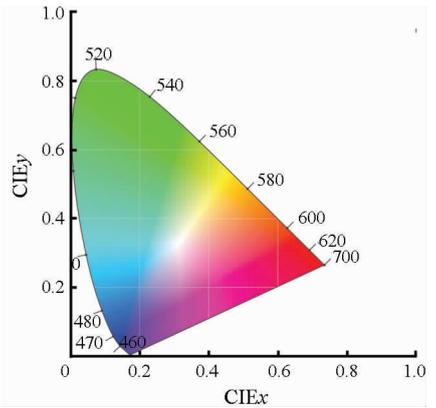


图 1 CIE1931 标准色度系统色品图

Fig. 1 CIE1931 standard chromaticity system chromaticity

X , Y , Z 是对 RGB 做了一层线性变换,变换后的颜色空间,使用其为三基色,且 3 个值都用正数去匹配所有颜色。同样,每种颜色都可以表示成 X , Y , Z 的混合,但不用于描述颜色,而用于说明光波如何组合会产生什么样的颜色,因此 X , Y , Z 是独立于设备的。 X , Y , Z 归一化得到色度坐标 (x, y) 为:

$$x = X / (X + Y + Z), \quad (4)$$

$$y = Y / (X + Y + Z). \quad (5)$$

CIE1931 推荐了色度标准,形成了现代的色度学基础。此后 CIE 不断对 1931 的体系进行回顾和修正,并形成一些新的色度学推荐以扩充色度学的领域和范畴,并且在我国形成了国家标准^[7]。

1.1.3 HSB 颜色系统

CIE 色度坐标虽消除了 RGB 系统颜色匹配时所产生的负值,且在应用时不受任何设备限制,但无法展现颜色的亮度。而 HSB 模型对亮度做了量化描述,HSB 模型描述颜色的 3 个基本特征为:色相 H 是从物体反射或透过物体传播的颜色,在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的标准色轮上,按位置度量的,通常由颜色名称标识的;饱和度 S 是指颜色的强度或纯度,表示色相中灰成分所占的比例,用从 0% (灰色) ~ 100% (完全饱和) 的百分比来度量;亮度 B 是颜色的相对明暗程度,通常用从 0% (黑) ~ 100% (白) 的百分比来度量。RGB 与 HSB 之间的转换见文献[8]。

3 种色度系统中 RGB 可以作为桥梁,连接起 HSB 和 CIE 这 2 种颜色系统,实现相互之间的转换。具体转换关系为 $HSB \leftrightarrow RGB \leftrightarrow CIE - XYZ$ 。

1.2 基于 AOP 的色度学表达方法

水体颜色由水的 2 大光学特性 AOP 和 IOP 所

决定。AOP 是指随光照条件变化而变化的量,包括离水亮度 L_w 、归一化离水辐亮度 L_{wN} 、遥感反射率 Rrs 以及刚好处于水面以下深度的辐照度比 $R(0-)$ 等^[9-10]。自然界中水体的每个波长光谱都可以通过 X, Y 和 Z 三基色刺激值组合产生,因此水体颜色由水体光谱决定。水体光谱由 AOP 和 IOP 决定,因此研究水体颜色需从 AOP 和 IOP 切入,进而深入了解水体光谱及其产生的水体颜色。Wernand 等^[3]通过一系列的研究证明:光谱信息,例如物体的颜色或海洋的颜色,最终可以通过色度学计算转换和简化为 2 个数值,即色度坐标 (x, y) ,从色度学坐标 (x, y) 再转化为色度角实现定量表达。这种转换过程通过遥感反射率 Rrs 实现。Woerd 等^[11]通过推导,得到了从 Rrs 到三刺激值从而得到色品值和色度角的方法。

Woerd 等^[11-12]对高光谱遥感反射率进行了一系列推导,以刺激值 Z 为例,即

$$Z = \sum_{i=1}^N \overline{t(\lambda)} Rrs(i), \quad (6)$$

式中: $\overline{t(\lambda)}$ 为波段 λ 的颜色匹配函数(color matching function, CMF); $Rrs(i)$ 为波段反射率; N 为波段数。三刺激值 X 和 Y 同理,这样就可以通过可见光波段反射率求得三刺激值 X, Y, Z 。色度坐标 (x, y, z) 则可以由其与三刺激值之和之比来进行标准化输出。虽然 CIE 的颜色匹配函数多次进行了补充和修改,但是至今依然是一个沿用的标准。

在此基础上 Wernand 等^[3]使用色度学方法对 FU 比色管进行了研究,通过分析光谱透过率曲线和相应的色度坐标值,对 FU 色度标尺进行了重新的评价,认为 FU 色度标尺及其实际应用使其成为评价天然水体颜色的一个很好的颜色比较器; Novoa 等^[13]在 Rosen 和 Wernand 的基础上重新配置了 FU 的 21 个色度的颜色,并重新测量了其色度坐标使之更加准确,同时还测量了 FU21 个色度标尺每一个色度的三刺激值。三刺激值的测定建立起了 FU 与人眼观察定量化的物理联系; Woerd 等^[11]在先前的研究基础上进一步提出了色度角的概念,色度角 α 是一个连续的数值变量,它用一个数字表示光谱的颜色。在自然水域,色度角范围从 40° 的棕色水体到 235° 的深蓝色大洋水体^[14],即

$$\alpha = \arctan(y - y_w, x - x_w) \text{ modulus } 2\pi, \quad (7)$$

式中: (x_w, y_w) 为白点坐标; modulus 为取模运算。

Novoa 等^[13]计算了新的 FU 色度标尺中每个颜色在色度平面上所对应的角度及其范围。随着色度

角概念的提出,色度角 α 直接与 FU 建立起一一对应关系(图 2)。实现了用色度角这个简单的参数对于水色的定量表达。

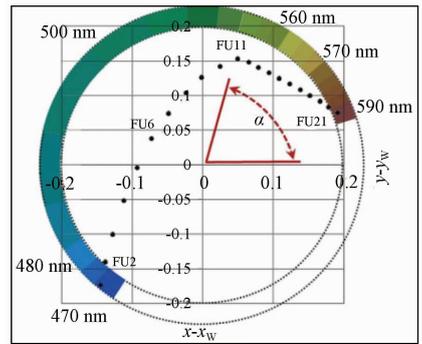


图 2 色品坐标平面与色度角及 FU 匹配图^[12]

Fig. 2 A chromaticity diagram showing the hue colour angle of the FU scale colours

2 基于 IOP 的颜色位表达

IOP 是仅与水体成分有关的光学量,如光束衰减系数 c 、吸收系数 a 、散射系数 b 、散射相函数 P 等,这些量不随入射光场的变化而变化。国际上有学者提出,从 IOP 与水色的关系为出发点^[15-16],研究水色与藻类的关系,从而提出了颜色位的概念。

2.1 颜色位的研究历史

19 世纪末,Engelmann 率先证明了光养生物可以利用光谱的特定部分。随后人们发现了许多光合色素,每种色素都有其自身的特征吸收光谱^[17]。光谱的利用可以根据经典生态理论来解释,早期人们将光视作一种资源,根据生态学理论,沿光谱范围的生态位分化减少了物种之间的竞争,从而促进了物种之间的共存^[18]。物种的吸收光谱差异导致沿光谱的生态位分化。Stomp 等^[15]研究表明红色和绿色的微蓝细菌可以通过吸收光谱的不同部分共存,还通过实地调查证实,湖泊和海洋中红色和绿色微蓝细菌的相对丰度与水下光色有关。哪些颜色可用于光养微生物?针对这个问题,Stomp 等^[15]从微观角度对水下光色和光养微生物的关系进行了研究,认为水分子的振动会在水下光谱中形成间隙,这为光养微生物产生了一系列独特的颜色。

2.2 颜色位的理论基础——分子振动

水分子在特定波长下能更有效地吸收光子,这些光子的能量使 H_2O 中共价 $O-H$ 键产生分子振动。表现出 3 种基本的振动模式:对称拉伸、不对称拉伸和弯曲。基本的振动模式及其组合(称为谐波)在水的吸收光谱的可见光和红外部分产生了一系列的肩峰。拉伸振动的第 4—8 谐波分别在 742 nm,

605 nm, 514 nm, 449 nm 和 401 nm 处被识别。

Stomp 等^[15]发现水及其光学成分的吸收特性在水生生态系统中产生了一系列不同的颜色。这一发现的核心是水分子本身的行为。水分子在特定的波段吸收光,这些波段与它们的拉伸和弯曲振动所需的能量相匹配。尽管在这些特定波长处的光吸收仅在纯水的吸收光谱中显示为细微的肩部,但由于光衰减的指数性质,这些细微的肩部在水下光谱中会产生较大的间隙,这些间隙之间的波段在水下光谱中定义了一系列不同的颜色位,这些独特的光谱空间与地球上主要光合色素的光吸收光谱相匹配。

2.3 颜色位的计算

Stomp 等^[15]的这些概念如何应用于实际生态系统并没有给出答案。由于光束衰减由水的 IOP 决定,于是 Holtrop 等^[16]利用实测数据通过对水下光谱吸收变化情况的研究给出了 5 个颜色的定量描述,利用 Ecolight 新型模型通过数值方式求解透光层处的光谱分布。该模型将天空辐射模型、空气-水界面模型、底部反射模型和生物光学模型耦合在一起,以计算在每个指定深度 z 上相对于方位角的辐射分布。至此回答了在给定的水生生态系统的水下光场中,哪个光谱位占主导地位的问题,建立起了 IOP 与颜色位之间的计算关系,即

$$r_n = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_0(\lambda, z_{eu}) d\lambda}{\int_{400}^{700} E_0(\lambda, z_{eu}) d\lambda}, \quad (8)$$

式中: r_n 为第 n 个颜色位的相对可用率; $E_0(\lambda, z_{eu})$ 为在真光层深度 z_{eu} 处波长 λ 的辐照度; λ_1 和 λ_2 分别为划分生态位的 2 个谐波的波长。

3 颜色定量表达的应用

3.1 水体卫星真彩色的实现与识别

早在 1973 年 Smith 等^[19]利用塞盘和光谱仪对 Tahoe 湖与 Crater 湖进行测量后指出,水色是观察湖水变化情况的有效工具和客观指标; Wernand^[2]认为水色是近百年来记录海洋的有效工具,而对其的定量表达能反映出海洋真实的变化。因此水色的定量识别就显得特别重要。

在 Landsat MSS 传感器时代,就已经开始了水体颜色的监测研究。前期的一些研究主要集中在选择适当的颜色参量,并试图建立颜色与水体水质参数的关系。Alfoldi 等^[20]利用 Landsat MSS 假彩色数据,将其绿光、红光和近红外波段分别作为 CIE 标准色度系统中的 X, Y, Z 三刺激值,将图像色度坐标与

水质参数联系起来,分析了 Landsat MSS 假彩色数据的色调和饱和度与水体状况的关系。

Jaquet 等^[21]将 TM 影像的红光、绿光、蓝光波段作为 CIE 色度系统中三刺激值,对瑞士西部和法国东部 50 多个湖库水体进行了色度计算,分析水体营养状态和色度坐标的关系; Sovdat 等^[22]利用 Sentinel-2 的 DN 值研究了 CIE 色彩空间与 RGB 空间的关系,首先通过对 DN 值预处理得到大气校正后反射率数据,在反射率基础上进行 CIE, LAB 和 RGB 色彩间的转换,并结合 Gamma 拉伸和色彩调整等方法得到真彩色图像实现了色度角与真彩色的关联; Jolliff 等^[23]以 OLCI 作为经验值对 GOES-ABI 数据进行了 CIE 到 RGB 的转换,得到增强的 JPEG 格式图像。GOESABI 图像序列忠实地再现了在 OLCI 真彩色重建中检测到的主要颜色图案。在佛罗里达大湾地区附近的色彩重建中明显的明亮的绿松石色可表明沉积物的重新悬浮过程。

尽管上述学者对水体真彩色的实现做了诸多研究,但由于其通用性问题,一直无法在更多的探测装置上应用。直到 Wernand 等^[4]率先研究了 Forel-Ule MERIS(FUME)算法,开启了利用卫星遥感对水色定量识别的先河,通过与实地观测的 FU 值拟合分析,高光谱和 FUME 算法所反演的 FU 值与实测相比结果良好(R^2 分别为 0.81 和 0.71)。而其后色度角方法的提出^[11-12]与随之进行的多卫星遥感仪器之间对比及与 IOCCG 数据集和实地验证的一系列工作表明,色度角在不同仪器之间有良好的 consistency,且与实测数据相比,也有着相当高的准确率,所列出的仪器与高光谱相比 R^2 均大于 0.9,这说明色度角可以统一地用于几乎所有的水色仪器。这为水色的定量识别打下了良好基础。

3.2 水体真彩色的逆转化

Novoa 等^[24]开发了一种算法 WACODI (water color from digital images)。这种算法能将廉价相机拍摄到的数码图像用于水体的科研与监测中。具体的方法为利用相机拍摄的 sRGB 色彩空间通过 Gamma 拉伸和光源校正(如水体镜面反射等)转换成为 CIE-XYZ 色彩空间。不论光源与天气条件如何,利用获得的高光谱与相机图像,通过转化成 CIE-XYZ 坐标后对比发现,两者具有很好的一致性。在欧洲的 Citclops 计划中,通过 WACODI 算法,利用数字化的 FU 色度标尺和色度角,让公民只用手机和所开发的 APP 软件,就可以进行水色观测,这将极大地丰富了数据的来源。该计划致力于利用廉价的数码相机和手机 APP,让公民参与到水环境数据资料的收集,扩展数据的来源,用低廉的方法对水环

境进行有效监测^[12]。基于这项计划,实地的验证工作也有序开展^[25-28],通过一系列的采样、对比与验证证明,在大多数天气与光照条件下,无论是内陆水体还是近岸或者是开阔大洋水体,Citclops 所开发的 APP 都能准确获取水色信息,提供相当准确的真彩色定量表达。

尽管 Citclops 计划鼓励了更多公民的参与,扩展了数据来源的渠道。但由于其时空的局限性,更多对水色定量的识别还是基于卫星来实现。Wernand 等^[4]开启了利用卫星遥感对水色定量识别的先河;段洪涛等^[29-30]系统总结了水色遥感的历史和发展方向,从最初的水色三要素遥感为基础的水色遥感,发展到水质遥感,而后再补充和发展到水环境遥感。随着更多基于卫星的水色定量识别算法被开发,应用领域也沿着水色遥感的发展趋势和方向一起,从开阔大洋水体到近岸二类水体^[31-39],从流域水体到内陆湖泊水体及水库水体^[40-52],从一般城市水体到城市黑臭水体^[53-55]。总的来说从 Citclops 研究结果和卫星数据在不同水体的研究表明,从公民和卫星获取的数据既有优势也有局限性,而且两者间高度互补。因而水色定量识别的领域和应用范围得到了很大扩展。

3.3 气候变化定量表达因子

近年来,水体颜色被世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)和全球气候观测系统(Global Climate Observing System, GCOS)计划列为基本气候变量之一。欧洲航天局所提出的气候变化倡议,致力于利用卫星组成全球气候观测系统,利用卫星数据生成基本气候变量数据集。而其中的一个子项目:海洋颜色气候变化倡议(European Space Agency Ocean Colour Climate Change Initiative, ESA-OC-CCI)旨在建立一个长期的、连续的、并带有误差评价的长时序海洋颜色数据产品^[56]。随着水色定量遥感研究的深入及数据的不断累积,基于多源卫星融合的数据集 ESA-OC-CCI 发布问世。该数据集反映了过去 20 a 全球大洋的水色信息,包含了 FU、色度角和塞盘深度等定量描述水色的参数。数据集中月数据的空间分辨率为 4 km,目前该版本是最新发布的,采用了最新的反演技术且应用不局限于任何特定的水体类型^[14,57]。

中国科学院空天信息创新研究院科研团队发布全球首套湖库遥感水色指数科学数据集,该数据集反映了全球范围千余个大型湖库在过去近 20 a 的水色长时间序列时空变化趋势,在这套数据集中,通过实地测量的从清澈贫营养到浑浊富营养的多种湖泊水体,将离水反射率重采样到 MODIS 相应的波段

后计算 FUI(FU index)值,一般来说卫星遥感水色产品能允许的误差范围在 30% 以内,而此数据集的误差率小于 10%。由于该数据集采用一致的反演算法,保证了数据集在监测水体颜色变化时的稳定性^[58-59]。这 2 套定量描述水色的数据集的发布,为全球大洋和水库水色的变化和监测提供了重要的科学数据支撑。随着人工智能的发展,利用上述数据集进行降尺度从而匹配更高分辨率数据用以衍生其用途^[37],相关的研究还在不断进行中。除了标准化的数据产品之外,在 Citclops 计划中采用 EyeOnWater APP 所采集的接近 5 000 条全球观测的水色、透明度和荧光数据,用户可以通过门户网站 European Marine Observation and Data Network (<http://www.emodnet.eu>)和 Global Earth Observation System of Systems(<http://www.earthobservations.org>)进行访问。

3.4 水体成分的识别

不管是大洋一类清洁水体,还是海洋近岸、湖泊、河流二类浑浊水体,除了纯水本身外,对于自然光有吸收和散射作用的主要有浮游植物色素、非色素颗粒物和 CDOM 等 3 种物质,一般统称为光学活性物质^[29]。由于其存在与相互作用改变了水体对光的散射与吸收,因此水体会呈现出不同的颜色。水色定量识别的目的在于探究水色与水色组分的关系,从而从水色反演出水色组分的含量,进而对水体生态进行定量监测。与传统水色方法反演不同,以往利用多光谱数据获取水体中三要素浓度,难以实现精确的组分反演,因而有必要确定复杂的局部散射和吸收特性。相比之下,在色度空间内定义的 FU 不依赖于单个波段的信号响应,大大降低了水色计算的不确定性^[43]。

3.4.1 叶绿素

海洋浮游在海洋生态过程、地球化学循环、渔业和其他重要海洋过程中起着关键作用^[60]。由于一类水体的光学特性主要由浮游植物及其伴生物决定,因此在开阔大洋中利用水色定量识别叶绿素方法已经相当成熟,这部分研究主要关注于海洋叶绿素的长期变化、对气候变化的响应和对海洋遥感反射率、水色的影响等^[3,61]。

但对于近岸和内陆水体而言,悬浮泥沙和黄色物质的增多,悬浮泥沙的后向散射和黄色物质的强烈吸收直接影响了海水的光学性质^[62],导致反演叶绿素的工作十分复杂。尽管 Boyce 等^[60]论证了 FU 数值小于等于 10 的范围内 FU 与叶绿素有着非常好的相关关系。但是这种相关关系在二类水体的研究中却存在高度不确定性。利用水色对叶绿素进行

定量识别的主要思路是采用实测的 FU 值与叶绿素含量,通过大量样本建立统计关系,建立起 FU 与叶绿素含量的数学模型。Woerd 等^[12]为了说明色度角的意义,利用了 IOCCG^[63]不同叶绿素浓度下海水样本与实测样本,讨论了从低 CDOM 到高 CDOM 色度角与叶绿素浓度的对应关系。类似利用水色定量识别方法对叶绿素浓度进行反演的研究也大量开展,并取得丰硕成果。Wernand 等^[4]利用从 1889 年以来航海所记录的 FU,由 EcoLight 辐射传输数值模型表明,在最清澈的海水($FU = 1 \sim 4$)中,藻类色素是光吸收的主导因素,FU 指数与叶绿素浓度之间存在极显著的指数关系($R^2 = 0.99$),通过卫星遥感方式可以把这种关系拓展到全球开阔大洋使得在全球范围监测叶绿素成为可能; Busch 等^[26-27]在地中海西北部使用了高光谱仪、Citclops 计划中的所使用的 APP 和 MERIS 卫星图像对比后得出,三者所反演出的色度角均在一个 FU 的角度范围内,即使是最大的误差也只有一个 FU 的差异。基于普通数码相机镜头的用于测量叶绿素-a 荧光的原型装置 SmartFluo 被设计出来^[64],用荧光方法计算叶绿素含量。通过实验室的对照试验,SmartFluo 的结果与专业仪器所测得的结果高度一致($R^2 = 0.97$)。证明了手机拍摄的数码照片通过在欧洲 Citclops 计划下能成为高质量海洋数据的来源。

3.4.2 其他水色组分

二类水体因其特殊性及其在日常经济活动中的特殊性总受到极大的关注。除了叶绿素以外,利用水色对其他水色组分的监测也显得十分重要。叶绿素测量往往与其他水色组分的测量同时进行。利用数学模型建立起水色组分与水色的定量表达关系,实现对水色组分的识别。Pozdnyakov 等^[65]利用色度学方法讨论了水色组分与水色的大致关系,即在高叶绿素和悬浮有机物及低浓度 CDOM 水色从绿色到棕色。高浑浊或者高浓度 CDOM 是以棕色水色为标志。Wozniak 等^[66]利用色度学方法在波罗的海利用色度学方法,通过测量纯水和影响水色的另外 3 种物质颗粒有机物、颗粒物无机物和 CDOM。通过一系列对照试验,尝试建立色度学与水色组分之间的关系,绘制查找表,以实现利用色度对海水成分的大致估计。类似的研究在全球各地不同水域都在进行, Bukata 等^[67]在安大略湖通过实测数据讨论了叶绿素、悬浮物质和有机溶解碳含量与水色之间的关系,利用色度学方法阐述了这 3 种物质不同占比时水色的大致范围。但也同时指出这种单点测量的水色组分关系并不能推广应用到平面上。也是因为 FUME 算法的出现和电子、遥感技术的发展,水

色组分与水色的关系逐渐变得清晰,也实现了从点到面,从单一时刻到长时序的跨越。Garaba 等^[32]在欧洲西北部海湾通过航测数据分析得到叶绿素-a, CDOM 和悬浮颗粒物能与 FU 建立线性回归关系,且模型具有较高准确度; Jafar 等^[45]在北爱尔兰海使用比色皿和航测数据,通过计算值与观测值比对分析得到 FU2(蓝色)-FU18(绿棕色)范围内,观测值和计算值之间有良好的-一致性($R^2 = 0.79$, $RMSE = 2.7$),并通过 MODIS 数据证明了在欧洲西北部海域,颜色最丰富的水域是由悬浮沉积物而不是浮游植物大量繁殖造成的; Wang 等^[42]基于 MODIS 数据反演的色度学参数 FU 和色度角开发了一种稳健的中国湖泊透明度算法模型,该模型与 17 个湖泊的实测数据进行了比较,结果表明该模型的平均相对偏差为 27.4%,与其他经验透明度模型相比,基于色度学方法的透明度模型在不同透明度和营养状态下水体的适用性和可靠性上均得到了提高; Petus 等^[35]使用色度学方法为澳大利亚昆士兰州大堡礁开发了一种评估洪水期间海洋水组成和生态系统健康趋势的操作方法,并对比了 2017—2018 年雨季期间各类数据反演的色度学时空模态,认为该水色数据集和框架将有助于更好地理解洪水和水体透明度下降对海洋生态系统的影响; Zhan 等^[38]将黄海海域所得到的 FUI 与实测透明度数据相比, $RMSE$ 和 MRE 分别为 1.83 m 和 43.74%,比其他的经验拟合公式更好,证明了 FUI 在浑浊海域中透明度测量的价值。但 Malthus 等^[28]指出,尽管水颜色和水质之间的关系本身非常有用,但它是复杂的。为了解决这种问题,有学者利用水体的营养指数建立起与水色相关关系,以实现水体生态进行监测。Wang 等^[40]使用 MODIS 反演的 FUI 对太湖进行了研究,发现 FUI 可以检测出不同季节的水质差异; Li 等^[41]进一步结合 FUI 把水体营养类型划分成贫营养、中营养和富营养; Wang 等^[42]随后继续将水体营养等级和 FUI 的对应关系进行细分,得到了较高的精度,并拓展到全球湖泊; 许杨等^[49]和王野^[50]研究结果量化了近 20 a 来洞里萨湖水体颜色或水质综合状态、富营养化程度的演变程度及空间分布,为该湖泊的水质监测与治理提供基础数据支持; Chen 等^[47]使用 Landsat8 数据对从 2013—2018 年长江城市湖泊进行了研究得出 FUI 可以很好地表征湖泊的营养状态($R^2 = 0.8065$); Lehmann 等^[44]扩展了 Woerd 和 Wernand 的工作,引入饱和度以扩展色度角的使用范围和物理可解释性,其表达式为:

$$S = \sqrt{(x - x_w)^2 + (y - y_w)^2}, \quad (9)$$

式中 S 为光谱颜色在色度平面上相对于白点 (x_w, y_w) 的距离。这种扩展和补充在利用高分辨率卫星监测城市小范围黑臭水体中有着重要的意义; 温爽等^[53]利用 GF-2 卫星监测南京黑臭水体时发现, 有些河段受排放污染物的影响水色差异大, 出现墨绿、灰黑色等与玄武湖、莫愁湖等正常水体颜色相似, 这使得利用色度学方法对黑臭水体的识别率很低, 识别准确率仅有 37.5%。尽管 Zhao 等^[55]已经证明了在黑臭水体监测中色度角有良好的稳定性, 但也指出其局限性。基于这些问题, 杨子谦等^[54]使用 CIE-XYZ 颜色系统并结合 GF-2 影像的 3 个可见光波段用来定量的表征颜色, 利用色度学方法同构建了适用于城市水体遥感分级的 U-FUI (urban FU index) 水色指数, 根据水体水色信息完成城市水体的遥感分级, 这极大提升了识别准确率, 识别准确率达到 72%。由于黑臭水体的成分更加复杂, 其水色组分的定量识别方法还在继续研究中。

3.5 水体光合作用的光适应

水的颜色变化可以改变色素组成不同的浮游植物之间的竞争性相互作用, 从而利用光谱的不同部分。在 CDOM 浓度极低的最清澈海水中, 总吸收光谱类似于纯水, 在吸收光谱中可以看到 PAR (photosynthetically active radiation) 范围内的所有 (次) 谐波。在低营养化海洋典型的低 CDOM 浓度下, 水下光谱主要由紫光和蓝光 (400 ~ 500 nm) 控制; 在非常高的 CDOM 浓度下, 水下光谱主要由橙色和红光 (600 ~ 700 nm) 控制, 水下光谱的变化进而导致光谱位的变化。CDOM 和 NAP (non-algal particles) 都在短波段下强烈吸收, 二者浓度的变化均会引起水下光谱的变化从而改变颜色。

Holtrop 等^[16]以原球绿藻等蓝藻为主体研究了藻类体内色素对光谱的吸收作用, 结果表明 PEB/PUB/PCB/chla/chlb 等藻类体内主要色素对光的吸收与 5 个颜色十分吻合, 同时与不同纬度蓝藻的分布情况达成较好一致性。在此基础上还利用卫星数据进行了全球范围的研究, 结果表明紫色谱位主导亚热带少营养海洋环流, 蓝色谱位主导温带开阔海域、赤道上升流区域、黑海、地中海以及缺乏营养的湖泊; 绿色谱位主导富饶的浅海、海岸线上升流区域、波罗的海以及中富营养湖泊; 橙色和红色谱位控制富营养化和肥厚的内陆水体以及含有高浓度溶解物和碎屑物质的河口。

在温带和北方地区, 由于富营养化的增加和有机质的增加, 例如, 湖泊的“绿化”和“褐变”^[68], 许多清澈的蓝色湖泊已变成浑浊的水域。浮游植物群落很可能会受到水下光谱中这些变化的影响, 因为

它们由不同种类的物种组成, 这些物种部署了不同的光合色素和采光策略^[69]。近年来, 北半球许多湖泊和沿海水域的颜色发生了变化, 这是由于土地利用、酸沉降和气候变化^[70-72]导致 CDOM 浓度增加所致。随着 CDOM 浓度的增加, 水下光的颜色向更长的波长转移。约 1 000 个北美湖泊的研究表明^[68], 蓝色湖泊的数量大大减少, 而黑色湖泊的数量增加, 这是由于湖水的“绿化”和“褐变”。根据颜色, 湖泊“褐变”意味着 CDOM 浓度的增加使浮游植物的光合作用从蓝色和绿色位, 向橙色和红色位转变。湖泊“褐变”导致浮游植物群落结构发生重大变化, 包括绿藻和硅藻的总体下降^[73-74], 淡水蓝藻细菌和隐藻植物的增加^[75-77]。这些发现得到实验^[78]的进一步支持, 富含 PCB 的蓝细菌以橙红光获胜。绿藻和硅藻的叶绿素和类胡萝卜素在紫色和蓝色生态位中有效吸收, 而淡水蓝藻和隐生植物的藻蓝蛋白 PEB 和 PCB 利用绿色和橙色生态位。

Luimstra 等^[79]以颜色位为基础开发了一种新的资源竞争模型, 使用以淡水蓝藻和绿藻为代表的浮游植物, 通过单培养实验对模型进行参数化。随后进行了一系列竞争实验, 结果与模型预测一致, 绿藻在蓝光下更具生存竞争力, 而蓝藻在红光下较易存活, 而这些与该物种的初始相对丰度无关。这些结果与观察到的浮游植物群落结构响应湖泊“褐变”的变化一致。同样, 在海水中, 模型预测蓝光下以叶绿素为基础的采光复合物的前绿球菌占优势, 而绿光则预测聚球菌与藻胆体的优势, 两者之间存在广泛的共存关系。

3.6 应用于卫星遥感数据处理

Wernand 等^[4]率先提出了色度学方法应用于遥感数据的 FUME 算法, 其随后的研究对于卫星遥感数据处理进一步完善, 形成了应用于卫星遥感数据的通用算法^[11,12,43]。

Woerd 等^[11-12]指出, 卫星遥感反射率与 CMF 权重系数的乘积表达式为:

$$y(\lambda) = Rrs(\lambda)w(\lambda), \quad (10)$$

式中: $y(\lambda)$ 为波长 λ 处的三刺激值; $w(\lambda)$ 为波长 λ 处 CMF 的权重系数。为了方便表示波长 λ 处的三刺激值 X, Y 和 Z 引入变量 T 。

由于卫星数据光谱覆盖范围有限, 因此光谱首先必须通过线性插值方法进行重构。重构方法基于遥感光谱波段的遥感反射。频谱区间 $b1$ 和 $b2$ 之间三刺激值为 T , 波长 $L1$ 和 $L2$ 之间的三刺激值 ΔT 用四边形的法则近似表示 (图 3)。

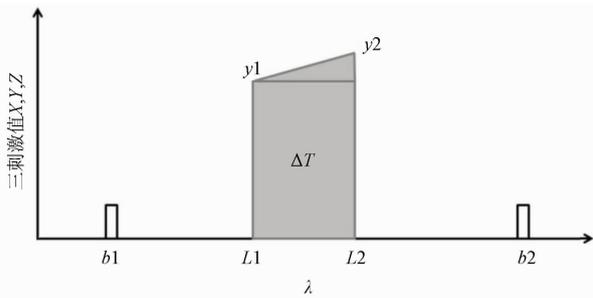


图3 位于 b_1 和 b_2 波段之间的频谱对三刺激值的贡献^[11]
Fig. 3 Contribution of a small part of the spectrum, lying between bands b_1 and b_2 , to the tristimulus values

ΔT 最终的表达式为:

$$\Delta T = A \{ t_{L1} [R_{b1} + B(R_{b2} - R_{b1})] + t_{L2} [R_{b1} + C(R_{b2} - R_{b1})] \}, \quad (11)$$

$$A = 0.5(L2 - L1), \quad (12)$$

$$B = (L1 - b1)/(b2 - b1), \quad (13)$$

$$C = (L2 - b1)/(b2 - b1), \quad (14)$$

式中: t_{L1} 和 t_{L2} 分别为 $L1$ 和 $L2$ 波长处三刺激值; R_{b1} 和 R_{b2} 分别为 $b1$ 和 $b2$ 处反射率。将公式(11)改写为:

$$\Delta T = R_{b1}A [t_{L1}(1 - B) + t_{L2}(1 - C)] + R_{b2}A [t_{L1}B + t_{L2}C]。 \quad (15)$$

公式(15)表示根据波段 $b1$ 和 $b2$ 可得到其反射率数值 R , 公式(11)改写得到公式(15)可很方便地通过测量参数计算出 ΔT , 这个重要的参数对于色度角精度有着不可或缺的作用。由于利用卫星反演色度角存在着系统性偏差 Δ , 把参数 Δ 定义为高光谱色度角与多光谱色度角之差, 在数学上利用五次多项式进行拟合。

综上所述, 利用卫星得到色度角的步骤为:

①从遥感反射率 Rrs 和系数计算三刺激值 (X, Y, Z); ②计算色度角; ③系统偏差修正。

4 结论与展望

自利用光谱测量 FU 比色皿的三刺激值开始, 水体颜色的色度学表达成为水色遥感领域的一个新的发展方向, 因其具有抗干扰能力强、精度高、各种仪器之间可相互比较等特点, 发展出广阔的应用前景^[43], 尤其是在与人类关系密切的二类水体监测中, 不仅能够提高参数估算精度, 而且能一定程度上避免因反演模型的区域性、时相性特征从而难以推广的问题^[80]。在水色(FU)和卫星遥感的真彩色再现、水体成分的间接表达等方面已取得了一定的研

究成果, 但水色作为表观光学量, 其与固有光学量、水色组分、水质参数的关系的研究还有待于继续深化, 水色作为基本气候变量之一与气候变化的关系及其机制的研究也尚不清楚。对我国而言, 已有学者开展这方面的工作, 但广度和深度有待加大, 同时在国产卫星的应用上仅有高分系列卫星的少量研究, 更多如风云系列卫星等的研究尚处于空白状态。

首先, 应加强水体生物-光学数据集的建设, 除了传统的光谱测量和卫星遥感数据外, 还应加强已有数据集诸如 ESA-OC-CCI 的验证和使用。新技术的出现, 如利用人工智能方法对数据降尺度、升尺度使用、高光谱卫星影像和高光谱无人机的出现将为数据获取和应用提供新的途径。

其次, 开展我国水体的色度学方法研究, 应从固有和表观光学量 2 个维度开展, 了解和掌握我国内陆和近岸水体的色度学特征。目前的色度学研究还比较分散, 并未形成全面、业务化的体系。此外多数研究也仅基于表观光学量与水色组分、水质参数的关系, 而水色与固有光学量的研究几乎没有。

第三, 加强色度学方法在国产卫星数据上的应用, 拓展卫星产品类型。目前国内仅使用高分系列卫星, 利用色度学方法对内陆水体进行了初步的研究。但是更多国产卫星在色度学的应用方面还属空白。此外色度学产品目前也仅有 FU、色度角和塞盘深度 3 种, 且时空分辨率较低。还不能满足日益多样化和精细化的产品需求。因此, 需要从深度和广度方面下手, 利用更多国产卫星数据, 拓展更多水色产品。

参考文献 (References):

- [1] Wernand M R, Novoa S, van der Woerd H, et al. A centuries - long history of participatory science in optical oceanography: From observation to interpretation of natural water colouring[J]. History of Oceanography Yearbook, 2014, 19(20): 61 - 90.
- [2] Wernand M R. Poseidon's paintbox: Historical archives of ocean colour in global - change perspective[D]. Utrecht: Utrecht University, 2011.
- [3] Wernand M R, van der Woerd H J. Spectral analysis of the Forel - Ule ocean colour comparator scale [J]. Journal of the European Optical Society - Rapid Publications, 2010, 5(10014S): 1 - 7.
- [4] Wernand M R, Hommersom A, van der Woerd H J. MERIS - based ocean colour classification with the discrete Forel - Ule scale [J]. Ocean Science, 2013, 9(3): 477 - 487.
- [5] Wernand M R, Woerd H J, Gieskes W C. Trends in ocean colour and chlorophyll concentration from 1889 to present [J]. PLOS ONE, 2013, 8(6): 1 - 20.
- [6] Arthur D B. A critical review of the development of the CIE1931 RGB color - matching functions [J]. Color Research and Application, 2004, 29(4): 267 - 272.

- [7] 中国计量科学研究院. GB/T3977—2008. 颜色的表示方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
National Institute of Metrology. GB/T3977—2008 [S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2008.
- [8] 贾婉丽. Photoshop 中的色彩空间转换 [D]. 西安: 西安理工大学, 2002.
Jia W L. Color conversions in Photoshop [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [9] 唐军武, 陈清莲, 谭世祥, 等. 海洋光谱测量与数据分析处理方法 [J]. 海洋通报, 1998, 17(1): 71–79.
Tang J W, Chen Q L, Tang S X, et al. Method of oceanic spectral data measurement and analysis [J]. Marine Science Bulletin, 1998, 17(1): 71–79.
- [10] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法 [J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37–44.
Tang J W, Tian G L, Wang X Y, et al. The methods of water spectra measurement and analysis I: Above-water method [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 37–44.
- [11] Woerd H J, Wernand M R. True colour classification of natural waters with medium-spectral resolution satellites; SeaWiFS, MODIS, MERIS and OLCI [J]. Sensors, 2015, 15(10): 25663–25680.
- [12] Woerd H J, Wernand M R. Hue-angle product for low to medium spatial resolution optical satellite sensors [J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 180–198.
- [13] Novoa S, Wernand M R, van der Woerd H J. The Forel-Ule scale revisited spectrally: Preparation protocol, transmission measurements and chromaticity [J]. Journal of the European Optical Society – Rapid publications, 2013(13057): 1–8.
- [14] Pitarch J, Bellacicco M, Marullo S, et al. Global maps of Forel-Ule index, hue angle and Secchi disk depth derived from twenty-one years of monthly ESA-OC-CCI data [J]. Earth System Science Data Discussions, 2020(13): 1–17.
- [15] Stomp M, Huisman J, Stal L J, et al. Colorful niches of phototrophic microorganisms shaped by vibrations of the water molecule [J]. The ISME Journal, 2007, 1(4): 271–282.
- [16] Holtrop T, Huisman J, Stomp M, et al. Vibrational modes of water predict spectral niches for photosynthesis in lakes and oceans [J]. Nature Ecology and Evolution, 2021, 5(1): 55–66.
- [17] Haverkamp T H A. Shades of red and green: The colorful diversity and ecology of picocyanobacteria in the Baltic Sea [D]. Amsterdam: Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 2008.
- [18] Rueffler C, van Dooren T J M, Leimar O, et al. Disruptive selection and then what? [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2006, 21(5): 238–245.
- [19] Smith R C, Goldman T. Optical properties and color of Lake Tahoe and crater lake [J]. Limnology and Oceanography, 1973, 18(2): 189–199.
- [20] Alfoldi T T, Munday J C. Water quality analysis by digital chromaticity mapping of Landsat data [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1978, 4(2): 108–126.
- [21] Jaquet J, Zand B. Colour analysis of inland waters using Landsat TM data [J]. European Space Agency Monographs, 1989, 1102(11): 57–67.
- [22] Sovdat B, Kadunc M, Batic M, et al. Natural color representation of Sentinel-2 data [J]. Remote Sensing of Environment, 2019(255): 392–402.
- [23] Jolliffe J K, Lewis M D, Ladner S, et al. Observing the ocean subsurface with enhanced-color GOES-ABI visible band data [J]. Sensors, 2019, 19(3900): 1–23.
- [24] Novoa S, Wernand M, van der Woerd H J. WACODI: A generic algorithm to derive the intrinsic color of natural waters from digital images [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2015, 13(12): 697–711.
- [25] Novoa S, Wernand M R, van der Woerd H J. The modern Forel-Ule scale: A “Do-it-yourself” colour comparator for water monitoring [J]. Journal of the European Optical Society – Rapid Publications, 2014, 9(14025): 1–10.
- [26] Busch J A, Price I, Jeansou E, et al. Citizens and satellites: Assessment of phytoplankton dynamics in a NW Mediterranean aquaculture zone [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016(47): 40–49.
- [27] Busch J A, Bardaji R, Ceccaroni L, et al. Citizen bio-optical observations from coast-and ocean and their compatibility with ocean colour satellite measurements [J]. Remote Sensing, 2016, 8(11): 879.
- [28] Malthus T J, Ohmsen R, Woerd H J. An evaluation of citizen science smartphone APPs for inland water quality assessment [J]. Remote Sensing, 2020, 12(1578): 1–20.
- [29] 段洪涛, 罗菊花, 曹志刚, 等. 流域水环境遥感研究进展与思考 [J]. 地理科学进展, 2019, 38(8): 1182–1195.
Duan H T, Luo J H, Cao Z G, et al. Progress in remote sensing of aquatic environments at the watershed scale [J]. Progress in Geography, 2019, 38(8): 1182–1195.
- [30] 段洪涛, 曹志刚, 沈明, 等. 湖泊遥感研究进展与展望 [J]. 遥感学报, 2020, 26(1): 3–18.
Duan H T, Cao Z G, Shen M, et al. Review of lake remote sensing research [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2019, 26(1): 3–18.
- [31] Garaba S P, Friedrichs A, Voß D, et al. Classifying natural waters with the Forel-Ule colour index system: Results, applications, correlations and crowdsourcing [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(12): 16096–16109.
- [32] Garaba S P, Voß D, Zielinski O. Physical, bio-optical state and correlations in North-Western European Shelf Seas [J]. Remote Sensing, 2014, 6(6): 5042–5066.
- [33] Woerd H J, Wernand M R, Peters M et al. True color analysis of natural waters with SeaWiFS, MODIS, MERIS and OLCI by SNAP [C]//Ocean Optics Conference, 2016.
- [34] Pitarch J, van der Woerd H J, Brewin R J W, et al. Optical properties of Forel-Ule water types deduced from 15 years of global satellite ocean color observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2019(231): 1–16.
- [35] Petus C, Waterhouse J, Lewis S, et al. A flood of information: Using Sentinel-3 water colour products to assure continuity in the monitoring of water quality trends in the Great Barrier Reef (Australia) [J]. Journal of Environmental Management, 2019(248): 1–20.
- [36] Nie Y, Guo J, Sun B, et al. An evaluation of apparent color of seawater based on the in-situ and satellite-derived Forel-Ule color scale [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020(246): 1

- 10.

- [37] Sung T, Kim Y J, Choi H, et al. Spatial downscaling of ocean colour - climate change initiative (OC - CCI) Forel - Ule index using GO - CI satellite image and machine learning technique [J]. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2021, 37(5 - 1): 959 - 974.
- [38] Zhan J, Zhang D J, Zhou G Q, et al. MODIS - based research on Secchi disk depth using an improved Semianalytical algorithm in the Yellow Sea [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021(14): 5964 - 5972.
- [39] Li M J, Sun Y H, Li X J et al. An improved eutrophication assessment algorithm of estuaries and coastal waters in Liaodong Bay [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(19): 3866 - 3884.
- [40] Wang S, Li J, Shen Q, et al. MODIS - based radiometric color extraction and classification of inland water with the Forel - Ule scale: A case study of Lake Taihu [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 8(2): 907 - 918.
- [41] Li J, Wang S, Wu Y, et al. MODIS observations of water color of the largest 10 lakes in China between 2000 and 2012 [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(8): 788 - 805.
- [42] Wang S, Li J, Zhang B, et al. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS - derived Forel - Ule index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018(217): 444 - 460.
- [43] 王胜蕾. 基于水色指数的大范围长时序湖库水质遥感监测研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
Wang S L. Large - scale and long - time water quality remote sensing monitoring over lakes based on water color index [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [44] Lehmann M K, Nguyen U, Allan M, et al. Colour classification of 1 486 lakes across a wide range of optical water types [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1273.
- [45] Jafar S M, Bowers D G, Griffiths J W. Remote sensing observations of ocean colour using the traditional Forel - Ule scale [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018(215): 52 - 58.
- [46] Wang S, Li J, Zhang B, et al. Changes of water clarity in large lakes and reservoirs across China observed from long - term MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020(247): 1 - 17.
- [47] Chen Q, Huang M, Tang X. Eutrophication assessment of seasonal urban lakes in China Yangtze River basin using Landsat8 - derived Forel - Ule index: A six - year (2013—2018) observation [J]. *Science of the Total Environment*, 2020(745): 135392 - 135392.
- [48] 许杨. 基于 Landsat 的长江中下游流域湖泊水体颜色长时序变化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
Xu Y. Study on the long - term change of lacustrine water color in the middle and lower basins of the Yangtze river based on Landsat datasets [D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.
- [49] 许杨, 王野, 陆建忠, 等. 基于 FUI 模型的柬埔寨洞里萨湖水体颜色研究 [J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 54(3): 454 - 462.
Xu Y, Wang Y, Lu J Z, et al. Study on water color of Tonle Sap Lake in Cambodia based on FUI model [J]. *Journal of Central China Normal University(Natural Science)*, 2020, 54(3): 454 - 462.
- [50] 王野. 基于多源遥感数据的洞里萨湖水环境长时序动态过程研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Wang Y. Research on long - time dynamic process of Tonle Sap Lake water environment based on multi - source remote sensing data [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [51] 曹畅, 王胜蕾, 李俊生, 等. 基于 MODIS 数据的全国 144 个重点湖库营养状态监测: 以 2018 年夏季为例 [J]. *湖泊科学*, 2018, 33(2): 405 - 413.
Cao C, Wang S L, Li J S, et al. MODIS - based monitoring of spatial distribution of trophic status in 144 key lakes and reservoirs of China in summer of 2018 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 33(2): 405 - 413.
- [52] 姜倩. 卫星遥感在湖库水质监测中的有效性评价方法研究——以 GF - 1 号卫星为例 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
Jiang Q. Study on the effectiveness evaluation method of satellite remote sensing in the monitoring of lake and reservoir water quality: Take GF - 1 satellite as an example [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [53] 温爽, 王桥, 李云梅, 等. 基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例 [J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 57 - 67.
Wen S, Wang J, Li Y M, et al. Remote sensing identification of urban black - odor water bodies based on high - resolution images: A case study in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 57 - 67.
- [54] 杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 等. 基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法 [J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2213 - 2222.
Yang Z Q, Liu H Q, Lyu H, et al. A comprehensive classification method of urban water by remote sensing based on high - resolution images [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2213 - 2222.
- [55] Zhao Y, Shen Q, Wang Q, et al. Recognition of water colour anomaly by using hue angle and Sentinel 2 image [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 716 - 737.
- [56] Sathyendranath S, Brewin B, Mueller D, et al. Ocean colour climate change initiative: Approach and initial results [C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2012: 2024 - 2027.
- [57] Jackson T, Chuprin A, Sathyendranath S, et al. Ocean colour climate change initiative (OC_CCI) - interim phase [R]. Plymouth: Plymouth Marine Laboratory, 2020.
- [58] 张兵, 李俊生, 申茜, 等. 长时序大范围内陆水体光学遥感研究进展 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 37 - 52.
Zhang B, Li J S, Shen Q, et al. Recent research progress on long time series and large scale optical remote sensing of inland water [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(1): 37 - 52.
- [59] Wang S, Li J, Zhang W, et al. A dataset of remote - sensed Forel - Ule index for global inland waters during 2000—2018 [J]. *Scientific Data*, 2021, 8(1): 1 - 10.
- [60] Boyce D G, Lewis M, Worm B. Integrating global chlorophyll data from 1890 to 2010 [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2012(10): 840 - 852.
- [61] Dutkiewicz S, Hickman A E, Jahn O, et al. Ocean colour signature of climate change [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1 - 13.
- [62] 邢小罡, 赵冬至, 刘玉光, 等. 叶绿素 a 荧光遥感研究进展 [J]. *遥感学报*, 2007, 11(1): 137 - 144.
Xing X G, Zhao D Z, Liu Y G, et al. Process in fluorescence remote sensing of chlorophyll - a [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(1): 137 - 144.

- [63] Lee Z P. Remote sensing of inherent optical properties; Fundamentals, tests of algorithms, and applications [R]. Dartmouth: International Ocean – Colour Coordinating Group, 2006.
- [64] Friedrichs A, Busch J A, van der Woerd H J, et al. SmartFluo; A method and affordable adapter to measure chlorophyll a fluorescence with smartphones [J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 678.
- [65] Pozdnyakov D V, Kondratyev K Y. Numerical modelling of natural water colour; Implications for remote sensing and limnological studies [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(10): 1913 – 1932.
- [66] Wozniak S B, Meler J. Modelling water colour characteristics in an optically complex nearshore environment in the Baltic Sea; Quantitative interpretation of the Forel – Ule scale and algorithms for the remote estimation of seawater composition [J]. *Remote Sensing*, 2020(12): 2851 – 2885.
- [67] Bukata R P, Jerome J H, Kondratyev K Y, et al. Modelling the radiometric color of inland waters; Implications to a) remote sensing and b) limnological color scales [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1997, 23(3): 254 – 269.
- [68] Leech D M, Pollard A I, Labou S G, et al. Fewer blue lakes and more murky lakes across the continental US; Implications for planktonic food webs [J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, 63(6): 2661 – 2680.
- [69] Ting C S, Rocap G, King J, et al. Cyanobacterial photosynthesis in the oceans; The origins and significance of divergent light – harvesting strategies [J]. *Trends in Microbiology*, 2002, 10(3): 134 – 142.
- [70] Croce R, van Amerongen H. Natural strategies for photosynthetic light harvesting [J]. *Nature Chemical Biology*, 2014, 10(7): 492 – 501.
- [71] Monteith D T, Stoddard J L, Evans C D, et al. Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry [J]. *Nature*, 2007, 450(7169): 537 – 540.
- [72] Weyhenmeyer G A, Müller R A, Norman M, et al. Sensitivity of freshwaters to browning in response to future climate change [J]. *Climatic Change*, 2016, 134(1 – 2): 225 – 239.
- [73] Kritzbeg E S. Centennial – long trends of lake browning show major effect of afforestation [J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2017, 2(4): 105 – 112.
- [74] Urrutia C P, Ekvall M K, Raticovich J, et al. Phytoplankton diversity loss along a gradient of future warming and brownification in freshwater mesocosms [J]. *Freshwater Biology*, 2017, 62(11): 1869 – 1878.
- [75] Wilken S, Soares M, Pablo U C, et al. Primary producers or consumers? Increasing phytoplankton bacterivory along a gradient of lake warming and browning [J]. *Limnology and Oceanography*, 2018(63): S142 – S155.
- [76] Feuchtmayr H, Pottinger T G, Moore A, et al. Effects of brownification and warming on algal blooms, metabolism and higher trophic levels in productive shallow lake mesocosms [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 678: 227 – 238.
- [77] Deininger A, Faithfull C L, Bergström A K. Phytoplankton response to whole lake inorganic N fertilization along a gradient in dissolved organic carbon [J]. *Ecology*, 2017, 98(4): 982 – 994.
- [78] Tan X, Zhang D, Duan Z, et al. Effects of light color on interspecific competition between microcystis aeruginosa and chlorella pyrenoidosa in batch experiment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(1): 344 – 352.
- [79] Luimstra V M, Verspagen J M H, Xu T, et al. Changes in water color shift competition between phytoplankton species with contrasting light – harvesting strategies [J]. *Ecology*, 2020, 101(3): 1 – 17.
- [80] 李云梅, 赵 焕, 毕 顺, 等. 基于水体光学分类的二类水体水环境参数遥感监测进展 [J]. *遥感学报*, 2022, 26(1): 19 – 31.
Li Y M, Zhao H, Bi S, et al. Research progress of remote sensing monitoring of case II water environmental parameters based on water optical classification [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(1): 19 – 31.

Recent progress in chromaticity remote sensing of inland and nearshore water bodies

LI Kailin, LIAO Kuo, DANG Haofei

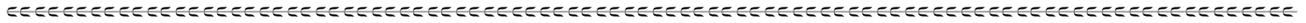
(Fujian Meteorological Institute, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Water color represents the most intuitive visible perception of the color of water bodies that is jointly affected by substances such as suspended particulate matter, chlorophyll, and soluble organic matter. Water color is a water environmental parameter with a long history and plays a critical role in research on the ecosystem of inland and nearshore water bodies. With the progress made in colorimetric research, as well as hyperspectral imaging and satellite remote sensing techniques, the colorimetric method of water color has developed. This study systematically reviewed the colorimetric research progress of inland and nearshore water bodies and elaborated on the theories and practical applications of the colorimetric method from the angles of apparent optical properties (AOP) and inherent optical properties (IOP). Moreover, it presented the colorimetric processing method of satellite remote sensing data. The colorimetric method is a technical method for the quantitative expression of water color. It is also an important branch of water color research and an extension and supplement to the study of water

color components, with a broad application prospect. To further improve the application of the colorimetric methods in inland and nearshore water bodies, it is necessary to enhance the construction of bio-optical datasets of water bodies in the future. Moreover, colorimetric studies should be conducted in two dimensions, namely AOP and IOP, and it is necessary to intensify research on domestic satellite-based colorimetric methods and increase the types of relevant water color products.

Keywords: chromaticity; FU; water color component; satellite remote sensing

(责任编辑: 陈 理)



下期要目

- 方 贺 浙江省植被生态质量时空变化及其对气候因子与人类活动的响应
- 滑永春 基于遥感内蒙古段黄河流域生态风险监测评价
- 蒋 毅 自然资源综合调查监测"一查多用"分类体系研究
- 李和谋 遥感估算河道流量研究进展
- 李 娜 基于高分五号高光谱数据的石漠化调查应用研究
- 梁茜亚 基于高分一号(GF-1)影像的蒙古高原干旱半干旱地区自然道路提取研究
- 伍炜超 面向多背景环境的 Sentinel-2 云检测
- 席 磊 基于 ICESat2 的西南山地森林 LAI 遥感估测模型优化研究
- 熊东阳 基于最大熵模型的遥感土地利用多分类研究
- 刁明光 基于 Mask R-CNN 的遥感影像疏林地智能识别方法