

doi:10.11988/ckyyb.20220515

2023,40(9):181-187,194

基于 Sentinel2-L1C 的江汉平原水产养殖区 水质参数反演

邹志科¹,余蕾¹,张煜¹,王文娟¹,赵永立²,孙建东³,程青雷³

(1.长江科学院 农业水利研究所,武汉 430010; 2.武汉珈和科技有限公司,武汉 430079;
3.中国水电基础局有限公司,天津 301700)

摘要:遥感技术已成为监测内陆水域水质的一种有效手段,为研究江汉平原水产养殖区域内水体总磷、总氮和化学需氧量浓度的变化规律,基于 Sentinel2-L1C 遥感数据建立水体透明度、悬浮物浓度、叶绿素 a 浓度 3 种光学活性物质浓度的反演模型,结合推算出的水体透明度、悬浮物浓度和叶绿素 a 浓度与拟合点水体实测总磷、总氮和化学需氧量浓度分别建立关联,构建江汉平原拟合点水体总磷、总氮和化学需氧量浓度 3 种非光学活性物质浓度的间接反演模型并进行模型的率定验证。结果表明:水体透明度与水体总磷浓度具有较好相关性,水体透明度越高,水质越好,水体总磷浓度越低;水体悬浮物浓度与水体总氮浓度具有较高相关性,水体悬浮物浓度越高,水质越差,对应水体总氮浓度越高;水体叶绿素 a 浓度越高,对应水体化学需氧量浓度越高。构建水体总磷浓度、总氮浓度和化学需氧量浓度的间接反演模型,确定性系数均>0.6,并对江汉平原监测点水体的总磷、总氮和化学需氧量浓度进行了模拟和分析,结论与水产养殖区内饲料投喂主要时期的影响规律基本保持一致。研究结果对于探测江汉平原水产养殖区大尺度范围水质参数的时空演变具有一定的实用价值。

关键词:水质参数;Sentinel2-L1C 影像;江汉平原;光学活性物质;反演模型

中图分类号:X87 文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2023)09-0181-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Inversion of Water Quality Parameters in Jiangnan Plain Based on Sentinel2-L1C Image

ZOU Zhi-ke¹, YU Lei¹, ZHANG Yu¹, WANG Wen-juan¹, ZHAO Yong-li², SUN Jian-dong³, CHENG Qing-lei³

(1.Agricultural Water Conservancy Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2.Wuhan Jiahe Technology Co., Ltd., Wuhan 430079, China; 3.Sinohydro Foundation Engineering Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

Abstract: Remote sensing technology has emerged as a powerful tool for monitoring inland water quality. To investigate changes in concentrations of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), and chemical oxygen demand (COD) in the aquaculture area of Jiangnan Plain, we developed inversion models utilizing Sentinel2-L1C remote sensing data. These models are based on three optical active substances: water transparency, suspended matter concentration, and Chl-a concentration. By correlating the calculated water transparency, suspended solids concentration, and Chl-a concentration with TP, TN, and COD concentrations at regional water fitting points, we established indirect inversion models to estimate the concentrations of these substances and validated the models using fitting points data. Our results demonstrate a strong correlation between water transparency and TP concentration. Higher water transparency indicates better water quality and lower TP concentration. The concentration of suspended matter in water is highly correlated with the TN concentration. Increased suspended matter concentration indicates inferior water quality and higher TN concentration. Additionally, higher water Chl-a concentration corresponds to higher

收稿日期:2022-05-13;修回日期:2022-07-25

基金项目:国家自然科学基金委员会-中华人民共和国水利部-中国长江三峡集团有限公司长江水科学研究联合基金项目(U2040213);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2021452/NY, CKSF2021299/NY, CKSF2019251/NY)

作者简介:邹志科(1990-),男,湖北汉川人,工程师,博士,研究方向为地下水流数值模拟。E-mail:971278375@qq.com

通信作者:张煜(1971-),男,湖北武汉人,正高级工程师,博士,研究方向为摄影测量与遥感。E-mail:zhangyu_1999@126.com

COD. The deterministic coefficients of the indirect fitting models for TP concentration, TN concentration, and COD were all greater than 0.6. Furthermore, the TP concentration, TN concentration, and COD concentration in water bodies of monitoring points in Jiangnan Plain were simulated. The results align with the expected patterns in feeding period and reflect the spatio-temporal evolution of water quality parameters in the aquaculture areas of Jiangnan Plain. This research contributes practical insights into understanding the dynamics of large-scale water quality parameters in aquaculture areas.

Key words: water quality parameters; Sentinel2-L1C image; Jiangnan Plain; optically active compounds; retrieval model

0 引言

内陆水域是重要的生态系统,为人类和其他陆生生物提供生境和各种生态服务功能,如供水、灌溉、渔业等^[1]。但在经济社会快速发展、水资源高强度开发利用、水生态环境保护未能协同跟进、气候变化影响凸显等多重胁迫下,内陆水域也可能成为流域内污染物的重要汇,导致这些生态功能受到富营养化、无机和有机污染物威胁日益突出,我国超过50%的内陆水域由于总氮(TN)、总磷(TP)浓度较高而具有富营养化特征^[2]。内陆水域的水环境治理和保护刻不容缓,实现内陆水域水质的整体、长期监测是开展内陆水域水污染防治的前提条件^[3]。

遥感技术由于具有快速、宏观、低成本和周期性的优点,广泛应用于水质时空变化的监测,现已成为局部到全球尺度上水质参数监测的重要手段^[4]。水质参数遥感反演机理是水体光学活性成分受其水质参数变化的影响,并间接改变了水的光谱反射率或出水亮度^[5]。水质遥感监测通过水质参数建立遥感反演算法,研究水体反射光谱特征与水质参数之间的关系,并利用遥感图像估算水质参数^[6]。当前,按照水质参数的光学特性,能够直接进行遥感反演的水质参数主要包括悬浮物(Total Suspended Solid, TSS)浓度、叶绿素 a (Chl-a) 浓度、可溶性有机物(Chromophoric Dissolved Organic Matter, CDOM)等水体中的光学活性物质浓度。水体中的非光学活性物质,例如 TN、TP、化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)等,没有直接的光学特性而无法直接进行遥感反演,往往需要利用水体中不同物质之间的关系进行间接的遥感分析^[7-8]。

水质参数反演方法主要包括经验法、半经验法、和分析法等3种方法^[9-10]。基于遥感数据与实测水质数据,利用统计回归、神经网络、粒子群算法等方法构建地表水体的水质参数反演模型,近年来得到

广泛使用^[11]。杨国范等^[12]建立了水库的 Chl-a 浓度与波段反射率比值的线性回归模型与最小二乘支持向量机2种反演模型,结果显示后者的精度优于前者。Cao等^[13]基于改进的二进制粒子群优化算法建立了自适应模型来反演微山湖多项水质指标,结果显示改进模型能很好地模拟水质的变化。陈军等^[14]研究结果显示,太湖 TN、TP 浓度与 Chl-a、TSS 和 CDOM 等光学活性物质浓度之间均存在较强的相关性,并且分别对这3种光学活性物质浓度建立了间接反演模型。况润元等^[15]利用多种常见的模型反演鄱阳湖悬浮泥沙的变化,发现单波段反演模型中,幂函数适用于鄱阳湖泥沙粒度遥感反演;波段比反演模型中,多项式模型适于鄱阳湖泥沙粒度遥感反演。肖潇等^[16]集成多种遥感反演模型优势,构建了河流水体浊度多光谱遥感联合反演模型并应用于汉江中下游典型河段,取得满意的效果。虽然已有越来越多关于非光学活性物质地表水质参数反演的研究,但由于水环境的复杂性、地域性等特点,水质参数反演方法一直难以克服其在普适性上的问题。

江汉平原是我国重要的淡水养殖业的基地,养殖产生的氮磷等物质排入湖体中,可能导致水体富营养化,但目前鲜有关于江汉平原水产养殖区水质参数反演的研究。因此,本文利用江汉平原水产养殖区典型水体的 Sentinel2-L1C 影像和实测水质数据,对水体 TP、TN 和 COD 进行反演研究,分析波段组合和水质参数的相关性,构建水体透明度(secchi depth, Z_{sd})、TSS、Chl-a 等光学活性物质与 TP、TN 和 COD 等非光学活性物质的间接反演模型,分析这3个水质参数在江汉平原水产养殖区的变化规律,可为系统监测内陆水域水质的时空演变提供参考。

1 研究区概况

江汉平原位于湖北省中南部,河流纵横交错,湖泊星罗棋布,水资源丰富,是长江中游平原的重要组

成部分,盛产水稻、油菜、棉花等农作物,流域面积为 4.6 万 km^2 (图 1)。江汉平原是全国最重要的淡水养殖基地之一,其中大小湖泊约 300 多个,重要的有洪湖、沔汉湖、长湖等,湖泊面积达 1 605.4 km^2 ,湖泊一般水浅、底平,淡水养殖相当发达^[17]。然而随着人口的增加和经济的发展,水质不断恶化,江汉平原水资源问题日益突出。水资源的优化配置,加强水资源的高效、可持续利用,才是江汉平原解决水资源可持续发展的关键^[18-19]。



图 1 江汉平原卫星影像

Fig.1 Satellite image of Jianghan Plain

2 数据来源及方法

2.1 数据来源与处理

根据江汉平原水质监测实际需求,此次水质监测采集的样本主要针对重点的养殖排放水体,覆盖了江汉平原的大部分区域,部分采样点位于农田排放渠道中,涉及水域面积不大。因此,水质参数遥感反演工作选择具有较高空间和时间分辨率的 Sentinel2-L1C(哨兵 2 号)影像作为数据源^[20-22]。哨兵 2 号是一颗多光谱高分辨率成像卫星,携带一枚用于陆地监测的多光谱成像仪,轨道高 786 km,覆盖 13 个光谱带,辐宽 290 km。地面分辨率分别为 10、20、60 m,1 颗卫星的重访周期为 10 d,2 颗卫星相辅相成,重访周期为 5 d。通过地表样本点的分析建模,可提供有关陆地植被生长、土壤覆盖、河流的信息,并在监测大型内陆水体的水质方面具有应用潜力^[23-24]。对 2019 年 6 月—2020 年 12 月 9 个监测点的水质参数进行遥感反演(其中 2020 年 7 月数据缺失)。

取样拟合点与监测点分布如图 2 所示。由图 2 可知实地监测点与实地拟合点均匀分布于江汉平原水系湖泊周围,5 个拟合点包括四湖总干渠(运粮湖同心队断面)、东荆河(新刘家台断面)、斧头湖咸宁水域(湖泊)、洪湖(湖泊)和通顺河(港洲村),9 个监

测点包括大沙湖 8、东荆河 4、斧头湖 1、陆水 2、排湖 5、田关湖 6、洪湖南 7、洪湖北 8 和四湖总干渠 9。基于江汉平原 Sentinel2-L1C 遥感影像建立光学活性物质(Chl-a、TSS 和 Z_{sd})参数反演模型,反演 5 个拟合点和 9 个监测点水体中光学活性物质的浓度。然后结合区域水体中 5 个拟合点 2019 年 1—12 月份的水体水质实测 COD、TP、TN 浓度,与遥感反演获得的水体 Chl-a 浓度、TSS 浓度和透明度 Z_{sd} 分别构建非光学活性物质的间接反演模型并进行模型的率定验证,通过间接反演模型模拟 9 个监测点 2019 年 6 月—2020 年 12 月的水体 TP、TN 和 COD 浓度的变化。

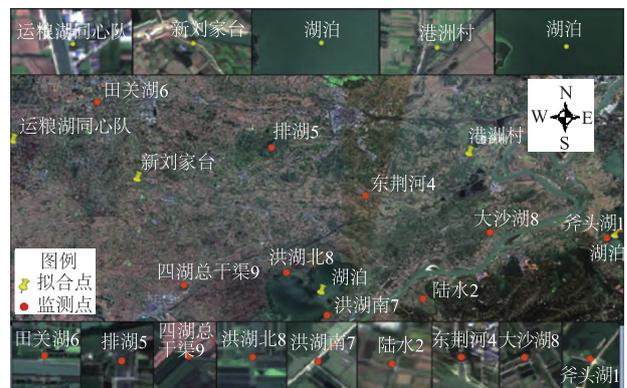


图 2 江汉平原水质参数反演实地点分布

Fig.2 Field points distribution in Jianghan Plain for water quality parameter inversion

2.2 拟合点光学活性物质浓度反演

在遥感光学图像中,不同地物的光谱特征也会有所不同,因此可以充分利用遥感数据对目标的特征光谱进行检索和分析,从而达到识别目标类型的目的。水体的光谱特征主要受水体参数和水体状态的影响。同时,它们也会在外在因素的作用下发生变化。因此水质遥感监测的基本原理是在尽可能减少外界干扰的前提下,利用影像中光谱信息之间的差异来反演水体中各种物质的浓度。

由图 3 可知,该监测点附近的 Chl-a 浓度在 6 月份和 9 月份相对较高,且 Chl-a 浓度较高区域的面积较大,4 月份和 11 月份 Chl-a 浓度相对较低,且高浓度区域分布面积有所减小。

2.2.1 Chl-a 浓度

Chl-a 是一种重要的浮游植物色素,与水生态系统的初级生产力有关,Chl-a 浓度是反映水环境质量、评价水体富营养化程度的一项重要指标^[25]。在卫星图像上,纯净水体的光谱反射以蓝光和绿光波段为主,对其他波长的光有一定的吸收率,而对近红外波段的吸收率最高。因此,当水体存在大量的浮游和藻类植物时,Chl-a 浓度增加,此时,近红外波段的吸收性能下降,产生了一个反射尖顶。结合 Chl-a

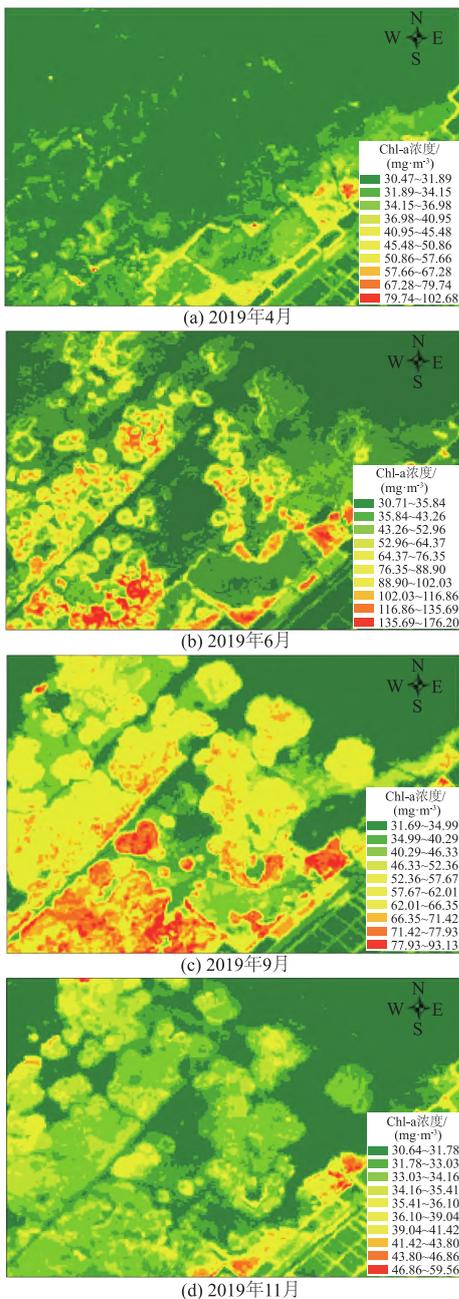


图3 监测点(洪湖南7)Chl-a反演浓度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of Chl-a inversion concentration at monitoring site (Honghu South 7)

光谱特征,在不同波段组合中选择反演性能最好的波段组合进行统计回归,多选用近红外波段与红外波段的比值,用二次多项式进行 Chl-a 浓度的反演^[26],即

$$C_{\text{Chl-a}} = 4.089(b_8/b_4)^2 - 0.746(b_8/b_4) + 29.733 \quad (1)$$

式中: $C_{\text{Chl-a}}$ 为 Chl-a 浓度(mg/m^3); b_8 为 Sentinel2-L1C 影像的近红外光谱,在这一波段中,植被具有较高的尖峰特性,水体则具有很高的吸收率,利用近红外线可以获得更多的 Chl-a 信息; b_4 为 Sentinel2-L1C 影像的红外光谱,在这一波长范围内,水体及植物都表现出了很好的吸收率。

2.2.2 水体 TSS 浓度

TSS 不仅是水体中具有光学活性的重要物质,亦是水体的重要水质参数。TSS 作为 TN、TP、金属和有机化合物的载体,包括有机 TSS 和无机 TSS,也会影响水生生态系统的光衰减和垂直分布以及初级生产力。TSS 浓度与水体中泥沙输移相关,并表现出显著的时空变异性。本文应用红外波段与绿色波段的比值,构建指数模型用于江汉平原地区的 TSS 浓度的反演^[27],即

$$C_{\text{TSS}} = 119.62(b_4/b_3)^{6.082^3} \quad (2)$$

式中: C_{TSS} 为 TSS 浓度(mg/L); b_4 为对 TSS 反应灵敏的波段,可用于提取卫星影像中的 TSS 信息; b_3 为 Sentinel2-L1C 的绿色光谱,在这一波长范围内,TSS 的反射性相对弱。

2.2.3 水体透明度

透明度是衡量水体质量的一个主要因素。透明度与水中的成分及含量有很大关系;水体中 TSS 及其它污染物浓度对水体透明度有重要的作用,通常构建 TSS 浓度和透明度的线性回归模型间接反演水产养殖区水体透明度^[28],即

$$Z_{\text{sd}} = 284.15C_{\text{TSS}} - 0.67 \quad (3)$$

式中: C_{TSS} 为参数反演获取的 TSS 浓度(mg/L); Z_{sd} 为水体透明度(cm)。

3 水质参数间接反演模型构建

3.1 参数拟合

水质参数反演研究主要集中于 TSS、黄色物质、Chl-a 等水色水质参数的反演,TP、TN、COD 等非水色水质参数同样是衡量水质的重要指标。结合提供的运粮湖同心队、新刘家台、湖泊、港洲村和湖泊 5 个拟合点的 COD、TN 和 TP 浓度与遥感反演获得的 $C_{\text{Chl-a}}$ 、 C_{TSS} 和 Z_{sd} ,分析参数间的相关性,构建间接反演模型。

水体中的污染成分、浓度等因素的差异,会造成水体对不同波长的光的吸收与散射,从而造成水体颜色、密度、透明度等方面的差异。TP 是通过溶解水中的不同形式的磷转化为磷酸盐而得到的;TN 是水中各种形态无机和有机氮的总量,包括 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 等无机氮和蛋白质、氨基酸、有机胺等有机氮;用化学方法测定水中要被氧化的还原性物质即为水体 COD,利用遥感技术对水体吸收和散射的太阳辐射进行测量和分析,从而获取水的光谱特性。

江汉平原水产养殖区典型水体的 TN、TP 和 COD 浓度与 Chl-a 浓度、 Z_{sd} 和 TSS 浓度等之间均存在较强

的相关性(表 1)。水体水色水质参数与非水色水质参数间具有一定的相关性,其中透明度 Z_{sd} 与 TN 浓度、TP 浓度具有较好的相关性,皮尔逊相关系数分别为-0.414和-0.723($p=0.01$),透明度 Z_{sd} 与 TP 浓度具有最强相关性;TSS 浓度与 TN 浓度的相关系数为 0.464($p=0.01$),TSS 浓度越高,水质越差,对应 TN 浓度越高;Chl-a 浓度与 COD 浓度的相关系数为 0.483 ($p=0.05$),Chl-a 浓度越高,对应 COD 浓度越高。水体水色水质参数与非水色水质参数内部也具有一定的相关性,透明度 Z_{sd} 与 TSS 浓度具有很强的负相关关系,相关系数为-0.842($p=0.01$);TP 浓度和 TN 浓度具有很强的正相关关系,相关系数为 0.630 ($p=0.01$)。根据水质参数之间的相关性分析,按照 TP 浓度和透明度一组、TN 浓度与 TSS 浓度一组、COD 浓度和 Chl-a 浓度一组构建水体 TP 浓度、TN 浓度和 COD 浓度的间接反演模型,如图 4 所示,拟合模型确定性系数均>0.6。

比较间接反演模型的结果和 5 个拟合点的实测数据,如图 5,反演模型的模拟效果较好,可以用于江汉平原水产养殖区典型水体水质参数的模拟。

3.2 结果与讨论

结合间接反演模型与遥感监测出的 2019 年 6 月—2020 年 12 月 9 个监测点(江汉平原大沙湖 3、东荆河 4、斧头湖 1、陆水 2、排湖 5、田关湖 6、洪湖南 7、洪湖北 8 和四湖总干渠 9)的透明度、TSS 浓度和 Chl-a 浓度,最终反演得到 9 个监测点在 2019 年 6 月—2020 年 12 月的 COD、TN、TP 浓度,如图 6 所示。

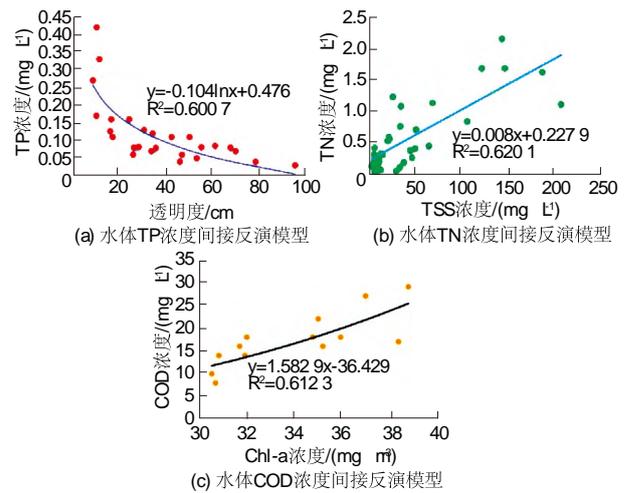


图 4 水体 TP 浓度、TN 浓度、COD 浓度间接反演模型

Fig.4 Indirect fitting models for TP, TN, and COD concentrations

由图 6 可以看出,江汉平原水产养殖区域内 COD 浓度、TN 浓度、TP 浓度年内变化较大,动态变化过程明显。

图 6 (a) 表明, COD 浓度范围为 13.32 ~ 73.71 mg/L;8 月份江汉平原水体 COD 浓度最高,其中洪湖北 8 水体 COD 浓度最高达到 73.71 mg/L,其次为田关湖 6,COD 浓度最高达到 68.47 mg/L;东荆河 4、排湖 5、四湖总干渠 9 水体 COD 浓度变化不大,最高分别为 24.9、21.3、24.0 mg/L;11 月份一次年 3 月份江汉平原水体 COD 浓度较低;同时,江汉平原水产养殖区整体上 4—10 月份水体 COD 浓度高,而 4—10 月份也是当地水产养殖业饲料投喂的

表 1 水质参数之间的自相关分析

Table 1 Autocorrelation analysis of water quality parameters

水质参数	指标	Chl-a 浓度	Z_{sd}	TSS 浓度	COD 浓度	TN 浓度	TP 浓度
Chl-a 浓度	皮尔逊相关系数	1	-0.277	0.096	0.483 *	0.05	0.021
	显著性(双尾)		0.084	0.554	0.015	0.76	0.897
	个案数	40	40	40	40	40	40
Z_{sd}	皮尔逊相关系数	-0.277	1	-0.842 **	0.164	-0.414 **	-0.723 **
	显著性(双尾)	0.084		0	0.313	0.008	0.023
	个案数	40	40	40	40	40	40
TSS 浓度	皮尔逊相关系数	0.096	-0.842 **	1	-0.12	0.464 **	0.360 *
	显著性(双尾)	0.554	0		0.462	0.003	0.006
	个案数	40	40	40	40	40	40
COD 浓度	皮尔逊相关系数	0.483 *	0.164	-0.12	1	-0.015	0.307
	显著性(双尾)	0.015	0.313	0.462		0.926	0.054
	个案数	40	40	40	40	40	40
TN 浓度	皮尔逊相关系数	0.05	-0.414 **	0.464 **	-0.015	1	0.630 **
	显著性(双尾)	0.76	0.008	0.003	0.926		0
	个案数	40	40	40	40	40	40
TP 浓度	皮尔逊相关系数	0.021	-0.723 **	0.360 *	0.307	0.630 **	1
	显著性(双尾)	0.897	0.023	0.006	0.054	0	
	个案数	40	40	40	40	40	40

注: * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著; ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

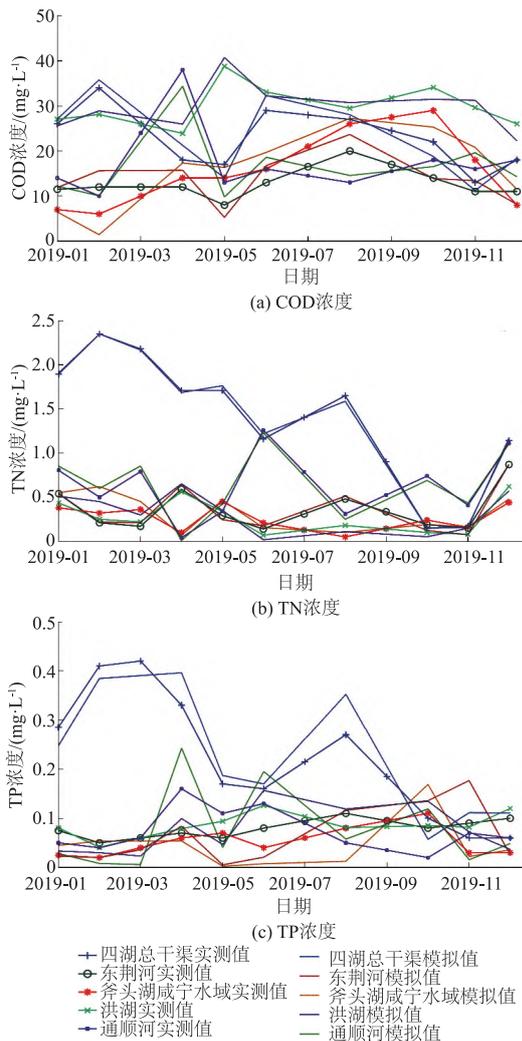


图5 拟合点水体 COD、TN、TP 浓度实测值与模拟值比较
Fig.5 Comparison of TP, TN, and COD concentrations at fitting sites between simulated and observed values

主要时期,加上流域周边畜禽养殖粪尿排泄大多没有经过处理就排入周边沟渠、河流、塘堰,导致水体的有机物质含量高。

图 6(b) 表明,不同月份江汉平原水体 TN 浓度不同,水体 TN 浓度范围为 0.31 ~ 1.66 mg/L。江汉平原水体 TN 浓度在 3、6、9 月份局部拟合点出现峰值,其中东荆河 4 水体 TN 浓度最高达到 1.66 mg/L,其次为洪湖南 7, TN 浓度最高达到 1.6 mg/L;排湖 5、田关湖 6、洪湖北 8 水体 TN 浓度变化不大,最高分别为 0.70、0.86、0.61 mg/L。从水体 TN 浓度的这一变化进行分析,水产养殖区域内 TN 浓度偏高,与水产品养殖有关,其中鱼、虾、蟹等排泄物、残留诱饵、浮游生物碎屑等,大多以氨的形态出现,此外,在虾的物质代谢过程中,其吸收的氮以氨的方式进入水体,导致了水体中的 TN 浓度较高。

图 6(c) 表明,不同月份江汉平原水体 TP 浓度不同,水体 TP 浓度范围在 0.05 ~ 0.25 mg/L 之间变化。

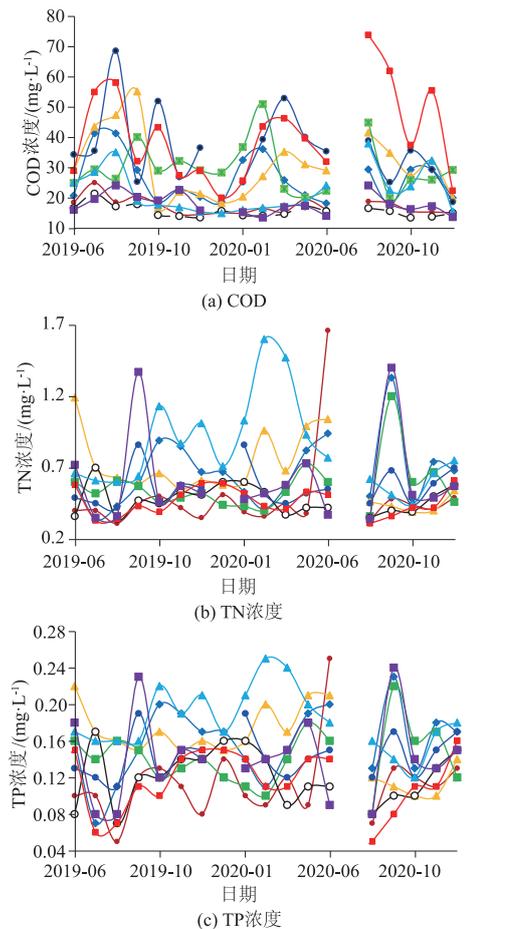


图6 2019年6月—2020年12月监测点水体反演 COD、TN、TP 浓度的变化

Fig.6 Trends of TP, TN, and COD concentrations at monitoring sites from June 2019 to December 2020

江汉平原水体 TP 浓度在 3、6、9 月份局部拟合点出现峰值,其中东荆河 4、洪湖南 7 水体 TP 浓度浓度最高达到 0.25 mg/L,其次为四湖总干渠 9, COD 浓度最高达到 0.24 mg/L;排湖 5、田关湖 6、洪湖北 8 水体 TP 浓度变化不大,最高分别为 0.17、0.19、0.16 mg/L。江汉平原水体水产养殖区域内拟合点 TN 浓度、TP 浓度变化过程相似,与水体中鱼类的饵料投入成分有关,用磷肥(主要是过磷酸钙)来补充水体的磷含量。

虽然本文构建的间接反演模型的精度达到了 0.6,精度提高仍然存在一定的空间。首先,卫星遥感数据捕获与野外的数据采集工作应同步进行,特别是对于水产养殖区域来讲,饲料投放、农业面源污染都对水质参数有重要影响;其次,本研究仅仅采用 5 个拟合点的水质监测数据与遥感监测数据建立模型,尽管这些点覆盖了江汉平原的大部分区域,但在一定程度上影响了间接反演模型的模拟效果和稳定性。增加样本数量及水质监测数据,能够提高模型模拟的精度和效果。水体中的非光学活性物质没有

直接的光学特性,例如 TN、TP、DO、COD、BOD 等,无法直接进行遥感反演,往往需要利用水体中不同物质之间的关系进行间接的遥感分析,可能造成间接反演模型的精度存在波动。本文采用的反演模型相对简单,后期研究可以考虑其他模型^[29-30],如人工神经网络、统计相关模型,有可能改善模型的精度。

4 结 论

本研究以江汉平原水产养殖区典型水体为例,基于遥感技术及现有的遥感参数,分析波段组合和光学活性物质的相关性,构建 Z_{sd} 、TSS 浓度、Chl-a 浓度与 TP 浓度、TN 浓度和 COD 浓度之间的反演模型,结合间接反演模型和遥感影像反演监测点非光学活性物质参数(COD、TP、TN)的变化规律,得出如下结论:

(1)江汉平原水产养殖区典型水体的影像波段和水体的光学活性物质(Chl-a、TSS 和 Z_{sd})存在良好的相关关系,其中,Chl-a 浓度 C_{Chl-a} 与红外波段与红外波段比值是二次多项式关系;水体 TSS 浓度 C_{TSS} 与红外波段与绿色波段比值是指数关系;水体透明度 Z_{sd} 与水体 TSS 浓度 C_{TSS} 是线性关系。

(2)江汉平原水产养殖区典型水体的光学活性物质与非光学活性物质(TP、TN 和 COD)存在相关关系,通过相关分析,TP 浓度和 Z_{sd} 、TN 浓度与 TSS 浓度、COD 浓度和 Chl-a 浓度的相关性最强,分别构建间接反演模型,模型的确定性系数达到了0.6以上。

(3)构建的反演模型模拟江汉平原水产养殖区典型水体 TP 浓度、TN 浓度和 COD 浓度的变化规律,基本反映了当地畜禽养殖排放、鱼类的饵料投入等引起水质参数的变化趋势。

参考文献:

- [1] CARVALHO L, MCDONALD C, DE HOYOS C, *et al.* Sustaining Recreational Quality of European Lakes: Minimizing the Health Risks from Algal Blooms through Phosphorus Control[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 50(2): 315-323.
- [2] 陈小锋. 我国湖泊富营养化区域差异性调查及氮素循环研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [3] HESTIR E L, BRANDO V E, BRESCIANI M, *et al.* Measuring Freshwater Aquatic Ecosystems: The Need for a Hyperspectral Global Mapping Satellite Mission[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 167: 181-195.
- [4] BUKATA R P. Retrospection and Introspection on Remote Sensing of Inland Water Quality: "Like DÉJÀ Vu all over again"[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, 39: 2-5.
- [5] 杨 振, 卢小平, 武永斌, 等. 无人机高光谱遥感的水质参数反演与模型构建[J]. *测绘科学*, 2020, 45(9): 60-64, 95.
- [6] 王歆晖, 巩彩兰, 胡 勇, 等. 水质参数遥感反演光谱特征构建与敏感性分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(6): 1880-1885.
- [7] GILERSON A A, GITELSON A A, ZHOU J, *et al.* Algorithms for Remote Estimation of Chlorophyll-a in Coastal and Inland Waters Using Red and near Infrared Bands[J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 24109-24125.
- [8] MOORE T S, DOWELL M D, BRADT S, *et al.* An Optical Water Type Framework for Selecting and Blending Retrievals from Bio-Optical Algorithms in Lakes and Coastal Waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 143: 97-111.
- [9] SILIÓ-CALZADA A, BRICAUD A, UITZ J, *et al.* Estimation of New Primary Production in the Benguela Upwelling Area, Using ENVISAT Satellite Data and a Model Dependent on the Phytoplankton Community Size Structure [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C11): C11023.
- [10] PANIGRAHI S, WIKNER J, PANIGRAHY R C, *et al.* Variability of Nutrients and Phytoplankton Biomass in a Shallow Brackish Water Ecosystem (Chilika Lagoon, India)[J]. *Limnology*, 2009, 10(2): 73-85.
- [11] XIONG Y, RAN Y, ZHAO S, *et al.* Remotely Assessing and Monitoring Coastal and Inland Water Quality in China: Progress, Challenges and Outlook[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2020, 50(12): 1266-1302.
- [12] 杨国范, 阎孟冬, 殷 飞. 清河水库叶绿素 a 浓度反演模型研究[J]. *遥感信息*, 2016, 31(5): 74-78.
- [13] CAO Y, YE Y, ZHAO H, *et al.* Remote Sensing of Water Quality Based on HJ-1A HSI Imagery with Modified Discrete Binary Particle Swarm Optimization-Partial Least Squares (MDBPSO-PLS) in Inland Waters: A Case in Weishan Lake[J]. *Ecological Informatics*, 2018, 44: 21-32.
- [14] 陈 军, 权文婷, 孙记红. 太湖氮磷浓度与水质因子的关系[J]. *中国环境监测*, 2011, 27(3): 79-83.
- [15] 况润元, 谢 佳, 张 萌, 等. 基于实测数据的鄱阳湖悬浮泥沙粒度遥感反演模式分析[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(11): 132-137, 147.
- [16] 肖 潇, 徐 坚, 赵登忠, 等. 基于国产卫星多光谱影像的河流水体浊度遥感联合反演研究[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(6): 128-136.
- [17] 崔祎满. 江汉平原水资源保护及战略对策研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.

(下转第 194 页)

结合野外复核调查结果,共确定危岩体 172 处(包括危石及孤石 132 处、危石群及孤石群 40 处)、崩塌 11 处以及滑坡 3 处。

(3)通过对危岩体发育与地形地貌、河流水系发育、气候植被以及人类工程活动之间关系的研究,统计发现研究区内危岩体发育是多因素耦合的结果,区内危岩体主要发育在 1 609~1 963 m 高程,其数量占危岩体总数的91.28%;坡度为 40°~70°的危岩体占危岩体总数的76.74%;危岩体以正南向最为发育,占总数的25.00%。

参考文献:

- [1] 陈洪凯,唐红梅,王 蓉. 三峡库区危岩稳定性计算方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 614-619.
- [2] 谢 金,杨根兰,覃乙根,等.基于无人机与 Rockfall 的危岩体结构特征识别与运动规律模拟[J].河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(1):55-64.
- [3] 周成凯,李远耀,王宁涛,等.基于小型无人机的高位危岩快速调查与稳定性评价[J].科学技术与工程, 2021, 21(10): 3920-3928.
- [4] 黄海宁,黄 健,周春宏,等.无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用[J].水文地质工程地质, 2019, 46(6): 149-155.
- [5] 陈爱云,曾唯恐,王 哲,等.基于三维激光扫描技术的危岩体特征快速识别方法及稳定性评价[J].水利与建筑工程学报, 2019, 17(6): 60-64, 176.
- [6] 崔 激,谢恩发,张贵科,等.利用无人机技术的高陡边坡孤立危岩体识别[J].武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(6): 836-843.
- [7] 徐 岗,裴向军,袁进科,等.基于无人机摄影技术的高陡危岩体调查分析[J].公路,2019,64(5):175-180.
- [8] 褚宏亮,殷跃平,曹 峰,等.大型崩滑灾害变形三维激光扫描监测技术研究[J].水文地质工程地质, 2015, 42(3): 128-134.
- [9] 陈绪钰,倪化勇,郭少文,等.四川雅江县城北危岩体变形特征与形成机理探讨[J].人民长江, 2014, 45(增刊2): 112-115.
- [10] 乐琪浪,王洪德,高幼龙,等.三峡库区望霞危岩体孕灾地质环境条件分析[J].地球学报,2015,36(2):204-212.
- [11] 刘昌军,张顺福,丁留谦,等.基于激光扫描的高边坡危岩体识别及锚固方法研究[J].岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2139-2146.
- [12] 黄 江,石豫川,吉 锋,等.三维激光扫描技术在高边坡危岩体调查中的应用与讨论[J].长江科学院院报, 2013, 30(11): 45-49.
- [18] 刘静静.江汉平原湖泊面源污染效应及调控机制研究[D].荆州:长江大学, 2012.
- [19] 胡久生,邢晓燕,康 群,等.江汉平原农村环境污染现状及对策[J].现代农业科技, 2013(9): 235-239, 241.
- [20] FAN D X, HUANG Y L, SONG L X, *et al.* Prediction of Chlorophyll *a* Concentration Using HJ-1 Satellite Imagery for Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir[J]. Water Science and Engineering, 2014, 7(1): 70-80.
- [21] 刘延龙,张保华,姚 昕,等.东平湖水体透明度的遥感反演研究[J].测绘科学, 2018,43(7):72-78.
- [22] 烟贯发,杜百利,张冬有,等.松花江哈尔滨段悬浮物含量遥感反演与克里格插值预测精度对比[J].湿地科学, 2015,13(2):184-189.
- [23] HOU X, FENG L, DUAN H, *et al.* Fifteen-Year Monitoring of the Turbidity Dynamics in Large Lakes and Reservoirs in the Middle and Lower Basin of the Yangtze River, China[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 107-121.
- [24] 孙青玲,黑永雪,郭 磊.地表水水质常规监测问题分析[J].资源节约与环保, 2013(8): 140.
- [25] REYJOL Y, ARGILLIER C, BONNE W, *et al.* Assessing the Ecological Status in the Context of the European Water Framework Directive: Where do we Go Now? [J]. Science of the Total Environment, 2014, 497/498: 332-344.
- [26] 李 渊.基于数据同化的太湖叶绿素浓度遥感估算[D].南京:南京师范大学, 2014.
- [27] 刘 静,况润元,李建新,等.基于实测数据的鄱阳湖总氮、总磷遥感反演模型研究[J].西南农业学报, 2020, 33(9): 2088-2094.
- [28] 郭云开,许 敏,张晓炯,等.结合 PRO-4SAIL 和 BP 神经网络的叶绿素含量高光谱反演[J].测绘通报, 2020(3): 21-24.
- [29] 邵琥翔,丁 凤,杨 健,等.基于深度学习的黑臭水体遥感信息提取模型[J].长江科学院院报, 2022, 39(4): 156-162.
- [30] 刘俊威,吕惠进.神经网络在水质预测中的应用研究[J].长江科学院院报, 2012, 29(9): 95-97.

(编辑:罗 娟)

(编辑:罗 娟)