

基于高光谱分析的 长荡湖水质监测技术研究

蒋志昊¹, 梁文广¹, 石一凡¹, 王冬梅¹, 唐大伟², 宋亚君¹

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210000; 2. 江苏省水文水资源勘测局常州分局, 江苏 常州 213300)

摘要:以江苏省长荡湖为例,对15项常规水质参数进行实地采样试验,并同步测定采样点的水体高光谱信息。为研究高光谱信息在该湖泊水质反演中的适用性,对水质参数和对应光谱特征进行定量分析,筛选高光谱对水质指标的敏感波段。分别选用波段差值、波段比值和单波段建立半经验数学模型,并根据实测值验证各模型反演精度。结果表明,利用波段组合反射率建立的模型对TP、浊度、悬浮物SS、水温和透明度具有较好的拟合效果。

关键词:高光谱; 水生态; 反演模型; 水质参数; 长荡湖

中图分类号:X832 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2021)08-0026-0009

Research on water quality monitoring technology of Changdang Lake based on hyperspectral analysis

JIANG Zhihao¹, LIANG Wenguang¹, SHI Yifan¹, WANG Dongmei¹,
TANG Dawei², SONG Yajun¹

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210000, China; 2. Changzhou Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Changzhou 213300, China)

Abstract: Taking Changdang Lake as an example, field sampling experiments were conducted on 15 sets of normal water quality parameters and the hyperspectral information of the water body at the sampling points was simultaneously measured. In order to study the applicability of hyperspectral information in water quality inversion in the lake, the water quality parameters and corresponding spectral characteristics were quantitatively analyzed, and the sensitive bands of hyperspectral to water quality indicators were selected. The semi-empirical mathematical models were established with difference of band reflectance, ratio of band reflectance and single band reflectance respectively, and the accuracy of inversion models were evaluated by the verification group. The results show that the model established by the reflectance of band mixed has a good fitting effect on total phosphorus, turbidity, suspended matter concentration, water temperature and transparency satisfactorily.

Key words: hyperspectral; water ecology; inversion model; water quality parameter; Changdang Lake

收稿日期:2022-02-07

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020061); 自主科研项目(20222026)

作者简介: 蒋志昊(1990—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事定量遥感与水利规划工作。邮箱: 18761609674@163.com

1 研究背景

目前,利用卫星遥感反演水质参数和人工实测这2种常规监测方法为主要的湖泊水质监测手段。常规的水质监测技术耗时耗力,投入产出比低,难以覆盖区域范围内所有地点水质数据,不能满足多样化的监测需求。当前,多光谱遥感技术具有时态多、范围广的动态监测优势,广泛应用于水体参数的反演研究中,但光谱波段少、光谱分辨率较低^[1],影响水质参数反演精度。高光谱技术具有光谱波段多和连续等优势,海量的光谱信息可反映真实水表光谱信息,是常规水质监测和遥感水质监测的重要补充,为区域性水环境监测提供新的技术手段。曹引等^[2]基于南四湖实测的高光谱数据和同步水质采样分析数据构建了反演南四湖水体叶绿素a浓度的多种数学模型;巩彩兰等^[3]利用地物光谱测量及同步配套水质采样分析实验,对黄浦江全河段水体进行调查研究,并以TN和悬浮物为例得出最佳反射率反演组合;包起帆等^[4]利用星地同步监测实验,建立长江口含沙量浓度高光谱反演模型;吴廷宽等^[5]以贵阳市百花湖为例,对水体进行光谱实测,探讨湖泊水质高光谱反射率与水质参数浓度之间的定量关系,对湖泊富营养化进行监测评价。由上述研究成果可知,不同湖泊之间的下垫面条件有所差别,反演模型普适性较差,对典型湖泊光谱特性和水质参数之间定量关系需单独分析。

根据常州水环境监测中心2008—2018年水质监测成果,长荡湖整体水质基本处于劣V类。考虑到长荡湖在西太湖流域中的重要过水作用和对周边水系的影响,提高长荡湖水质监测精度水平,实现全湖泊、多时段常态化管理,对改善水环境、实行长效化管理意义重大。因此,本研究以常州市长荡湖为研究对象,依照《地表水和污水监测技术规范》进行水质采样,获取采样点的水质参数,利用高光谱扫描仪提取对应点位水表光谱信息。通过水质参数与高光谱的相关性分析,分析比较不同水质指标的光谱,筛选出对光谱反射率敏感的水质参数,建立可见光至近红外波长范围内多种水质参数-高光谱反演模型,并验证分析模型精度和适用性,确定适用于长荡湖的水质高光谱监测模型。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

长荡湖(31°33′~31°40′N, 119°30′~119°37′E)位

于江苏省常州市境内,地处亚热带季风气候带,湖泊南北长13.6 km,东西宽9.3 km,现有水域面积约84 km²,平均水深1.1~1.2 m。现状湖盆地形平坦,无显著起伏,北半部湖盆水稍深,南半部水浅,多沼泽性芦苇浅滩,淤积严重。

2.2 水质采样及处理

为保证实验效果,要求采样当日天气晴朗,湖泊水体流速不宜过高,以提供较为稳定的实验环境。研究区域选定后,在湖泊的进出水区、中心敞水区、滨岸带等各类型典型区域设置一定数量的采样点,于2020年5月4日利用YSI公司水质多参数分析仪和实验室水质采样化验分析的方式,获取水温、DO、ORP、电导率、透明度、NH₃-N、NO₃-N、TP、TN、COD_{cr}、COD_{Mn}、悬浮物SS、浊度、Chl-a和pH等15项水质参数。本次采样共设20个点位,取水表0.5 m表层水,点位具体分布情况见表1。

表1 长荡湖布设点分布

位置	点号	数量/个
进、出水区	9、13、16、17	4
中心敞水区	2、4、7~12、13~15	10
滨岸带	1、5、6、18、19、20	6

通过传感器现场测量以及实验室内水样测定,长荡湖5月水质统计结果如表2所示。结果显示调研区域内各水质参数具有显著空间差异。根据国家《地表水环境质量标准》(GB3838—2001)和现场采样实验室分析结果,当日长荡湖COD_{Mn}、COD全湖平均达到Ⅱ类水体水质标准,南部水质劣于北部,大部分达到Ⅲ类标准。TP、TN质量浓度均低于V类地表水标准,湖泊水质为劣V类,溧阳市域内围网养殖严重,湖泊富营养化程度严重。

2.3 现场水体高光谱数据

高光谱采集与水质参数测量同步进行,根据布设点位的序号对各点依次进行测量。本次实验使用的是美国ASD公司生产的FieldSpec® 4 Std-Res野外便携式高光谱仪,波长范围350~2 500 nm,能够捕获可见和近红外光谱。在350~1 000 nm范围内,光谱采样间隔为1.4 nm,光谱分辨率为3 nm,而在1 000~2 500 nm范围内,光谱采样间隔为2 nm,光谱分辨率为10 nm。获取的原始数据经过数据筛选,反射率计算和异常值剔除处理后,与水质参数进行拟合分析。

表2 长荡湖水质参数统计结果						
指标	计数	平均值	最大值	最小值	标准偏差	方差
$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	20	0.665	0.867	0.545	0.103	0.011
$\rho(\text{NO}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	20	0.035	0.052	0.020	0.011	0.0001
$\rho(\text{TN})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	20	1.274	1.580	1.025	0.176	0.031
$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	20	0.247	0.400	0.180	0.052	0.003
$\rho(\text{COD}_{\text{cr}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	20	23.333	29.000	17.000	3.352	11.238
$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	20	5.524	6.623	5.033	0.485	0.235
$\rho(\text{SS})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	20	64.150	121.000	38.000	21.286	453.082
浊度/NTU	20	47.170	95.400	28.200	15.194	230.864
$\rho(\text{Chl-a})/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	20	15.845	25.668	11.116	3.984	15.869
pH	20	8.643	9.090	8.410	0.165	0.027
水温/℃	20	26.390	28.500	24.700	1.026	1.053
$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	20	7.705	9.450	6.680	0.685	0.470
ORP/mV	20	-118.305	-102.500	-148.400	12.752	162.616
电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	20	435.150	479.000	386.000	30.116	906.976
透明度/cm	20	22.230	31.000	9.700	4.855	23.567

2.4 光谱参数及相关性分析

将经实验室检测 15 种水质参数和经预处理的光谱反射率进行相关性分析。分别采样单波段^[6-7](Single Band, SB)、波段差值^[8](Difference of Band, DB)和波段比值(Ratio of Band, RB)^[9-11](式 1~2), 比较 350~1 000 nm 波长范围内光谱反射率和各参数间的相关关系, 筛选出对光谱敏感的水质参数。

$$B_D = R_i - R_j \tag{1}$$

$$B_R = \frac{R_i}{R_j} \tag{2}$$

式中: B_D 和 B_R 分别为波段差值和波段比值; R_i 和 R_j 为对应*i*和*j*波段的光谱反射率。

2.5 模型构建

利用检测到的建模样本,使用各种算法建立光谱数据与通过传统方法检测的属性值之间的线性或非线性回归模型。本次研究根据光谱相关性分析结果,参照水质参数与光谱反射率之间关系所得规律选择最优波段组合,分别建立指数、线性、多项式、幂函数和对数模型。

2.6 模型验证

从所有采样样本中随机选取 2/3 的样本用于构建数学模型,其他 1/3 的样本用来检验模型拟合精度。选择相关性最高的数学模型进行水质反演,并

采用 *F* 检验法对模型显著性进行验证,模型的精度评价指标为绝对误差(Absolute Error, AE)、均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)、相对误差(Relative Error, RE)和平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)来表示进行评价。通过 *R*²、RSE、Std.Res(残差标准差)将验证组样本真实值与模型模拟值进行对比,模型的评价标准为 *R*² 越高,且 RMSE、RE 以及 MRE 越低,则表示模型的拟合效果越好。实测值与模拟值散点越接近 1:1 线,代表反演的精度越高,最终确定反演效果最佳的模型。

3 结果与分析

3.1 水体光谱特征

本次实测光谱曲线在 810nm 开始下降,而由于水分子在近红外波段对光有强吸收作用,波长大于 1 000 nm 以后反射率迅速下降并接近于 0,所以选择 350~1 000 nm 波长范围进行样本分析。本次实验最终选取的 20 个采样点光谱处理结果如图 1 所示。根据光谱实测结果,长荡湖水体在可见光范围内共有 3 个反射峰值区,分别集中于 550 nm、700 nm 和 800 nm 波长附近,分别对应可见光绿光、红光波长。其中,在 550 nm 处的反射率对应最高峰值,在 700 nm 附近出现 2 个强吸收带,反射率陡降,800 nm 波长以外的反射率逐渐下降。

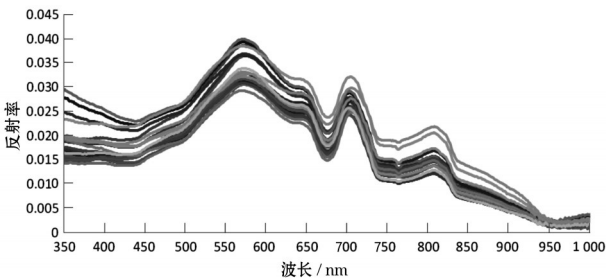


图1 长荡湖采样点光谱反射率响应曲线

2.2 水质参数与高光谱波段相关性分析

将2020年5月4日同步获取的上述15项水质参数和实测光谱数据进行Pearson相关分析,获取水质参数相关系数最佳的波段或波段组合反射率值(表3)。单波段相关性分析优点在于模型构建简单且直观,能排除波段自相关影响,并且具有丰富的先验知识和理论基础作为支撑;双波段相关性分析可以一定程度上消除测量时代入人的噪声、测量环境变化带来的误差和大气的影 响,达到信息增强与压缩的目的,以利于更好建立水表反射率与水质参数化验指标之间的关系。本文分别采用波段差值和比值的方法进行相关性分析。

根据最优波段相关性表,双波段组合与光谱反射率之间的相关关系整体优于单波段,其中波段比值与水温之间具有最高的相关性, $R=0.96$;波段差值

对悬浮物SS、电导率、水温、浊度相关性最强, $R=0.94$;单波段对悬浮物SS具有最高的相关性,在波长为816 nm处取得, $R=0.84$ 。

将各种波段组合下最优相关性大于0.7的水质参数看作光谱反射率的敏感参数,进行建模分析和对比验证,最终选取TP、悬浮物SS、浊度、水温和透明度等5项参数。图2~6为上述5种参数分别与单波段、波段差值、波段比值任意组合的相关关系分布图。5种参数均在近红外波段的波长处与反射率具有较好的相关性,TP、悬浮物SS、浊度、水温和透明度在单波段的最大相关系数分别为0.815、0.84、0.78、0.74、-0.74。图2~6为上述5项参数与350~1 000 nm波长范围内,3种波段反射率组合的相关性分布图。单波段光谱反射率相关性最高的波段集中位于近红外波段附近,900 nm之后伴随强水汽吸收带,相关性迅速减弱。波段差值组合的相关性分布图具有一致的特征规律,双波段在均位于500 nm波长范围内的组合与各参数相关性较弱,对应反射率曲线为Chl-a和黄色物质的强烈吸收带,此区间各波段反射率较低。500 nm以上时相关性较为显著,且波长差在200 nm以内,波段反射率差值与参数相关性较强,这与颗粒悬浮物的散射作用有关。波段相除组合具有相似的特征,但是当波长超过930 nm后相关性突然下降。

表3 长荡湖水质参数与350~1 000 nm范围内光谱反射率相关性分析

水质参数	单波段		双波段			
	波长/nm	R_{max}	差值	R_{max}	比值	R_{max}
$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	816	0.640	849~842	0.83	931/917	0.83
$\rho(\text{NO}_3\text{-N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	998	0.490	971~955	0.76	977/998	0.77
$\rho(\text{TN})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	816	0.412	940~934	0.71	895/900	0.77
$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	942	0.815	962~937	0.86	864/914	0.92
$\rho(\text{COD}_{cr})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	979	0.340	415~413	0.75	771/778	0.75
$\rho(\text{COD}_{Mn})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	570	-0.530	718~720	0.81	794/790	0.72
$\rho(\text{SS})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	816	0.840	928~964	0.94	733/762	0.86
浊度/NTU	818	0.780	909~923	0.91	733/762	0.89
$\rho(\text{Chl-a})/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	964	-0.410	366~365	0.65	964/968	0.71
pH	591	-0.400	464~465	0.79	768/778	0.84
水温/℃	814	0.740	779~740	0.94	741/773	0.96
$\rho(\text{DO})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	669	-0.330	959~952	0.65	959/952	0.66
ORP/mV	578	0.510	566~557	0.87	754/745	0.82
电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	814	-0.590	556~565	0.94	713/595	0.90
透明度/cm	817	-0.740	971~930	0.94	764/734	0.89

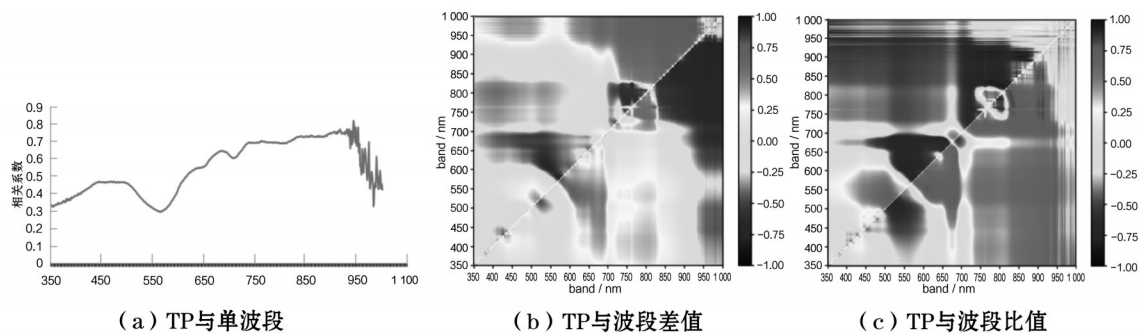


图2 TP与光谱反射率相关性分析

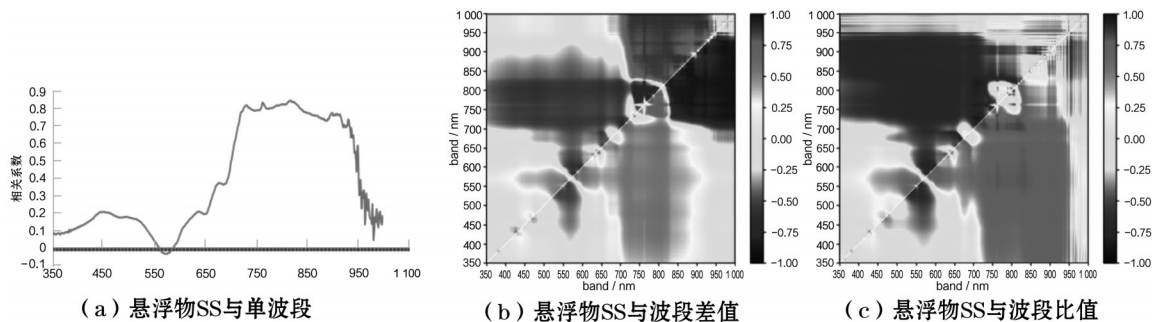


图3 悬浮物SS与光谱反射率相关性分析

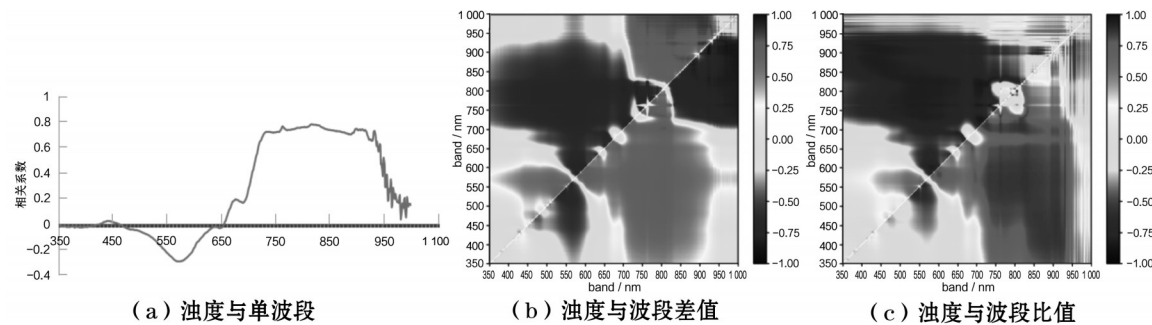


图4 浊度与光谱反射率相关性分析

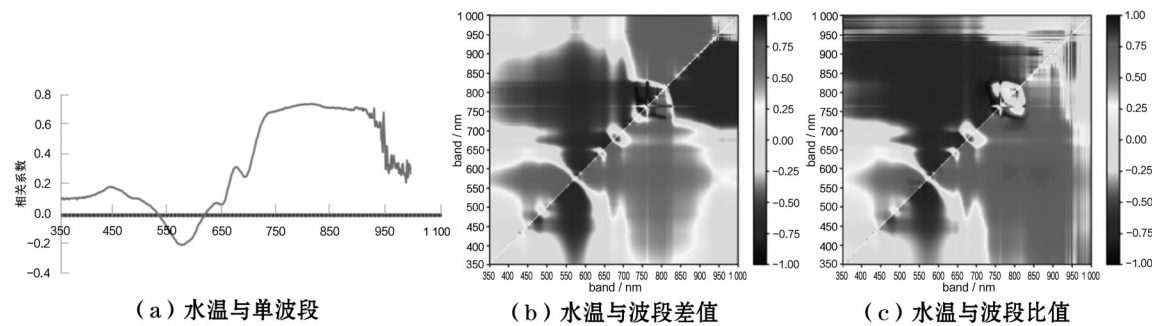


图5 水温与光谱反射率相关性分析

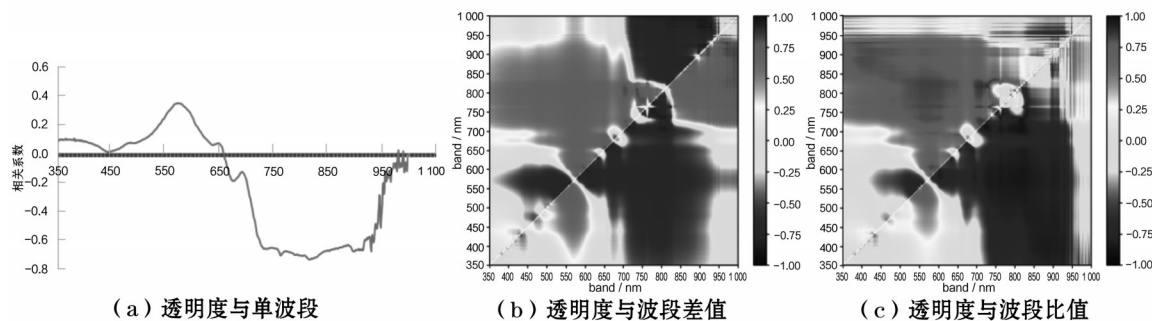


图6 透明度与光谱反射率相关性分析

2.3 模型构建

经验模型^[12-15]是通过对观测对象表层光谱特性和水质参数同步实测,并进行适当的统计分析得到水质参数的估测算法。本次实验以单波段、波段差值、波段比值为自变量,分别利用指数函数、线性函数、多项式函数、幂函数和对数函数对长荡湖TP、悬浮物SS、浊度、水温和透明度这5项参数进行模拟(表4~8)。

利用单波段、波段差值和波段比值组合,利用多种数学模型,建立光谱反射率和TP质量浓度之间的定量关系。结果显示,比值模型整体相关性最优,各类函数拟合均保持 $R^2>0.8$,其中将864 nm和914 nm处的反射率比值作为自变量,建立的一元二次多项式方程模拟的TP质量浓度具有最高的相关性, R^2 为0.833,并且通过 F 检验。

利用单波段、波段差值和波段比值组合,结合多种数学模型,建立光谱反射率和悬浮物SS之间的定量关系。结果显示,用波段差值和波段比值进行拟合均能取得较好的效果,其中将928 nm和964 nm

处的反射率比值作为自变量,建立的一元二次多项式方程模拟的悬浮物质量浓度具有最高的相关性, R^2 为0.926,并且通过 F 检验。

利用单波段、波段差值和波段比值组合,利用多种数学模型,建立光谱反射率和浊度之间的定量关系。结果显示,单波段反射率与浊度在可见光范围内虽然有较好的相关性,但不适宜用本文提供的经验模型法进行拟合。双波段进行拟合的效果明显优于单波段,并且以909 nm和923 nm处的反射率差值作为自变量,建立的线性方程模拟的水体浊度具有最高的相关性, R^2 为0.922。

利用单波段、波段差值和波段比值组合,利用多种数学模型,建立光谱反射率和水温之间的定量关系。结果显示,双波段模拟效果明显优于单波段,将779 nm和740 nm处的反射率比值作为自变量,建立的线性方程和多相式方程模拟的pH值相关性最高, R^2 均为0.941,并且通过 F 检验。考虑到线性方程式模型更加简易,最终选择线性模型作为反演模型。

表4 长荡湖水体TP高光谱拟合模型

自变量	模型类型	模型方程	样本数量/个	拟合参数	
				R^2	F
R_{942}	指数	$y=0.167e^{162.6x}$	14	0.223	26.4
$R_{962}-R_{937}$	多项式	$y=18444x^2-225.2x+0.274$		0.896	24.5
R_{864}/R_{914}	多项式	$y=8.357x^2-30x+27.11$		0.915	27.1

注: R_{**} 为对应波长处的反射率。

表5 长荡湖水体悬浮物SS高光谱拟合模型

自变量	模型类型	模型方程	样本数量/个	拟合参数	
				R^2	F
R_{816}	多项式	$y=3E+06x^2-76301x+523.7$	14	0.517	40.1
$R_{928}-R_{964}$	多项式	$y=-5E+06x^2+61455x-32.91$		0.926	34.3
R_{733}/R_{762}	多项式	$y=531.7x^2-2044.1x+1747.3$		0.828	50.5

注: R_{**} 为对应波长处的反射率。

表6 长荡湖水体浊度高光谱拟合模型

自变量	模型类型	模型方程	样本数量/个	拟合参数	
				R^2	F
R_{817}	指数	$y=29.8e^{26.08x}$	14	0.020	17.7
$R_{909}-R_{923}$	线性	$y=54259.22x-9.23$		0.922	2.9
R_{733}/R_{762}	多项式	$y=2223.2x^2-5779.1x+3779.3$		0.910	34.1

注: R_{**} 为对应波长处的反射率。

利用单波段、波段差值和波段比值组合,利用多种数学模型,建立光谱反射率和透明度之间的定量关系。结果显示,利用差值组合拟合的效果最佳,其中将 971 nm 和 930 nm 处的反射率差值作为自变量,建立的指数方程模拟的透明度具有最高的相关性, R^2 为 0.959,并且通过 F 检验。

对上述 5 种参数最佳波段组合下的最优模型进行整体评价,除 TP 的拟合采用的是波段比值,悬浮物、浊度、水温和透明度均宜采用波段差值的组合。对透明度模拟的 R 值最高,对水温进行模拟后 MRE 取得最小值(表 9)。

2.4 模型评价

根据最优半经验模型预测值与 TP、悬浮物 SS、浊度、水温和透明度实测值的对比,根据本文模型预测的长荡湖 TP、浊度、透明度均与实测值高度吻合。TP $R^2=0.97$, RES=0.005, std.Res=0.015; 透明度 $R^2=0.97$, RES=0.069, std.Res=1.204; 透明度 $R^2=0.9$, RES=-0.971, std.Res=3.69。预测值与实测值均匀分

布在 $X=Y$ 线的两侧且紧邻分布。水温和悬浮物 SS 的模拟相关性弱于上述 3 项,但 R^2 均大于 0.74。整体而言,本文建立模型对长荡湖 TP、悬浮物、浊度、水温和透明度的预测均取得较好的效果。图 7 为拟合效果对比图。

3 结论与讨论

本文根据实测长荡湖的光谱特征,利用同步获取 20 个点位的 15 项常规水质参数。通过光谱反射率和水质参数相关性分析,筛选出 TP、悬浮物 SS、浊度、水温和透明度等 5 项相关性强的水质参数,建立适用于长荡湖的多种水质-高光谱反演模型,并进行模型验证和适用性分析等,得出以下结论:

(1)根据 2021 年 5 月对长荡湖 15 项水质特征参数的采样结果分析,当日长荡湖 COD_{Mn} 、COD 全湖平均达到 II 类水体水质标准,南部水质劣于北部,大都达到 III 类标准。TP、TN 质量浓度均低于 V 类地表水标准,湖泊水质为劣 V 类。受溧阳市域内大量

表 7 长荡湖水体水温高光谱拟合模型

自变量	模型类型	模型方程	样本数量/个	拟合参数	
				R^2	F
R_{814}	多项式	$y=64806x^2-1762.7x+37.86$	14	0.007	3.3
$R_{779}-R_{740}$	线性	$y=5864.2x+26.55$		0.941	25.5
R_{741}/R_{773}	多项式	$y=653.4x^2-1424x+798.3$		0.917	20.8

注: R_{**} 为对应波长处的反射率。

表 8 长荡湖水体透明度高光谱拟合模型

自变量	模型类型	模型方程	样本数量/个	拟合参数	
				R^2	F
R_{817}	多项式	$y=594547.37x^2+15605x-77.86$	14	0.124	19.5
$R_{971}-R_{930}$	指数	$y=48.11e^{-529.1x}$		0.959	31.8
R_{764}/R_{734}	指数	$y=549402806\times\exp(14.48x)$		0.897	25.2

注: R_{**} 为对应波长处的反射率。

表 9 高光谱拟合模型整体评价

水质参数	最佳波段组合	模型	R^2	RMSE	RE	MRE/%
TP	864/914	多项式	0.92	0.011	0.014	6.24
悬浮物 SS	928-964	多项式	0.93	3.811	5.123	8.11
浊度	909-923	线性	0.92	2.045	3.693	7.57
水温	779-740	线性	0.94	0.138	0.171	0.65
透明度	971-930	指数	0.96	0.705	0.935	4.39

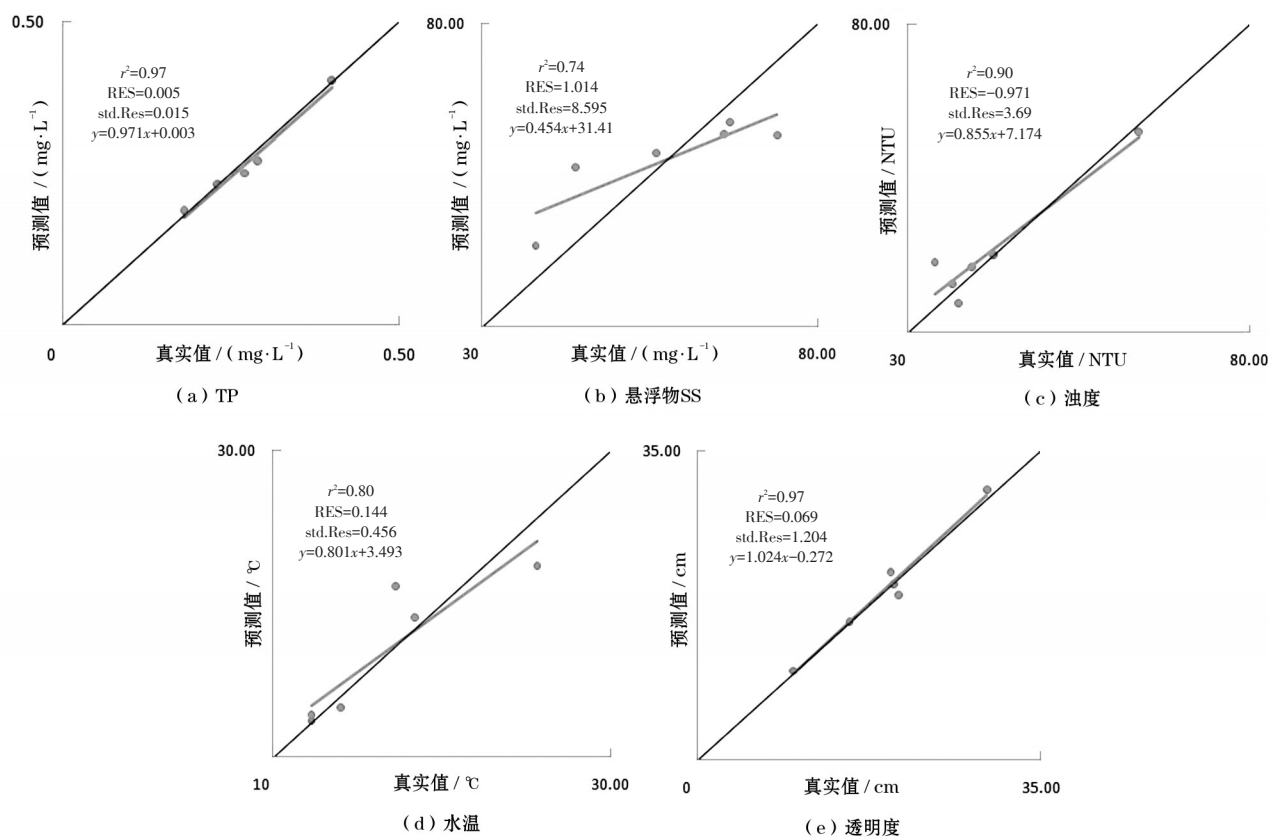


图7 长荡湖参数反演模型精度评价

围网养殖的影响,全湖各位置悬浮物SS、浊度、Chl-a和透明度差异较大,南部湖泊富营养化程度严重。

(2)根据光谱实测结果,长荡湖水体在可见光范围内共有3个反射峰值区,分别集中于550 nm、700 nm和800 nm波长附近,分别对应可见光绿光、红光波长。其中,在550 nm处的反射率对应最高峰值,在700 nm附近出现2个强吸收带,反射率陡降,800 nm波长以外的反射率逐渐下降。

(3)在实测水表面光谱的基础上,分别利用单波段、双波段差值、双波段比值3种组合方式与15项水质参数进行相关性分析。结果显示,双波段普遍比单波段具有更强相关性。单波段则受限于单边自变量,相关性在给定波长内表现出正负性。TP、悬浮物SS、浊度、水温和透明度在不同波段反射率组合条件下 R_{\max} 均大于0.7,表现出较强相关性,对光辐射敏感性较高。受自身作用机制和被其他水质参数掩盖特征的影响,另外10种水质参数辐射特性表现不太显著。

(4)基于半经验模型,分别利用指数、线性、多项式、幂函数和对数函数,筛选出最优波段组合下的最佳反演模型。结果显示,多项式模型对TP、悬

浮物SS和透明度的反演效果最佳,相关系数平方分别达到 $R^2_{864/914}=0.92$, $R^2_{928-964}=0.93$, $R^2_{971-930}=0.96$ 。浊度和水温更适合用线性函数反演,两者反演的相关系数平方分别为 $R^2_{909-923}=0.92$, $R^2_{779-740}=0.94$ 。将上述模型带入检验集中进行精度验证,均表现出于真实值相近的结果。TP预测值和真实值之间 $R^2=0.97$, $RES=0.005$;悬浮物SS $R^2=0.74$, $RES=1.014$;浊度 $R^2=0.9$, $RES=0.971$;水温 $R^2=0.80$, $RES=0.144$;透明度 $R^2=0.97$, $RES=0.069$ 。

(5)高光谱技术在湖泊水质参数研究中发挥重要作用,利用实测光谱和水质参数建立的数学模型有利于提高遥感反演精度,为实际应用和推广建立理论依据。同时,长荡湖内构筑物分布复杂,具有饮用水源地、水上景观、餐饮船聚集点和围网养殖等多种功能区。现已在全湖开展退圩还湖工作,高精度高光谱反演模型结合卫星遥感可有效监测工程实施过程中全湖水质改善状况,并对各功能区的分配决策给出指导性意见。

参考文献:

- [1] 童庆禧,张兵,张立福.中国高光谱遥感的前沿进展[J].遥感学报,2016,20(5):689-707.

- [2] 曹引,冶运涛,赵红莉,等. 南四湖水体叶绿素a浓度实用化高光谱反演模型[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4): 62-68.
- [3] 巩彩兰,尹球,匡定波. 黄浦江水质指标与反射光谱特征的关系分析[J]. 遥感学报, 2006(6): 910-916.
- [4] 包起帆,彭德艳,鲍道阳,等. 基于星地同测的长江口水文数据建模研究[J]. 水运工程, 2020(9): 146-151, 166.
- [5] 吴廷宽,贺中华,梁虹,等. 基于高光谱技术的湖泊富营养化综合评价研究——以贵阳市百花湖为例[J]. 水文, 2016, 36(2): 28-34, 72.
- [6] 高晨,徐健,高丹,等. 基于GF-1与实测光谱数据鄱阳湖丰水期总悬浮物质量浓度反演[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 101-109.
- [7] 王中正,李太君,方锦文. 两种单波段反演算法的海口市城市热岛研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(12): 108-111.
- [8] 温小乐,徐涵秋. 基于多源同步数据的闽江下游悬浮物定量遥感[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2441-2447.
- [9] 段洪涛,张柏,宋开山,等. 长春南湖水体透明度高光谱定量模型研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2006(5): 633-639.
- [10] 吕航,马蔚纯,周立国,等. 淀山湖微量水质参数卫星高光谱遥感估算[J]. 复旦学报(自然科学版), 2013, 52(2): 238-246, 285-286.
- [11] KAISHAN SONG, LIN LI, SHUAI LI, et al. Hyperspectral Remote Sensing of Total Phosphorus (TP) in Three Central Indiana Water Supply Reservoirs [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 223(4): 1481-1502.
- [12] DUAN W, HE B, TAKARA K, et al. Spatiotemporal evaluation of water quality incidents in Japan between 1996 and 2007 [J]. Chemosphere, 2013, 93(6): 946-953.
- [13] DUAN W, TAKARA K, HE B, et al. Spatial and temporal trends in estimates of nutrient and suspended sediment loads in the Ishikari River, Japan, 1985 to 2010 [J]. Science of the Total Environment, 2013(461/462): 499-508.
- [14] KOPONEN S, PULLIAINEN J. Analysis on the feasibility of multi-source remote sensing observations for chl-a monitoring in Finnish lakes [J]. The Science of the total Environment, 2001(268): 95-106.
- [15] KOPONEN S, ULLININEN J. Lake Water quality classification with airborne spectrometer and simulated MERIS data [J]. Remote sensing of hyperspectral Environment, 2002(79): 51-59.

(上接第25页)

黏土,上部5 m填C15速凝混凝土。

5 结 语

在夹砂土地区河道土方开挖首先要解决降排水问题,本工程采用管井结合垄沟降排水方案取得比较好的效果,河道底部完全干爽,甚至可以通行重型载重汽车。本工程河道开挖深度达到11~12 m,采取合理的分层施工方案,最大限度地降低了施工风险,提高了施工效益。目前该工程已验收,施工过程和通水后未发生滑坡、塌陷等事故,经济效益和社会效益显著。南延段洪涝水可直接北排长江,缩短洪水入江海的线路和时间,湖西地区防洪

标准提高到50年一遇,减轻嘉泽、湍里地区防汛压力;增强太湖水体流动,缩短换水周期(从309 d缩短至180 d),提高太湖水体自净能力和水环境容量。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委员会. 太湖流域水环境综合治理总体方案[R]. 北京:国家发展改革委员会, 2008.
- [2] 桂青. 新孟河延伸拓浚工程对长江水环境影响研究[J]. 人民长江, 2016, 47(19): 20-25.
- [3] 孙昌明,沈金荣. 浅析粉砂土河床开挖及稳定效果[J]. 江苏水利, 2005(3): 16-18.
- [4] 黄宏伟. 软土地基土方开挖施工控制措施[J]. 建筑施工, 2019, 41(5): 796-798.