

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)

基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素 高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)

餐饮源有机颗粒物排放特征 李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)

华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM_{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析 陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)

艾比湖地区气溶胶光学特性分析 张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)

天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势 徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟贇, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)

郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)

长江三角洲 2010~2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单 朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)

北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性 许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)

广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)

泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析 李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)

有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)

西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析 樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)

超低排放高湿度气态颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试 胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)

厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征 王坚, 黄屋, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)

基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)

基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演 黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨根晖, 杜晓晨 (3591)

不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例 刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)

城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱弈, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)

上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)

过氧化钙 (CaO₂) 联合生物炭对河道底泥的修复 李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)

基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ - $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)

三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷 严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)

高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算 高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)

Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附 赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)

微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为 薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)

多孔填料特性对生物膜形成影响 江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)

硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS 李初, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)

单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮 方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)

间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)

基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性 张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)

基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策 刘晓雷, 李安婕 (3725)

零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响 刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)

基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝婷, 张瑞良, 何欣昱 (3740)

亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移 袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)

四环素胁迫对 *Shigella flexneri* 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程 高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)

羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择 乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)

高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响 侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)

微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用 宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)

三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率 罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)

臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响 方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)

改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响 邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)

有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N₂O 排放的影响 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)

原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素 葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)

羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力 黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)

滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响 蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)

棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响 刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)

不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)

螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)

种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)

《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)

基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演

黄昕晰^{1,2,3}, 应晗婷^{1,2,3}, 夏凯^{1,2,3*}, 冯海林^{1,2,3}, 杨垠晖^{1,2,3}, 杜晓晨^{1,2,3}

(1. 浙江农林大学信息工程学院, 杭州 311300; 2. 浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室, 杭州 311300; 3. 林业感知技术与智能装备国家林业局重点实验室, 杭州 311300)

摘要: 无人机多光谱遥感可用于监测多个水质参数,如悬浮物、浊度、总磷和叶绿素等,建立稳定和准确的水质参数反演模型是开展这一工作的前提。matching pixel-by-pixel(MPP)算法是一种针对无人机影像高分辨率特点的反演算法,但其存在运算量过大和过拟合的问题,基于此,提出 optimize-MPP(OPT-MPP)算法,以克服运算量过大和过拟合的问题。本研究以浙江省杭州市青山湖作为研究区域,采集 45 个样本,分别构建悬浮物浓度(SS)与浊度(TU)的 OPT-MPP 算法反演模型。结果表明,最佳悬浮物反演模型的决定系数 R^2 达到 0.787 0,综合误差为 0.130 8;最佳浊度反演模型的决定系数 R^2 达到 0.804 3,综合误差为 0.150 3。最后利用分别建立的两个参数的最优模型,实现青山湖各实验区域的水质参数空间分布信息的反演。

关键词: 无人机(UAV); 遥感; 多光谱; 水质参数; 反演模型; 空间分布

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3591-10 DOI: 10.13227/j.hjck.201911141

Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm

HUANG Xin-xi^{1,2,3}, YING Han-ting^{1,2,3}, XIA Kai^{1,2,3*}, FENG Hai-lin^{1,2,3}, YANG Yin-hui^{1,2,3}, DU Xiao-chen^{1,2,3}

(1. College of Information Engineering, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Forestry Intelligent Monitoring and Information Technology, Hangzhou 311300, China; 3. Key Laboratory of Forestry Perception Technology and Intelligent Equipment, State Forestry Administration, Hangzhou 311300, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicle (UAV) multispectral remote sensing can be used to monitor multiple water quality parameters, such as suspended solids, turbidity, total phosphorus, and chlorophyll. Establishing a stable and accurate water quality parameter inversion model is a prerequisite for this work. The matching pixel-by-pixel (MPP) algorithm is an inversion algorithm for high resolution features of UAV images; however, it is associated with problems of excessive computation and over-fitting. To overcome these problems, the optimize-MPP (OPT-MPP) algorithm is proposed. In this study, Qingshan Lake in Hangzhou City, Zhejiang Province, was used as the research area. Forty-five samples were collected to construct the OPT-MPP algorithm inversion model for two water quality parameters: the suspended sediments concentration (SS) and turbidity (TU). The results showed that the optimal suspended sediment concentration inversion model had a determination coefficient (R^2) of 0.787 0 and a comprehensive error of 0.130 8. The optimal turbidity inversion model had a R^2 of 0.804 3 and a comprehensive error of 0.150 3. Hence, the inversion of the spatial distribution information for water quality parameters in each experimental area of QingShan Lake was realized by using the optimal models of the two established parameters.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); remote sensing; multispectral; water quality parameter; inversion model; spatial distribution

水资源是生态环境的重要组成部分和基础保障,定期进行水质监测十分必要。传统的水质监测方法主要为定点测量,这种方法需要消耗大量的人力物力,且因为监测点数量的限制,只能获取点状分布的数据,难以获取整个水域的水质状况。遥感技术具有高效、经济成本低以及覆盖范围广等优势,目前已被广泛应用于湖泊、水库以及河流等水域的水质监测^[1-6]。例如, Torbick 等^[7]使用 Landsat TM 影像对密歇根州下半岛内陆湖泊的叶绿素 a、总磷、总氮以及悬浮物浓度等多个水质参数进行了测绘;朱利等^[8]利用 GF-1 卫星 WFV 数据对太湖水域进行叶

绿素 a 和透明度的遥感监测,以上研究均表明卫星遥感技术在水质监测方面已得到应用。

近年来,无人机遥感技术因其更高的分辨率以及便捷性等优点被广泛应用于各个领域,且得到良好的效果,如魏鹏飞等^[9]使用无人机多光谱影像对不同

收稿日期: 2019-11-15; 修订日期: 2020-02-25

基金项目: 浙江省自然科学基金委员会-青山湖科技城管委会联合基金项目(LQY18C160002); 浙江省重点研发计划项目(2015C03008); 国家自然科学基金两化融合项目(U1809208); 浙江省大学生科技活动计划暨新苗人才计划项目(2019R412050)

作者简介: 黄昕晰(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为农业信息化, E-mail: huangxinxi0502@163.com

* 通信作者, E-mail: xiakai@zafu.edu.cn

生育期的夏玉米叶片氮含量进行了遥感估测;张智韬等^[10]使用无人机多光谱影像对土壤含水率进行了遥感反演研究;Flynn等^[11]使用无人机数据对浅水非浑浊河流水下植被进行了遥感监测等。

无人机遥感技术在水质监测方面的研究也日渐展开,如刘彦君等^[12]将无人机结合多光谱影像应用于小微水域的水质要素反演,其中总磷、悬浮物浓度、浊度的反演模型决定系数分别达到 0.7829、0.7503 和 0.7334,为小微水域的污染防治提供了技术支撑;Guimaraes等^[13]将神经网络应用于无人机图像预测水体悬浮物浓度的回归分析中,回归模型的质量得到了显著的提升.尽管无人机技术在水质监测中的应用已有了一些进展,但如何制作出稳定准确的水质参数反演模型仍是目前研究的重点.为了探索更精确的基于无人机影像的水质参数反演方法和模型,Su等^[14]在处理多光谱数据时提出了MPP(matching pixel-by-pixel)算法,所得反演模型决定系数 R^2 接近于 1,但在线性回归分析中,过高的 R^2 被认为是过拟合的结果,因此在后续的实验中 Su等^[15]对回归模型的预测性能进行了交叉验证,证明了训练样本点数量的增加对于减轻过拟合现象以提高回归模型的预测性能是有效的,但这种做法并没有解决运算量过大的问题。

本文以杭州市青山湖为研究区域,提出一种基于无人机多光谱影像的 OPT-MPP (Optimize-MPP) 算法,以克服 MPP 算法运算量过大和所得模型过拟合的问题,并实现悬浮物浓度和浊度的反演。

1 材料与方法

1.1 研究区域和采样点

青山湖水域 (N30° 12' 58" ~ 30° 15' 21", E119°44'55" ~ 119°47'58"),位于杭州市临安区东侧,水域面积约为 10 km². 本实验共设置 4 个采样区域,分别位于苕溪入口、森林公园、琴山码头以及青山湖大坝处,共计 45 个采样点,密度约为 4.5 个·km⁻²,并在取样时分别记录经纬度坐标. 于 2019 年 7 月对 4 个采样区域分别进行 4 次无人机多光谱影像获取和同步水质采样,其中悬浮物浓度使用杭州陆程仪器有限公司 LH-SS1 型悬浮物测定仪测量,浊度使用杭州陆恒生物科技有限公司 WGZ-1B 浊度仪测量,共获取 45 组数据,根据散点图剔除 3 组异常数据后,保留剩余 42 组数据,选取均匀分布在各研究区域且具有一定梯度的 14 组数据用于建模,另外 28 组数据用于模型精度检验(一般情况下采用 2/3 数据建模,1/3 数据检验,由于本实验中参与到建模的运算数据量足够多,且为了得到更精确

的误差分析数据,增加了检验数据). 表 1 为青山湖水域水质参数统计,研究区域和采样点如图 1.

表 1 水质参数统计

Table 1 Statistics of water quality parameters				
水质参数	最小值	最大值	平均值	标准差
悬浮物浓度/mg·L ⁻¹	15.65	87.25	28.57	15.35
浊度/NTU	10.3	44.1	20.08	7.16

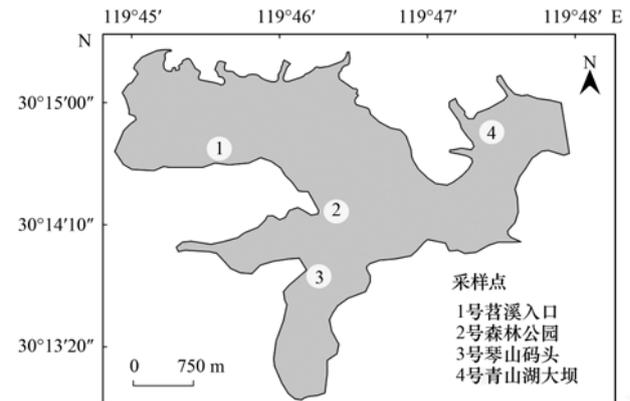
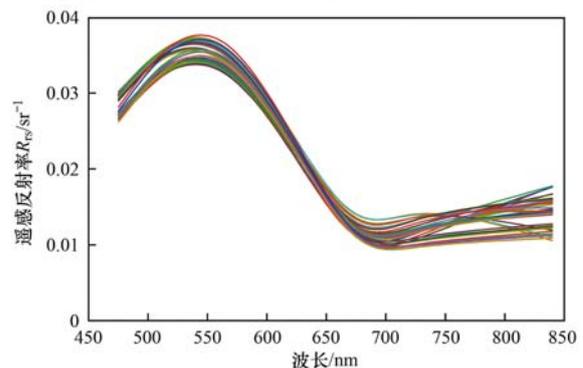


图 1 研究区域和采样点示意

Fig. 1 Research area and sampling point

1.2 无人机影像

本研究使用大疆悟 2 四旋翼无人机携带 MicaSense RedEdge 多光谱传感器获取遥感数据,该传感器具有重量轻、体积小特点,适合搭载于中小型无人机. 本实验航高设置为 400 m,航速 5 m·s⁻¹,以更加稳定地获取研究区域的多光谱影像,相对于卫星遥感影像数据,由于无人机的飞行高度较低,获取的影像区域较小,大气折射和地球曲率的影响可以忽略^[16~18],在无人机影像数据预处理时,使用与 RedEdge 多光谱传感器配套的 MicaSense Calibrated Reflectance Panel 配合 pix4Dmapper 软件进行辐射校正与辐射定标,最终在 ENVI 软件中读取与采样点对应的像元区域数据,以此作为光谱反射率数据 (R_{rs}),所得光谱曲线如图 2,其呈现出一般内陆水体的光谱特征^[19]. 表 2 为传感器获取的各波段名称



不同颜色的曲线分别表示不同采样点的光谱曲线

图 2 采样点水体光谱曲线

Fig. 2 Spectral curve of water in sample points

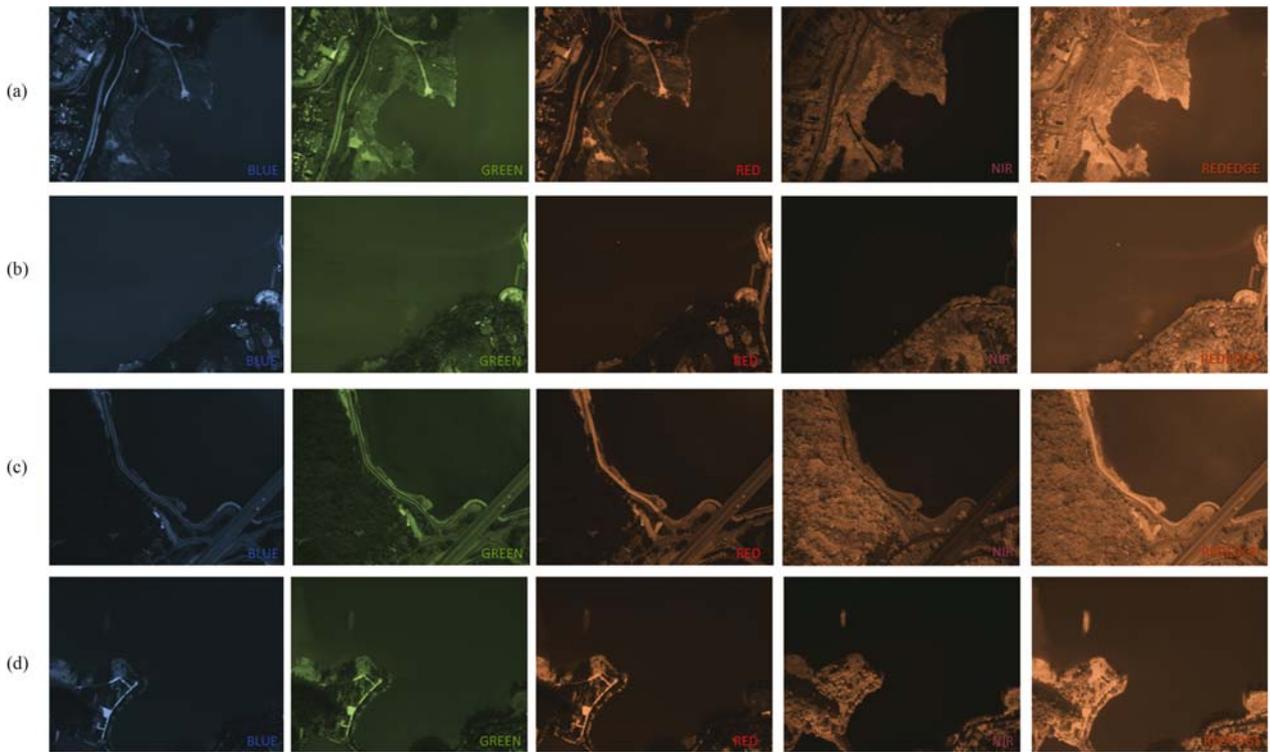
及其对应的中心波长和波宽,图 3 为各采样区域无人机多光谱影像图。

表 2 各波段中心波长及波宽

Table 2 Center wavelength and bandwidth of each band			
波段	波段名	中心波长/nm	波宽/nm
R1	Blue	475	20
R2	Green	560	20
R3	Red	668	10
R4	NIR	840	40
R5	Red Edge	717	10

1.3 MPP 算法

基于多光谱影像数据反演水质参数时,首先要分析采样点样本的实测值与遥感影像中该点所对应的像元值之间的相关性,并建立回归模型.由于无人机影像的分辨率极高,每个像元所代表的实际区域很小,很难精确匹配采样点和像元,因此通常使用样本点周围 $i \times j$ 个像元的平均值参与拟合回归模型(如图 4).这种方式虽然简洁方便,但不能最大程度规避数据误差,很难找到最优模型,尤其是样本量较



(a)1 号区域 茗溪入口; (b)2 号区域 森林公园; (c)3 号区 琴山码头; (d)4 号区 青山湖大坝

图 3 各区域无人机多光谱影像

Fig. 3 Unmanned aerial vehicle(UAV) multispectral imagery of various areas

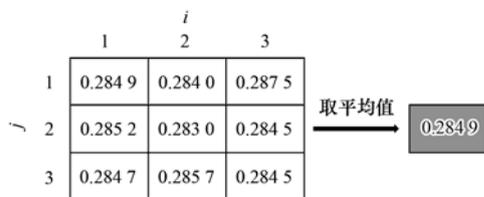


图 4 3 × 3 像元取平均值

Fig. 4 Average of 3 × 3 pixels

少时.而 MPP 算法的目的就是通过遍历每一个可能的像元来寻找最优的模型。

MPP 算法本质上是挑选不同的像元组合进行多次回归分析,并基于遗传算法寻找最优解.设 $P_{ij}(m)$ 是第 m 个采样点的第 (i,j) 个像元的值,其中 i 为列标, j 为行标,则每个采样点有 $i \times j$ 种可能的像元选择, m 个采样点产生 $(i \times j)^m$ 种像元组合,将每种组合均与实测水质参数进行一次回归分析,总

计进行 $(i \times j)^m$ 次回归分析,将决定系数 R^2 最大的模型作为最优回归模型.因此,MPP 算法的时间复杂度主要由 i,j 与 m 的大小决定, i 与 j 的数值越大,每个采样点的像元选择越多,相应地 m 的数值越大,产生的像元组合数目越多。

假设实验样本点个数为 8, i 与 j 的维度均为 3,则所有可能的候选组合个数为 $(3^2)^8$ 种,图 5 展示了其中一种可能的解结果,其像元组合为 $P_{12}(1)$ 、 $P_{11}(2)$ 、 $P_{21}(3)$ 、 $P_{31}(4)$ 、 $P_{33}(5)$ 、 $P_{23}(6)$ 、 $P_{13}(7)$ 和 $P_{32}(8)$,用于与实测水质参数数据建立反演模型。

图 6 为传统平均值建模方法与 MPP 算法建模方法的对比,相较于传统平均法建模方式,MPP 算法需构建组合矩阵以找到与水质参数具有最佳相关性的数据。

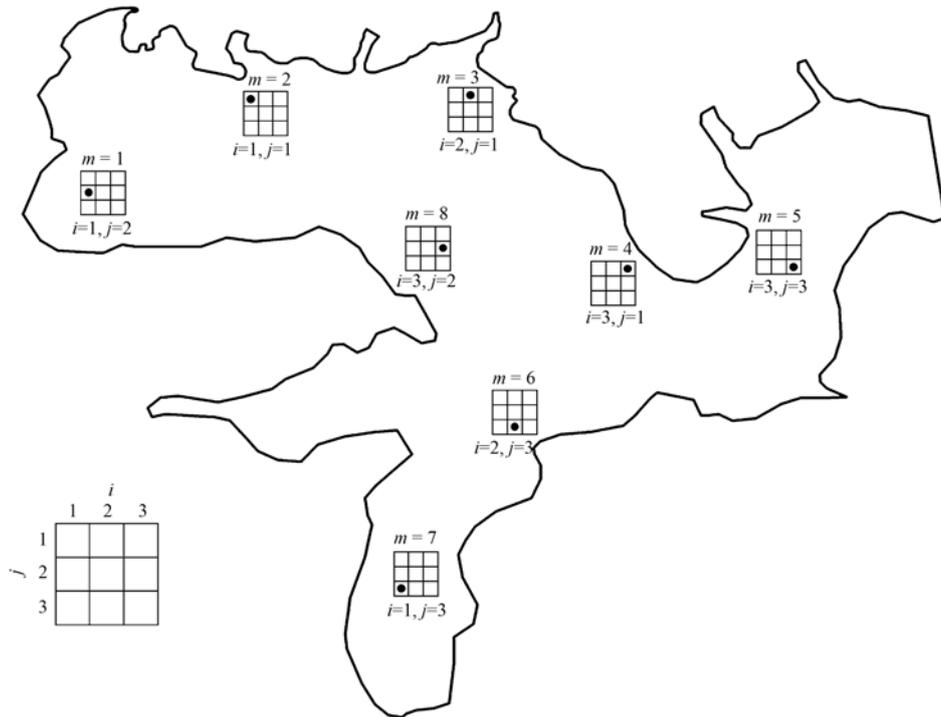


图 5 3 × 3 像元区域及一种可能解

Fig. 5 The 3 × 3 pixel area and one of the possible solutions

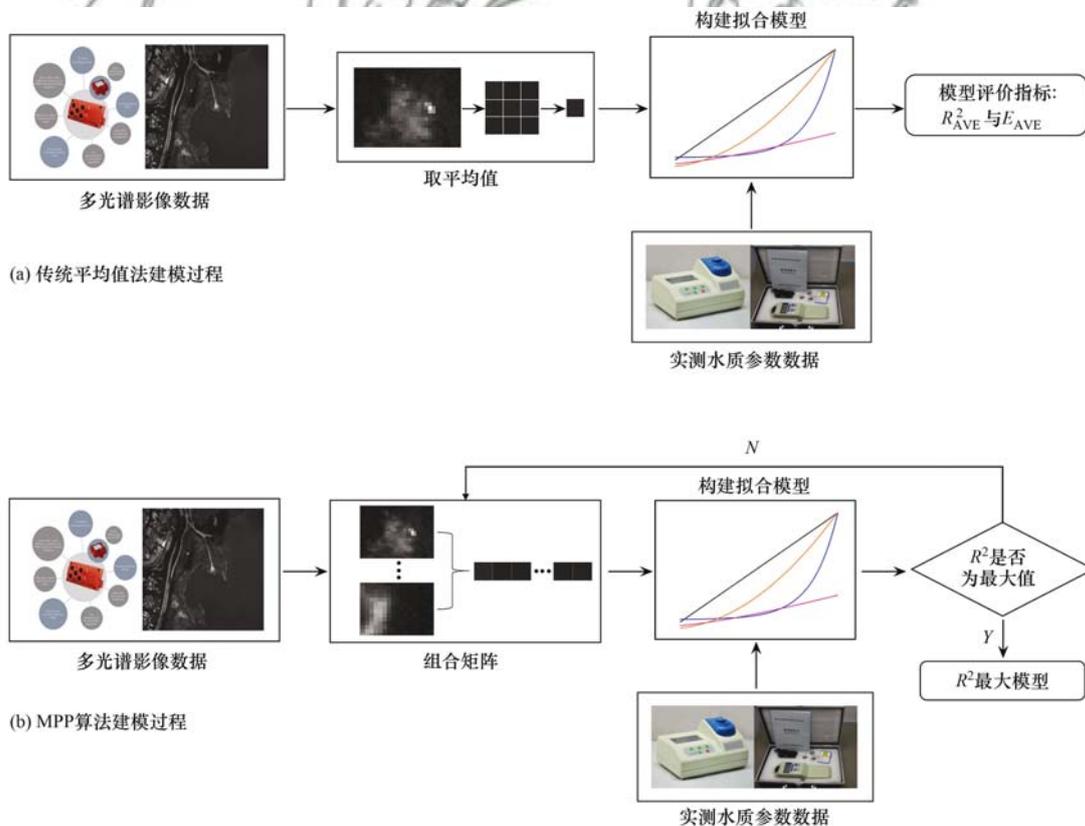


图 6 建模方法对比

Fig. 6 Comparison diagram of the modeling method

虽然 MPP 算法相较于传统平均值法已有了较大改进,但本文认为 MPP 算法仍存在如下缺陷: ①组合数量过多,计算量大,导致运算速度过慢,仅能适用于较少的采样点个数; ②将 R^2 作为模型选

择的唯一标准欠妥,容易产生模型过拟合现象.

1.4 OPT-MPP 算法

针对 MPP 算法计算量大运算速度缓慢的缺陷,本研究将 3 × 3 像元区域内的数据按列从小到大排

序,选取大小排在 2、5 和 8 位的数据参与后续运算,相比 MPP 算法而言将每个像元区域内所需处理的数据量从 9 个减少到了 3 个,将 9^m 种组合运算减

少到 3^m 种,其中 m 表示采样点的个数,通过减少单个采样点参与运算的数据量,以使更多的其他样本数据参与运算,处理过程如图 7.

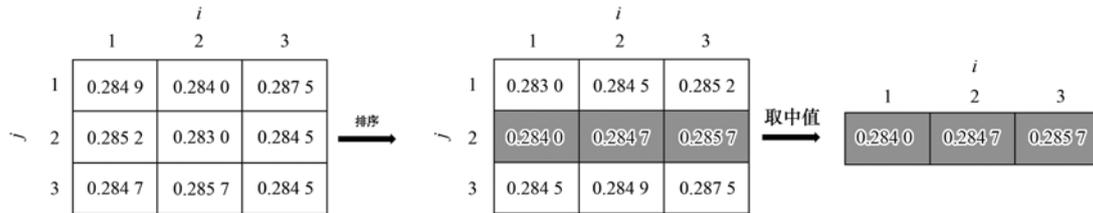


图 7 OPT-MPP 算法处理示意

Fig. 7 Processing diagram of the OPT-MPP algorithm

针对 MPP 算法可能产生过拟合的现象,OPT-MPP 算法在筛选模型时设置双重条件,即决定系数 R_{OPT}^2 大于 R_{AVE}^2 (传统平均值建模方法所得模型决定系数),同时平均相对误差 E_{OPT} 小于 E_{AVE} (传统平均值建模方法所得模型相对误差),以此产生模型集合 S :

$$S = \{y | yR_{OPT}^2 > yR_{AVE}^2 \cap yE_{OPT} < yE_{AVE}\}$$

式中 y 表示拟合模型,最终从集合 S 中筛选出误差最小模型 M :

$$M = \{y | \min(yE), y \in S\}$$

式中, yE 表示拟合模型 y 的平均相对误差. 这种双重条件的筛选模式,去除了决定系数较高但精度较低的拟合模型,这样既能避免模型产生过拟合现象,又能保证反演模型的精度,建模过程如图 8.

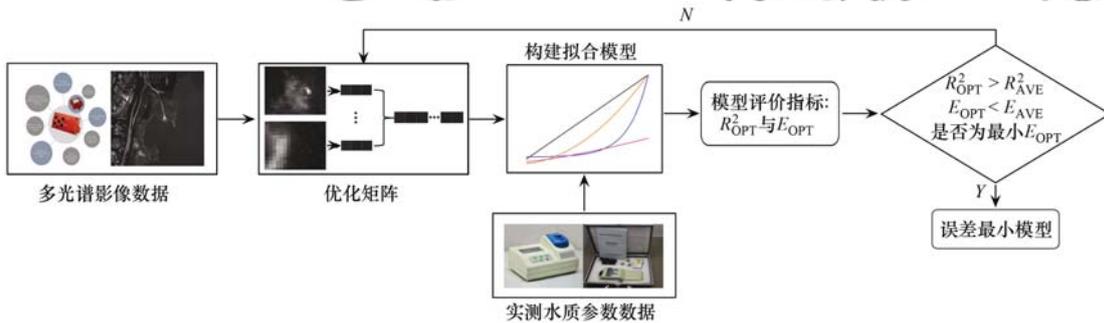


图 8 OPT-MPP 算法建模方法

Fig. 8 Modeling method for the OPT-MPP algorithm

2 结果与讨论

2.1 相关性分析

根据悬浮物浓度和浊度的光谱响应特征,参考已有的特殊波段组合方式,构建了 8 种满足本实验需求的波段组合,包括 R4/R3、R4/R2、R4/R1、R4/(R1 + R2 + R3)、(R2 + R3)/R4、(R2 + R3) × R4、(R3 + R4)/R2 和 R3/R4^[20-22]. 悬浮物浓度和浊度进行相关性及显著性分析后,选用与悬浮物浓度相关性最高的 R4/R1 波段组合,与浊度相关性最高的 R4/(R1 + R2 + R3) 波段组合进行实验,其显著性均满足小于 0.05 的统计学要求^[23]. 表 3 为相关性及显著性分析结果.

2.2 模型结果分析

本实验使用决定系数 R^2 、平均相对误差 ARE、均方根误差 RMSE、相对均方根误差 rRMSE 以及综合误差 CE 这 5 种指标来评价模型精度^[24,25],模型决定系数 R^2 越大,ARE、RMSE、rRMSE 和 CE 越小,

则模型的估算效果越好. 相关公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$ARE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{y_i} \right|}{n} \times 100\% \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$rRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (4)$$

$$CE = \frac{ARE + rRMSE}{2} \quad (5)$$

式中, y_i 表示第 i 个点的实测值, \hat{y}_i 表示第 i 个点的预测值, \bar{y} 表示水质参数实测值的平均值, n 表示验证样本数.

将检测得到的悬浮物浓度、浊度数据以及经 OPT-MPP 算法处理后的水体多光谱数据结合,依次构建线性(U)、多项式(PL)、幂函数(P)和指数函数(E)这4项基本模型,并计算决定系数 R^2 及各项模

型精度指标. 悬浮物浓度和浊度建模结果与精度评价指标分别如表4和表5,其中表4的 x 为 $R4/R1$, y 表示悬浮物浓度,表5的 x 为 $R4/(R1 + R2 + R3)$, y 表示浊度.

表3 相关性及其显著性分析结果¹⁾

Table 3 Analysis result for correlation and significance

编号	波段或波段组合	悬浮物浓度		浊度	
		相关性	显著性	相关性	显著性
B1	R1	-0.530	0*	-0.376	0.011*
B2	R2	-0.353	0.017*	-0.265	0.079
B3	R3	-0.343	0.021*	-0.321	0.031*
B4	R4	0.360	0.015*	0.478	0.001*
B5	R5	0.057	0.711	0.089	0.560
B6	R4/R3	0.575	0*	0.639	0*
B7	R4/R2	0.649	0*	0.660	0*
B8	R4/R1	0.701	0*	0.663	0*
B9	R4/(R1 + R2 + R3)	0.685	0*	0.692	0*
B10	(R2 + R3)/R4	-0.536	0*	-0.566	0*
B11	(R2 + R3) × R4	-0.010	0.947	0.110	0.470
B12	(R3 + R4)/R2	0.606	0*	0.566	0*
B13	R3/R4	-0.501	0*	-0.559	0*

1) * 表示通过 0.05 水平的显著性检验,黑体字表示相关性最大值

由表4可以看出,在悬浮物浓度各拟合模型中, I_{SS} (PL) 拥有 OPT-MPP 算法建模方式所得模型中最高决定系数 R^2 和最低综合误差 CE, 相较于传统平均值法最优模型 A_{SS} (PL) (最高决定系数 R^2 及最低综合误差 CE), 决定系数 R^2 从 0.775 1 提升到 0.787 0, 说明在建模过程中拟合效果更好. 此外平均相对误差 ARE 从 13.11% 降低到 12.35%, 均方根

误差 RMSE 与相对均方根误差 rRMSE 略有上升, 但总体综合误差 CE 从 0.132 4 下降到 0.130 8, 说明 OPT-MPP 算法得到的拟合模型检验精度更高, 更适用于悬浮物浓度反演. 未设置双重筛选条件所得 4 种模型虽然拥有几种建模方式下较高的决定系数 R^2 , 但其综合误差均相对较大, 说明这 4 种模型产生了过拟合现象, 不适用于悬浮物浓度反演.

表4 悬浮物浓度回归模型¹⁾

Table 4 Regression model of the suspended sediment concentration

方法	编号	拟合模型	R^2	ARE/%	RMSE	rRMSE	CE
传统平均值法	A_{SS} (U)	$y = 30.28x + 0.49$	0.701 7	17.87	5.101 2	0.178 5	0.178 6
	A_{SS} (PL)	$y = 35.06x^2 - 35.43x + 28.31$	0.775 1	13.11	3.820 9	0.133 6	0.132 4
	A_{SS} (P)	$y = 30.88x^{1.032}$	0.702 2	18.35	5.115	0.179	0.181 3
	A_{SS} (E)	$y = 9.26e^{1.12x}$	0.757 3	15.46	4.321 1	0.151 2	0.152 9
未设置双重筛选条件	R_{SS} (U)	$y = 35.72x - 3.65$	0.838 9	20.35	5.525 8	0.193 4	0.198 5
	R_{SS} (PL)	$y = 38.16x^2 - 36.35x + 27.09$	0.910 2	14.16	4.030 2	0.141 1	0.141 4
	R_{SS} (P)	$y = 31.55x^{1.219}$	0.849 8	20.16	5.333 7	0.186 7	0.194 2
	R_{SS} (E)	$y = 8.33e^{1.28x}$	0.9	16.68	4.482 4	0.156 9	0.161 9
OPT-MPP 算法	I_{SS} (U)	$y = 27.51x + 2.35$	0.702 1	16.53	4.935 2	0.172 7	0.169
	I_{SS} (PL)	$y = 37.12x^2 - 41.03x + 30.44$	0.787 0	12.35	3.944 3	0.138 0	0.130 8
	I_{SS} (P)	$y = 30.15x^{0.95}$	0.702 6	17.15	5.004 1	0.175 2	0.173 4
	I_{SS} (E)	$y = 10.27e^{1.03x}$	0.761 6	14.52	4.300 1	0.150 5	0.147 9

1) 黑体字表示综合误差最小值

浊度各拟合模型如表5, 在浊度各拟合模型中, I_{TU} (PL) 拥有 OPT-MPP 算法建模方式所得模型中最高决定系数 R^2 和最低综合误差 CE, 相较于传统平均值法最优模型 A_{TU} (PL) (最高决定系数 R^2 及最低综合误差 CE), 决定系数 R^2 从 0.803 2 提升到 0.804 3, 说明在建模过程中拟合效果更好. 此外平均相对误

差 ARE 从 16.87% 降低到 13.29%, 均方根误差 RMSE 从 4.409 4 下降到 3.365 4, 相对均方根误差 rRMSE 从 0.219 6 下降到 0.167 6, 综合误差 CE 从 0.194 2 下降到 0.150 3, 说明 OPT-MPP 算法得到的拟合模型检验精度更高, 更适用于浊度反演. 未设置双重筛选条件所得 4 种模型虽然拥有几种建模方式

表 5 浊度回归模型¹⁾

Table 5 Regression model of turbidity

方法	编号	拟合模型	R^2	ARE/%	RMSE	rRMSE	CE
传统平均值法	$A_{TU}(U)$	$y = 106.3x - 9.34$	0.680 4	23.02	5.264 8	0.262 2	0.246 2
	$A_{TU}(PL)$	$y = 625.4x^2 - 275.8x + 45.57$	0.803 2	16.87	4.409 4	0.219 6	0.194 2
	$A_{TU}(P)$	$y = 146.2x^{1.58}$	0.714 6	22.48	5.388 4	0.268 3	0.246 6
	$A_{TU}(E)$	$y = 4.55e^{5.09x}$	0.761 8	20.54	5.002	0.249 1	0.227 3
未设置双重筛选条件	$R_{TU}(U)$	$y = 116.42x - 12.13$	0.820 0	24.75	5.745 6	0.286 1	0.266 8
	$R_{TU}(PL)$	$y = 524.62x^2 - 211.36x + 35.71$	0.891 6	17.82	4.532 4	0.225 7	0.202
	$R_{TU}(P)$	$y = 161.07x^{1.66}$	0.848 8	23.32	5.643 3	0.281	0.257 1
	$R_{TU}(E)$	$y = 4.6e^{5.1x}$	0.874 5	20.78	5.065 9	0.252 3	0.230 1
OPT-MPP 算法	$I_{TU}(U)$	$y = 97.76x - 8.07$	0.681 7	19.45	4.611 9	0.229 7	0.212 1
	$I_{TU}(PL)$	$y = 572.5x^2 - 265.9x + 46.19$	0.8043	13.29	3.365 4	0.167 6	0.150 3
	$I_{TU}(P)$	$y = 126.38x^{1.51}$	0.715 5	19.25	4.668 6	0.232 5	0.212 5
	$I_{TU}(E)$	$y = 5.09e^{4.58x}$	0.762 5	17.13	4.144 9	0.206 4	0.188 9

1) 黑体字表示综合误差最小值

下较高的决定系数 R^2 ,但其综合误差均相对较大,说明这 4 种模型产生了过拟合现象,不适用于浊度反演。

表 6 展示了 $I_{SS}(PL)$ 模型与 $I_{TU}(PL)$ 模型所对应的波段组合值,即构建拟合模型所采样用的 14

个采样点对应波段组合值.图 9 为 $I_{SS}(PL)$ 模型与 $I_{TU}(PL)$ 模型的拟合图像,从中可以看出用于构建拟合模型的 14 个采样点均匀分布在拟合曲线两侧,证明悬浮物浓度和浊度在这两种模型的拟合程度较好。

表 6 OPT-MPP 算法所得最优解¹⁾

Table 6 Optimal solution by the OPT-MPP algorithm

回归模型	波段组合值						
	$m=1$ $i=3$	$m=2$ $i=3$	$m=3$ $i=3$	$m=4$ $i=3$	$m=5$ $i=3$	$m=6$ $i=3$	$m=7$ $i=3$
$y = 37.12x^2 - 41.03x + 30.44$ y: 悬浮物浓度 x: R4/R1	1.075 1	0.850 1	0.792 5	0.667 3	0.712 0	0.691 2	0.861 2
	$m=8$ $i=3$	$m=9$ $i=3$	$m=10$ $i=1$	$m=11$ $i=2$	$m=12$ $i=3$	$m=13$ $i=3$	$m=14$ $i=2$
$y = 572.5x^2 - 265.9x + 46.19$ y: 浊度 x: R4/(R1 + R2 + R3)	0.670 1	0.555 6	0.440 0	0.972 5	0.915 2	1.406 5	1.362 1
	$m=1$ $i=3$	$m=2$ $i=3$	$m=3$ $i=3$	$m=4$ $i=3$	$m=5$ $i=3$	$m=6$ $i=3$	$m=7$ $i=1$
	0.350 3	0.251 5	0.295 8	0.310 3	0.202 4	0.188 0	0.233 8
	$m=8$ $i=3$	$m=9$ $i=2$	$m=10$ $i=1$	$m=11$ $i=1$	$m=12$ $i=3$	$m=13$ $i=3$	$m=14$ $i=3$
	0.269 6	0.278 7	0.217 8	0.250 9	0.436 5	0.421 8	0.414 4

1) m 表示采样点编号, i 表示光谱反射率编号

根据构建的拟合模型,结合 28 个被用于模型检验的采样点水质参数实测数据,分别计算 $I_{SS}(PL)$ 与 $I_{TU}(PL)$ 模型的反演估测值,并制作实测值与估

测值分布曲线图,由图 10(a)可以看出 $I_{SS}(PL)$ 模型估测的悬浮物浓度值与对应的实测值在绝大部分下比较接近.由图 10(b)可以看到 $I_{TU}(PL)$ 模型估测

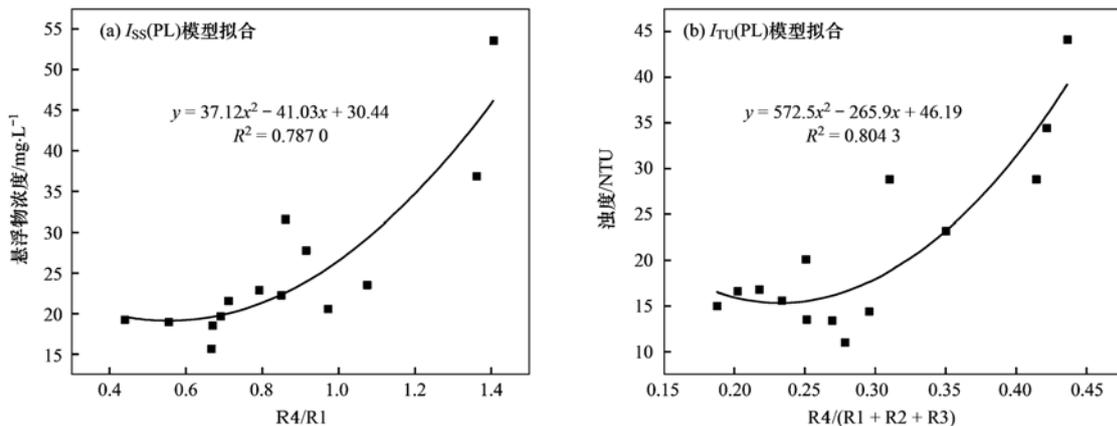


图 9 $I_{SS}(PL)$ 与 $I_{TU}(PL)$ 模型拟合

Fig. 9 Model fitting of $I_{SS}(PL)$ and $I_{TU}(PL)$

的浊度值除 15 号点(推测为异常点)以外的其他点均与对应实测值较为接近,说明这两个模型适用于悬浮物浓度与浊度反演。

表 7 展示了本实验中各种建模方法所需的时间,在用于模型制作的样本点个数均为 14 个的条件下,传统平均值法运用 MATLAB 软件中的 curve

fitting 拟合工具箱,拥有较快的运算速度;MPP 算法因运算量过大导致运算速度缓慢,需要约一周甚至更长的运算时间;而本实验所使用的 OPT-MPP 算法在运算时间上做出了较大的优化,在保障模型精度的同时可以于 2 h 左右完成回归模型的制作。

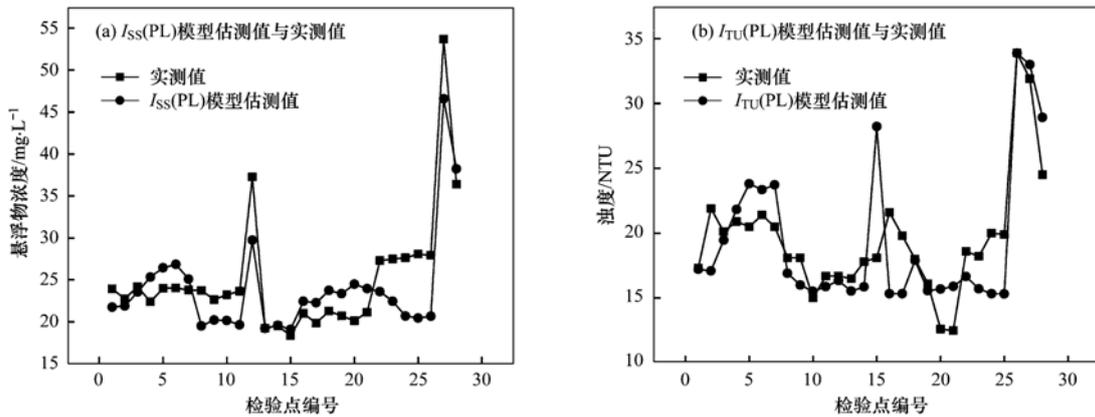


图 10 实测值和预测值对比

Fig. 10 Comparison diagram of estimated values and measured values

表 7 建模方法所需时间

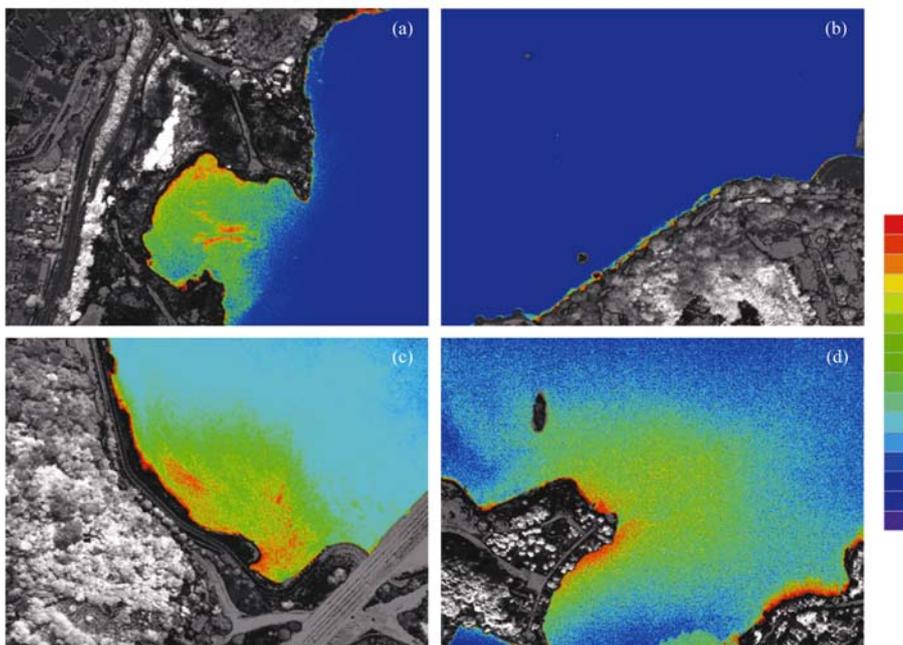
Table 7 Time required for the modeling method

建模方法	样本点个数/个	所需时间/h
传统平均值法	14	约 0.1
MPP 算法	14	约 168
OPT-MPP 算法	14	约 2

2.3 水质参数空间分布

将最优模型 $I_{SS}(PL)$ 与 $I_{TU}(PL)$ 分别代入 Band Math 波段运算工具,制作实验各区域的悬浮物与浊

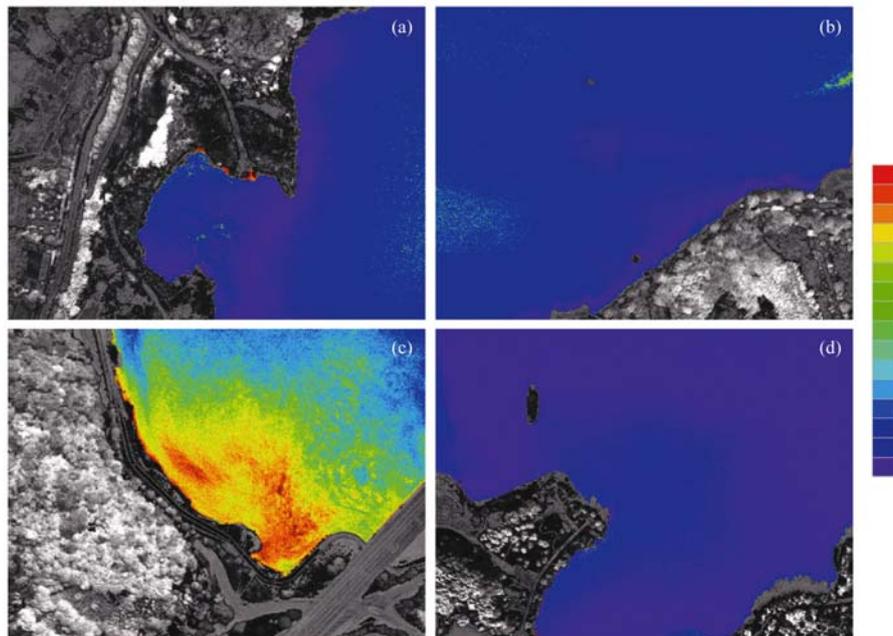
度空间分布^[26,27],悬浮物空间分布如图 11,浊度空间分布如图 12.从中可以看到,区域 1 和区域 4 中,悬浮物和浊度分布近岸边略高,推测是因为近岸边设有绿道,与人类活动有关;区域 3 的近岸区域两种参数在进行波段运算后的结果多呈红偏绿色,说明浓度值较高,与近期正在进行的青山湖绿道建设存在一定关系;而区域 2 为青山湖国家森林公园附近,近岸边多为树林,具有较好的生态环境。



(a)1 号区域 茗溪入口; (b)2 号区域 森林公园; (c)3 号区 琴山码头; (d)4 号区 青山湖大坝; 图例自下向上表示浓度值从低到高,下同

图 11 各区域悬浮物浓度空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of the suspended sediment concentration in various regions



(a) 1 号区域 茗溪入口; (b) 2 号区域 森林公园; (c) 3 号区 琴山码头; (d) 4 号区 青山湖大坝

图 12 各区域浊度空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of the turbidity in various regions

3 结论

(1) 本实验过程中, OPT-MPP 算法经过前期数据处理, 将用于计算的数据量减少为 MPP 算法的 $(1/3)^m$, 其中 m 为采样点个数, 使得计算量大大降低。

(2) OPT-MPP 算法计算所得最佳悬浮物反演模型 $I_{SS}(PL)$ 相较于传统平均值法所得最优模型 $A_{SS}(PL)$, 决定系数 R^2 从 0.775 1 提升到 0.787 0, 综合误差 CE 从 0.132 4 下降到 0.130 8, 表明模型 $I_{SS}(PL)$ 更适用于悬浮物反演。最佳浊度模型 $I_{TU}(PL)$ 相较于模型 $A_{TU}(PL)$, 决定系数 R^2 从 0.803 2 提升到 0.804 3, 综合误差 CE 从 0.194 2 下降到 0.150 3, 表明模型 $I_{TU}(PL)$ 更适用于浊度反演。

(3) 本方法不仅仅适用于悬浮物浓度与浊度两项水质参数指标, 同样适用于其他参数, 也可推广到其他相关的无人机影像领域, 特别是样本量较小的研究。

(4) 利用无人机遥感影像结合建模算法进行水质参数浓度反演, 可以有效提高反演模型的精度与反演质量, 得到更加准确的水质参数空间分布情况, 对于更准确地评估水域水质参数的时空变化和更好地进行水域治理等具有重要的应用价值和实际意义。但无人机遥感反演仍处于探索阶段, 在实际研究中也存在着一些问题和困难, 由于实验环境、仪器和时间等因素的限制, 本实验存在个别异常点且未能获取到更长时间跨度的数据, 在今后研究中将着重

考虑时间因素, 构建多时段反演模型, 对青山湖水域进行长时序的水质参数变化状况分析。

致谢: 临安区五水共治工作领导小组办公室对本项目提供了各方面的协助与支持, 特此致谢!

参考文献:

- [1] 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 Q, 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.
- [2] Shi K, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Deteriorating water clarity in shallow waters: evidence from long term MODIS and in-situ observations [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, **68**: 287-297.
- [3] 张毅, 陈成忠, 吴桂平, 等. 遥感影像空间分辨率变化对湖泊水体提取精度的影响[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(2): 335-342.
Zhang Y, Chen C Z, Wu G P, *et al.* Effects of spatial scale on water surface delineation with satellite images[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(2): 335-342.
- [4] 程春梅, 李源, 丁奕, 等. 基于 GF-1/WFV 的钱塘江叶绿素 a 和总悬浮物浓度遥感估算[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(1): 21-28.
Cheng C M, Li Y, Ding Y, *et al.* Remote sensing estimation of chlorophyll-a and total suspended matter concentration in Qiantang river based on GF-1/WFV data[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(1): 21-28.
- [5] Schaeffer B A, Schaeffer K G, Keith D, *et al.* Barriers to adopting satellite remote sensing for water quality management [J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, **34**(21): 7534-7544.
- [6] 李渊, 李云梅, 郭宇龙, 等. 基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 200-

210.
Li Y, Li Y M, Guo Y L, *et al.* Reconstruction of water hyperspectral remote sensing reflectance based on sparse representation and its application[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 200-210.
- [7] Torbick N, Hession S, Hagen S, *et al.* Mapping inland lake water quality across the Lower Peninsula of Michigan using Landsat TM imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, **34**(21): 7607-7624.
- [8] 朱利, 李云梅, 赵少华, 等. 基于 GF-1 号卫星 WFV 数据的太湖水质遥感监测[J]. *国土资源遥感*, 2015, **27**(1): 113-120.
Zhu L, Li Y M, Zhao S H, *et al.* Remote sensing monitoring of Taihu Lake water quality by using GF-1 satellite WFV data[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2015, **27**(1): 113-120.
- [9] 魏鹏飞, 徐新刚, 李中元, 等. 基于无人机多光谱影像的夏玉米叶片氮含量遥感估测[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(8): 126-133, 335.
Wei P F, Xu X G, Li Z Y, *et al.* Remote sensing estimation of nitrogen content in summer maize leaves based on multispectral images of UAV [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(8): 126-133, 335.
- [10] 张智韬, 王海峰, 韩文霆, 等. 基于无人机多光谱遥感的土壤含水率反演研究[J]. *农业机械学报*, 2018, **49**(2): 173-181.
Zhang Z T, Wang H F, Han W T, *et al.* Inversion of soil moisture content based on multispectral remote sensing of UAVs [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, **49**(2): 173-181.
- [11] Flynn K F, Chapra S C. Remote sensing of submerged aquatic vegetation in a shallow Non-Turbid River using an unmanned aerial vehicle [J]. *Remote Sensing*, 2014, **6**(12): 12815-12836.
- [12] 刘彦君, 夏凯, 冯海林, 等. 基于无人机多光谱影像的小微水域水质要素反演[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(4): 1241-1249.
Liu Y J, Xia K, Feng H L, *et al.* Inversion of water quality elements in small and micro-size water region using multispectral image by UAV [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(4): 1241-1249.
- [13] Guimaraes T T, Veronez M R, Koste E C, *et al.* Evaluation of regression analysis and neural networks to predict total suspended solids in water bodies from unmanned aerial vehicle images[J]. *Sustainability*, 2019, **11**(9): 2580.
- [14] Su T C, Chou H T. Application of multispectral sensors carried on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to trophic state mapping of small reservoirs: a case study of Tain-Pu Reservoir in Kinmen, Taiwan[J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(8): 10078-1097.
- [15] Su T C. A study of a Matching Pixel By Pixel (MPP) algorithm to establish an empirical model of water quality mapping, as based on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) images [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, **58**: 213-224.
- [16] Doña C, Chang N B, Caselles V, *et al.* Integrated satellite data fusion and mining for monitoring lake water quality status of the Albufera de Valencia in Spain [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, **151**: 416-426.
- [17] Zaman B, Jensen A, Clemens S R, *et al.* Retrieval of spectral reflectance of high resolution multispectral imagery acquired with an autonomous unmanned aerial vehicle; AggieAir™ [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2014, **80**(12): 1139-1150.
- [18] Michaelsen E, Meidow J. Stochastic reasoning for structural pattern recognition; an example from image-based UAV navigation [J]. *Pattern Recognition*, 2014, **47**(8): 2732-2744.
- [19] 孙德勇, 周晓宇, 李云梅, 等. 基于光学分类的太湖水体叶绿素 a 浓度高光谱遥感[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3002-3009.
Sun D Y, Zhou X Y, Li Y M, *et al.* Hyperspectral remote sensing of chlorophyll a concentrations in the lake Taihu, based on water optical classification [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3002-3009.
- [20] 赵庆展, 刘伟, 尹小君, 等. 基于无人机多光谱影像特征的最佳波段组合研究[J]. *农业机械学报*, 2016, **47**(3): 242-248, 291.
Zhao Q Z, Liu W, Yin X J, *et al.* Selection of optimum bands combination based on multispectral images of UAV [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, **47**(3): 242-248, 291.
- [21] 朱云芳, 朱利, 李家国, 等. 基于 GF-1 WFV 影像和 BP 神经网络的太湖叶绿素 a 反演[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(1): 130-137.
Zhu Y F, Zhu L, Li J G, *et al.* The study of inversion of chlorophyll a in Taihu based on GF-1 WFV image and BP neural network [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(1): 130-137.
- [22] 冯驰, 金琦, 王艳楠, 等. 基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1557-1564.
Feng C, Jin Q, Wang Y N, *et al.* Remote sensing estimation of chlorophyll-a concentration in inland lakes based on GOCI image and optical classification of water body [J]. *Environmental science*, 2015, **36**(5): 1557-1564.
- [23] 邹伟, 李太民, 刘利, 等. 苏北骆马湖大型底栖动物群落结构及水质评价[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(5): 1177-1187.
Zou W, Li T M, Liu L, *et al.* Macrozoobenthic community structure and water quality assessment of Lake Luoma, Jiangsu Province, China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(5): 1177-1187.
- [24] 曹引, 冷运涛, 赵红莉, 等. 内陆水体水质参数遥感反演集合建模方法[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3940-3951.
Cao Y, Ye Y T, Zhao H L, *et al.* Ensemble modeling methods for remote sensing retrieval of water quality parameters in inland water [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3940-3951.
- [25] 王珊珊, 李云梅, 王桥, 等. 基于 GOCI 影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3620-3632.
Wang S S, Li Y M, Wang Q, *et al.* Remote Sensing inversion of diffuse attenuation coefficient in Lake Taihu based on the GOCI images [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3620-3632.
- [26] Fisher J R B, Acosta E A, James Kennedy-Frank P, *et al.* Impact of satellite imagery spatial resolution on land use classification accuracy and modeled water quality [J]. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2018, **4**(2): 137-149.
- [27] 高燕, 梁泽毓, 王彪, 等. 基于无人机和卫星遥感影像的升金湖草滩植被地上生物量反演[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(2): 517-528.
Gao Y, Liang Z Y, Wang B, *et al.* UAV and satellite remote sensing images based aboveground biomass inversion in the meadows of Lake Shengjin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(2): 517-528.

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)