

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)

内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究

黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

摘要: 利用具有较大时空差异性的水体组分和光学特性数据集对现有叶绿素半分析(三波段和四波段模型)和生物光学反演模型进行检验, 研究叶绿素反演模型的普适性及其影响因素. 结果表明, 叶绿素生物光学分析反演模型具有较高的普适性, 总体反演精度可以接受, 但反演精度受叶绿素比吸收系数时空差异影响较大; 三波段和四波段叶绿素反演模型反演精度较高, 但是由于水体组分组成及其生物光学特性差异使得反演因子最佳波段位置和反演模型参数存在较大的变异性, 大大降低了三波段和四波段叶绿素反演模型的普适性, 其中后向散射系数光谱曲线形状和叶绿素比吸收系数是三波段和四波段模型普适性的主导影响因素.

关键词: 生物光学模型; 普适性; 叶绿素; 分析模型; 太湖

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0525-07

Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll-a Retrieval Model in Inland Water Body

HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, YANG Hao, LÜ Heng, CHEN Xia, WANG Yan-hua

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: The semi-analytical three-and four-band model and bio-optical analytical model of chlorophyll-a were checked by the water constituents and optical properties with high spatio-temporal variation. The influencing factors and universality of the retrieval model were studied by the modeling checking results. The study results indicate that the universality of bio-optical analytical model is much higher than the three-and four-band model, and the accuracy of the retrieval model is acceptable, but the accuracy of the retrieval model was highly affected by the specific absorption coefficient of chlorophyll-a. The accuracy of the three-and four-band model is higher than the bio-optical analytical model. However, the universality of the three-and four-band model is not very high, because of the optimal wavelength position of the retrieval factors and the greater variability of the retrieval model parameters. The spectral shape of particle backscattering coefficient and chlorophyll-a specific absorption coefficient are the dominant influencing factors of the three-and four-band retrieval model.

Key words: bio-optical model; universality; chlorophyll-a; analytical model; Taihu Lake

叶绿素是衡量水体浮游植物生物量和水体富营养化重要指标, 同时叶绿素的定量研究对于水生生态系统中的初级生产力、水气界面碳循环具有重要的意义. 由于大洋水色要素组分(主要包括有色溶解有机质、非生物悬浮颗粒物和浮游植物^[1])来源较为单一和稳定, 利用遥感反演叶绿素算法相对成熟, 并得到了广泛运用^[2~6]. 随着内陆湖泊生态环境问题的逐渐突出, 海洋水色遥感的理论和技术被逐步应用于内陆湖泊水体, 并得到了进一步的丰富和发展^[7]. 但与大洋水色要素组成相比, 湖泊水色要素物质组成受陆源影响较大, 水体中颗粒物的理化性质具有较强的时空差异性, 从而导致湖泊水色要素生物光学特性具有较大的变异性, 最终使得建立普适性强、精度高的湖泊水质参数反演模型成为一个难点. 因此, 相比海洋水色遥感, 湖泊水色遥感在理论、方法和技术上虽与其一脉相承, 但研究的对象更为复杂, 所解决的问题更具挑战性. 处长江中

下游地区的太湖属于典型的大型浅水湖泊, 面积约为2 338 km², 最大水深不足3 m, 平均水深仅为1.89 m^[8], 湖泊动力比[湖泊面积(km²)的平方根/平均湖深(m)]高达25.6^[9]. 同时太湖处于亚热带季风区, 全年90%时间受盛行季风和台风的影响, 在风浪驱动下太湖沉积物极容易发生再悬浮和水平迁移再分布. 风浪引起的沉积物再悬浮使得水色要素组成发生变化, 从而改变了水体主导光学因子, 增加了水体光学的复杂程度, 降低了遥感反演模型的反演精度和普适性, 限制了遥感技术在内陆浅水湖泊中的应用. 故对于水体光学特性较为复杂的二类(Case II)水体, 目前并没有一个普适性(时间和空间统一

收稿日期: 2012-04-25; 修订日期: 2012-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030751, 11KJ170003, 40701136, 41103047, 50908116); 高层次人才引进科研启动基金项目(2011105XGQ0244); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 黄昌春(1982~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境污染遥感监测, E-mail: huangchangchun_aaa@163.com

模型)的水色要素及其理化性质反演模型,学者主要针对不同的研究区甚至不同的时间提出相应的水色要素反演模型,这些模型无论是反演因子还是表达函数都存在较大的差异性^[10~14].这使得仅太湖水域,针对不同野外采样数据集,叶绿素反演模型就有十余种(波段比值^[15,16]、三波段模型^[17]、四波段模型^[18]、半分析模型^[19]、生物光学模型等^[20]).系统性地研究和对比现有模型的适用范围、反演精度、影响因素等是建立具有普适性叶绿素反演模型重要的保证和前提.

本研究利用具有较大时空差异的水色和光学特性数据(太湖5次野外实验、巢湖、滇池和三峡水库各一次实验)对叶绿素反演模型的精度和普适性

进行检验,对比研究目前主流叶绿素反演模型的优缺点和影响因素,以期建立具有更高反演精度和普适性的叶绿素反演模型奠定经验基础.

1 数据与方法

1.1 数据

2006~2010年5次太湖野外实验数据、2009年巢湖、2009年滇池和2009年三峡野外实验数据,样点分布如图1所示,野外数据相关信息如表1所示.测量参数包括水体高光谱遥感反射率、悬浮颗粒物浓度、叶绿素a浓度(Chl-a)、吸收系数、散射系数和后向散射系数数据.参数测量方法参见文献[21].

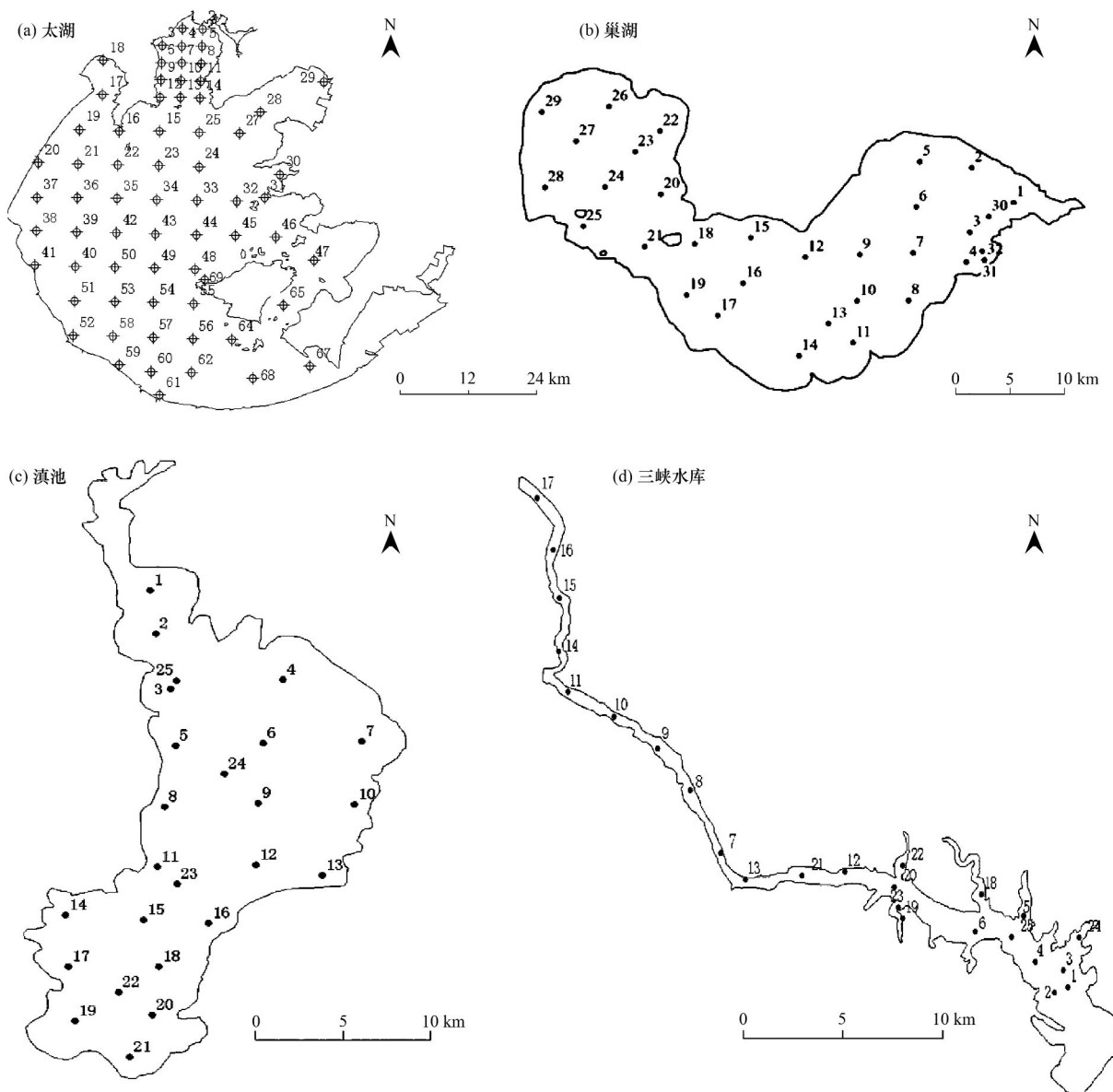


图1 野外数据采集样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sample stations in the study areas

表 1 野外采样数据相关信息¹⁾

Table 1 Sampling information						
区域	时间(年-月)	<i>N</i>	SPM/mg·L ⁻¹	Chl-a/μg·L ⁻¹	<i>a_{ph}</i> (440)/m ⁻¹	<i>a_{ph}</i> [*] (440)/m ² ·mg ⁻¹
太湖	2006-08	62	6.5~84.5	5.1~54.8	0.20~3.60	0.017~0.088
	2007-11	42	8.5~116.6	3.8~65.1	0.21~2.91	0.020~0.094
	2008-11	65	13.3~68.8	3.0~64.8	0.12~3.29	0.013~0.089
	2009-04	36	12.9~178.2	3.0~55.1	0.12~2.28	0.028~0.097
	2010-08	47	15.4~122.2	3.1~110.6	0.18~4.65	0.026~0.089
巢湖	2009-06	32	17.8~83.9	23.8~165.8	0.79~4.73	0.025~0.049
滇池	2009-09	26	17.1~66.6	45.5~156.7	2.23~7.24	0.033~0.067
三峡	2009-08	23	3.8~2.2	1.9~18.8	0.12~0.60	0.024~0.082

1) *N* 为采样样点数目,SPM 为悬浮颗粒物浓度,Chl-a 为叶绿素浓度,*a_{ph}*(440) 为 440 nm 处浮游植物吸收系数,*a_{ph}*^{*}(440) 为 440 nm 处浮游植物比吸收系数

1.2 模型精度评价

均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAPE)和相对误差(RE)被用来衡量反演模型的精度.其计算公式分别为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{imea} - x_{imod})^2}{n}}$$
 (1)

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{imea} - x_{imod}}{x_{imea}} \right|}{n}$$
 (2)

$$RE = \frac{x_{imod} - x_{imea}}{x_{imea}}$$
 (3)

式中,*x_{imod}* 为估算值,*x_{imea}* 为测量值,*n* 为样本数.

2 结果与分析

2.1 叶绿素空间区域反演模型

波段比值、三波段和四波段模型是目前内陆水体较为成功的叶绿素反演算法,尽管针对不同的数据集其模型参数、波段选择存在较大的差异性.针

对该 3 种反演算法,利用太湖 2006~2010 年、巢湖 2009 年、三峡水库 2009 年和滇池 2009 年野外实测遥感反射率数据和叶绿素 a 浓度数据中 2/3 数据进行建模,1/3 数据进行验证.经过多次迭代比值运算,确定与叶绿素浓度相关性最高的一组遥感反射率比值,进行回归参数估计,建立决定系数最高的叶绿素比值反演模型.根据叶绿素三波段模型^[22]和四波段^[18]反演模型建设条件,利用自编 Matlab 优化程序确定三波段和四波段模型波长位置,并进行线性回归参数估计,确定太湖、巢湖、滇池和三峡水库的三波段和四波段叶绿素反演模型.不同区域的叶绿素反演模型如表 2 所示.太湖、巢湖和三峡水库的叶绿素反演模型中四波段反演模型决定系数最高分别达到 0.81、0.93 和 0.97.但是滇池叶绿素反演模型中三波段模型效果最好,而四波段模型效果最差.由此可见,不同叶绿素反演模型在不同区域具有不同的反演效果,无论是比值反演模型、还是三波段模型或四波段模型在空间上普适性较低.即使在四波段反演模型反演效果最好的太湖、巢湖和三峡

表 2 不同区域叶绿素反演模型

Table 2 Chlorophyll-a retrieval model in different study areas			
区域	变量	模型	<i>R</i> ²
太湖	<i>R_{rs}</i> (704)/ <i>R_{rs}</i> (683)	Chl-a = 5.164 <i>X</i> ² + 86.68 <i>X</i> - 71.12	0.74
	[1/ <i>R_{rs}</i> (665) - 1/ <i>R_{rs}</i> (705)] · <i>R_{rs}</i> (740)	Chl-a = 65.30 <i>X</i> + 27.78	0.79
	[1/ <i>R_{rs}</i> (664) - 1/ <i>R_{rs}</i> (701)]/[1/ <i>R_{rs}</i> (742) - 1/ <i>R_{rs}</i> (726)]	Chl-a = 54.295 <i>X</i> + 16.117	0.81
巢湖	<i>R_{rs}</i> (706)/ <i>R_{rs}</i> (673)	Chl-a = 170.27 <i>X</i> ² - 313.79 <i>X</i> + 175.53	0.81
	[1/ <i>R_{rs}</i> (665) 1/ <i>R_{rs}</i> (705)] · <i>R_{rs}</i> (740)	Chl-a = 453 <i>X</i> + 22.517	0.88
	[1/ <i>R_{rs}</i> (665) - 1/ <i>R_{rs}</i> (700)]/[1/ <i>R_{rs}</i> (740) - 1/ <i>R_{rs}</i> (725)]	Chl-a = 164.45 <i>X</i> + 14.646	0.93
三峡	<i>R_{rs}</i> (700)/ <i>R_{rs}</i> (680)	Chl-a = 976.376 <i>X</i> ² - 23.959 <i>X</i> + 148.2	0.82
	[1/ <i>R_{rs}</i> (684) - 1/ <i>R_{rs}</i> (688)] · <i>R_{rs}</i> (694)	Chl-a = 164.79 <i>X</i> + 3.2426	0.88
	[1/ <i>R_{rs}</i> (685) - 1/ <i>R_{rs}</i> (700)]/[1/ <i>R_{rs}</i> (710) - 1/ <i>R_{rs}</i> (705)]	Chl-a = 9.9924 <i>X</i> + 12.51	0.97
滇池	<i>R_{rs}</i> (708)/ <i>R_{rs}</i> (681)	Chl-a = 5.924 <i>X</i> ² + 51.064 <i>X</i> - 43.315	0.79
	[1/ <i>R_{rs}</i> (678) - 1/ <i>R_{rs}</i> (700)] · <i>R_{rs}</i> (737)	Chl-a = 144.41 <i>X</i> + 12.808	0.82
	[1/ <i>R_{rs}</i> (656) - 1/ <i>R_{rs}</i> (694)]/[1/ <i>R_{rs}</i> (732) - 1/ <i>R_{rs}</i> (718)]	Chl-a = 180.57 <i>X</i> + 57.648	0.72

这 3 个区域,其模型的波段位置和模型参数具有较大的差异.

对比 4 个区域最佳反演模型(太湖、巢湖和三峡为四波段模型;滇池为三波段模型)的反演结果(如表 3),可以发现,滇池三波段模型反演效果最好,MAPE 仅为 15%;其次是巢湖四波段模型和太湖四波段模型,MAPE 分别为 16% 和 19%;三峡的

四波段模型效果最差,MAPE 高达 31%. 可见不同的模型在不同区域具有不同的应用效果,由模型反演效果详细统计表(表 3)可知,相对于其他模型,四波段模型在太湖、巢湖和三峡相对反演结果最好,但是在这 3 个区域的应用效果却大相径庭,最好的反演结果为巢湖地区,最差的为三峡水库. 而在滇池区域,三波段模型反演结果要优于四波段模型.

表 3 不同区域最优叶绿素 a 模型反演精度相关统计表

Table 3 Accuracy of the best chlorophyll-a retrieval model in different study areas

区域	MAPE	RMSE	RE				
			最大值	最小值	中值	偏差	变异系数
太湖	0.19	7.14	0.57	-0.39	-0.06	0.18	-6.41
巢湖	0.16	12.14	0.35	-0.40	0.011	0.16	-30.75
三峡	0.31	2.30	0.68	-0.56	-0.17	0.28	-3.75
滇池	0.15	19.99	0.18	-0.44	-0.05	0.14	-3.21

2.2 叶绿素浓度等级反演模型

将 2006 ~ 2010 年太湖、2009 年巢湖、三峡水库和滇池野外实验数据所有样点数据按照叶绿素 a 浓度大小进行排序,将样点数平均分成三等份,最终得到叶绿素 3 个浓度区间:0 ~ 10、10 ~ 30 和 > 30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 在 3 个浓度区间内同样利用 2/3 数据进行建模,1/3 数据进行验证,建模方法与 3.1 节中相同. 分别得到不同浓度区间内叶绿素最佳反演模型(反演值与测量值之间 RMSE 最小). 反演因子和表达函数如表 4 所示. 叶绿素浓度在 0 ~ 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 10 ~ 30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间三波段模型是最佳模型,但是波段位置和模型系数存在较大差异;而在 > 30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围,波段比值是叶绿素最佳反演模型.

对比 3 个叶绿素浓度区间内的最佳反演模型(太湖、巢湖和三峡为四波段模型;滇池为三波段模型)的反演结果如表 5 所示. 可以发现, > 30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,叶绿素反演效果最好,MAPE 仅为 22%; 10 ~ 30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内的叶绿素反演模型反演效果次之,MAPE 为 30%; 而 0 ~ 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,叶绿素反演模型效果最差,MAPE 高达 43%. 可见,在一定浓度区域内四波段模型反演效果不如三波段和波段比值模型,而随着叶绿素浓度的提高,其反演模型精度也在不断提高. 与四波段相比,三波段模型和波段比值模型由于其反演因子简单,引入的不确定性因素也相应较少,有其自身的优势和适用范围.

表 4 不同叶绿素浓度等级的叶绿素反演模型

Table 4 Chlorophyll-a retrieval model in different chlorophyll-a concentration range

浓度范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	变量	模型	R^2
0 ~ 10	$[1/R_{rs}(684) \sim 1/R_{rs}(688)] \cdot R_{rs}(694)$	$\text{Chl-a} = 164.79X + 3.2426$	0.88
10 ~ 30	$[1/R_{rs}(665) \sim 1/R_{rs}(705)] \cdot R_{rs}(740)$	$\text{Chl-a} = 453X + 22.517$	0.88
> 30	$R_{rs}(706)/R_{rs}(673)$	$\text{Chl-a} = 170.27X^2 - 313.79X + 175.53$	0.80

表 5 不同叶绿素浓度等级的叶绿素反演模型反演精度相关统计表

Table 5 Accuracy of the best chlorophyll-a retrieval model in different chlorophyll-a concentration range

浓度范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	MAPE	RMSE	RE				
			最大值	最小值	中值	偏差	变异系数
0 ~ 10	0.43	2.90	0.96	-0.38	-0.37	0.28	-1.29
10 ~ 30	0.30	6.90	0.88	-0.49	0.07	0.30	6.92
> 30	0.22	30.50	0.90	-0.75	0.03	0.22	11.12

2.3 叶绿素生物光学分析反演模型

根据水体辐射传输机制,水体的遥感反射率 $[R_{rs}(\lambda)]$ 可以通过水体的总吸收系数 $[a(\lambda)]$ 、总后向散射系数 $[b_b(\lambda)]$ 、光场分布参数 (Q) 、水体

折射率 (n) 和气-水界面的透过率 (t) 等参数进行近似描述:

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{f}{Q} \frac{t^2}{n^2} \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \tag{4}$$

式中,水体的总吸收系数 $[a(\lambda)]$ 可以表示为浮游植物吸收系数 $[a_{ph}(\lambda)]$ 、非色素颗粒物吸收系数 $[a_{NAP}(\lambda)]$ 、黄质吸收系数 $[a_{CDOM}(\lambda)]$ 和纯水吸收系数 $[a_w(\lambda)]$ 之和.将吸收系数和后向散射系数分别进行参数化,利用优化算法反演参考波段处浮游植物吸收系数,再通过参考波段处叶绿素比吸收系数对水体中的叶绿素进行反演^[20],该反演模型具有严格的物理意义,并且只需要叶绿素比吸收系数这一已知量就可以对水体中的叶绿素浓度进行反演.

表 6 不同区域叶绿素生物光学反演模型反演精度相关统计表

Table 6 Accuracy of bio-optical analytical chlorophyll-a retrieval model in different study areas

区域	时间(年)	MAPE	RMSE	RE				
				最大值	最小值	中值	偏差	变异系数
太湖	2006	0.22	6.35	0.42	-0.51	-0.15	0.25	-1.98
	2007	0.24	5.78	0.45	-0.52	-0.04	0.32	-7.72
	2008	0.21	4.38	0.44	-0.46	0.02	0.24	-240.12
	2009	0.24	7.11	0.58	-0.49	-0.13	0.29	-6.26
	2010	0.23	10.53	0.44	-0.59	-0.10	0.26	-2.65
巢湖	2009	0.43	40.92	-0.20	-0.60	-0.42	0.10	-0.23
滇池	2009	0.27	31.09	0.08	-0.47	-0.30	0.15	-0.59
三峡	2009	0.33	5.31	0.32	-0.60	-0.24	0.36	-1.93
所有样点		0.26	17.68	0.58	-0.60	-0.14	0.28	-2.31

3 讨论

叶绿素生物光学分析反演模型不需要建模数据集,因此其模型构建不受建模数据的生物光学特性的影响,故叶绿素生物光学反演模型具有较强的普适性.但是叶绿素生物光学反演模型的反演精度受吸收、后向散射系数参数化模型精度和参考波段处的叶绿素比吸收系数的影响.与生物光学分析模型相比,三波段模型和四波段模型在建模过程中,首先需要通过迭代确定最优波段位置,进而确定叶绿素最佳反演因子,再通过线性或非线性回归确定反演模型函数形式;三波段和四波段反演模型需要一定数量的建模数据,由于受建模数据集生物光学特性等的影响,三波段和四波段模型最佳反演因子的波长位置、反演函数形式及其模型参数存在一定的差异性,从而使三波段和四波段模型在时间和空间上的普适性较低.影响三波段和四波段模型普适性的影响因子存在于其模型构建的条件之中.

$$c_{chl-a} = \frac{[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)]R_{rs}^{-1}(\lambda_3)a_w(\lambda_3) - a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)}{a_{ph}^*(\lambda_1)} \quad (5)$$

$$c_{chl-a} = \frac{[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)]R_{rs}^{-1}(\lambda_3)a_w(\lambda_3) - a_w(\lambda_4) - a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)}{a_{ph}^*(\lambda_1)} \quad (6)$$

然而,在内陆浅水湖泊富营养化浑浊水体中,由于每个样点生物光学特性存在较大的差异性,

本研究中叶绿素比吸收系数为4个研究区域所有样点的平均值.反演结果如表6所示,总体而言,叶绿素生物光学反演模型反演精度较高,但与叶绿素最佳区域反演模型三波段和四波段模型反演精度相比(表3),叶绿素生物光学模型的反演效果有所降低,MAPE大约降低了10%左右.其中巢湖反演效果最差,这主要是巢湖叶绿素比吸收系数要低于所有样点平均值,从而使得巢湖叶绿素浓度被严重低估(其RE最大值仍小于20%).

根据三波段和四波段模型所有假设条件,利用遥感反射率进行数学运算可以得到叶绿素与遥感反射率之间的关系如式(5)和(6)所示.可以发现,三波段和四波段模型在最佳反演因子波长位置确定的情况下,由于纯水吸收系数较为确定,可以认为是常数,因此三波段模型参数 $\left[\frac{a_w(\lambda_3)}{a_{ph}^*(\lambda_1)}\right]$ 和 $\left[\frac{a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)}{a_{ph}^*(\lambda_1)}\right]$ 或四波段模型参数 $\left[\frac{a_w(\lambda_3) - a_w(\lambda_4)}{a_{ph}^*(\lambda_1)}\right]$ 和 $\left[\frac{a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)}{a_{ph}^*(\lambda_1)}\right]$ 只受浮游植物比吸收系数 $[a_{ph}^*(\lambda_1)]$ 的影响,所以三波段模型和四波段模型参数(斜率和截距)具有共变性.然而无论是已有的研究还是本研究建立的三波段和四波段模型,其模型参数的变化存在较大差异性(主要体现为斜率变化幅度较大,而截距变化幅度较小).由此可以确定模型参数除受 $a_{ph}^*(\lambda_1)$ 影响之外,还受到其他影响因素的影响.

使得建模数据集中样点之间叶绿素高和低吸系数对应的遥感反射率波长位置、非色素和CDOM

吸收系数接近的波长位置不具有一致性. 因此即使使用迭代优化算法, 希望抵消 λ_1 和 λ_2 处的非色素颗粒物和 CDOM 吸收系数也是非常困难的. 因此当部分样点 λ_1 和 λ_2 处的非色素颗粒物和 CDOM 吸收系数难以抵消时, 式(5)和(6)形式的三波段和四波段需要改写为式(7)和(8)所示. 此时影响三波段和四波段模型参数(斜率和截距)变

$$C_{chl-a} = \frac{[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] R_{rs}^{-1}(\lambda_3) a_w(\lambda_3)}{[a_{ph}^*(\lambda_1) - a_{ph}^*(\lambda_2)]} - \frac{a_w(\lambda_1) + a_{CDOM}(\lambda_1) + a_{NAP}(\lambda_1) - a_w(\lambda_2) - a_{CDOM}(\lambda_2) - a_{NAP}(\lambda_2)}{[a_{ph}^*(\lambda_1) - a_{ph}^*(\lambda_2)]} \quad (7)$$

$$C_{chl-a} = \frac{[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] [R_{rs}^{-1}(\lambda_3) - R_{rs}^{-1}(\lambda_4)] a_w(\lambda_3) - a_w(\lambda_4)}{[a_{ph}^*(\lambda_1) - a_{ph}^*(\lambda_2)]} - \frac{a_w(\lambda_1) + a_{CDOM}(\lambda_1) + a_{NAP}(\lambda_1) - a_w(\lambda_2) - a_{CDOM}(\lambda_2) - a_{NAP}(\lambda_2)}{[a_{ph}^*(\lambda_1) - a_{ph}^*(\lambda_2)]} \quad (8)$$

假设后向散射系数随波长变化较小是三波段和四波段模型进行波段运算的基本条件, 而在内陆富营养化浑浊水体中, 后向散射系数随波段呈幂函数递减. 因此在波段运算过程中, 应该乘以与后向散射系数幂指数相关的参数, 三波段和四波段模型如式(9)和(10). 在三波段和四波段模型中, 由于在优化波段选择时需要抵消非色素颗粒物和 CDOM 吸收系数, 故 $\lambda_1 \setminus \lambda_0$ 和 $\lambda_2 \setminus \lambda_0$ 较接近, 因此线性函数截距变化较小. 但是, 其线性函数斜率除受比吸收系数影响外, 还受到 $\lambda_3 \setminus \lambda_0$ 、 $\lambda_2 \setminus \lambda_0$ 和 $\lambda_4 \setminus \lambda_0$ 的影响. 向散射系数光谱曲线形状(幂指

化的因素较为复杂, 除受比吸收系数 $[a_{ph}^*(\lambda_1)]$ 和 $[a_{ph}^*(\lambda_2)]$ 影响之外, 其模型截距还受非色素颗粒物和 CDOM 吸收系数影响. 可见, 影响模型截距的因素要比影响模型斜率的因素复杂得多. 但是现有模型参数表明截距的变化程度要远小于斜率的变化程度, 因此存在其他重要因素影响模型斜率的变化.

数)的影响. 当 Y 介于 0 ~ 4 之间, 假设 $\left(\frac{\lambda_4}{\lambda_0}\right)^Y \approx \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_0}\right)^Y = 1.07$ (即 λ_0 取介于 λ_1 和 λ_2 之间的 690 nm; λ_3 、 λ_4 取平均值 740 nm), $\left(\frac{\lambda_4}{\lambda_0}\right)^Y \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_0}\right)^Y \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_0}\right)^Y$ 变化范围可以达到 1 ~ 1.72, 由于叶绿素比吸收系数数值较小, 而 $a_w(\lambda_3)$ 较大, $\left(\frac{\lambda_4}{\lambda_0}\right)^Y \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_0}\right)^Y \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_0}\right)^Y$ 变化范围可以导致线性函数斜率发生 1 ~ 2 个数量级的变化.

$$C_{chl-a} = \frac{[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] R_{rs}^{-1}(\lambda_3) a_w(\lambda_3)}{\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_0}\right)^Y \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_0}\right)^Y a_{ph}^*(\lambda_1)} - \frac{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_0}\right)^Y a_w(\lambda_1) - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)^Y a_w(\lambda_2)}{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_0}\right)^Y a_{ph}^*(\lambda_1)} \quad (9)$$

$$C_{chl-a} = \frac{[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] R_{rs}^{-1}(\lambda_3) \left[\left(\frac{\lambda_4}{\lambda_0}\right)^Y a_w(\lambda_3) - \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_0}\right)^Y a_w(\lambda_4) \right]}{\left(\frac{\lambda_4}{\lambda_0}\right)^Y \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_0}\right)^Y \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_0}\right)^Y a_{ph}^*(\lambda_1)} - \frac{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_0}\right)^Y a_w(\lambda_1) - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0}\right)^Y a_w(\lambda_2)}{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_0}\right)^Y a_{ph}^*(\lambda_1)} \quad (10)$$

综上所述, 影响三波段和四波段模型参数及其普适性主要是叶绿素比吸收系数、非色素、CDOM 吸收系数和后向散射系数曲线形状. 其中模型斜率主要受比吸收系数和后向散射系数光谱曲线形状影响, 而模型截距受叶绿素比吸收系数、非色素和 CDOM 吸收系数影响. 对比本研究三波段和四波段模型参数可以发现, 叶绿素最优线性模型(太湖、巢湖和三峡为四波段模型; 滇池为三波段模型)斜率变化较大, 而其线性模型截距变化较小(如表 2). 由

此可见, 通过迭代抵消 λ_1 和 λ_2 处的非色素颗粒物和 CDOM 吸收系数影响可以基本实现, 色素颗粒物和 CDOM 吸收系数差值对线性模型截距影响较小; 或 λ_1 和 λ_2 处的非色素颗粒物和 CDOM 吸收系数之间的差值与叶绿素比吸收系数差值之间具有一定的共变性, 从而使得线性模型截距变化较小. 线性模型斜率受色素颗粒物和 CDOM 吸收系数变化影响较小, 其变化则主要是由后向散射系数光谱曲线形状引起的, 然而后向散射系数光谱曲线对线性模型斜率的影响并未

得到足够的重视,因此在叶绿素反演过程中还需要对后向散射系数进行详细研究。

4 结论

(1)具有明确物理意义的叶绿素生物光学分析模型的普适性较高,但其反演精度受到固有光学量模型参数化精度和叶绿素比吸收系数的时空差异影响较大。

(2)叶绿素三波段和四波段模型具有较高的反演精度,但其需要一定的建模数据,并且其最佳反演因子的波长位置、反演模型的参数受水体组分生物光学特性影响具有较大的时空差异性,从而使得三波段和四波段模型的普适性将会较低。后向散射系数光谱曲线形状和叶绿素比吸收系数是三波段和四波段模型普适性的主导影响因素。

(3)相对于三波段模型,四波段模型增加一波段用于减小近红外波段颗粒物吸收系数对叶绿素反演结果的影响,进而提高叶绿素四波段模型的反演精度。但是内陆水体组分及其光学特性时空差异性极大,当色素颗粒物吸收系数较大,近红外颗粒物吸收系数较小时,四波段模型增加了一个波段的同时也增加反演模型的不确定性,有时甚至降低了模型的反演精度。

参考文献:

- [1] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 71.
- [2] Carder K L, Chen F R, Cannizzaro J P, *et al.* Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a [J]. *Advances in Space Research*, 2004, **33**(7): 1152-1159.
- [3] Dall'Olmo G, Gitelson A A, Rundquist D C, *et al.* Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **96**(2): 176-187.
- [4] Darecki M, Stramski D. An Evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89**(3): 326-350.
- [5] Hoge F E, Lyon P E, Swift R N, *et al.* Validation of Terra-MODIS phytoplankton chlorophyll fluorescence line height I. Initial airborne lidar results [J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(15): 2767-2771.
- [6] 赵冬至, 曲元, 张丰收, 等. 用 TM 图象估算海表面叶绿素浓度的神经网络模型[J]. *海洋环境科学*, 2001, **20**(1): 16-21.
- [7] 马荣华, 唐军武, 段洪涛, 等. 湖泊水色遥感研究进展[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 143-158.
- [8] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] Bachmann R W, Hoyer M V, Canfield D E. The potential for wave disturbance in shallow Florida lakes. [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2000, **16**(4): 281-291.
- [10] 马荣华, 戴锦芳. 结合 Landsat ETM 与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量[J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(2): 97-103.
- [11] 吕恒, 李新国, 周连义, 等. 基于反射光谱的太湖北部叶绿素 a 浓度定量估算[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(4): 349-355.
- [12] 席红艳, 张渊智, 丘仲峰, 等. 基于半分析算法的香港邻近海域叶绿素 a 浓度反演[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 199-206.
- [13] Zhang Y L, Liu M L, Qin B Q, *et al.* Modeling remote sensing reflectance and retrieving chlorophyll a concentration in extremely turbid Case- 2 waters (Lake Taihu, China) [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(7): 1937-1948.
- [14] Zhang M W, Tang J W, Dong Q, *et al.* Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**: 392-403.
- [15] Jiao H B, Zha Y, Gao J, *et al.* Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Tai, China using in situ hyperspectral data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4267-4276.
- [16] 马荣华, 戴锦芳. 应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度[J]. *遥感学报*, 2005, **9**(1): 78-86.
- [17] 杨煜, 李云梅, 王桥, 等. 富营养化的太湖水体叶绿素 a 浓度模型反演[J]. *地球信息科学学报*, 2009, **11**(5): 597-603.
- [18] Le C F, Li Y M, Zha Y, *et al.* A four-band semi-analytical model for estimationg chlorophyll a in highly turbid lakes: the case of Taihu Lake, China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(6): 1175-1182.
- [19] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 太湖水体悬浮颗粒物生物光学模型及 MERIS 数据反演[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, **31**(4): 367-374.
- [20] 李云梅, 黄家柱, 韦玉春, 等. 用分析模型方法反演水体叶绿素的浓度[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(2): 169-175.
- [21] 黄昌春. 顾及颗粒物垂直分布的太湖水体组分生物光学模型反演研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- [22] Gitelson A A, Dall'Olmo G, Moses W, *et al.* A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbidwaters; Validation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(9): 3582-3593.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i>	(409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i>	(416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i>	(434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i>	(441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui	(448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun	(455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i>	(462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i>	(468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i>	(476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i>	(484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan	(494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao	(499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i>	(509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i>	(517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i>	(525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i>	(532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i>	(540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i>	(547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i>	(555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke	(561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i>	(570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i>	(576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya	(583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i>	(596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i>	(604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping	(611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i>	(616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i>	(622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i>	(629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i>	(635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen	(642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i>	(647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i>	(653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i>	(662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei	(668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i>	(676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i>	(685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i>	(692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i>	(698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i>	(705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i>	(712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i>	(718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i>	(732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i>	(740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i>	(746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i>	(753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i>	(760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i>	(767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i>	(773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i>	(781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i>	(789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i>	(795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i>	(804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-bin, <i>et al.</i>	(810)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行