

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与铊的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

基于 Landsat 8 影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数

张毅博^{1,2}, 张运林^{2*}, 查勇¹, 施坤^{2,3}, 周永强^{2,3}, 刘明亮⁴

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 是指可以被植物利用并进行光合作用的那部分太阳辐射, 其进入湖水后受光学组分 (悬浮颗粒、有色可溶性有机物和浮游植物) 的吸收和散射作用发生衰减, 对湖泊生物的密度和分布具有重要影响。本研究构建了基于 Landsat 8 影像数据的较为清洁的新安江水库 PAR 漫射衰减系数的遥感估算模型, 进而分析其时空分布特征及主要影响因素。结果表明, 利用 Landsat 8 的第二、三和第八波段构建的多元回归模型能够得到较为准确的估算结果, 模型决定系数为 0.87。利用独立样本对构建的模型验证, 预测值和实测值相对误差绝对值均值为 9.16%, 均方根误差为 0.06 m^{-1} , 由此可见利用 Landsat 8 数据的 3 个波段, 采用多元回归模型能够较好地估算较清洁水体的 PAR 漫射衰减系数。基于 14 景 Landsat 8 影像发现, 新安江水库 PAR 漫射衰减系数季节差异性明显, 秋季 (9~11 月) 和夏季 (6~8 月) PAR 漫射衰减系数较高, 分别为 $(0.82 \pm 0.60) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.77 \pm 0.41) \text{ m}^{-1}$, 而冬季 (12~次年 2 月) 和春季 (3~5 月) PAR 漫射衰减系数相对较低, 分别为 $(0.56 \pm 0.50) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.40 \pm 0.45) \text{ m}^{-1}$ 。新安江水库 PAR 漫射衰减系数空间差异性显著, 全湖 PAR 漫射衰减系数变化范围为 $(0.002 \sim 13.86) \text{ m}^{-1}$, 均值为 $(0.64 \pm 0.49) \text{ m}^{-1}$ 。漫射衰减系数的季节变化主要是由季节性降雨和浮游植物季节性生长引起, 空间差异性主要由外源河流输入和部分水域采砂过程导致悬浮物浓度变化引起。

关键词: Landsat 8; 新安江水库; PAR 漫射衰减系数; 经验方法; 遥感估算

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2015) 12-4420-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.12.013

Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data

ZHANG Yi-bo^{1,2}, ZHANG Yun-lin^{2*}, ZHA Yong¹, SHI Kun², ZHOU Yong-qiang^{2,3}, LIU Ming-liang⁴

(1. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Key Laboratory of Virtual Geographical Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Hangzhou Institute of Environmental Science, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Photosynthetically active radiation (PAR) is defined as the wavelength band of 400 to 700 nm, representing most of the visible solar radiation that could be used for photosynthesis. PAR is attenuated by the absorption and scattering of nonpigment suspended matter, chromophoric dissolved organic matter and phytoplankton, and it plays an important role in determining the density and distribution of aquatic organisms. This study developed an empirical model and presented the spatial-temporal distribution of PAR diffuse attenuation coefficient [$K_d(\text{PAR})$] for the slightly turbid Xin'anjiang Reservoir based on the in situ ground data and the matching Landsat 8 data. The results showed that the three-band combinational model of $K_d(\text{PAR})$ using Band 2, Band 3 and Band 8 could give a reasonable and acceptable estimation accuracy with a determination coefficient of 0.87. Independent dataset was used to validate the model with a mean relative error of 9.16% and a root mean square error of 0.06 m^{-1} . Therefore, the three-band combination using Landsat 8 data could be used to accurately estimate $K_d(\text{PAR})$ in the slightly turbid Xin'anjiang Reservoir. $K_d(\text{PAR})$ exhibited significant seasonal and spatial differences. $K_d(\text{PAR})$ was higher in autumn (September–November) and summer (June–August) with the average $K_d(\text{PAR})$ of $(0.82 \pm 0.60) \text{ m}^{-1}$ and $(0.77 \pm 0.41) \text{ m}^{-1}$, but lower in winter (December–February) and spring (March–May) with the average $K_d(\text{PAR})$ of $(0.56 \pm 0.50) \text{ m}^{-1}$ and $(0.40 \pm 0.45) \text{ m}^{-1}$, respectively. Spatially, $K_d(\text{PAR})$ ranged from 0.002 to 13.86 m^{-1} with an average of $(0.64 \pm 0.49) \text{ m}^{-1}$. The temporal heterogeneity of $K_d(\text{PAR})$ was mainly

收稿日期: 2015-06-09; 修订日期: 2015-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41325001); 江苏省自然科学基金项目 (BK20141515); 湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目 (2014SKL004)

作者简介: 张毅博 (1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊环境遥感, E-mail: hbxgzyb@126.com

* 通讯联系人, E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

caused by the seasonal rainfall and seasonal growth of phytoplankton. The spatial heterogeneity was mainly caused by suspended matter concentration derived from watershed inputs and human dredging activity.

Key words: Landsat 8 data; Xin'anjiang Reservoir; PAR diffuse attenuation coefficient; empirical method; remote sensing estimation

光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 是指波长在 400 ~ 700 nm 的可见光部分的辐射, 这部分辐射进入水体后, 受到湖水中悬浮颗粒物 (TSM)、有色可溶性有机物 (CDOM) 和浮游植物的吸收和散射作用发生衰减^[1], 其分布及性质对水生生物的生长和水体的初级生产力有重要影响^[2~5]. 因此, 表征 PAR 在水体中衰减的参数 PAR 漫射衰减系数 [K_d (PAR)] 是湖泊光学与水色遥感研究总的一个重要参数, 反映了太阳辐射在湖水中的分布及变化, 是湖水清澈或浑浊程度的真实反映. 精确估算 K_d (PAR) 可更好地了解水体的光学性质和光学类型以及更深入地分析水体生物、水文要素和水化学性质, 可为水体的环境质量评价和水体环境的生态修复提供基础资料^[1, 6, 7].

国内外许多学者利用遥感技术对漫射衰减系数进行估算研究. 归纳起来可以分为以下 3 类: ①构建漫射衰减系数和叶绿素 a (Chla) 的经验关系^[8]; ②基于辐射传输模型, 通过解吸收或者解后向散射来构建漫射衰减系数与固有光学量之间的关系^[9~11]; ③构建漫射衰减系数和遥感影像单波段或多波段通道的归一化离水辐亮度 (或者遥感反射率) 之间的统计关系^[12~16]. 方法①通常用于漫射衰减系数主要受浮游植物影响的 I 类水体, 并不适用于漫射衰减系数同时受 CDOM 和 TSM 影响的内陆水体^[5]. 方法②是反演漫射衰减系数的一种理想方法. 然而, 它需要水体固有光学特性的精确信息, 特别是后向散射系数, 而目前后向散射系数精确测定仍然存在一定不确定性^[17]. 方法③简单易于构建, 而且可以降低大气校正误差对估算结果的影响, 是目前应用较多的一种方法^[18].

针对第③类模型, 国内外学者基于统计关系对 K_d (PAR) 的估算进行了大量研究. Austin 等^[19]利用 Coastal Zone Color Scanner (CZCS) 数据的第 1、2 波段 (443 和 550 nm) 离水辐亮度的比值较好地估算了沿海水域漫衰减系数. Mueller 等^[13]利用 Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) 数据的 490 nm 和 555 nm 两个波段位置的归一化离水辐亮度比值估算了 I 类水体的漫衰减系数. Zhang 等^[20]以中心波长为 490 nm 和 555 nm 波段的遥感反射率的比值作为指数模型的因子对清洁水体的漫衰减系

数进行估算, 并利用中心波长为 490 nm 和 665 nm 波段的遥感反射率的比值作为指数模型的因子对浑浊水体的漫衰减系数进行估算. Shi 等^[5]利用 Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) 数据第 10 波段 (753 nm) 的大气顶层辐亮度对太湖的漫衰减系数进行了估算. Zhang 等^[16]利用 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 数据的 859 nm 和 748 nm 通道分别构建了 K_d (PAR) 的单波段模型, 并对太湖的漫射衰减系数进行了估算研究. 然而以上研究主要集中在清洁的 I 类海洋水体和受无机悬浮物主导的浑浊内陆水体, 并不适合较为清洁的内陆水体^[12, 21]. 与这些常用的传感器 (CZCS、SeaWiFS、MERIS 和 MODIS) 相比较, Landsat 卫星数据具有更高的空间分辨率 (30 m), 可以很好地满足较小湖泊、水库等内陆水体的遥感探测需求, 尤其是于 2013 年 2 月发射的 Landsat 8 卫星因其波段更多, 波段划分更加精细等特点很好地继承了 Landsat 系列数据的延续性^[22], 具有很好的漫射衰减系数遥感反演潜力.

新安江水库位于中国浙江省杭州市西南部的淳安县和建德市境内, 最大水深 100 m, 平均水深 30.44 m, 常年水位在 108 m 左右^[23, 24], 全湖平均水质可达 I 类水质标准^[25]. 作为钱塘江的重要水源,

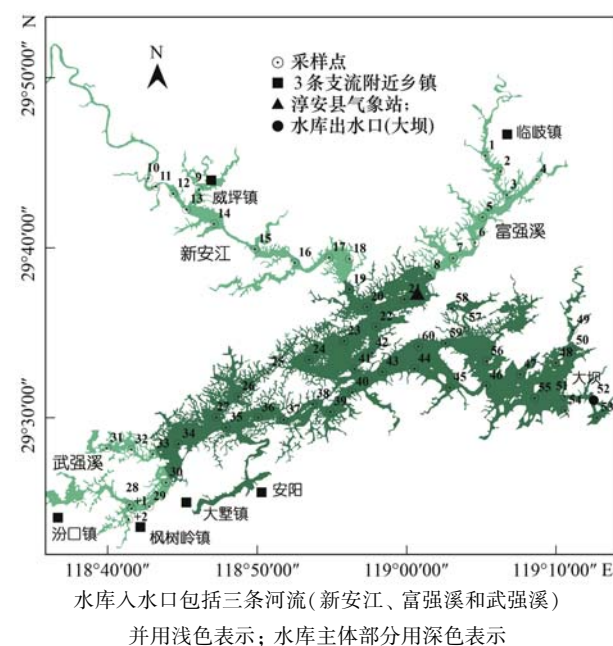


图 1 采样点示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Xin'anjiang Reservoir

新安江水库对保障钱塘江中下游的水域生态安全及未来长三角饮用水供水安全起着极其重要的作用,因此迫切需要加强新安江水库水下光环境的监测.本文结合同步采样数据和 Landsat 8 遥感影像数据,构建新安江水库 K_d (PAR) 的遥感估算模型并应用于 14 景影像,获得新安江水库 K_d (PAR) 的时空变化规律,并探讨其主要影响因素.

1 材料与方法

1.1 采样数据

于 2013 年 12 月 1 日和 2014 年 7 月 29 日卫星过境时进行了两次野外同步实验,为获取较高质量的 K_d (PAR) 数据,选择晴天无风或低风的天气,采样时间为 08:30 ~ 16:30(确保一定的太阳高度角,降低散射光的比例,计算获得更为准确的漫射衰减系数.此外,较高的太阳高度角也可以减小测量仪器自阴影对测量结果的影响,保证较强的太阳辐射强度,提高测量的准确性).每次采样包括 60 个采样点(图 1:样点 1 ~ 60),剔除两次采样中受水面漂浮垃圾影响的样点,对有效的 90 个样点随机抽取 60 个样点用于模型的构建,余下的 30 个样点用于模型的验证.采样时记录每个样点的经纬度、风速风向等信息.将水样低温冷藏,并当天送到实验室.

总悬浮物浓度采用称量法测定:将所有水样用煅烧过的 GF/F(Whatman)过滤膜过滤,再将滤膜在 105℃ 条件下烘干 4 h 称量得到.

叶绿素 a 的测定采用分光光度法,在 80℃ 条件下,用 90% 的热乙醇萃取提取色素,然后在分光光度计上通过测定 750 nm 和 665 nm 的吸光度换算得到叶绿素 a 浓度.

水面以下 PAR 的测定选用 Li-cor192SA 水下光量子仪.观测期间天空基本上晴朗,分水下 0、0.25、0.5、0.75、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 和 5.0 m 共 13 层测定 PAR 强度,每层记录 3 个数据,用平均值代替该层数据, K_d (PAR)通过对不同深度水下辐照度进行指数回归得到,当回归方程决定系数 ≥ 0.99 时认为对应的 K_d (PAR) 是有效数据,其他不符合条件的数据剔除^[16].

1.2 降雨量数据

降雨量观测站位于淳安县(29°37'N, 119°01'E)(图 1 中▲位置),数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>).

1.3 卫星数据

新安江水库湖口狭窄,中低分辨率遥感影像

(CZCS, SeaWiFS, MERIS 和 MODIS) 的像元尺寸比新安江水库某些入湖口还大,从而造成混合像元的出现,进而降低反演精度,因此需要基于较高空间分辨率的遥感影像来构建新安江水体 K_d (PAR) 遥感估算模型. Landsat 8 是太阳同步轨道卫星,轨道倾角为 98.2°,轨道高度为 705 km,运行周期为 98.9 min,它携带 2 个主要载荷:运行陆地成像仪(operational land imager, OLI)和热红外传感器(thermal infrared sensor, TIRS).与 Landsat 5/Landsat 7 相比,Landsat 8 OLI 增加了 2 个波段:深蓝波段[(433 ~ 453) nm]和短波波段[(1360 ~ 1390) nm],第八波段(全色波段)位置也由原来的(520 ~ 900) nm 调整为(500 ~ 680) nm,其他几个波段的边界也均有调整.总的来说,Landsat 8 涵盖的波段更多、波段划分更加精细,每景卫星数据的下行速率也由原来的 150 Mbps 提高到 441 Mbps,数据总量是以往的 3 倍.本研究选择与野外采样时间准同步的两景 Landsat 8 数据用于模型的构建和验证,其中与 2013 年 11 月 29 日至 12 月 1 日对应的准同步卫星过境时间为 12 月 1 日,与 2014 年 7 月 30 日至 8 月 1 日对应的准同步卫星过境时间为 7 月 29 日,剔除两次采样中受漂浮垃圾影响的样点,对有效的 90 个样本随机抽取 60 个样本用于模型的构建,剩余的 30 个样本用于模型的验证(表 1),由于新安江水库水深较深,受沉积物再悬浮的影响较小,水体中影响漫射衰减系数的各组分短期内随时间变化并不是很大,因此本研究采用的卫星过境时间和采样时间相差 1 ~ 2 d 是可以接受的.对 2013 ~ 2015 年获取的 14 景无云 Landsat 8 影像进行辐射定标和大气校正^[22],然后将构建的模型应用于影像获得漫射衰减系数的时空格局.为了分析新安江水库水体 PAR 漫射衰减系数的季节性变化,将 14 景无云 Landsat 8 影像按照季节分为四类:春季(3 ~ 5 月)、夏季(6 ~ 8 月)、秋季(9 ~ 11 月)和冬季(12 ~ 次年 2 月)(表 2).

1.4 统计分析

运用 SPSS 17.0 进行数据统计分析,包括计算最小值、最大值、中值、平均值、绝对值、标准差、方差分析等,显著性水平用显著($P < 0.05$)和不显著($P > 0.05$)表示,差异性用 t -tests($P < 0.05$)检测.模型系数确定采用 Matlab 软件,通过最小二乘法非线性拟合得到.引入决定系数、均方根误差(root mean square error, RMSE)和相对误差绝对值均值(mean absolute relative error, MARE)作为统计

表 1 总悬浮物 (TSM)、叶绿素 a (Chla) 浓度和光合有效辐射衰减系数 [K_d (PAR)]

Table 1 Total suspended matter (TSM), chlorophyll a (Chla) concentration and diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation [K_d (PAR)]

参数名 ¹⁾	样点数	最小值	最大值	中值	均值	标准差	标准差/均值
TSM/mg·L ⁻¹	90	0.67	4.52	0.96	1.34	0.82	0.61
Chla/μg·L ⁻¹	90	1.18	5.31	2.65	2.64	0.87	0.33
K_d (PAR) (C)/m ⁻¹	60	0.26	0.94	0.36	0.44	0.17	0.39
K_d (PAR) (V)/m ⁻¹	30	0.30	0.91	0.47	0.49	0.16	0.33

1) K_d (PAR) (C)用于模型的构建; K_d (PAR) (V)用于模型的验证

表 2 2013 ~ 2015 年新安江水库 Landsat 8 影像季节分类以及影像成像前 10、7 和 5 d 累计降雨量/mm

Table 2 Seasonal distribution of Landsat 8 images and accumulated rainfall of ten days, seven days and five days before imaging over Xin'anjiang Reservoir during 2013-2015/mm

项目	影像成像时间 (年-月-日)	成像前 10 d	成像前 7 d	成像前 5 d
春季 (n = 2)	2013-05-23	718	576	232
	2015-04-11	75	43	17
	2013-07-10	170	0	0
夏季 (n = 4)	2013-08-11	8	0	0
	2014-06-11	269	0	0
	2014-07-29	660	660	641
秋季 (n = 2)	2013-10-14	407	395	0
	2013-11-15	300	300	300
	2013-12-01	116	116	0
	2014-01-02	0	0	0
冬季 (n = 6)	2014-01-18	156	94	0
	2014-02-03	0	0	0
	2014-12-20	68	0	0
	2015-02-06	0	0	0

量来检验反演值和实测值是否一致。RMSE 和 MARE 的计算式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{Est,i} - x_{Obs,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$MARE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|x_{Est,i} - x_{Obs,i}|}{x_{Obs,i}}}{n} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $x_{Est,i}$ 和 $x_{Obs,i}$ 分别为第 i 波长处模拟值和实测值, n 是样本数。

2 结果与分析

2.1 水体组分与光学参数

表 1 表明 3 个生物光学参数变化区间都较小, TSM 浓度变化范围: (0.67 ~ 4.52) mg·L⁻¹, 均值为 (1.34 ± 0.82) mg·L⁻¹, 相比太湖^[26~29]、巢湖^[17, 30] 等水体, 新安江水库 TSM 浓度均值较低, 属于较清洁水体。Chla 的变化范围: (1.18 ~ 5.31) μg·L⁻¹, 均值为 (2.65 ± 0.87) μg·L⁻¹。 K_d (PAR) 的变化范

围: (0.26 ~ 0.94) m⁻¹, 均值为 (0.46 ± 0.18) m⁻¹。

2.2 模型的构建和验证

通过对 Landsat 8 OLI 多光谱变量与 K_d (PAR) 进行相关性分析, 可以发现, 对 K_d (PAR) 信息敏感的波段为绿光波段 [(530 ~ 590) nm], 其次是全色波段 [(500 ~ 680) nm] 和蓝光波段 [(450 ~ 510) nm], 决定系数分别为 0.63、0.54 和 0.32。为了寻找 K_d (PAR) 信息最为敏感的遥感数据多波段变量因子, 对这 3 个波段进行线性、指数、对数、多项式组合运算, 将这些组合作为 K_d (PAR) 的估算因子, 并且分析这些因子与 K_d (PAR) 的相关性。选取与 K_d (PAR) 相关性较高的估算因子进行回归分析, 建立回归方程。经过比较发现通过构建的 K_d (PAR) 与反演因子之间的各种关系模型中, 使用多元线性回归模型能够较好地描述 K_d (PAR) 与反演因子之间的关系, 估算模型如下:

$$K_d(\text{PAR}) = -43.49Rrs(450 \sim 510) + 5.07Rrs(530 \sim 590) + 40.61Rrs(850 \sim 880) + 1.27$$
$$R^2 = 0.87 \quad (3)$$

三波段模型[式(3)]的估测值和预测值相对误差绝对值均值 MARE 为 10.49%, 均方根误差 RMSE 为 0.06 m^{-1} . 利用验证样本对三波段模型[式(3)]进行验证可以看出,模型具有较高的反演精度,预测值和实测值相对误差绝对值均值 MARE 为 9.16%, 均方根误差 RMSE 为 0.06 m^{-1} (图 2).

2.3 新安江水库 $K_d(\text{PAR})$ 时空分布

图 3 基于三波段模型[式(3)]并结合 14 景无云的 Landsat 8 影像给出了新安江水库 2013 年 5 月至 2015 年 4 月之间 $K_d(\text{PAR})$ 的季节分布. 通过 t -tests ($P < 0.05$) 检测发现, $K_d(\text{PAR})$ 季节差异性明显,秋季和夏季 PAR 漫射衰减系数较高,分别为 $(0.82 \pm 0.60)\text{ m}^{-1}$ 和 $(0.77 \pm 0.41)\text{ m}^{-1}$. 冬季和春季 PAR 漫射衰减系数相对较低,分别为 $(0.56 \pm 0.50)\text{ m}^{-1}$ 和 $(0.40 \pm 0.45)\text{ m}^{-1}$. 秋夏季值显著高于冬春季值.

图 4 基于三波段模型统计得到各季节 $K_d(\text{PAR})$ 值频率分布. 春季 $K_d(\text{PAR})$ 的变化范围为: $(0.003 \sim 6.47)\text{ m}^{-1}$, 众数为 0.26 m^{-1} ; 夏季 $K_d(\text{PAR})$ 的变化范围为: $(0.007 \sim 13.86)\text{ m}^{-1}$, 众数为

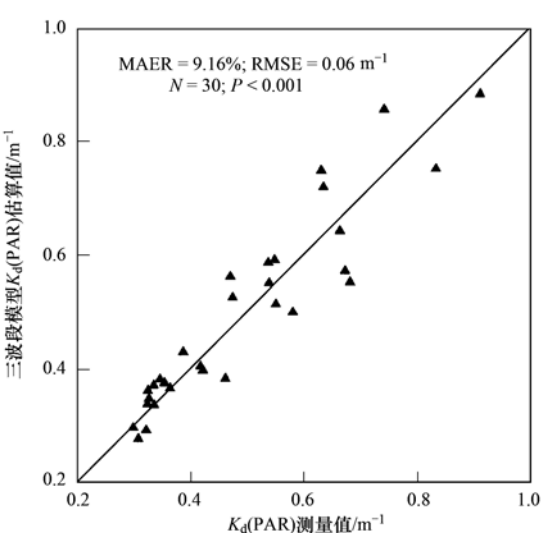


图 2 $K_d(\text{PAR})$ 测量值与模型估算值对比
Fig. 2 Comparison between the estimated $K_d(\text{PAR})$ and the measured $K_d(\text{PAR})$

0.73 m^{-1} ; 秋季 $K_d(\text{PAR})$ 的变化范围为: $(0.01 \sim 11.54)\text{ m}^{-1}$, 众数为 1.54 m^{-1} ; 冬季 $K_d(\text{PAR})$ 的变化范围为: $(0.002 \sim 8.77)\text{ m}^{-1}$, 众数为: 0.54 m^{-1} .

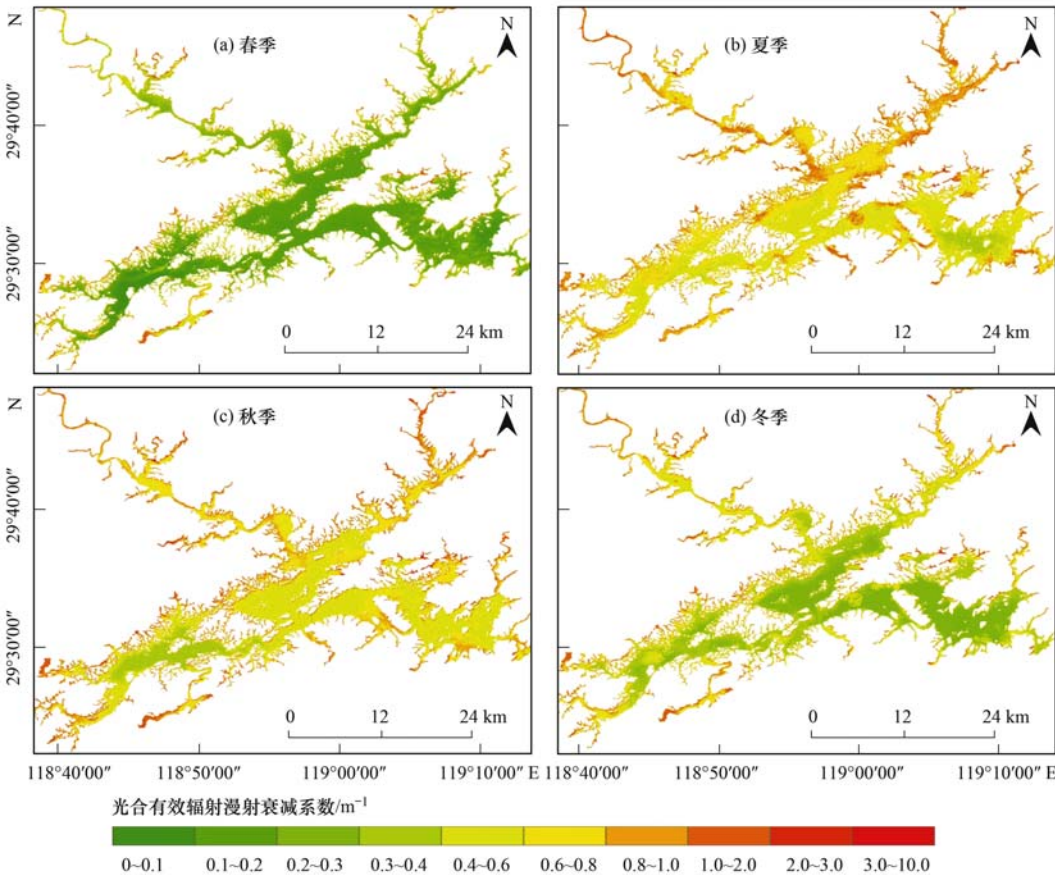


图 3 基于三波段模型估算得到新安江水库 $K_d(\text{PAR})$ 季节分布
Fig. 3 Spatial and seasonal distributions of Landsat 8 derived $K_d(\text{PAR})$ in Xin'anjiang Reservoir using three-band model

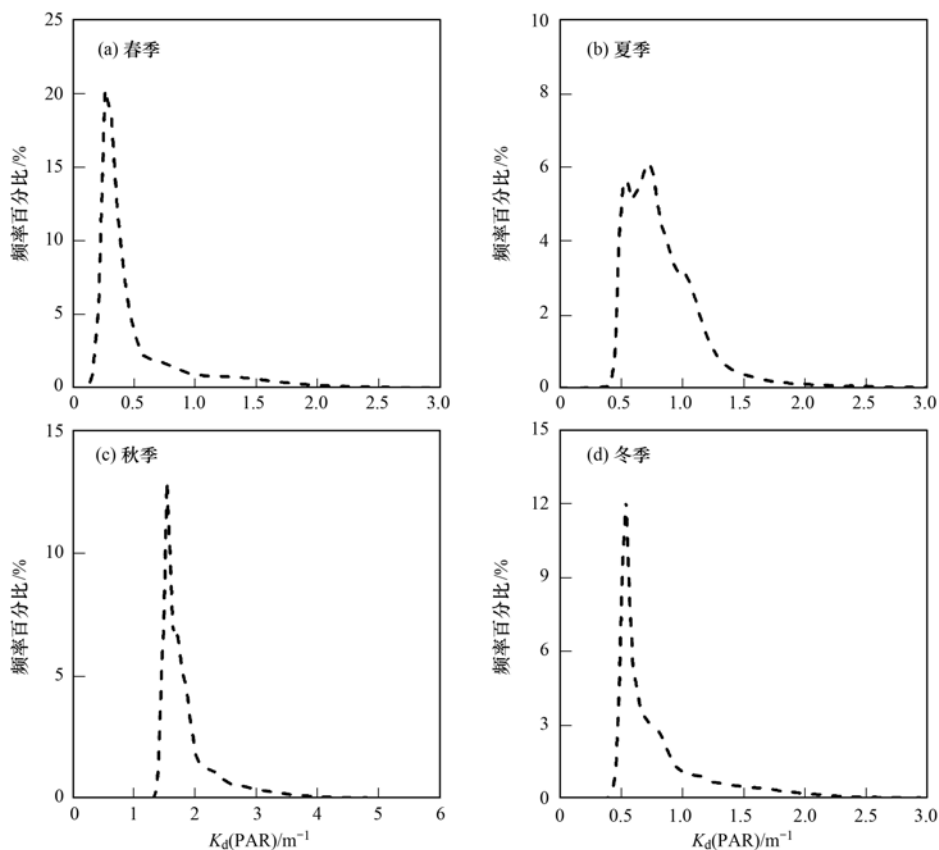


图4 基于三波段模型估算得到新安江水库四季 $K_d(\text{PAR})$ 频率分布

Fig. 4 Frequency distribution of $K_d(\text{PAR})$ in four seasons in Xin'anjiang Reservoir estimated from Landsat 8 images with three-band model

对 14 景估算得到的 $K_d(\text{PAR})$ 产品取均值得到新安江水库 $K_d(\text{PAR})$ 的空间分布(图 5), 并基于此

统计得到 $K_d(\text{PAR})$ 值频率分布(图 6). 整个新安江水库 $K_d(\text{PAR})$ 变化范围为: $(0.002 \sim 13.86) \text{ m}^{-1}$, 均值为: $(0.64 \pm 0.49) \text{ m}^{-1}$. 漫射衰减系数的最大值出现在湖的边缘区即与陆地交接处以及一些湖湾

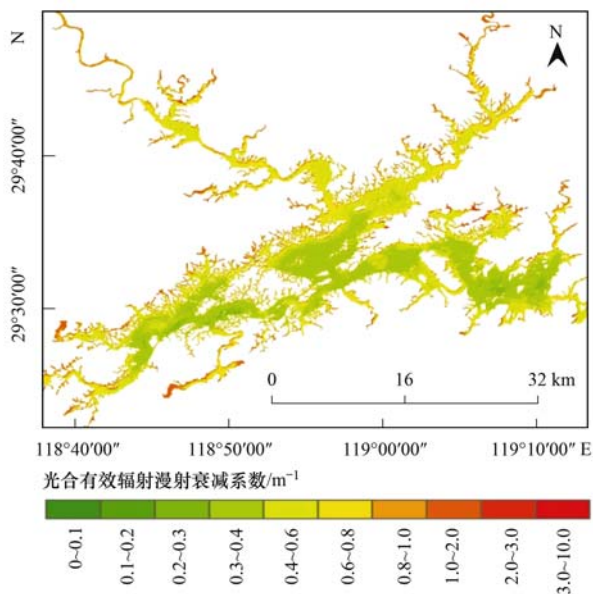


图5 2013~2015 年新安江水库年平均 $K_d(\text{PAR})$ 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of $K_d(\text{PAR})$ in Xin'anjiang Reservoir averaged from all $K_d(\text{PAR})$ estimated from 14 Landsat 8 images from 2013 to 2015

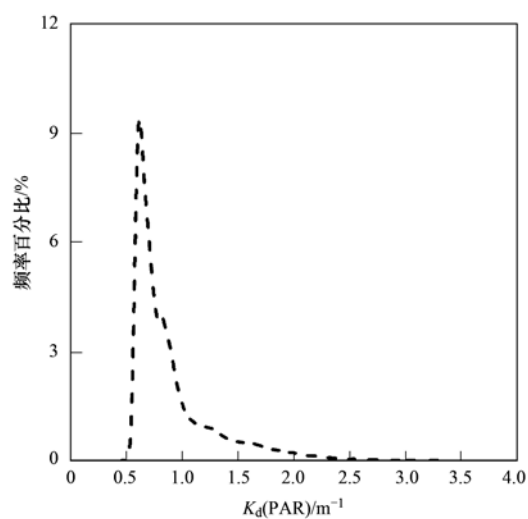


图6 2013~2015 年新安江水库年平均 $K_d(\text{PAR})$ 频率分布

Fig. 6 Frequency distribution of $K_d(\text{PAR})$ in Xin'anjiang Reservoir averaged from all $K_d(\text{PAR})$ estimated from 14 Landsat 8 images from 2013 to 2015

枝杈(最大值的像元数极少,所占百分比小于0.005%),99%以上区域的 $K_d(\text{PAR})$ 在 2.8 m^{-1} 以下。

3 讨论

3.1 三波段模型

以往研究显示,如果TSM浓度和 $K_d(\text{PAR})$ 之间具有显著相关,用于估算TSM的波段同样适合用来估算 $K_d(\text{PAR})$ ^[5]。对于新安江水库,TSM浓度和 $K_d(\text{PAR})$ 之间相关性显著($R^2 = 0.84$),所以适合用于估算新安江水库TSM浓度的波段同样适合用来估算新安江水库PAR漫射衰减系数。有研究通过比较不同悬浮物浓度的光谱曲线表明^[31~35]:在690~900 nm波段,水体反射率随悬浮物含量的增加而单调增加,适合用来监测悬浮物。但对于较清洁的新安江水体,反射率在该位置的变化并不明显,因而限制该方法的进一步应用^[22]。有报道分别基于Landsat TM、SPOT、SeaWiFS和MODIS数据对不同研究区域的悬浮物浓度进行研究^[36~39],发现其对应的敏感波段分别为450~520、500~590、545~565和620~670 nm。基于以上学者的研究,张毅博等^[22]选择与以上波段相符的Landsat 8第二(530~590 nm)、三(530~590 nm)和八(500~680 nm)波段构建总悬浮物浓度的估算模型($R^2 > 0.9$),利用验证样本对该模型进行验证,结果表明该模型精度较高(RMSE = $0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, MARE = 11.49%)。因此本文也基于Landsat 8的第二、三和八波段构建新安江水体 $K_d(\text{PAR})$ 估算模型。

很多学者利用经验的或者半经验的方法构建漫射衰减系数的估算模型,Shi等^[5]和Zhang等^[16]分

别利用MERIS和MODIS在700 nm以后的波段数据构建了 $K_d(\text{PAR})$ 的单波段模型,并对太湖的漫射衰减系数进行了估算研究。然而以上研究主要针对受无机悬浮物主导的浑浊内陆水体,对较为清洁的内陆水体,700 nm以后的波段遥感反射率信号微弱,采用单波段模型不适合用来估算PAR漫射衰减系数^[12, 21, 22]。同时,为了进一步评估本研究的模型,选择文献[8, 10, 13, 19]的模型估算新安江水库 $K_d(\text{PAR})$ 。研究发现,这些模型的估算值和测量值之间的平均相对误差百分比分别是32%、36%、27%和22%,模型的精度低,不能满足新安江水库中 $K_d(\text{PAR})$ 估算精度的要求。因此,需要一个改进的模型对该地区PAR漫射衰减系数进行估算。本文选用Landsat 8的第二、三和第八波段数据来构建PAR漫射衰减系数的估算模型。利用验证样本对该模型进行验证,结果表明该模型精度较高(RMSE = 0.06 m^{-1} , MARE = 9.16%),因此可以认为,利用上述3个波段构建的模型对较为清洁的内陆水体(TSM < $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TSM/Chla < 2.2×10^3)的PAR漫射衰减系数估算是有效的,但是,由于受到样本数量的限制,本文所构建的模型对于更大变化范围的PAR漫射衰减系数估算是否仍然有效还需要更深入的研究。

3.2 $K_d(\text{PAR})$ 时空分布影响机制

以往研究表明季节性降雨和藻类的季节性生长会影响悬浮物和 $K_d(\text{PAR})$ 的分布^[5, 18, 40, 41]。对14景影像 $K_d(\text{PAR})$ 估算值均值与成像前10、7和5 d累计降雨量进行回归分析(累计降雨量为0 mm的不纳入分析)(图7),结果表明全湖 $K_d(\text{PAR})$ 均值受降雨的影响较大,累计降雨量越大, $K_d(\text{PAR})$ 均

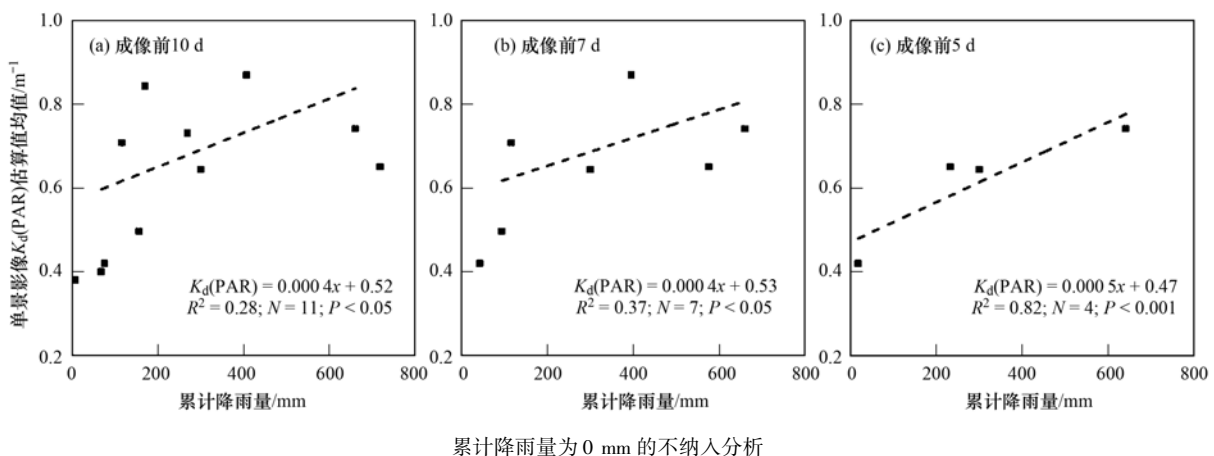


图7 2013~2015年Landsat 8影像成像前10、7和5 d累计降雨量与 $K_d(\text{PAR})$ 估算值均值回归分析

Fig. 7 Linear relationships between accumulated rainfall of ten days, seven days and five days before imaging and averaged estimated $K_d(\text{PAR})$ during 2013-2015

值越高,并且影像成像前 5 d 累计降雨量与 $K_d(\text{PAR})$ 的相关性比影像成像前 10 d 和前 7 d 累计降雨量与 $K_d(\text{PAR})$ 的相关性高。夏季梅雨和暴雨之后,地表径流携带大量泥沙进入水库,导致漫射衰减系数显著增加,而冬季降雨量明显低于夏季和秋季导致漫射衰减系数显著下降(图 8)。另外,受水体营养盐的影响,藻类在夏季和秋季生长旺盛,冬季和春季生长缓慢^[23]。因此可以认为,季节性降雨和藻类季节性爆发是新安江 PAR 漫射衰减系数季节变化的主要原因,两者共同作用导致新安江水体夏季和秋季 PAR 漫射衰减系数整体水平较高,而冬季和春季 PAR 漫射衰减系数整体水平较低(图 3)。

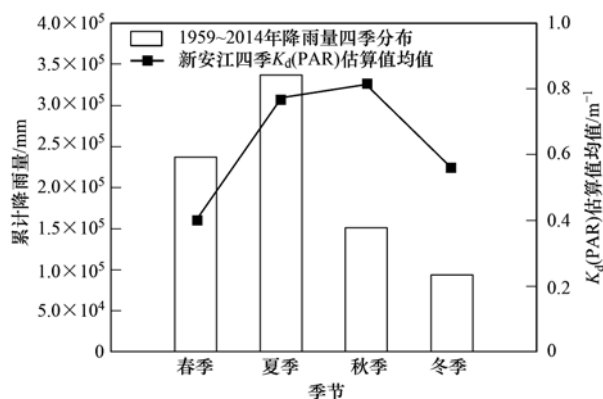


图 8 2013~2015 年 $K_d(\text{PAR})$ 模型估算值季节变化散点图和 1959~2014 年四季累计降雨量分布

Fig. 8 Scatter distribution of estimated $K_d(\text{PAR})$ in four seasons from 2013-2015 and accumulated rainfall of four seasons from 1959 to 2014

有关研究表明入湖河流和降雨量输入会影响悬浮物和 $K_d(\text{PAR})$ 的分布^[26, 18, 40, 41]。通过测算新安

江 3 条入湖河流各采样点到最近开敞区样点的距离,并且分别从 14 景 $K_d(\text{PAR})$ 估算产品中提取三条入湖河流各采样点位置的 $K_d(\text{PAR})$ 值,对距离和 $K_d(\text{PAR})$ 均值进行回归分析(图 9),结果表明新安江入湖河流 PAR 漫射衰减系数与到最近开敞区的距离显著性正相关($R^2 > 0.7$),入湖河流距离开敞区越远,PAR 漫射衰减系数越大,入湖河流距离开敞区越近,PAR 漫射衰减系数越小(图 9)。除受入湖河流和降雨量输入影响外,湖泊水体 PAR 漫射衰减系数分布还受到水域采砂活动影响。新安江水库受水域采砂活动影响导致总悬浮物浓度较高的部分位于湖的边缘以及一些湖湾枝杈位置(威坪镇、临歧镇、汾口镇、枫树岭镇、大墅镇和安乡乡),其中受采砂影响最大的汾口水域 TSM 浓度最大,平均 TSM 浓度大于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其次是安阳水域和大墅水域,平均 TSM 浓度为 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;最后是东方大桥以上威坪水域和溪口大桥以上临歧水域,其平均 TSM 浓度在 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右^[22],在图 8 中表现为,同一时期汾口水域的漫射衰减系数最大为 2.0 m^{-1} ,其次是安阳水域和大墅水域,其平均漫射衰减系数为 1.0 m^{-1} ,最后是东方大桥以上威坪水域和溪口大桥以上临歧水域,其平均漫射衰减系数为 0.8 m^{-1} 。因此可以认为,新安江入湖河流 PAR 漫射衰减系数主要受入湖河流和降雨输入的影响,其次是由于部分水域采砂过程导致总悬浮物浓度变化引起。由此可见,利用遥感技术可分析入湖河流、降雨输入和采砂活动对新安江水库水下光场分布及变化的影响,可为水体的环境质量评价和水体环境的生态修复提供基础资料。

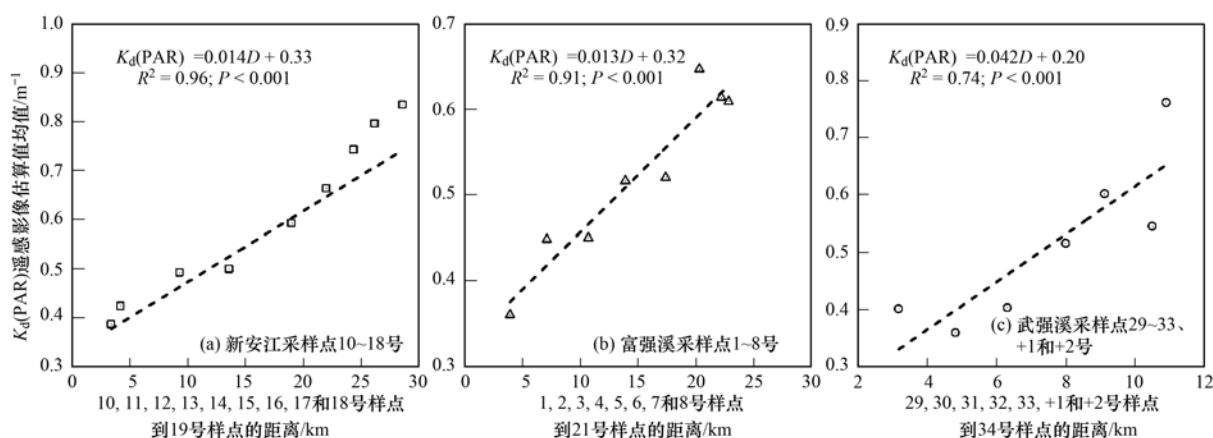


图 9 新安江、富强溪和武强溪各个样点分别离水库开敞区(19、21 和 34 号)的距离与该样点 $K_d(\text{PAR})$ 估算值均值线性相关分析

Fig. 9 Linear relationships between the mean $K_d(\text{PAR})$ of four seasons from 2013 to 2015 and the distance of different sampling sites in Xin'anjiang River, Fuqiangxi Brook and Wuqiangxi Brook from the open region of the reservoir (site 19, 21 and 34)

4 结论

(1) 针对特定区域(新安江水库)提出了一个 PAR 漫射衰减系数的估算模型,该模型对较清洁水体而言,具有较好的效果,估算模型为:

$$K_d(\text{PAR}) = -43.49R_{rs}(450 \sim 510) + 5.07R_{rs}(530 \sim 590) + 40.61R_{rs}(850 \sim 880) + 1.27$$

(2) 新安江水库 PAR 漫射衰减系数季节差异性明显。秋季和夏季 PAR 漫射衰减系数较高,而冬季和春季 PAR 漫射衰减系数相对较低。新安江水库 PAR 漫射衰减系数空间差异性显著,全湖 PAR 漫射衰减系数变化范围为 $0.002 \sim 13.86 \text{ m}^{-1}$,均值为 $(0.64 \pm 0.49) \text{ m}^{-1}$,高值部分主要位于 3 条入湖河流以及一些湖湾枝杈位置。

(3) 漫射衰减系数的这种季节变化主要由季节性降雨和藻类季节性暴发引起,空间变化主要由入湖河流和降雨输入导致悬浮物浓度变化,其次是水域采砂过程导致悬浮物浓度变化引起。利用遥感技术分析新安江水库 PAR 漫射衰减系数的时空分布,可为水体的环境质量评价和水体环境的生态修复提供基础资料。

致谢:野外观测得到杭州市环境保护科学研究所的殷燕工程师以及淳安县环境保护监测站的吴志旭站长支持和帮助。刘笑菡、王明珠、刘刚、蒋浩等参加野外观测和室内分析,一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 张运林,秦伯强,陈伟民,等. 太湖水体光学衰减系数的分布及其变化特征[J]. 水科学进展, 2003, **14**(4): 447-453.
- [2] Carter C M, Ross A H, Schiel D R, *et al.* In situ microcosm experiments on the influence of nitrate and light on phytoplankton community composition [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2005, **326**(1): 1-13.
- [3] McMinn A, Hirawake T, Hamaoka T, *et al.* Contribution of benthic microalgae to ice covered coastal ecosystems in northern Hokkaido, Japan [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2005, **85**(2): 283-289.
- [4] Zhang Y L, Qin B Q, Hu W P, *et al.* Temporal-spatial variations of euphotic depth of typical lake regions in Lake Taihu and its ecological environmental significance [J]. Science in China Series D, 2006, **49**(4): 431-442.
- [5] Shi K, Zhang Y L, Liu X H, *et al.* Remote sensing of diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation in Lake Taihu using MERIS data [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, **140**: 365-377.
- [6] 乐成峰,李云梅,查勇,等. 太湖水体漫射衰减系数的光学特性及其遥感反演模型[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(2): 337-343.

- [7] Saulquin B, Hamdi A, Gohin F, *et al.* Estimation of the diffuse attenuation coefficient $K_d(\text{PAR})$ using MERIS and application to seabed habitat mapping [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, **128**: 224-233.
- [8] Morel A, Huot Y, Gentili B, *et al.* Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, **111**(1): 69-88.
- [9] Lee Z P, Darecki M, Carder K L, *et al.* Diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance: An evaluation of remote sensing methods [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 2005, **110**(C2): C02017.
- [10] Lee Z P, Du K P, Arnone R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 2005, **110**(C2): C02016.
- [11] Lee Z P, Weidemann A, Kindle J, *et al.* Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote sensing [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 2007, **112**(C3): C03009.
- [12] Wang M H, Son S H, Harding Jr L W. Retrieval of diffuse attenuation coefficient in the Chesapeake Bay and turbid ocean regions for satellite ocean color applications [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 2009, **114**(C10): C10011.
- [13] Mueller J L. SeaWiFS algorithm for the diffuse attenuation coefficient, $K(490)$, using water-leaving radiances at 490 and 555 nm [A]. In: Hooker S B, Firestone E R (Eds.). SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, Part, 3, vol. 11 [M]. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Cent, 2000. 24-27.
- [14] Doron M, Babin M, Mangin A, *et al.* Estimation of light penetration, and horizontal and vertical visibility in oceanic and coastal waters from surface reflectance [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 2007, **112**(C6): C06003.
- [15] Kratzer S, Broc kmann C, Moore G. Using MERIS full resolution data to monitor coastal waters-a case study from Himmerfjärden, a fjord-like bay in the northwestern Baltic Sea [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, **112**(5): 2284-2300.
- [16] Zhang Y L, Liu X H, Yin Y, *et al.* A simple optical model to estimate diffuse attenuation coefficient of photosynthetically active radiation in an extremely turbid lake from surface reflectance [J]. Optics Express, 2012, **20**(18): 20482-20493.
- [17] 施坤,李云梅,刘忠华,等. 基于半分析方法的内陆湖泊水体总悬浮物浓度遥感估算研究 [J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1571-1580.
- [18] Xi H Y, Zhang Y Z. Total suspended matter observation in the Pearl River estuary from in situ and MERIS data [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **177**(1-4): 563-574.
- [19] Austin R W, Petzold T J. The determination of the diffuse attenuation coefficient of sea water using the Coastal Zone Color

- Scanner[J]. *Oceanography from Space*, 1981, **13**: 239-256.
- [20] Zhang T L, Fell F. An empirical algorithm for determining the diffuse attenuation coefficient K_d in clear and turbid waters from spectral remote sensing reflectance [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2007, **5**(12): 457-462.
- [21] Son S H, Campbell J, Dowell M, *et al.* Primary production in the Yellow Sea determined by ocean color remote sensing[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, **303**(1): 91-103.
- [22] 张毅博, 张运林, 查勇, 等. 基于 Landsat 8 影像估算新安江水库总悬浮物浓度[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 56-63.
- [23] 韩晓霞, 朱广伟, 吴志旭, 等. 新安江水库(千岛湖)水质时空变化特征及保护策略[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(6): 836-845.
- [24] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China [J]. *Limnology and Oceanography*, 2014, **59**(4): 1193-1202.
- [25] 韩伟明, 胡水景, 金卫, 等. 千岛湖水环境质量调查与保护对策[J]. *湖泊科学*, 1996, **8**(4): 337-344.
- [26] Shi K, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250 m MODIS-Aqua data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **164**: 43-56.
- [27] 王艳红, 邓正栋, 马荣华. 基于实测光谱与 MODIS 数据的太湖悬浮物定量估测[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(3): 509-515.
- [28] Zhang B, Li J S, Shen Q, *et al.* A bio-optical model based method of estimating total suspended matter of Lake Taihu from near-infrared remote sensing reflectance [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **145**(1-3): 339-347.
- [29] Zhang Y L, Shi K, Liu X H, *et al.* Lake topography and wind waves determining seasonal-spatial dynamics of total suspended matter in turbid Lake Taihu, China: assessment using long-term high-resolution MERIS data [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(5): e98055.
- [30] 刘忠华, 李云梅, 檀静, 等. 太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3000-3008.
- [31] 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.
- [32] 郭明权, 韩松, 赵永清, 等. 应用 Landsat TM 影像估算渤海叶绿素 a 和总悬浮物浓度[J]. *遥感信息*, 2012, **27**(4): 91-95.
- [33] 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.
- [34] 管义国, 王心源, 吉文帅. 巢湖水体悬浮物的遥感分析[J]. *遥感信息*, 2007, (5): 39-43.
- [35] Dekker A G, Vos R J, Peters S W M. Comparison of remote sensing data, model results and in situ data for total suspended matter (TSM) in the southern Frisian lakes[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **268**(1-3): 197-214.
- [36] Baban S M J. Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U. K., using Landsat imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, **14**(7): 1247-1267.
- [37] 许珺, 方红亮, 傅肃性, 等. 运用 SPOT 数据进行河流水体悬浮固体浓度的研究——以台湾淡水河为例[J]. *遥感技术与应用*, 1999, **14**(4): 17-22.
- [38] Eleveld M A, Pasterkamp R, van der Woerd H J, *et al.* Remotely sensed seasonality in the spatial distribution of sea-surface suspended particulate matter in the southern North Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **80**(1): 103-113.
- [39] Miller R L, McKee B A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters [J]. *Remote sensing of Environment*, 2004, **93**(1-2): 259-266.
- [40] Choi J Y. Seasonal variations of suspended matters in the Keum estuary and its adjacent coastal area [J]. *The Journal of the Oceanological Society of Korea*, 1993, **28**(1): 272-280.
- [41] Min J E, Ryu J H, Lee S, *et al.* Monitoring of suspended sediment variation using Landsat and MODIS in the Saemangeum coastal area of Korea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(2): 382-390.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行