

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 (1)

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 林海涛,李琦路,张干,李军 (10)

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 (16)

南京地区大气PM_{2.5}潜在污染源硫碳同位素组成特征 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 (22)

青奥会前后南京PM_{2.5}重金属污染水平与健康风险评估 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 (28)

南昌市秋季大气PM_{2.5}中金属元素富集特征及来源分析 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 (35)

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 (41)

边界层低空急流导致北京PM_{2.5}迅速下降及其形成机制的个例分析 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 (51)

电厂燃煤烟尘PM_{2.5}中化学组分特征 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 (60)

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 (66)

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 (74)

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 (82)

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 (88)

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 (94)

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 (102)

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 (112)

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 (123)

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 (132)

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 杨帆,蒋铁锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝斌,陈琳 (141)

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 (148)

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 (156)

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 黄廷林,刘飞,史建超 (166)

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 (173)

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 (180)

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 (187)

二氧化钛光催化氧化阿散酸 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 (193)

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 (198)

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 (208)

纳米TiO₂吸附HgCl₂水溶液中Hg(II) 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 (220)

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 (228)

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 (240)

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 (247)

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 (253)

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 徐特,曾辉,倪宏刚 (262)

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 (270)

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 (280)

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 周益奇,刘云霞,傅慧敏 (288)

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 (293)

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 (301)

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 (309)

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 (317)

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 (325)

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 (335)

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (342)

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 (350)

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 (359)

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 (366)

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 (377)

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 (384)

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 (391)

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 (397)

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性

李思佳^{1,2}, 宋开山^{1*}, 赵莹¹, 穆光熠^{1,3}, 邵田田¹, 马建行¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102; 2. 东北师范大学环境学院, 自然灾害研究所, 长春 130024; 3. 东北师范大学生命科学学院, 草地研究所, 长春 130024)

摘要: 分别于 2012 年 9 月对不同盐度水体的查干湖和新立城水进行水体野外采样和室内实验分析, 通过测定颗粒物、CDOM 等光学活性物质的吸收系数来对比分析两种水体的光学活性物质的吸收特性、来源及其在 400 ~ 700 nm 范围内对总吸收系数的贡献。结果表明, 综合营养状态评价指数显示秋季查干湖、新立城水库水体属于中等富营养化, 总悬浮颗粒物的吸收光谱表现均与色素类颗粒物吸收光谱相似。对于盐度较大的查干湖水体 ($EC = 988.87 \mu S \cdot cm^{-1}$), 非藻类颗粒物占主导地位, 各组分贡献率为非藻类颗粒物 > 色素颗粒物 > CDOM; 而盐度较低的新立城水库水体 ($EC = 311.67 \mu S \cdot cm^{-1}$), 色素颗粒物贡献率略大于非藻类颗粒物贡献, 各组分贡献率依次为: 色素颗粒物 > 非藻类颗粒物 > CDOM。查干湖总悬浮颗粒物吸收系数 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 和非藻类颗粒物吸收系数 $a_n(440)$ 分别与 TSM(总悬浮颗粒物)、ISM(无机悬浮颗粒物) 和 OSM(有机悬浮颗粒物)、Chl-a(叶绿素 a) 相关性均较好, 相关系数在 0.55 以上; 新立城水库 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 与 Chl-a 相关性较好 (0.77 和 0.85, $P < 0.05$), $a_n(440)$ 与 ISM 具有相关性 (0.74, $P < 0.01$), 与 OSM 表现为负相关 (-0.63, $P < 0.05$)。查干湖 CDOM 吸收系数 $a_g(440)$ 仅与 OSM 表现为负相关性 (-0.54, $P < 0.05$), 而新立城水库 $a_g(440)$ 与其他参数均无相关性。通过对 CDOM 吸收曲线在 250 ~ 400 nm 的拟合所得到的 S_g 以及相对分子量 M_r 发现, 查干湖的 $S_g [(0.021 \pm 0.001) m^{-1}]$ 大于新立城的 $S_g [(0.0176 \pm 0.001) m^{-1}]$, 而 CDOM 的相对分子量 M_r 值分别为 $11.44 \pm 2.00 (7.5 \sim 15.09)$ 、 $7.53 \pm 0.79 (6.17 \sim 8.89)$, 查干湖 M_r 值高于新立城水库水体, 表明查干湖 CDOM 组成较新立城水体中 CDOM 的分子量大, 组成更趋向于大分子。查干湖受风速和湖岸坍塌的影响产生矿物悬浮、沉积微粒, 水体颗粒物以非藻类为主, 部分来自于浮游植物降解产物; 新立城水库水体不仅有径流携带的陆源性无机物的输入, 同时水体浮游植物生长减弱且微生物分解活动加强, 降解有机颗粒物与非藻类吸收系数呈现负相关。

关键词: 吸收特性; 有色可溶性有机物; 非藻类颗粒物; 浮游植物; 查干湖; 新立城水库

中图分类号: X122; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0112-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.016

Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn

LI Si-jia^{1,2}, SONG Kai-shan^{1*}, ZHAO Ying¹, MU Guang-yi^{1,3}, SHAO Tian-tian¹, MA Jian-hang¹

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. Natural Disaster Research Institute, College of Environment, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 3. Institute of Grassland Science, School of Life Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Field surveys and laboratory analysis were carried out in Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir under different salinity conditions in September 2012. In the laboratory, the absorption coefficients of particulates and chromophoric dissolved organic matter (CDOM) were measured, aiming to compare the absorption features, source of optical active substances and relative contribution of optical active constituents over the range of PAR (400-700 nm) in Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir. The results showed that the Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir were water bodies with medium eutrophication in autumn by TAL nutrient index and the absorption spectra of particulates matters were similar to those of phytoplankton. For the Chagan Lake with high salinity ($EC = 988.87 \mu S \cdot cm^{-1}$), the total particulate absorption was dominated by the nonalgal particles, and the contribution rate was in the order of nonalgal particles > phytoplankton > CDOM. For the Xinlicheng Reservoir with low salinity ($EC = 311.67 \mu S \cdot cm^{-1}$), the total particulate absorption was dominated by the phytoplankton, and the contribution rate was ranked as phytoplankton > nonalgal particles > CDOM. Positive correlation was observed between $a_p(440)$, $a_p(675)$, $a_n(440)$ and total suspended matter (TSM), inorganic suspended matter (ISM), organic suspended matter (OSM) and Chl-a respectively in Chagan Lake, with correlation coefficients all

收稿日期: 2015-04-24; 修订日期: 2015-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471290); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-TZ-16)

作者简介: 李思佳(1988 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为湖泊生物光学特性, E-mail: jlsdlsj@126.com

* 通讯联系人, E-mail: songks@iga.ac.cn

above 0.55. Positive correlation was observed between $a_p(440)$, $a_p(675)$ and Chl-a (0.77 and 0.85, $P < 0.05$), so did $a_d(440)$ and ISM (0.74, $P < 0.01$), while negative correlation was observed between $a_d(440)$ and OSM in the Xinlicheng Reservoir. In terms of Chagan Lake, negative correlation was merely observed between $a_g(440)$ and OSM (-0.54 , $P < 0.05$), but not in the Xinlicheng Reservoir. Both S_g , which was calculated by the fitting absorption curve from 250 to 400 nm, and relative molecular weight M_r showed that $S_g [(0.021 \pm 0.001) \text{ m}^{-1}]$ in Chagan Lake was greater than that in the Xinlicheng Reservoir $[(0.0176 \pm 0.001) \text{ m}^{-1}]$, and M_r in Chagan Lake was 11.44 ± 2.00 (7.5-15.09), which was greater than that in Xinlicheng Reservoir 7.53 ± 0.79 (6.17-8.89), indicating that the relative molecular weight of CDOM in the Chagan Lake was less than that in the Xinlicheng Reservoir. The Chagan Lake was greatly affected by wind speed and shore collapse to produce suspended mineral and sediment particles. Thereby the total particulate absorption was dominated by the nonalgal particles. The waters in the Xinlicheng Reservoir were greatly impacted by terrestrial inorganic matter, and the growth of phytoplankton was weakened and microbes activities were strengthened simultaneously, which led to the negative correlations between $a_g(\lambda)$ and OSM.

Key words: absorption characteristics; CDOM; nonalgal particles; phytoplankton; Chagan Lake; Xinlicheng Reservoir

太阳辐射照射水体中,一部分光被水体反射,另一部分光穿透水体被水体中光学活性物质(非藻类颗粒物、色素颗粒物和有色可溶性有机物等)吸收或散射而衰减^[1,2],成为了水生生物系统的主要能量来源^[3]. 对于内陆Ⅱ类水体,由于所处区域气候、水动力环境的差异并受陆源无机颗粒物、有色溶解性有机物输入的影响,相比Ⅰ类水体光学活性物质的来源不仅仅为浮游植物^[4-6],导致水体中光学活性物质的浓度及组成具有明显的区域和季节差异,其引起的光学行为的改变,使辐射能量的吸收、散射等作用呈现区域变化的特点,反映为水体光学活性物质吸收特性和散射特性等固有光学量的变化. 水色物质固有光学特性决定其表观光学特性,不同的水体类型及营养状态不同,水体固有光学特性决定的表观光学量也呈现不同的特点,使水色遥感定量反演模型的普适度受到限制,并影响模型的精度,需要不同区域和水体类型的实验数据进行模型调整及验证^[7]. 水体中光学活性物质的吸收、散射常用吸收系数和散射系数表示^[8],总吸收系数和散射系数为各组分吸收和散射系数的线性叠加^[9-11]. 而吸收特性作为水体初级生产力的估算、水色遥感模型和光学传输模型的基本参数,对水色遥感定量反演具有重要的作用^[2,12,13]. 例如,色素颗粒物的比吸收系数、有色可溶性有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)吸收光谱形状因子 S_g 等是建立水色遥感模型的关键参数^[14-16]. 因此,针对不同水体类型的吸收特性进行研究,可探究水体光学活性物质和固有光学量变化机制,是选择、评价水色遥感模型和构建普适度模型的前提,对于提高水质参数反演精度、实现区域水色遥感算法和生物光学模型参数化具有重要的理论意义和应用价值^[17,18].

查干湖作为中国半干旱区典型的苏打盐碱型平原浅水湖泊,是吉林西部重要的生态屏障^[19],湖泊蒸发量大,水体矿化度偏高,独特的地理位置和气候

条件等因素使其水体吸收特性呈现不同的特点,制约水色遥感估测模型的应用. 水色遥感针对查干湖固有光学特性^[20,21]和水色遥感反演模型^[22-24]已做了相应的研究,而对于内陆半咸水水体光学遥感算法的应用研究还不够,需要更多不同水体类型的吸收特性进行分析及对比. 新立城水库与查干湖皆位于东北平原,其是长春市供水、防洪、灌溉、养殖、旅游等综合利用的水库,水质参数和固有光学特性与查干湖具有明显差异. 因此,本研究针对查干湖和新立城水库秋季水体,运用卡尔森综合营养状态评价指数对其进行营养状态评价,并展开对不同盐度水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性及其影响因素的对比研究,进一步丰富内陆不同盐度水体及其光学活性物质主导的生物光学特性库,指示于内陆湖泊光学分类和不同盐度水体质遥感监测模型,以期对不同盐度水质遥感动态监测提供参考依据.

1 研究区概况

查干湖(124°04' ~ 124°27'E, 45°10' ~ 45°21'N)位于吉林省西部前郭县、乾安县和大安市的交界,地处嫩江与霍林河交汇水网地区,为松嫩平原的代表湖泊和重要渔业基地. 查干湖水质为苏打型盐碱水,湖底平坦为粉砂质土壤,湖周为白钙碱土,正常运行水位 130 m,水域面积 $3.72 \times 10^4 \text{ hm}^2$,平均水深 2.52 m,水体容积 $5.98 \times 10^8 \text{ m}^3$,其补给来源为松花江水源、洮儿河、嫩江、降水和地下水等(图 1). 该区地处大陆性季风型半干旱气候区,春季多大风,风速 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的日数年均 29 d; 冬季寒冷,冰封期 130 d 左右,冰厚 0.8 ~ 1.1 m. 年均气温 4.5℃, $\geq 14^\circ\text{C}$ 的水温日数 145 d, 年均降水量为 400 ~ 500 mm,蒸发量为 1 140 ~ 1 270 mm. 查干湖湖底平坦为粉沙质土壤,湖周为白钙碱土,集水区均为盐碱化农田和牧场. 新立城水库(125°19' ~ 125°24'E, 43°33' ~ 45°41'N)位于长春市东南部,距离市中心 16

km,为拦截伊通河而形成的丘陵型水库. 水库上游纳入伊丹河、下游纳入新开河,至农安县靠山屯注入饮马河并归入第二松花江. 新立城水库平均水深约为 7.6 m,容积 $5.92 \times 10^8 \text{ m}^3$,占长春市供水量的

30%. 该区属温带大陆性气候,四季盛行西南风,年均气温 4.6°C ,年均降水量 601 mm,无霜期 140 ~ 150 d. 库区周围以农田、林地为主,并有部分草地、荒地为辅.

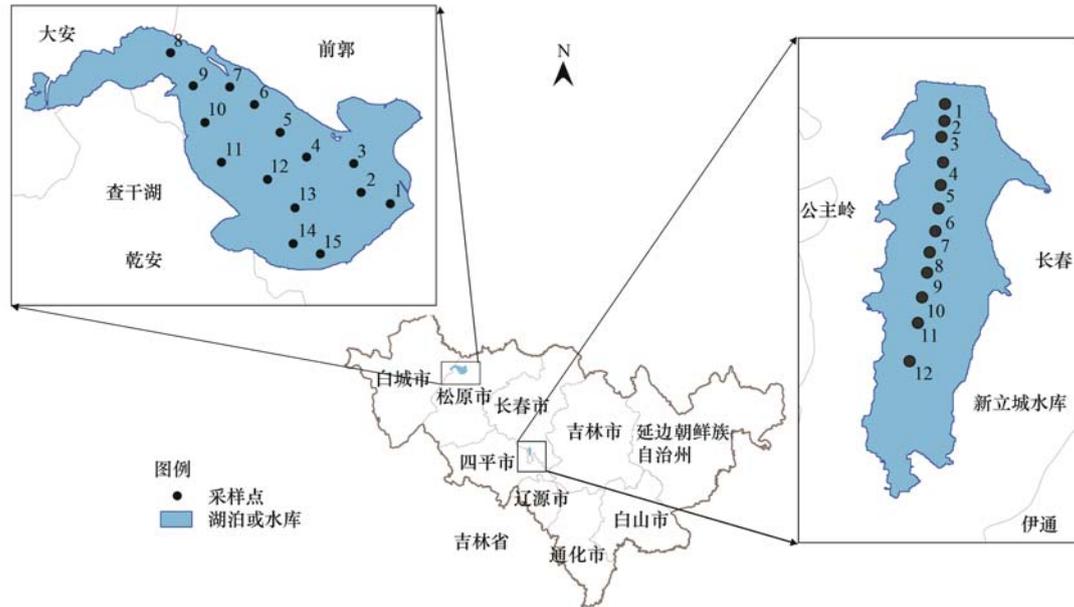


图 1 研究区采样点示意

Fig. 1 Sampling points in Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir

2 材料与方法

2012年9月19、20日分别在查干湖和新立城水库进行水样采集,并用手持式GPS进行定位导向(如图1).水样采集使用有机玻璃采水器,采样前先将采样器和聚四氟乙烯水样瓶润洗,采样深度设置为表层0~50 cm,每个采样点采集水样约1 L,2次采样共得到27个水样(1~15号为查干湖,16~27号为新立城水库),采样后立即用黑色塑料袋罩住,避免阳光直射,放入车载保温箱,透明度由Secchi盘来测定,浊度、电导率、pH值、水温由YSI水质参数仪来实时测定.为防止酸化引起色素溶解,水样参数的测定在采样后立即完成.吸收系数的测量采用定量滤膜技术(quantitative filter technique, QFT)^[25,26],以Milli-Q水作空白对比,利用岛津-紫外可见分光光度计UV-2006在200~800 nm范围测定滤膜上颗粒物的吸光度,通过计算得到总悬浮物颗粒物的吸收系数 $a_p(\lambda)$ 、非藻类颗粒物的吸收系数 $a_d(\lambda)$ 、浮游植物色素颗粒物的吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 和CDOM的吸收系数 $a_g(\lambda)$,具体测量方法和详细步骤见文献[14].为消除仪器间的差异,用各波段的吸光度减去750 nm波长处的吸光度以校

正,并与经蒸馏水润湿的同样湿润程度的空白滤膜作对比. $a_p(\lambda)$ 的计算公式为:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \times \frac{S}{V} D_s(\lambda) \quad (1)$$

式中, V 为过滤水样的体积, S 为过滤留在滤膜上的有效面积, $D_s(\lambda)$ 为滤膜上悬浮颗粒物的吸光度.采用500 μL 含量为0.1%的NaClO溶液漂白总悬浮颗粒物滤膜15 min,利用分光光度计测定 $a_d(\lambda)$,方法同上.根据线性叠加原理, $a_{ph}(\lambda)$ 计算公式为:

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda) \quad (2)$$

利用0.22 μm 微孔聚碳酸酯膜过滤的水样测定CDOM的吸光度,方法同上.按照式(3)、(4)计算 $a_g(\lambda)$:

$$a_g(\lambda') = 2.303 D(\lambda) / r \quad (3)$$

式中, $a_g(\lambda')$ 为未校正的CDOM吸收系数(m^{-1}), $D(\lambda)$ 为吸光度, r 为光路径(m).为消除由过滤液体残留细小颗粒引起的散射影响,作散射效应订正:

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda') - a_g(700) \cdot \lambda / 700 \quad (4)$$

叶绿素a(Chlorophyll-a, Chl-a)的浓度参考EPA方法445.0^[27],溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)采用TOC仪进行测定,总悬浮物(total suspended matter, TSM)的重量、有机悬浮物(organic

suspend matter, OSM) 重量和无机悬浮物 (inorganic suspend matter, ISM) 重量采用烘烧、称重的方法测定, 总氮 (total nitrogen, TN)、总磷 (total phosphorus, TP) 测定采用碱性过硫酸钾消解紫外、钼锑抗显色测定.

3 结果与讨论

3.1 综合营养状态评价

查干湖和新立城水库的水体综合营养状态评价采用卡尔森指数方法 (加权的 TLI 营养指数)^[27], 选

取 Chl-a、总磷 (TP)、总氮 (TN)、透明度 (SD) 指标 (图 2) 进行水体富营养化评价, 避免单项指标的局限性. 结果显示查干湖 [TLI(\sum) = 35.26] 和新立城水库 [TLI(\sum) = 30.81] 均为中营养等级 ($30 < \text{TLI}(\sum) \leq 50$), 查干湖综合营养评分较新立城水库大, 由于查干湖湖底多为粉沙质土壤, 集水区为盐碱化土地并水土流失较为严重^[28], 加之周围灌区污染物的排入, 使水体中悬浮泥沙含量大, 表现为湖水透明度较低, 与其他研究结果一致^[20,23].

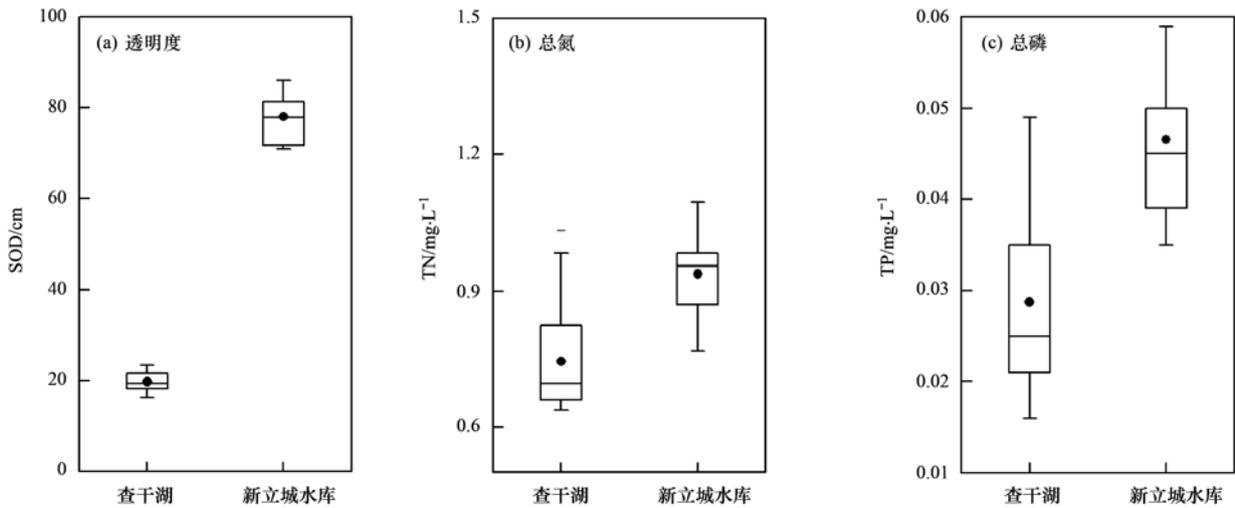


图 2 查干湖和新立城营养指标浓度

Fig. 2 Component concentration of nutrition in Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir

3.2 水体组分浓度分析

不同采样点水质参数浓度见图 3, 查干湖水体 TSM、ISM 和 OSM 分别为 $(71.57 \pm 16.61) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($42.67 \sim 92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、 $(55.8 \pm 15.29) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

$(29.33 \sim 74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 、 $(15.78 \pm 1.93) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($12 \sim 18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 明显高于新立城水库 TSM、ISM 和 OSM [$(6.89 \pm 0.92) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($5.67 \sim 8.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、 $(3.47 \pm 1.82) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($0.67 \sim 5.0$

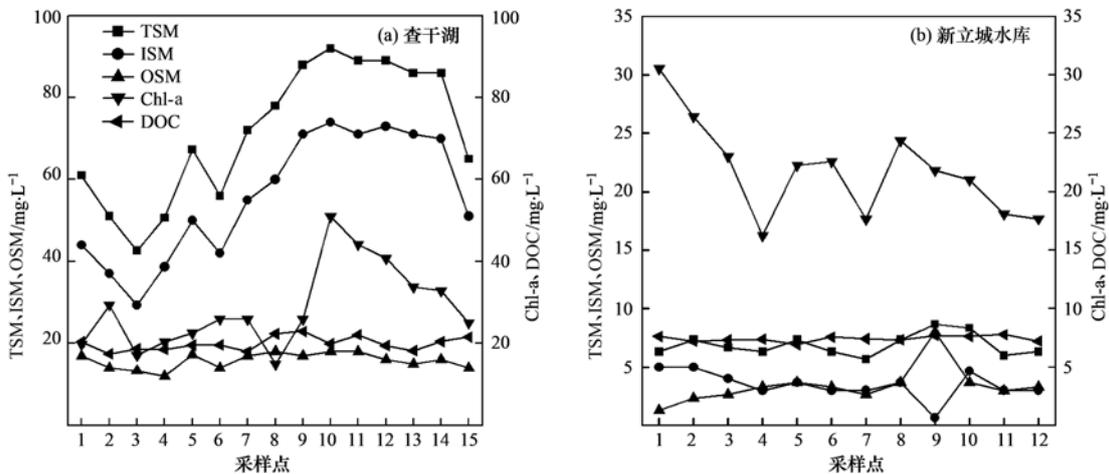


图 3 查干湖和新立城水库采样点组分浓度

Fig. 3 Component concentration of sampling sites in Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 $(3.42 \pm 1.6) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($1.33 \sim 8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 表现较高的颗粒物含量. 查干湖水体 Chl-a 和 DOC 分别为 $(28.64 \pm 10.24) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($14.93 \sim 50.93 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $(19.95 \pm 1.67) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($17.48 \sim 22.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 高于新立城水库 Chl-a 和 DOC [$(21.79 \pm 4.1) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($16.24 \sim 30.51 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $(7.43 \pm 0.24) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($6.93 \sim 7.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)]. 前研究结果表明, 在气候相对潮湿地区, 由于生物降解和光漂白作用, 内陆水体的 DOC 浓度随着水体滞留时间而降低^[29]. 而在半干旱地区, 由于降雨量少蒸发量大, 水体溶解性有机物与盐度有关, 并随着水体滞留时间而积累, 表现为相对较高的 DOC 浓度^[30]. 但 DOC 水平的高低不仅受气候的影响, 还与水体流域景观类型相关.

3.3 总悬浮颗粒物的吸收光谱特征

查干湖和新立城水库水体总悬浮颗粒物的吸收光谱如图 4(a), 总体上查干湖总悬浮颗粒物的光谱吸收系数高于新立城水库水体, 且两者总悬浮颗粒物的吸收光谱均呈现与浮游色素颗粒物吸收光谱类似. 曲线在 675 nm 左右出现明显的吸收峰, 在 440

nm 出现小吸收峰, 480 nm 出现不明显的肩峰, 在 550 nm 吸收系数达到最低值. 查干湖、新立城水库 $a_p(440)$ 分别为 $(5.12 \pm 0.72) \text{ m}^{-1}$ ($4.05 \sim 6.39 \text{ m}^{-1}$)、 $(2.59 \pm 0.39) \text{ m}^{-1}$ ($2.03 \sim 3.19 \text{ m}^{-1}$), 查干湖不同采样点总悬浮颗粒物的光谱吸收系数差异较新立城水库大, 高于其他秋季水体吸收特性研究结果的官厅水库 $(1.52 \pm 0.60) \text{ m}^{-1}$ ^[31], 与 10 月查干湖 $a_p(440)$ 值 (介于 $0.25 \sim 1.02 \text{ m}^{-1}$, 均值为 0.564 m^{-1}) 变化一致^[20]. 440 nm 处总颗粒物的吸收系数、非色素颗粒物吸收系数和色素颗粒物的吸收系数均值比较分析得出, 查干湖颗粒物以非藻类颗粒物为主, 新立城水库以色素颗粒物为主, 与水体组分浓度变化一致 (图 2). $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 与 TSM、ISM、OSM、Chl-a 的相关分析 (表 1、2) 表明, 查干湖 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 与 TSM、ISM、OSM、Chl-a 相关性都较好, 新立城水库 $a_p(440)$ 、 $a_p(675)$ 与 TSM、ISM、OSM 相关性差, 与 Chl-a 相关性较好. 表明查干湖水体悬浮颗粒物来源于陆源和浮游植物, 而新立城水库水体颗粒物多来源于浮游植物及其伴生物. 同时, 查干湖和新立城水库 DOC 和 Chl-a 均表现为不相关, 表

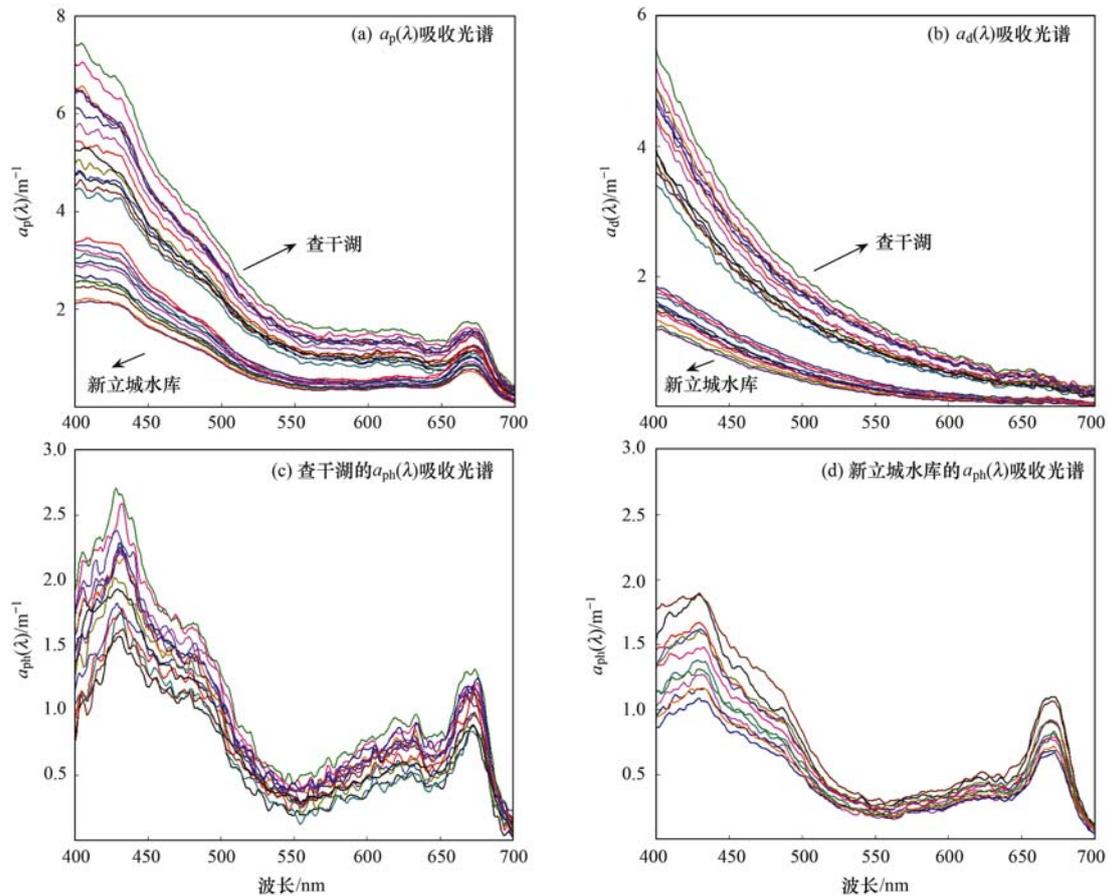


图 4 查干湖和新立城水库光学活性物质吸收光谱

Fig. 4 Absorption spectra of $a_p(\lambda)$, $a_d(\lambda)$ and $a_{ph}(\lambda)$ in Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir

表 1 查干湖颗粒物吸收系数与各组分浓度之间的线性相关系数¹⁾

Table 1 Linear correlation coefficients of absorption and components concentration in Chagan Lake

	$a_p(440)$	$a_p(675)$	$a_d(440)$	$a_d(675)$	$a_{ph}(440)$	$a_{ph}(675)$	$a_g(440)$	TSM	ISM	OSM	Chl-a	DOC
$a_p(440)$	1											
$a_p(675)$	0.94**	1										
$a_d(440)$	0.94**	0.90**	1									
$a_d(675)$	0.60*	0.59*	0.66**	1								
$a_{ph}(440)$	0.92**	0.85**	0.73**	0.43	1							
$a_{ph}(675)$	0.88**	0.95**	0.81**	0.32	0.83**	1						
$a_g(440)$	-2.16	-0.33	-0.175	0.10	-0.23	-0.42	1					
TSM	0.80**	0.75**	0.78**	0.25	0.71**	0.79**	-0.39	1				
ISM	0.80**	0.73**	0.771**	0.23	0.71**	0.77**	-0.35	0.99**	1			
OSM	0.55*	0.67**	0.599*	0.25	0.42	0.69**	-0.54*	0.72**	0.65**	1		
Chl-a	0.77**	0.65**	0.810**	0.35	0.62*	0.64*	-0.08	0.68**	0.69**	0.35	1	
DOC	0.13	0.09	0.104	0.03	0.14	0.09	-0.25	0.46	0.44	0.51	0	1

1) ** 为在 0.01 水平上相关; * 为在 0.05 水平上相关,下同

表 2 新立城水库颗粒物吸收系数与各组分浓度之间的线性线性相关系数

Table 2 Linear correlation coefficients of absorption and components concentration in Xinlicheng Reservoir

	$a_p(440)$	$a_p(675)$	$a_d(440)$	$a_d(675)$	$a_{ph}(440)$	$a_{ph}(675)$	$a_g(440)$	TSM	ISM	OSM	Chl-a	DOC
$a_p(440)$	1											
$a_p(675)$	0.94**	1										
$a_d(440)$	0.79**	0.60*	1									
$a_d(675)$	0.76**	0.70*	0.85**	1								
$a_{ph}(440)$	0.91**	0.96**	0.48	0.53	1							
$a_{ph}(675)$	0.90*	0.96**	0.49	0.57	0.98**	1						
$a_g(440)$	0.61*	0.43	0.78**	0.52	0.36	0.38	1					
TSM	0.04	0.08	-0.13	0.01	0.15	0.09	-0.31	1				
ISM	0.57	0.53	0.74**	0.80**	0.32	0.42	0.52	-0.13	1			
OSM	-0.39	-0.35	-0.63*	-0.59*	-0.15	-0.26	-0.57	0.68*	-0.82*	1		
Chl-a	0.77**	0.85**	0.47	0.66*	0.80**	0.82**	0.45	0.25	0.53	-0.25	1	
DOC	-0.11	-0.03	-0.19	-0.07	-0.02	-0.01	-0.38	0.04	-0.28	0.23	-0.01	1

明两者 DOC 均来源于陆源木质素等输入。

3.4 非藻类颗粒物的吸收光谱特征

非藻类颗粒物包括水体中矿物沉积、非生命有机碎屑比如排泄物与藻类细胞降解物,加上活的非色素有机体^[32]。查干湖和新立城水库非藻类颗粒物的吸收光谱如图 4(b),在蓝光波段吸收系数最大,且随着波长的增加吸收系数变小。查干湖和新立城水库 $a_d(440)$ 分别为 $(3.06 \pm 0.42) \text{ m}^{-1}$ ($2.35 \sim 3.83 \text{ m}^{-1}$)、 $(1.14 \pm 0.42) \text{ m}^{-1}$ ($0.86 \sim 1.42 \text{ m}^{-1}$),查干湖秋季水体 $a_d(440)$ 高于新立城水库,且高于秋季官厅水库^[31] [$a_d(440)$: $(0.37 \pm 0.19) \text{ m}^{-1}$],低于太湖^[33]、巢湖^[34];新立城水库 $a_d(440)$ 低于滇池^[35] [$a_d(440)$: $(1.94 \pm 0.67) \text{ m}^{-1}$]。由于 I 类水体非藻类颗粒物来自于浮游植物降解, $a_d(440)$ 和 Chl-a 具有较高相关性,而 II 类水体 $a_d(440)$ 通常表现出与悬浮物浓度较高的相关性^[36]。相关分析表明(表 1、2),查干湖 $a_d(440)$ 水

体与 TSM、ISM、OSM、Chl-a 相关性均较好(r^2 为 0.78^{**} 、 0.71^{**} 、 0.59^* 、 0.81^{**}),与 $a_p(440)$ 相关性一致,表明查干湖为非藻类颗粒物主导,且非藻类颗粒物来源于浮游植物和陆源或内源无机颗粒物的输入,为 II 类水体吸收特性的典型特征^[37],且对于 9 月的水体而言, $a_d(440)$ 与 Chl-a 的相关性高于 TSM,与 10 月查干湖 $a_d(440)$ 与 Chl-a 和 TSM 的相关性结果不同^[20]。由于秋季查干湖水体非藻类色素颗粒物均来源于浮游植物和陆源或内源的无机颗粒物的输入,其中无机颗粒物的输入包括松原灌区工程的盐碱荒地改造中低产田携带的 COD、TN、TP 等污染物^[28]、入湖河流及排灌携带的表土层无机矿物盐类及其反应物,内源为湖岸坍塌或沉积物再悬浮产生的颗粒物等;由于秋季为浮游植物生长减弱时期,微生物分解活动增强使降解产物逐渐增多并在水体中颗粒物来源中占主导, $a_d(440)$ 和 Chl-a 相关性高于 TSM,随着光照时数的减少和气温降

低,在内源和陆源无机颗粒物持续的输入下,藻类降解产物来源逐渐减少降低了与 $a_d(440)$ 的相关性.对比查干湖水体,新立城水库水体 $a_d(440)$ 仅表现与ISM相关性(r^2 为 0.74^{**}),与OSM表现为负相关(r^2 为 -0.63^*),表明新立城水库水体非藻类颗粒物来源于内源或陆源无机颗粒物的输入,同时随着水体浮游植物生长减弱且微生物分解活动加强,降解有机颗粒物与 $a_d(440)$ 呈现负相关.

3.5 色素颗粒物的吸收光谱特征

区域尺度上固碳速率依赖于反演的水体色素浓度,估算浮游植物净初级生产力.根据图4(c)、4(d),查干湖、新立城水库水体色素颗粒物吸收曲线在440 nm出现小吸收峰,480 nm出现吸收肩峰,在550 nm吸收系数达到最低值,620 nm处出现藻青蛋白的吸收峰,675 nm为明显的叶绿素a吸收峰.水体中浮游藻类群落结构组成和浓度大小影响色素颗粒物吸收系数^[38],查干湖水体 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 为 $(2.06 \pm 0.36) m^{-1}$ ($1.46 \sim 2.63 m^{-1}$)、 $(1.45 \pm 0.27) m^{-1}$ ($1.05 \sim 1.86 m^{-1}$),Chl-a浓度为 $(28.64 \pm 10.24) \mu g \cdot L^{-1}$ ($14.93 \sim 50.93 \mu g \cdot L^{-1}$);新立城水库水体 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 为 $(1.06 \pm 0.18) m^{-1}$ ($0.82 \sim 1.31 m^{-1}$)、 $(0.83 \pm 0.14) m^{-1}$ ($0.66 \sim 1.07 m^{-1}$),Chl-a浓度为 $(21.79 \pm 4.10) \mu g \cdot L^{-1}$ ($16.24 \sim 30.51 \mu g \cdot L^{-1}$),查干湖色素颗粒物吸收和叶绿素a浓度较新立城水库较大,表明查干湖灌区农田退水携带更大量的TN、TP等污染物,为浮游植物生长提供营养盐,表现为色素含量高.相关分析(表1、2)表明查干湖水体 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 与TSM、ISM相关性均较好, r^2 为 0.71^{**} 以上,675 nm峰值为叶绿素a的吸收峰使 $a_{ph}(675)$ 与OSM的 r^2 为 0.69^{**} ,与Chl-a的 r^2 分别为 0.62^* 、 0.64^* .相比查干湖水体,受周围农业灌区的影响小,新立城水库水体 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 仅与OSM具有相关性, r^2 分别为 0.80^{**} 、 0.82^{**} .

色素颗粒物的比吸收系数 $a_{ph}^*(\lambda)$ 是水体光学模型构建的重要参数^[39],对比比吸收系数可推动II类水体叶绿素a遥感反演精度的提高.秋季查干湖、新立城水体 $a_{ph}^*(440)$ 为 $(0.078 \pm 0.198) m^2 \cdot mg^{-1}$ ($0.05 \sim 0.11 m^2 \cdot mg^{-1}$)、 $(0.067 \pm 0.009) m^2 \cdot mg^{-1}$ ($0.06 \sim 0.09 m^2 \cdot mg^{-1}$),高于加利福尼亚南部海区^[40] [$a_{ph}^*(440) = 0.041 m^2 \cdot mg^{-1}$]、滇池^[35] [$a_{ph}^*(440) = (0.041 \pm 0.012) m^2 \cdot mg^{-1}$],低于Erie Lake^[41] [$a_{ph}^*(440) = 0.086 m^2 \cdot mg^{-1}$]、太湖^[42]

[$a_{ph}^*(440) = (0.068 \pm 0.057) m^2 \cdot mg^{-1}$].对比图3,未出现叶绿素a浓度越大,对应的归一化比吸收系数越小的现象,与文献^[42]的研究结果不同.秋季查干湖、新立城水体 $a_{ph}^*(670)$ 分别为 $(0.034 \pm 0.009) m^2 \cdot mg^{-1}$ 、 $(0.038 \pm 0.004) m^2 \cdot mg^{-1}$,高于太湖^[42] [$a_{ph}^*(670) = (0.028 \pm 0.020) m^2 \cdot mg^{-1}$]、珠江口及广东沿海^[43] [$a_{ph}^*(670) = 0.030 m^2 \cdot mg^{-1}$].由于不同水体所在地理位置和气候条件、营养水平、浮游植物群落结构及组成和光学活性物质的差异使归一化的比吸收系数发生变化,水体浮游植物色素打包效应和色素成分主要影响浮游植物比吸收系数.一般贫营养水体浮游植物比吸收系数高于富营养水体^[39,44],查干湖富营养化评分和440 nm的比吸收系数均高于新立城水库也证实这一结论,与前期在太湖和海洋水体的比较结果一致^[45].

3.6 CDOM的吸收光谱特征

由于CDOM的吸收集中于短波波段,本研究选择250~700 nm分析CDOM的吸收特性.查干湖和新立城水库水体CDOM吸收光谱 $a_g(\lambda)$ 呈现指数衰减规律(图5),且 $a_g(440)$ 分别为 $(0.96 \pm 0.49) m^{-1}$ ($0.33 \sim 2.13 m^{-1}$)、 $(0.73 \pm 0.25) m^{-1}$ ($0.37 \sim 1.11 m^{-1}$),查干湖CDOM浓度和不同采样点空间异质性明显高于新立城水库水体,高于太湖和巢湖^[34] [$(0.45 \pm 0.18) m^{-1}$ 、 $(0.7 \pm 0.17) m^{-1}$]、渤海湾^[43] ($0.732 m^{-1}$)、辽东湾^[43] ($0.461 m^{-1}$)、莱州湾^[43] ($0.579 m^{-1}$)、秦皇岛外海^[43] ($0.536 m^{-1}$),低于滇池($1.678 \pm 0.485) m^{-1}$ ^[35].

相关分析结果(表1、2)表明,查干湖 $a_g(440)$ 仅与OSM具有相关性(r^2 为 -0.54^*),表明查干湖水体CDOM来源为内源浮游植物的降解,且随着光照时数的减少和气温降低,浮游植物降解速度和产物逐渐降低和减少,在内源和外源无机物的不断输入下,与 $a_g(440)$ 呈现负相关;新立城水库 $a_g(440)$ 与TSM、ISM、OSM、Chl-a和DOC均无相关性,说明新立城水库水体DOC中无色部分所占比例高,且浮游植物降解产物不是无色DOC的主要来源,吸附在颗粒物上CDOM占总CDOM比例低,其集水区无色DOC的陆源性输入占水体CDOM的主要来源.

S_g 值可反映水体中CDOM含量相对的高低^[41],本研究选取250~400 nm进行吸收曲线的斜率拟合,查干湖、新立城水库水体CDOM吸收光谱曲线斜率 S_g 为 $(0.021 \pm 0.001) nm^{-1}$ ($0.017 \sim 0.024 nm^{-1}$)、 $(0.0176 \pm 0.001) nm^{-1}$ ($0.016 \sim$

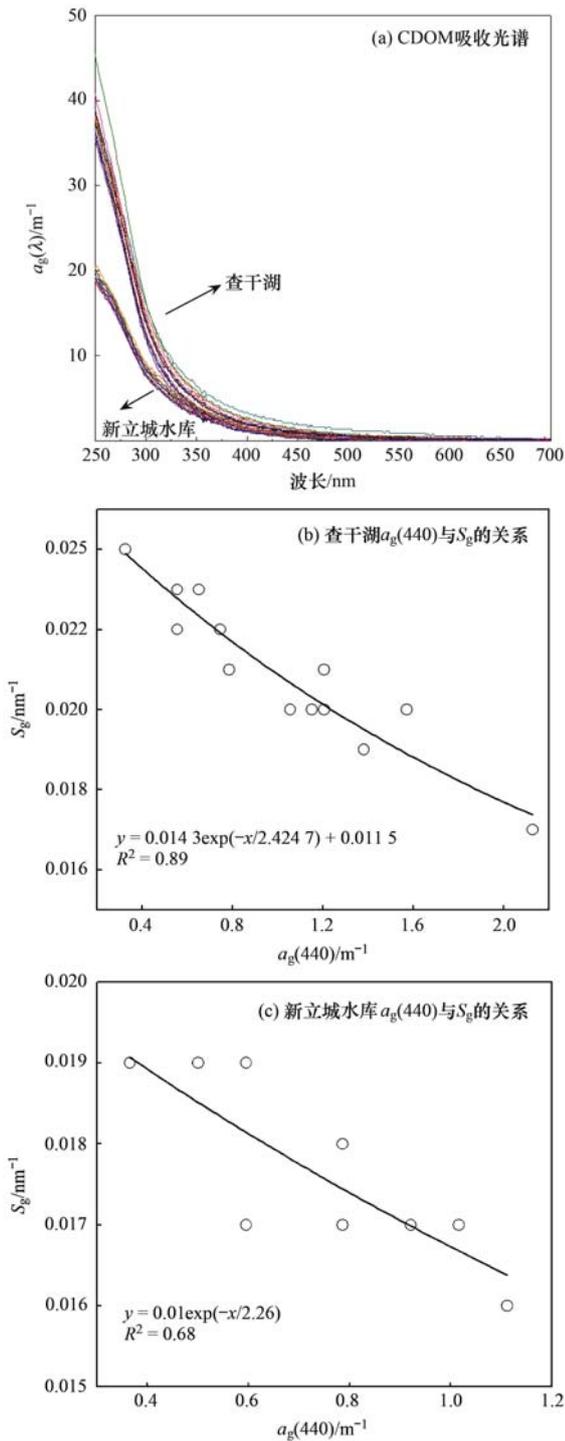


图5 查干湖和新立城水库 CDOM 吸收光谱和 $a_g(440)$ 与 S_g 的拟合关系

Fig. 5 Absorption spectra of $a_g(\lambda)$ and the relationship between $a_g(440)$ and S_g in Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir

0.019 nm^{-1}), 拟合系数 R^2 均在 0.99 以上, 查干湖 CDOM 含量高于新立城水库, 与其他参数对比结果一致, 高于巢湖^[34] $[(0.0132 \pm 0.0017) \text{ nm}^{-1}]$ 、三峡水库^[46] $[(0.0115 \pm 0.0016) \text{ nm}^{-1}]$ 、滇池^[35] $[(0.0138 \pm 0.002) \text{ nm}^{-1}]$ 、欧洲近岸水体^[36]

$[(0.0176 \pm 0.002) \text{ nm}^{-1}]$ 、Malaren 湖^[47] $[(0.0113 \pm 0.0015) \text{ nm}^{-1}]$ 、渤海^[43] $(0.01372 \text{ nm}^{-1})$ 、辽东湾^[43] (0.0143 nm^{-1}) 、莱州湾^[43] (0.015 nm^{-1}) 、秦皇岛外海^[43] (0.0141 nm^{-1}) , 低于太湖^[34] $[(0.0214 \pm 0.0024) \text{ nm}^{-1}]$. 根据前研究结果得到, 在半干旱地区水体溶解性有机物与盐度有关, 并随着水体滞留时间而积累^[29, 30], 但不同水体的 S_g 值的差异也受到参考波长和拟合波段的选择的影响. 分别对查干湖和新立城水库的 S_g 值进行曲线拟合(图 5), 两者与 $a_g(440)$ 存在较好的指数函数关系 ($R^2 = 0.89$; $R^2 = 0.68$).

CDOM 的相对分子质量 M_r 值 $a_g(250)/a_g(365)$ 可反映腐殖酸和富里酸在 CDOM 中的比例, M_r 值越小, 大分子量的腐殖酸所占比例高^[48], 陆源性物质输入往往使腐殖酸的比例偏大^[33, 49]. 查干湖、新立城水库 CDOM 的 M_r 值分别为 11.44 ± 2.00 ($7.5 \sim 15.09$)、 7.53 ± 0.79 ($6.17 \sim 8.89$), 查干湖 M_r 值和空间异质性高于新立城水库, 与 S_g 值变化一致, 同其他研究结果相似^[46, 47], 且高于太湖梅梁湾^[48] 冬季水体(均值为 8.09 ± 0.56)、巢湖^[34] (均值为 8.66 ± 0.09)、滇池^[35] (均值为 7.68 ± 0.16). 查干湖高 M_r 值显示 CDOM 组成较新立城水体中 CDOM 的分子量小, 更趋向于富里酸等小分子颗粒物, 而新立城水库有机成分的输入更大, CDOM 组成趋向于腐殖酸大分子的颗粒物, 进一步说明新立城水库受风速和湖岸坍塌的影响产生矿物悬浮、沉积微粒. 分别对查干湖和新立城水库的 S_g 、 M_r 值进行相关分析, 结果表明存在显著正相关 (r^2 为 0.96^{**} 、 0.86^{**}), 进一步说明 CDOM 的分子组成是影响形状因子 S_g 的因素之一, 与其他研究结果一致^[33], 高分子量的腐殖酸表现的光谱斜率值比低分子量低.

3.7 各组分吸收贡献率

根据线性叠加原理, 水色物质的吸收贡献率为各水色因子吸收系数的和:

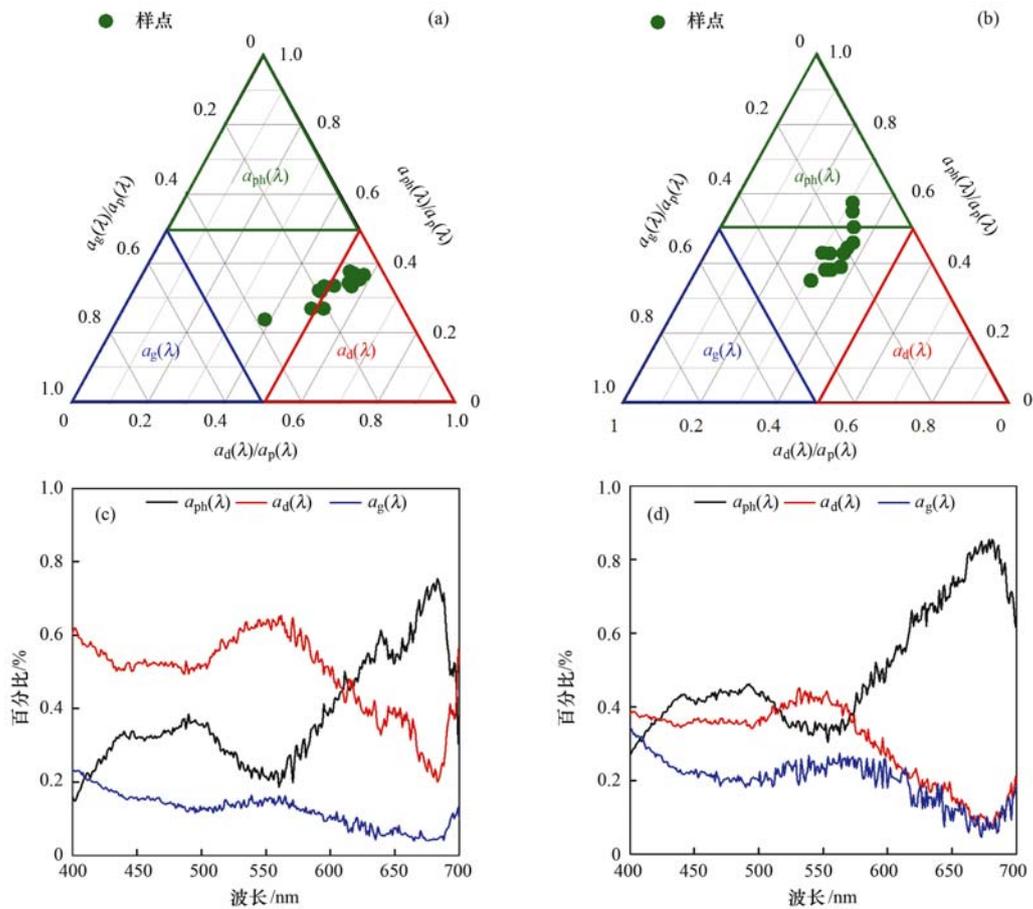
$$a(\lambda) = a_d(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_g(\lambda) + a_w(\lambda)$$

(1)

式中, $a_w(\lambda)$ 为纯水的吸收系数. 由于纯水的吸收系数为常数^[50], 本研究以非藻类颗粒物、色素颗粒物和 CDOM 的吸收系数为总吸收系数, 分别计算 400 ~ 700 nm 各采样点相对吸收贡献率. 根据图 6, 查干湖水体吸收大多数采样点吸收贡献率主要以非藻类颗粒物为主, 而新立城水库部分采样点吸收贡献

率以色素颗粒物为主,大部分贡献率相当. 在蓝光和绿光波段,查干湖水体组分平均吸收贡献率为非藻类颗粒物 > 色素颗粒物 > CDOM,非藻类颗粒物在 50% 以上,由于非藻类颗粒物和 CDOM 在短波段的强吸收,使红光波段色素颗粒物的贡献率最大. 对于查干湖以非藻类颗粒物为主的总悬浮物浓度的反演,后向散射对水体光谱的影响最大,以半分析模型反演算法较好. 由于两者均为中等程度富营养化湖泊,均可应用三波段、四波段模型进行叶绿素 a

浓度的反演. 新立城水库水体组分平均贡献率与查干湖一致,表现为非藻类颗粒物和色素颗粒物占主要优势. 蓝光波段,色素颗粒物 > 非藻类颗粒物 > CDOM; 绿光波段,非藻类颗粒物 > 色素颗粒物 > CDOM; 红光波段,色素颗粒物贡献率最大,CDOM 和非藻类颗粒物持平. 总体上,查干湖作为松原灌区工程的最终承泄区,内源和外源的无机颗粒物的输入使非藻类颗粒物贡献率相比新立城水库具有一定优势.



(a) 查干湖采样点相对吸收贡献率; (b) 新立城水库采样点相对吸收贡献率;
(c) 查干湖各组分平均吸收贡献; (d) 新立城水库各组分平均吸收贡献

图 6 查干湖和新立城水库相对吸收贡献率和平均吸收贡献

Fig. 6 Relative absorption contribution and average absorption contribution in Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir

4 结论

(1) 卡尔森综合营养状态评价指数表明秋季查干湖和新立城水库水体均为中营养等级 ($30 < TLI(\sum) \leq 50$), 查干湖评分较新立城水库高, 与其集水区颗粒物、营养盐输入有关. 秋季查干湖总悬浮颗粒物的吸收系数高于新立城水库水体, 两者的吸收光谱呈现与浮游色素颗粒物吸收光谱类似.

(2) 查干湖颗粒物以非藻类颗粒物为主,其在蓝绿光波段的平均贡献率在 50% 以上,为光辐射能量衰减的主导因子; 新立城水库以色素颗粒物为主,仅在绿光波段非藻类平均贡献率高于色素,两者 CDOM 的平均贡献率均为最低. 色素颗粒物特征波长处 $a_{ph}(440)$ 、 $a_{ph}(675)$ 和 Chl-a 变化一致,表现为查干湖高于新立城水库.

(3) 查干湖 $a_d(440)$ 为 $(3.06 \pm 0.42) m^{-1}$

($2.35 \sim 3.83 \text{ m}^{-1}$), 与 TSM、ISM、OSM、Chl-a 相关性均较好, 由于秋季为浮游植物生长减弱期和微生物分解活动增强期, 使 $a_d(440)$ 和 Chl-a 相关性高于 TSM 并逐渐降低; 新立城水库 $a_d(440)$ 分别为 (1.14 ± 0.42) m^{-1} ($0.86 \sim 1.42 \text{ m}^{-1}$) 仅表现与 ISM 正相关和 OSM 负相关. 查干湖和新立城水库 $a_g(440)$ 分别为 (0.96 ± 0.49) m^{-1} ($0.33 \sim 2.13 \text{ m}^{-1}$)、(0.73 ± 0.25) m^{-1} ($0.37 \sim 1.11 \text{ m}^{-1}$), 查干湖 $a_g(440)$ 仅与 OSM 具有相关性, CDOM 来源于浮游植物的降解; 新立城水库 $a_g(440)$ 与 TSM、ISM、OSM、Chl-a 和 DOC 均无相关性, 陆源无色 DOC 所占比例高.

(4) 250 ~ 400 nm 的吸收曲线斜率拟合, S_g 为 (0.021 ± 0.001) nm^{-1} ($0.017 \sim 0.024$)、(0.0176 ± 0.001) nm^{-1} ($0.016 \sim 0.019$), 拟合系数 R^2 均在 0.99 以上, S_g 与 $a_g(440)$ 存在较好的指数函数关系. 查干湖作为松原灌区工程的最终承泄区, 集水区较多的外源颗粒物、污染物的输入, 使水体光学特性呈现与新立城水库差别. 同时, 本研究结果也证实在半干旱区, 水体溶解性有机物与盐度有关.

参考文献:

- [1] 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): 93-106.
- [2] Zimba P V, Gitelson A. Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization[J]. *Aquaculture*, 2006, **256**(1-4): 272-286.
- [3] Kirk J T O. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystem*[M]. Cambridge, Britain: Cambridge University Press, 1994. 1-431.
- [4] Organelli E, Bricaud A, Antoine D, *et al.* Seasonal dynamics of light absorption by chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the NW Mediterranean Sea (BOUSSOLE site)[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014, **91**(5): 72-85.
- [5] 陈莉琼, 陈晓玲, 田礼乔, 等. 鄱阳湖水体悬浮颗粒物散射光谱分解方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(3): 729-733.
- [6] Song K S, Li L, Tedesco L P, *et al.* Remote estimation of chlorophyll-a in turbid inland waters: Three-band model versus GA-PLS model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **136**: 342-357.
- [7] 马荣华, 唐军武. 湖泊水色遥感参数获取与算法分析[J]. *水科学进展*, 2006, **17**(5): 720-726.
- [8] Tassan S, Ferrari G M. An alternative approach to absorption measurements of aquatic particles retained on filters [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(8): 1358-1368.
- [9] Lee Z P, Hu C M, Shang S L, *et al.* Penetration of UV-visible solar radiation in the global oceans: Insights from ocean color remote sensing[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, **118**(9): 4241-4255.
- [10] Carder K L, Hawes S K, Baker K A, *et al.* Reflectance model for quantifying chlorophyll a in the presence of productivity degradation products [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, **96**(C11): 20599-20611.
- [11] Shi K, Li Y M, Zhang Y L, *et al.* Optical scattering properties of organic-rich and inorganic-rich particles in inland waters[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(2): 308-316.
- [12] Li L H, Li L, Song K S. Remote sensing of freshwater cyanobacteria: An extended IOP Inversion Model of Inland Waters (IIMIWI) for partitioning absorption coefficient and estimating phycocyanin [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **157**: 9-23.
- [13] Lee Z P, Arnone R, Hu C M, *et al.* Uncertainties of optical parameters and their propagations in an analytical ocean color inversion algorithm[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(3): 369-381.
- [14] Song K S, Li L, Tedesco L, *et al.* Spectral characterization of colored dissolved organic matter for productive inland waters and its source analysis[J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, **25**(3): 295-308.
- [15] Lee Z P, Carder K L. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89**(3): 361-368.
- [16] Lee Z P, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(27): 5755-5772.
- [17] Mishra S, Mishra D R, Lee Z P, *et al.* Quantifying cyanobacterial phycocyanin concentration in turbid productive waters: A quasi-analytical approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **133**: 141-151.
- [18] 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.
- [19] 孙晓静, 王志春, 赵长巍, 等. 盐碱地农田排水对查干湖承泄区的水质影响评价[J]. *农业工程学报*, 2011, **27**(9): 214-219.
- [20] 王远东, 刘殿伟, 宋开山, 等. 吉林省查干湖水体悬浮颗粒物光谱吸收特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(1): 162-167.
- [21] Wang Y D, Liu D W, Song K S, *et al.* Characterization of water constituents spectra absorption in Chagan Lake of Jilin Province, Northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2011, **21**(3): 334-345.
- [22] 段洪涛, 张柏, 刘殿伟, 等. 查干湖水体光谱荧光峰特征与叶绿素 α 响应关系研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(5): 355-359.

- [23] 段洪涛, 于磊, 张柏, 等. 查干湖富营养化状况高光谱遥感评价研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(7): 1219-1226.
- [24] 宋开山, 张柏, 王宗明, 等. 吉林省查干湖水体叶绿素 a 含量高光谱模型研究[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(3): 275-282.
- [25] Röttgers R, Gehnke S. Measurement of light absorption by aquatic particles; improvement of the quantitative filter technique by use of an integrating sphere approach[J]. Applied Optics, 2012, **51**(9): 1336-1351.
- [26] Roesler C S. Theoretical and experimental approaches to improve the accuracy of particulate absorption coefficients derived from the quantitative filter technique[J]. Limnology and Oceanography, 1998, **43**(7): 1649-1660.
- [27] 陈科. 鹤地水库富营养化状况分析与防治对策[J]. 水利科技与经济, 2009, **15**(3): 214-216.
- [28] 代雪静, 田卫. 查干湖水质污染分析及控制途径[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(8): 179-184.
- [29] Song K S, Zang S Y, Zhao Y, *et al.* Spatiotemporal characterization of dissolved carbon for inland waters in semi-humid/semi-arid region, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, **17**(10): 4269-4281.
- [30] Curtis P J, Adams H E. Dissolved organic matter quantity and quality from freshwater and saltwater lakes in east-central Alberta [J]. Biogeochemistry, 1995, **30**(1): 59-76.
- [31] 雷霞, 郭子祺, 田野, 等. 官厅水库秋季悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 883-891.
- [32] Del Castillo C E, Coble P G. Seasonal variability of the colored dissolved organic matter during the 1994- 95 NE and SW monsoons in the Arabian Sea [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2000, **47**(7-8): 1563-1579.
- [33] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性[J]. 生态学报, 2006, **26**(12): 3969-3979.
- [34] 施坤, 李云梅, 王桥, 等. 太湖、巢湖水体 CDOM 吸收特性和组成的异同[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1183-1191.
- [35] 张红, 黄家柱, 李云梅, 等. 滇池水体光学物质的吸收特性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 452-463.
- [36] Wen Z D, Song K S, Zhao Y, *et al.* Influence of environmental factors on spectral characteristic of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Inner Mongolia Plateau, China [J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2015, **12**(6): 5895-5921.
- [37] Gitelson A A, Gurlin D, Moses W J, *et al.* A bio-optical algorithm for the remote estimation of the chlorophyll-a concentration in case 2 waters [J]. Environmental Research Letters, 2009, **4**(4): 045003.
- [38] Lohrenz S E, Weidemann A D, Tuel M. Phytoplankton spectral absorption as influenced by community size structure and pigment composition[J]. Journal of Plankton Research, 2003, **25**(1): 35-61.
- [39] Bricaud A, Babin M, Morel A, *et al.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization [J]. Journal of Geophysical Research; Oceans (1978-2012), 1995, **100**(C7): 13321-13332.
- [40] Millán-Núñez E, Sieracki M E, Millán-Núñez R, *et al.* Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2004, **51**(6-9): 817-826.
- [41] Binding C E, Jerome J H, Bukata R P, *et al.* Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, **112**(4): 1702-1711.
- [42] 孙德勇, 李云梅, 王桥, 等. 太湖水体中悬浮颗粒物的比吸收光谱特性及其参数化分析[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(9): 1820-1829.
- [43] 邢小罡, 赵冬至, 刘玉光, 等. 渤海非色素颗粒物和黄色物质的吸收特性研究[J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(6): 595-598.
- [44] 王明珠, 张运林, 刘笑憾, 等. 不同营养水平湖泊浮游植物吸收和比吸收系数变化特征[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 505-513.
- [45] 张运林. 太湖水体生物-光学特性及其生态学意义[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2005.
- [46] 盖利亚, 刘正军, 张继贤. 三峡坝区水体吸收系数的特征研究[J]. 遥感学报, 2010, **14**(2): 313-332.
- [47] Pierson D C, Strömbeck N. Estimation of radiance reflectance and the concentrations of optically active substances in Lake Mälaren, Sweden, based on direct and inverse solutions of a simple model[J]. Science of the Total Environment, 2001, **268**(1-3): 171-188.
- [48] Ledesma J L J, Köhler S J, Futter M N. Long-term dynamics of dissolved organic carbon; implications for drinking water supply [J]. Science of the Total Environment, 2012, **432**: 1-11.
- [49] Ma R, Tang J, Dai J, *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Taihu Lake, China; absorption [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, **27**(19): 4277-4304.
- [50] Smith R C, Baker K S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm)[J]. Applied Optics, 1981, **20**(2): 177-184.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

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