

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

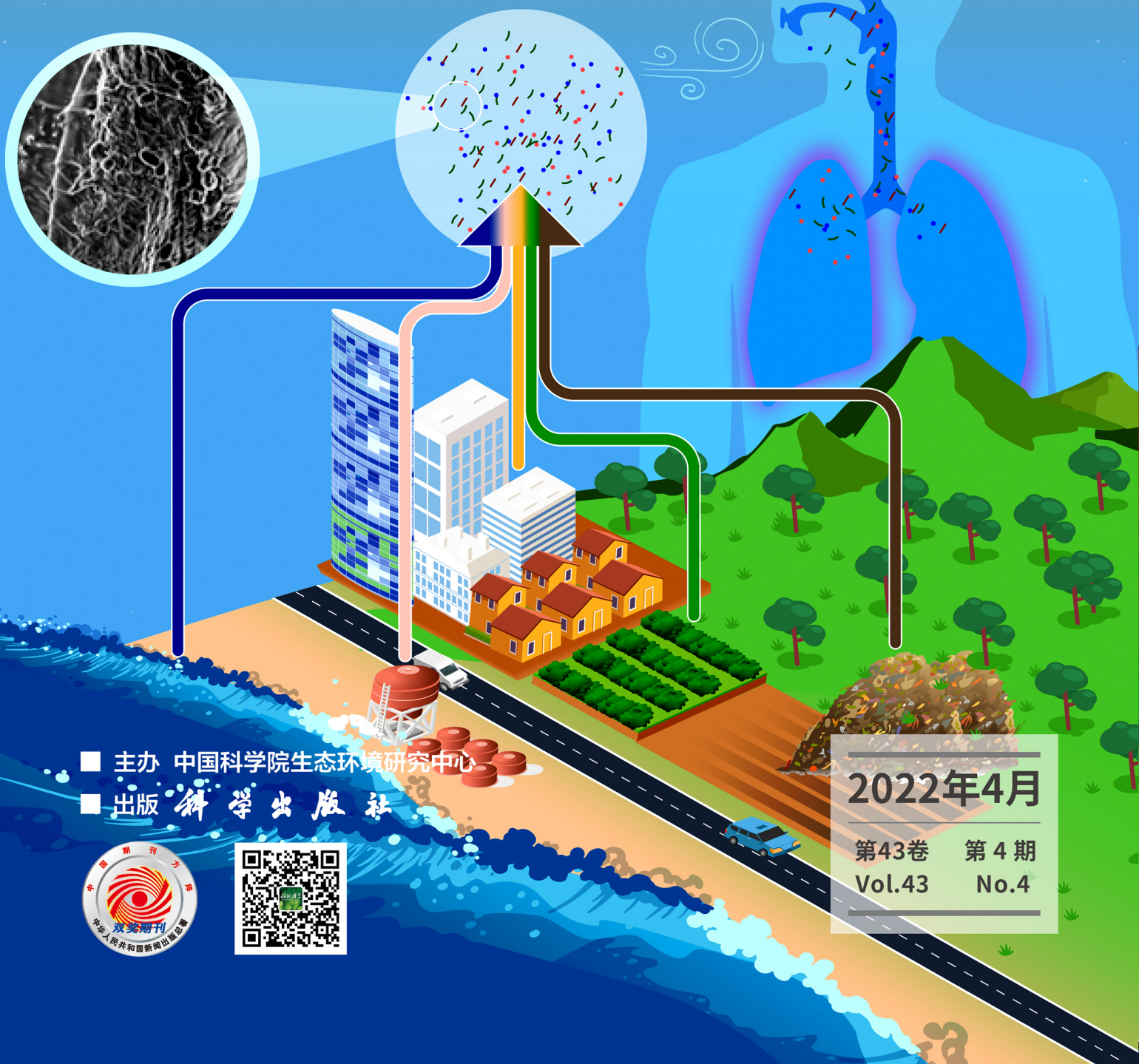
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢桢, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响

高静¹, 蒲晓^{1*}, 张玉虎¹, 程红光², 张瑞宁¹, 刘训良¹, 董雪¹, 许新瑶¹

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要:以潮白河密云段水体为研究对象, 采用三维荧光光谱法及平行因子分析解析了潮白河饮用水源中溶解性有机物 (DOM) 来源和荧光特性, 结合方差分析探讨了不同季节和区域土地利用类型对 DOM 浓度和荧光组分强度的影响。结果表明, 潮白河密云段水体荧光溶解性有机物 (FDOM) 由 5 种荧光组分组成, 包括微生物腐殖质 2 种, 自生酪氨酸, 还原醌类和陆地腐殖质类各 1 种。DOM 主要来源于微生物。河岸周边土地利用以农田为主的区域水体中 DOM 浓度相比森林和城镇较大, 河岸周边土地利用以农田和城镇为主的区域水体 FDOM 各荧光组分强度均低于森林。潮白河密云段水体 DOM 受其附近农田土地利用影响程度比森林和城镇土地利用影响更大, 由于沿岸土地利用类型变化河流中增加的 DOM 主要是非荧光部分。虽然季节对 DOM 腐殖化程度也有显著影响, 但土地利用与季节对水体 DOM 的影响不存在交互效应。

关键词:潮白河; 溶解性有机物 (DOM); 三维荧光光谱 (EEMs); 荧光指数; 平行因子分析 (PARAFAC)

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2022) 04-1950-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105013

Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source

GAO Jing¹, PU Xiao^{1*}, ZHANG Yu-hu¹, CHENG Hong-guang², ZHANG Rui-ning¹, LIU Xun-liang¹, DONG Xue¹, XU Xin-yao¹

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Regional concentrations, fluorescent components, and sources of dissolved organic matter (DOM) in a drinking water source in Chaobai River across seasons were investigated here using fluorescence excitation-emission matrices, parallel factor analysis, and fluorescence indexes. Five fluorescent-DOM components were identified, including two microbial humic-like components and one autochthonous tyrosine-like, one reduced quinone-like, and one terrestrial humic-like component. DOM was mainly derived from microorganisms. The farmland-dominated region showed the highest DOM concentration and significantly lower maximum fluorescence intensities ($F_{\max}$) of almost all fluorescent components than those in the forest-dominated region. The region dominated by urban lands exhibited obviously lower DOM concentrations than those in the farmland-dominated region and lower $F_{\max}$ values of fluorescent components than those in the forest-dominated region. No interaction was found between land use and season when considering their effects on DOM. Season had a significant influence on the humification degree of DOM. This study shows that agricultural land use had a greater impact on DOM than that of forests and urban areas, and the increased riverine DOM resulting from farmland was mainly non-fluorescent parts.

Key words: Chaobai River; dissolved organic matter (DOM); excitation emission matrix spectroscopy (EEMs); fluorescence index; parallel factor analysis (PARAFAC)

溶解性有机物 (dissolved organic matter, DOM) 作为反映水体受有机物污染的替代水质指标之一, 其大量存在对饮用水安全带来巨大挑战。例如, DOM 浓度与消毒副产物 (disinfection by-products, DBPs) 生成潜力之间存在线性正相关关系^[1], DOM 中较大分子腐殖质更易与水处理体系中消毒剂反应形成 DBPs^[2]。而 DBPs 具有致癌性, 人类长期暴露于过量 DBPs 中会对健康产生影响^[3]。因此, 为避免饮用水体系中过多 DBPs 产生, 监测饮用水源中 DOM 浓度和组分变化至关重要。

国内外研究者对不同河岸土地利用类型影响下水体 DOM 丰度和荧光组分特征进行了研究^[4,5], 但对不同土地利用类型是否会影响 DOM 浓度和荧光特性的相关结论不统一。有研究表明溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 浓度与流域农业覆盖率呈反比^[6], 也有研究表明 DOC 浓度与河流周边农

田和城镇土地利用之间无关^[7]。具有相同周边土地利用类型的不同河流 DOM 荧光特性也存在差异, 有流经农田的河流中 DOM 显示腐殖质化程度更高^[7], 也有流经农田的河流中 DOM 蛋白质含量更高^[8]。水体 DOM 特性受不同土地利用类型影响具有位点特异性。另外, 虽已有研究探讨季节或土地利用类型对河流 DOM 的影响^[9,10], 却很少有研究讨论季节和土地利用类型两因素之间是否存在交互效应, 尤其是在水源水中。因此, 同时研究不同季节和周边土地利用对水源水中 DBPs 前体 DOM 的影响可为控制后续 DBPs 生成提供数据支撑和参考方向。

收稿日期: 2021-05-05; 修订日期: 2021-09-18

基金项目: 北京自然科学基金项目 (8172015); 国家自然科学基金项目 (41601581, 41771496, 51609259); 北京市教委一般项目 (025185305000/129)

作者简介: 高静 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境中溶解性有机物存在特征, E-mail: 2180902052@enu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xiao.pu@enu.edu.cn

潮白河包括潮河、白河和密云水库,其中密云水库是华北地区最大水库、北京最大地表饮用水源地和南水北调来水重要的调蓄库,为首都提供生活和生产用水。目前水库和湖泊等水体中 DOM 的相关分布变化也是各类研究的关注热点。因此,本研究目的是:① 解析潮白河密云段水体 DOM 荧光组分及 DOM 潜在来源;② 确定土地利用和季节对水体 DOM 的影响之间是否存在交互效应;③ 探讨季节和土地利用类型变化对水源水 DOM 浓度和荧光组分荧光强度的可能影响,以期为水源水附近环境管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文选取潮白河密云段流域作为研究对象(图 1),该地区属于温带季风性大陆半湿润半干旱气候区,季节分明。流域附近主要分布有草地、森林、农田和城镇这 4 种土地利用类型。密云水库平均储水量为 10.62 亿 m^3 ^[11],周围土地利用类型主要为森林和草地,有 2 大支流,分别为白河和潮河,其中白河流域面积 8575.4 km^2 ,起源于河北省沽源县,经赤城县,延庆县,怀柔区,流入密云水库;潮河流域面积 6292.3 km^2 ,起源于河北省丰宁县,经滦平县,自古北口入密云水库。其汇水河流还有蛇鱼川河、白马关河、蛇牛河、安达木河和清水河等支流或季节性河,均流入密云水库。出库后,两河在密云县河槽村汇合始称潮白河河流,年均天然径流量为 10.22 亿 m^3 。潮白河入库前周边土地利用类型主要为森林,出库后流经区域土地利用类型主要为农田和城镇。该流域为暖温带季风性大陆性半湿润半干旱气候,冬季受西伯利亚、蒙古高压影响,夏季受大

陆低压和太平洋高压控制,四季分明,干湿冷暖变化明显,年平均气温为 10.8°C 。降水季节性变化明显,年平均降水量 660 mm ,6~8 月的降水量占全年降水量的 76% 左右,降水多以暴雨形式出现,降雨强度大且侵蚀力强,加之坡度大和土层薄,极易形成水土流失。近年来,为支持农业和城市发展,潮白河有限水资源被不断开发利用,河流周边区域工农业活动增加,导致河流水量不仅有减少趋势,水质也因受到不同来源污染物的改造,发生了相当大的变化,导致水体溶解性污染物增多,富营养化程度加重,浮游生物量增加^[12]。

1.2 样品采集与检测

本研究样品采集于 2017 年,在潮白河密云段流域设置 10 个采样断面如图 1 所示(S1~S10),潮河采样点有 S1、S3、S4 和 S5,白河采样点有 S2、S6、S7 和 S8, S9 和 S10 设置在潮河和白河汇合后的潮白河段。采样期包括 3 个季节:春季(4~5 月)、夏季(6~8 月)和秋季(9~11 月),每月采集一次河水样品。采集的河水样品通过预冲洗的 $0.45 \mu\text{m}$ 过滤器进行加压过滤($<200\,000 \text{ Pa}$),保存在 4°C 下以便后续测定分析。根据监测断面附近的土地利用类型,将采样断面划分为 4 种类型:L1(河岸土地利用以林地为主,包括 S1、S2、S3、S6),L2(河岸土地利用以农田为主,包括 S4、S7),L3(河岸土地利用以城镇为主,包括 S5、S8)和 L4(河岸土地利用类型既有农田又有城镇,包括 S9、S10)。

DOC 浓度通过 Elab-TOC 分析仪(中国苏州埃兰)测得。水样三维荧光光谱(EEMs)采用 F-7000 荧光光谱仪(日本日立)在 $220 \sim 450 \text{ nm}$ 激发波长(间隔 5 nm)和 $290 \sim 600 \text{ nm}$ 发射波长(间隔 1 nm)下测量。水样中铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、镍(Ni)和锌(Zn)的离子浓度采用电感耦合等离子体质谱仪测得。

1.3 荧光指数分析

通过 EEMs 可以计算获得荧光指数,指数 FI_{370} 用于探究 DOM 来源,是激发波长(E_x)为 370 nm 时发射波长(E_m)在 450 nm 和 500 nm 处荧光强度的比值^[13]。 FI_{370} 值低于 1.4 表明 DOM 具有陆源腐殖酸特性。值越大,DOM 中腐殖酸含量越高。当值高于 1.9,则表明 DOM 主要来源于藻类或细菌的渗出液及胞外释放液^[14]。

FI_{310} 是 $E_x = 310 \text{ nm}$ 时, 380 nm 与 430 nm 发射波长下荧光强度之比,与本地生物活动密切相关。其值在 $0.6 \sim 0.7$ 之间表示自生 DOM 较少。其值与自生源 DOM 贡献比例呈正相关关系。 FI_{310} 值大于 1.0 则表示 DOM 来源于生物细菌或水生细菌^[15]。

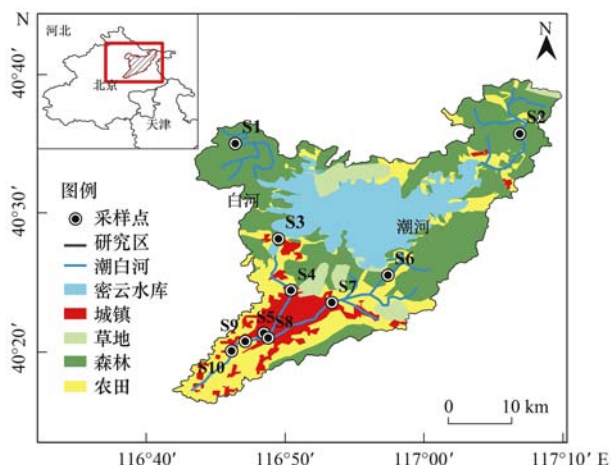


图 1 研究区土地利用状况和采样断面位置示意

Fig. 1 Location and land use of the study area and monitoring sections

FI_{255} 是 $E_x = 255\text{ nm}$ 时, $435 \sim 480\text{ nm}$ 与 $300 \sim 345\text{ nm}$ 发射光谱的平均荧光强度之比^[16], 该值与有机物腐殖化程度有关. 较高的 FI_{255} 值 (>3) 与复杂分子如陆源高分子芳香族化合物有关^[16].

1.4 统计分析

采用 MATLAB 中 DOMFluor 工具箱对水样 EEMs 进行平行因子分析, 确定荧光溶解性有机物 (FDOM) 组分及其最大荧光强度 ($F_{\max}$). 使用 SPSS 22.0 对河流 DOM 浓度, 荧光组分 $F_{\max}$ 和荧光指数进行单因素方差分析, 结合多元方差分析方法 (MANOVA) 探究季节变化和不同区域土地利用类型对 DOM 的影响. 图表绘制采用 SigmaPlot 14.0 和 MATLAB2016a 软件.

2 结果与分析

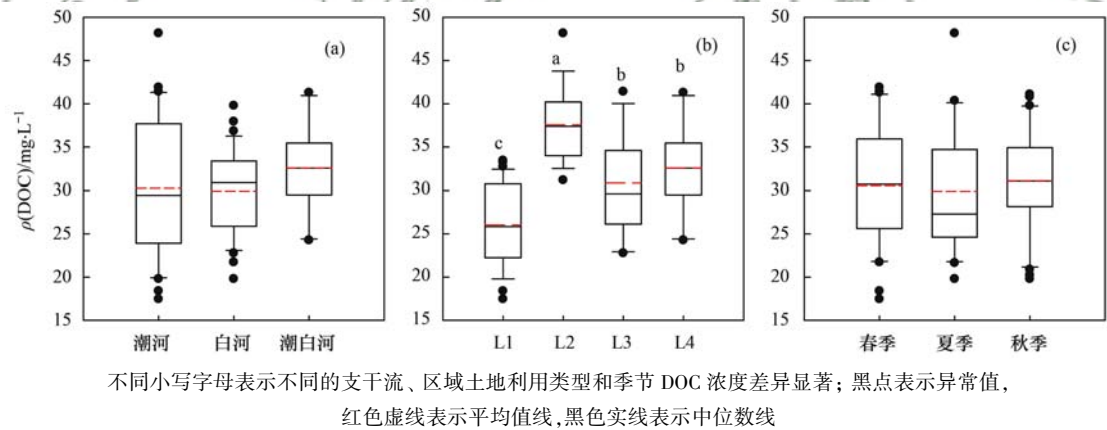
2.1 DOC 浓度变化

经检测, 4~11 月潮白河密云段水体所有采样点 $\rho(\text{DOC})$ 范围为 $17.4 \sim 48.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $30.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2). 不同支干流、区域土地利用类型和季节潮白河密云段 DOC 浓度均出现一定波动. 其中, 潮白河中 DOC 平均值最大 ($32.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 潮河 DOC 平均值变化范围最大, 均值

处于中等水平 ($30.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); 潮河、白河和潮白河中 DOC 浓度差异不显著. 相比支流干流间 DOC 浓度差异, 河流周边不同土地利用类型区域之间 DOC 浓度变化更大, 从上游到下游, $\rho(\text{DOC})$ 平均值从 $26.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (L1) 显著上升到 $37.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (L2), 然后显著降低至 $30.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (L3) 和 $32.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (L4), DOC 浓度组间差异显著. 此外, 春季、夏季和秋季 $\rho(\text{DOC})$ 平均值分别为 30.6 、 29.9 和 $31.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P>0.05$), DOC 浓度未出现明显季节性变化.

2.2 FDOM 荧光光谱特征分析

采用 PARAFAC 模型结合 EEMs 进行半拆分验证确定潮白河密云段水体 FDOM 有 5 个荧光组分 (图 3 和表 1). C1 分别在 350 nm 和 345 nm 处显示出激发和发射最大值, 与 Yamashita 等^[17] 的研究中定义的微生物腐殖质类似. C2 最大激发和发射波长均为 425 nm , 也被认为是一种微生物腐殖质类似物^[17]. C3 的荧光峰与 Stedmon 等^[18] 的研究中本地酪氨酸样荧光相似. 根据荧光团激发和发射最大波长分别为 270 nm 和 560 nm , 可将 C4 划为还原醌类^[19,20]. C5 ($E_x/E_m = 240/510\text{ nm}$) 可被归类为陆源腐殖质^[21].



不同小写字母表示不同的支干流、区域土地利用类型和季节 DOC 浓度差异显著; 黑点表示异常值, 红色虚线表示平均值线, 黑色实线表示中位数线

图 2 潮白河密云段不同的支干流、区域土地利用类型和季节 DOC 浓度变化

Fig. 2 Variations in DOC concentration of Chaobai River located in Miyun district in different tributaries and the mainstream, regions with different land uses, and seasons

表 1 潮白河密云段 FDOM 荧光组分特征

Table 1 Characteristics of DOM fluorescence components in Chaobai River located in Miyun district

组分	$E_{x\max}/E_{m\max}$	组分类型	其它文献中类似组分对应波长
C1	350/345	微生物腐殖质	C4: 330/380 ^[17]
C2	425/425	微生物腐殖质	C5: 400/440 ^[17]
C3	310/305	色氨酸、蛋白质类	C8: 275/304 ^[18]
C4	270/560	还原醌类	C2: 240~275/434~520 ^[19,20]
C5	240/510	陆源腐殖质	C3: 260(370)/490 ^[21]

2.3 FDOM 荧光组分变化

周边不同区域土地利用类型和不同季节 FDOM

荧光组分的 $F_{\max}$ 变化见图 4. 4~11 月所有采样点 FDOM 荧光组分中 $F_{\max}$ 最大值为 1.9 R. U. (Raman Unit). C1 和 C2 $F_{\max}$ 平均值高于其它组分 [C1: (0.9 ± 0.5) R. U.; C2: (1.1 ± 0.4) R. U.; C3 (0.4 ± 0.2) R. U.; C4: (0.2 ± 0.1) R. U.; C5: (0.1 ± 0.1) R. U.], 在 FDOM 总荧光强度中占比相对较大 (平均值: C1 占 31%, C2 占 45%, C3 占 17%, C4 占 6%, C5 占 1%). 不同支流和干流之间, 对比汇合前潮河和白河 $F_{\max}$, 潮白河 C1~C4 的 $F_{\max}$ 均有显著降低 ($P<0.05$), 但潮河与白河 C1~C5 的 $F_{\max}$ 值无显

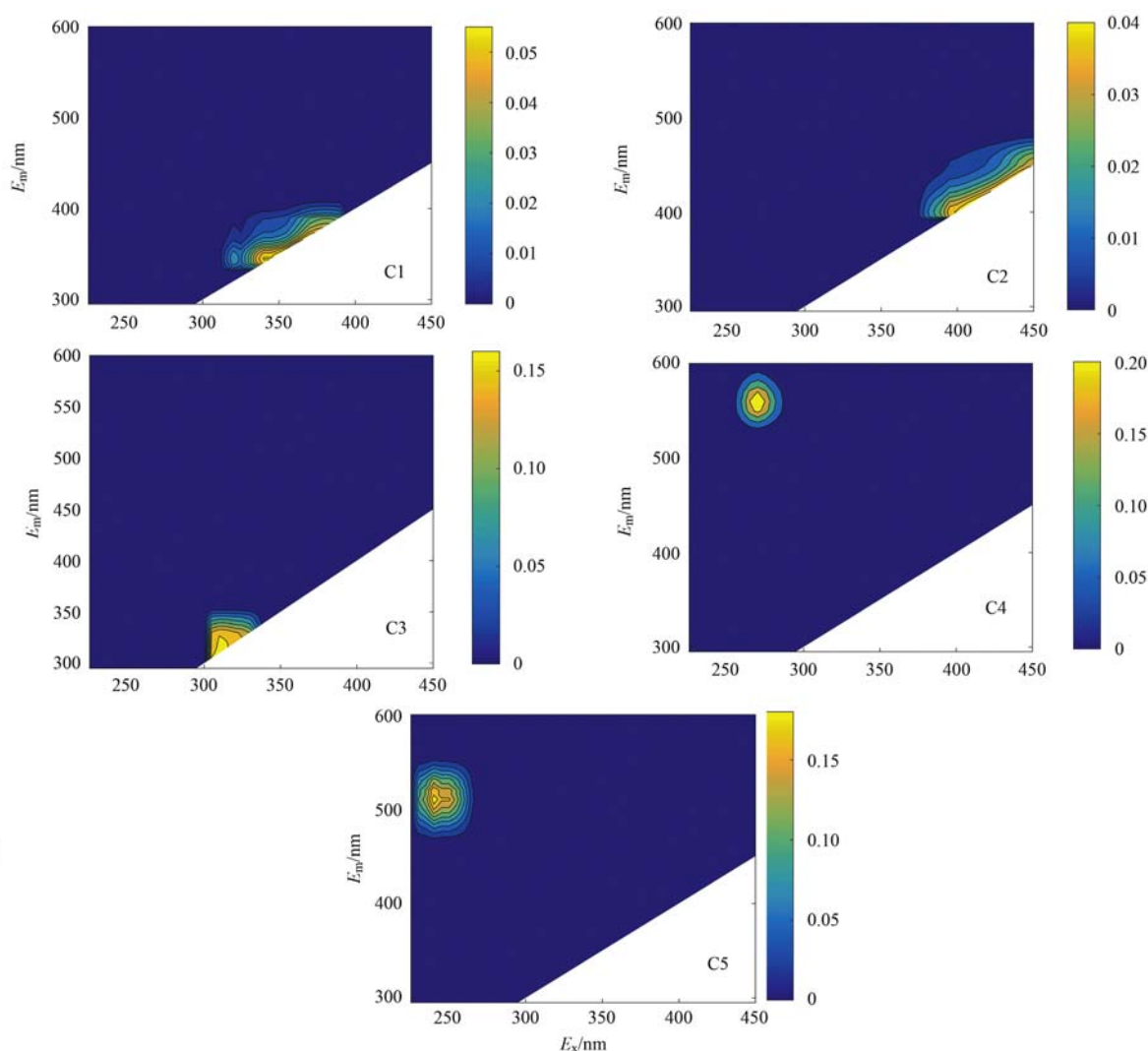


图3 潮白河密云段 FDOM 荧光光谱特征

Fig. 3 Characteristics of FDOM fluorescence spectrum in Chaobai River located in Miyun district

著差异 ($P > 0.05$). 从 L1 ~ L4, 河流 FDOM 荧光组分 $F_{\max}$ 平均值呈持续下降趋势. 与 L1 相比, L2 区域河流中 C1、C3、C4 和 C5 的 $F_{\max}$ 平均值出现显著下降 ($P < 0.05$). 与 L2 相比, L3 区域河流中 C1、C3 和 C4 的 $F_{\max}$ 平均值也显著降低 ($P < 0.05$). 但除 C3 之外, L3 和 L4 区域河流中 C1 ~ C5 的 $F_{\max}$ 平均值都无显著差异 ($P > 0.05$). 另外, 尽管相邻区域之间 C2 的 $F_{\max}$ 平均值没有出现明显变化 ($P > 0.05$), 但 L1 [(1.52 ± 0.16) R. U.] 和 L4 [(0.80 ± 0.28) R. U.] 区域 C2 的 $F_{\max}$ 平均值存在显著差异. 而在各个季节之间, 各荧光组分仅有 C1 的 $F_{\max}$ 平均值出现显著变化, 相比春季, 在夏季出现显著降低 ($P < 0.05$).

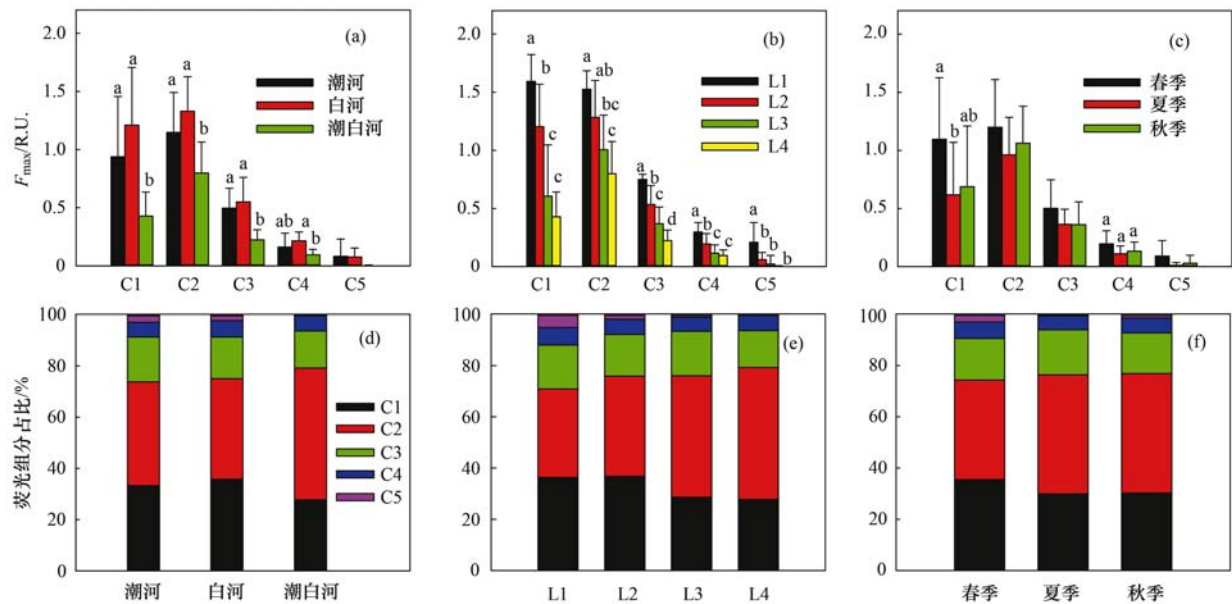
2.4 荧光指数变化

4 ~ 11 月所有采样点水体中 FDOM 的 FI_{370} 、 FI_{310} 和 FI_{255} 指数变化范围分别为 2.2 ~ 3.1、0.8 ~ 1.3 和 0.2 ~ 1.0, 在不同支干流、区域土地利用类型和季节的平均值如表 2 所示. 与交汇前潮河和白

河相比, 潮白河 FI_{370} 、 FI_{310} 和 FI_{255} 值显著增加 ($P < 0.05$). 尽管 L1 区域 FI_{255} 值显著低于 L4 ($P < 0.05$), 但 L1 ~ L4 之间相邻区域 FI_{255} 值无显著差异 ($P > 0.05$). 相比 L1, L2 区域 FI_{310} 值有显著增加 ($P < 0.05$), L2 和 L3 之间无显著差异 ($P > 0.05$). L3 和 L4 区域 FI_{370} 值显著高于 L1 ($P < 0.05$), 而相邻区域之间 FI_{370} 值却无显著差异 ($P > 0.05$). 除此之外, 不同季节潮白河中 FI_{370} 和 FI_{310} 值变化不大, FI_{255} 从春季的 0.5 和夏季的 0.6 显著增加到秋季的 0.7 ($P < 0.05$).

2.5 季节和区域土地利用类型影响

MANOVA 的 F 和 P 值如表 3 所示. 可以发现, 周边区域不同土地利用类型对 DOM 浓度、C1 ~ C5、 FI_{310} 和 FI_{370} 影响显著, 季节变化仅对 FI_{255} 和 C1 有显著影响, 区域土地利用类型和季节之间无显著交互效应. 因此, 不同区域土地利用类型或季节 DOM 之间的显著变化可归因于区域土地利用类型或季节因素的独立作用.



不同小写字母表示不同的支干流、区域土地利用类型和季节 FDOM 荧光组分强度差异显著

图 4 潮白河密云段不同的支干流、区域土地利用类型和季节 FDOM 荧光组分最大荧光强度变化

Fig. 4 Variations in fluorescent-DOM components in maximum fluorescence intensity ($F_{\max}$) of Chaobai River located in Miyun district in different tributaries and the mainstream, regions with different land uses, and seasons

表 2 潮白河密云段不同的支干流、区域土地利用类型和季节荧光指数变化¹⁾

Table 2 Fluorescence indexes including FI_{255} , FI_{310} , and FI_{370} of Chaobai River located in Miyun district in different tributaries and the mainstream, regions with different land uses, and seasons

类别	FI_{255}	FI_{310}	FI_{370}
潮河	0.499 ± 0.122b	1.104 ± 0.070b	2.576 ± 0.247b
白河	0.580 ± 0.195ab	1.074 ± 0.121b	2.516 ± 0.208b
潮白河	0.668 ± 0.190a	1.208 ± 0.068a	2.777 ± 0.085a
L1	0.473 ± 0.132b	0.998 ± 0.826c	2.364 ± 0.116c
L2	0.549 ± 0.175ab	1.110 ± 0.095b	2.672 ± 0.243bc
L3	0.567 ± 0.171ab	1.123 ± 0.078ab	2.525 ± 0.184ab
L4	0.668 ± 0.190a	1.208 ± 0.068a	2.777 ± 0.085a
春季	0.498 ± 0.110b	1.117 ± 0.126	2.577 ± 0.211
夏季	0.634 ± 0.258ab	1.127 ± 0.094	2.686 ± 0.254
秋季	0.693 ± 0.132a	1.134 ± 0.057	2.619 ± 0.216

1) 不同小写字母表示不同的支干流、区域土地利用类型和季节 DOM 荧光指数差异显著

表 3 不同季节和区域土地利用类型下 DOM 浓度、荧光组分和指数多元方差分析结果¹⁾

Table 3 The F values and P values of the effects of region and season on DOC concentrations, DOM fluorescent components and indexes through the multivariate analysis of variance

项目	类型	区域土地利用类型	季节	区域土地利用类型 × 季节
DOC 浓度	F	21.991	0.399	1.023
	P	<0.001	0.673	0.407
C1	F	16.077	2.455	0.102
	P	<0.001	0.099	0.981
C2	F	10.571	0.431	0.273
	P	<0.001	0.653	0.893
C3	F	28.779	0.354	1.863
	P	<0.001	0.704	0.136
C4	F	10.934	1.049	0.238
	P	<0.001	0.360	0.915
C5	F	7.834	0.334	0.217
	P	<0.001	0.718	0.927
FI_{255}	F	2.065	4.620	1.258
	P	0.121	0.016	0.303
FI_{310}	F	12.098	1.280	1.787
	P	<0.001	0.290	0.151
FI_{370}	F	10.417	0.630	1.304
	P	<0.001	0.538	0.286

1) 黑体字表示 $P < 0.05$, 因素对因变量具有显著影响

3 讨论

3.1 DOM 溯源

由表 2 可知,不同分类下潮白河 FI_{370} 值均大于 1.9(2.2~3.1),与 McKnight 等^[13]报道的微生物衍生富里酸对应值相似,表明潮白河密云段水 DOM 主要是由微生物产生的自生源物质^[16]. FI_{310} 变化范围为 0.8~1.3,平均值为 1.1 ± 0.1,与 Huguet 等^[15]的研究报道范围一致,表明 DOM 来源于微生物或水生细菌,同时反映出潮白河中 DOM 新生内源贡献较大. FI_{255} 值变化范围为 0.2~1.0,也表明 DOM 主要来源于自生生物活动^[16]. 因此,潮白河密云段

DOM 主要来自微生物,与李家河水库上游水体和岗南水库沉积物间隙水中 DOM 主要来源相似,新生内源贡献较大^[22,23].

尽管不同支干流、区域土地利用类型和季节之

间的荧光指数平均值存在一些差异,但 MANOVA 的结果表明, FI_{370} 和 FI_{310} 仅受周边不同土地利用类型区域影响, FI_{255} 仅受季节影响(表 2)。从春季到秋季, FI_{255} 值的增加反映了该河流在该采样期内的腐殖化程度在增加^[24]。随着农田和城镇土地利用增加, FI_{310} 和 FI_{370} 的值从 L1 ~ L4 区域一直在增加,这表明农田和城镇土地利用可能比森林带来更多自生贡献 DOM^[16]。这一发现与加拿大安大略省温带流域呈现出的结果相符,在该研究中,这些增加的微生物来源 DOM 被认为可能是由微生物群落所驱动产生,因为农田和城镇土地中输送至河流的氮素一般高于森林,导致附近河流微生物产量大多较高^[25],这些氮素可能来源于化肥或汽车尾气和工业废气等^[26]。因此,后续研究可以进一步研究河流中沿岸土地向河流的碳与氮输出和微生物生产。

3.2 DOM 浓度与土地利用

据 ANOVA 和 MANOVA 结果(图 2 和表 3),可以发现土地利用对潮白河密云段 DOC 浓度有显著影响。与土地利用以森林为主的 L1 区域相比,河岸以农业用地为主的 L2 处 DOC 浓度显著较高,与中国粮食主产区之一伊洛河流域水体相似,表明河岸的农田土地利用可以增加河流 DOC 浓度^[27]。可能是因为,河岸土地利用以农田为主的区域与以森林用地为主的区域相比可容纳更多有机肥料,使得来源于这些肥料的 DOM 输出到河流中也更多^[28]。此外,进入河流后,这些肥料也可能成为微生物群落的养分,一定程度上可以刺激河流微生物对 DOM 的生产^[29]。

由于以城镇用地为主的区域 L3 处 DOC 浓度明显低于 L2,因此可以反映出城镇土地利用可使 DOC 浓度降低。当 DOM 从河岸土壤传输到河流,被防护性植被(例如河岸草皮)截留一部分^[30],或被城镇污水系统稀释时^[31],则可能出现这样的结果。然而,也有研究表明,由于城市区域内污水处理和排放不当,进入汇水区,导致城市和城乡结合区域 DOC 浓度均大于农村区域^[5,32],这说明潮白河密云段水体附近城镇污水排放和处理相对规范,防护植被截留或排水入河稀释作用对 DOC 浓度的影响可能远大于污水输入 DOM 的影响。

而在 L4 区域(河岸地区占主导地位的土地利用类型有城镇和农田),DOC 浓度与 L3 相比没有显著变化,可能是由于城镇和农田对 DOC 浓度的影响有所抵消。此外,尽管 L3 位于潮河和白河汇合之前, L4 位于汇合之后,但由于 L3 和 L4 之间 DOC 浓度没有显著差异,表明河流汇合对其中 DOC 浓度没有

显著影响。

由以上结果及讨论可以看出,潮白河密云段 DOC 浓度变化与人类活动密切相关,尤其在河岸以农田和城镇为主要土地利用类型的区域,与施肥、污水排放、微生物活动等都可能存在密切联系^[33]。

3.3 FDOM 荧光组分与土地利用

当不同荧光团吸收相同辐射能量时,产生荧光效率不同。因此,不同荧光团之间 F_{max} 值差异不能代表荧光组分浓度差异,但不同条件下同一荧光团 F_{max} 值与其浓度呈正相关。ANOVA 和 MANOVA 的结果表明,FDOM 荧光组分荧光强度也受到区域不同土地利用类型的影响(图 4 和表 3)。L4 处 C1 ~ C5 的 F_{max} 值显著低于 L1 [图 4 (b)],就可以通过河流周边土地利用类型的变化进行解释。从表 4 可以看出, L3 和 L4 处铁(Fe)、镍(Ni)和锌(Zn)的平均离子浓度均高于 L1。因此,可以认为 C1 ~ C5 的 F_{max} 下降可能是因为 L3 和 L4 处金属对 FDOM 的猝灭作用相比 L1 更强,由于微生物腐殖质、蛋白质样、还原醌类和陆地腐殖质类物质可以被这些金属猝灭^[34,35],一定程度上,随着河流中金属浓度的增加,猝灭效果可能会增强^[17],DOM 荧光团会减少^[36]。然而,在加拿大安大略省流域,农业和人为土地利用的压力会使微生物活动强度增大,导致该地区原生 FDOM (包括微生物腐殖质,蛋白质和还原性醌类物质)更丰富^[37]。因此,以上内源荧光组分 F_{max} 值降低的原因可以解释为,以农田和城镇土地利用为主的区域由于金属与 FDOM 络合减少的 DOM 荧光团量可能远远超过了微生物活动受到农业和人为活动刺激产生的荧光团量。此外,一般来说,由于森林覆盖地区的矿质土壤对腐殖质和疏水性 FDOM 的吸附能力要比农田或城镇强,因此森林覆盖地区从土壤输入到河流的腐殖质要少于农田,农田附近河流受纳 FDOM 多于森林^[38]。而从森林周边河流 C5 的 F_{max} 值高于农田的现象,可以推断出金属猝灭对 C5 含量的影响可能比周边土壤输入更显著。另外, L1 ~ L4 区域之间 C1 ~ C5 的 F_{max} 值下降程度的不同可以解释为不同荧光组分与金属结合时猝灭程度可能不同^[17]。综上所述,农业和城镇土地利用均可降低 FDOM 荧光强度,周边土地以农田和城镇为主的河流中较高的金属浓度可能是造成这种情况的原因。结合土地利用类型对 DOC 浓度的影响,可以推断出潮白河密云段河岸农业活动导致河流中增加的 DOM 可能主要是非荧光部分。

表 4 潮白河密云段不同区域土地利用类型铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、镍(Ni)和锌(Zn)离子浓度/mg·L⁻¹
Table 4 Ion concentrations of copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), nickel (Ni), and zinc (Zn) in different regions
with different land uses in Chaobai River located in Miyun district/mg·L⁻¹

区域土地利用类型	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
L1	0.001 ± 0.001	0.006 ± 0.002c	0.002 ± 0.001	0.000 ± 0.000c	0.001 ± 0.001c
L2	0.001 ± 0.000	0.010 ± 0.006ab	0.014 ± 0.041	0.000 ± 0.001c	0.002 ± 0.001bc
L3	0.003 ± 0.007	0.012 ± 0.007a	0.005 ± 0.004	0.001 ± 0.001b	0.004 ± 0.003ab
L4	0.001 ± 0.002	0.009 ± 0.004bc	0.003 ± 0.003	0.002 ± 0.001a	0.06 ± 0.003a

1) 不同小写字母表示不同区域土地利用类型金属离子浓度差异显著

4 结论

(1)潮白河密云段水体中 FDOM 荧光组分包括微生物腐殖质 2 种,自生源酪氨酸类物质、还原醌样和陆地腐殖质样各 1 种。

(2)DOM 主要来源为微生物,不同季节和区域土地利用类型对 DOM 的来源影响不大。

(3)对比森林和城镇,河岸周边土地利用以农田为主的水体 DOM 浓度最大,但河岸周边土地利用以农田和城镇为主的水体 FDOM 各荧光组分的 F_{max} 值均低于森林。季节和土地利用对 FDOM 腐殖化程度和其荧光组分占比各有显著影响,但季节与土地利用对 DOM 的影响不存在交互效应。农田土地利用对 DOM 影响相比森林和城镇土地利用类型更大,使河流中增加的 DOM 主要是非荧光部分。

参考文献:

[1] An D, Gu B, Sun S N, *et al.* Relationship between THMs/NDMA formation potential and molecular weight of organic compounds for source and treated water in Shanghai, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **605-606**: 1-8.

[2] 刘冰, 于鑫, 余国忠, 等. 污水中溶解性有机氮类化合物的氯化反应特性及其消毒副产物生成潜能[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3156-3163.

Liu B, Yu X, Yu G Z, *et al.* Chlorination characteristic and disinfection by-product formation potential of dissolved organic nitrogen compounds in municipal wastewater[J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3156-3163.

[3] Lu J F, Zhang T, Ma J, *et al.* Evaluation of disinfection by-products formation during chlorination and chloramination of dissolved natural organic matter fractions isolated from a filtered river water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **162**(1): 140-145.

[4] Hosen J D, Armstrong A W, Palmer M A. Dissolved organic matter variations in coastal plain wetland watersheds: the integrated role of hydrological connectivity, land use, and seasonality[J]. Hydrological Processes, 2018, **32**(11): 1664-1681.

[5] 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 等. 溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1751-1759.

Li Y, Wei H J, Wang K, *et al.* Analysis of the relationship between dissolved organic matter (DOM) and watershed land-use based on three-dimensional fluorescence-parallel factor (EEM-PARAFAC) analysis[J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1751-1759.

[6] Cronan C S, Piampiano J T, Patterson H H. Influence of land use and hydrology on exports of carbon and nitrogen in a Maine River Basin[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, **28**(3): 953-961.

[7] Wilson H F, Xenopoulos M A. Ecosystem and seasonal control of stream dissolved organic carbon along a gradient of land Use[J]. Ecosystems, 2008, **11**(4): 555-568.

[8] Vidon P, Wagner L E, Soyeux E. Changes in the character of DOC in streams during storms in two Midwestern watersheds with contrasting land uses[J]. Biogeochemistry, 2008, **88**(3): 257-270.

[9] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. Soil Science, 2000, **165**(4): 277-304.

[10] Spencer R G M, Aiken G R, Wickland K P, *et al.* Seasonal and spatial variability in dissolved organic matter quantity and composition from the Yukon River basin, Alaska[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2008, **22**(4), doi: 10.1029/2008GB003231.

[11] Zeng Q H, Qin L H, Bao L L, *et al.* Critical nutrient thresholds needed to control eutrophication and synergistic interactions between phosphorus and different nitrogen sources [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(20): 21008-21019.

[12] Xiong W, Ni P, Chen Y Y, *et al.* Zooplankton community structure along a pollution gradient at fine geographical scales in river ecosystems: the importance of species sorting over dispersal [J]. Molecular Ecology, 2017, **26**(16): 4351-4360.

[13] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. Limnology and Oceanography, 2001, **46**(1): 38-48.

[14] 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 等. 太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4958-4969.

Zhang W H, Zhao D L, Wang X Y, *et al.* Absorption and three dimensional fluorescence spectra of CDOM in the water of the Taibaishan Nature Reserve[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4958-4969.

[15] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. Organic Geochemistry, 2009, **40**(6): 706-719.

[16] Zhang Y L, Zhang E L, Yin Y, *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude [J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(6): 2645-2659.

[17] Yamashita Y, Jaffé R. Characterizing the interactions between trace metals and dissolved organic matter using excitation-emission matrix and parallel factor analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(19): 7374-7379.

- [18] Stedmon C A, Markage S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis [J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(2): 686-697.
- [19] Cory R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [20] Ishii S K L, Boyer T H. Behavior of reoccurring PARAFAC components in fluorescent dissolved organic matter in natural and engineered systems: a critical review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(4): 2006-2017.
- [21] Murphy K R, Stedmon C A, Waite T D, *et al.* Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2008, **108**(1-2): 40-58.
- [22] 周石磊, 孙悦, 苑世超, 等. 岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2635-2645.
- Zhou S L, Sun Y, Yuan S C, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and difference analysis of chromophoric dissolved organic matter in sediment interstitial water from Gangnan Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2635-2645.
- [23] 林子深, 黄廷林, 李凯, 等. 李家河水库上游水体溶解性有机物组分与来源[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(3): 1275-1283.
- Lin Z S, Huang T L, Li K, *et al.* Dissolved organic matter components and sources in upstream of Lijiahe Reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(3): 1275-1283.
- [24] Singh S, D'Sa E J, Swenson E M. Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) variability in Barataria Basin using excitation-emission matrix (EEM) fluorescence and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(16): 3211-3222.
- [25] Wilson H F, Xenopoulos M A. Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(1): 37-41.
- [26] 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 等. 河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布特征、来源解析及氮素响应[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5250-5263.
- Zhang Z W, Zhou S L, Chen Z Y, *et al.* Spatial distribution characteristics of the spectrum, sources analysis, and nitrogen response of dissolved organic matter in summer rainfall in the Hebei Province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5250-5263.
- [27] Shao T T, Wang T. Effects of land use on the characteristics and composition of fluvial chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Yiluo River watershed, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **114**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106332.
- [28] Graeber D, Gelbrecht J, Pusch M T, *et al.* Agriculture has changed the amount and composition of dissolved organic matter in Central European headwater streams[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **438**: 435-446.
- [29] Shi J H, Cui H Y, Jia L M, *et al.* Bioavailability of riverine dissolved organic carbon and nitrogen in the Heilongjiang watershed of northeastern China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(2), doi: 10.1007/s10661-016-5120-y.
- [30] Hale R L, Turnbull L, Earl S R, *et al.* Stormwater infrastructure controls runoff and dissolved material export from arid urban watersheds[J]. *Ecosystems*, 2015, **18**(1): 62-75.
- [31] DeVilbiss S E, Zhou Z Z, Klump J V, *et al.* Spatiotemporal variations in the abundance and composition of bulk and chromophoric dissolved organic matter in seasonally hypoxia-influenced Green Bay, Lake Michigan, USA[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **565**: 742-757.
- [32] 朱弈, 陈浩, 丁国平, 等. 城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5264-5274.
- Zhu Y, Chen H, Ding G P, *et al.* Distribution and influencing factors of DOM components in urban and suburban polluted rivers [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5264-5274.
- [33] 何杰, 朱学惠, 魏彬, 等. 基于 EEMs 与 UV-vis 分析苏州汛期景观河道中 DOM 光谱特性与来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1889-1900.
- He J, Zhu X H, Wei B, *et al.* Spectral characteristics and sources of dissolved organic matter from landscape river during flood season in Suzhou based on EEMs and UV-vis [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1889-1900.
- [34] Yang Y G, He Z L, Wang Y B, *et al.* Dissolved organic matter in relation to nutrients (N and P) and heavy metals in surface runoff water as affected by temporal variation and land uses—a case study from Indian River Area, south Florida, USA [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, **118**: 38-49.
- [35] Chuang C W, Hsu L F, Tsai H C, *et al.* Nickel binding affinity with size-fractionated sediment dissolved and particulate organic matter and correlation with optical indicators [J]. *Applied Sciences*, 2020, **10**(24), doi: 10.3390/app10248995.
- [36] 席玥, 王婷, 倪晋仁, 等. 黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4114-4121.
- Xi Y, Wang T, Ni J R, *et al.* Characterization of dissolved organic matter fractions in the Ning-Meng section of the Yellow River and relationship with metal ions [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4114-4121.
- [37] Williams C J, Yamashita Y, Wilson H F, *et al.* Unraveling the role of land use and microbial activity in shaping dissolved organic matter characteristics in stream ecosystems [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(3): 1159-1171.
- [38] Inamdar S, Finger N, Singh S, *et al.* Dissolved organic matter (DOM) concentration and quality in a forested mid-Atlantic watershed, USA[J]. *Biogeochemistry*, 2012, **108**(1-3): 55-76.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)