

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

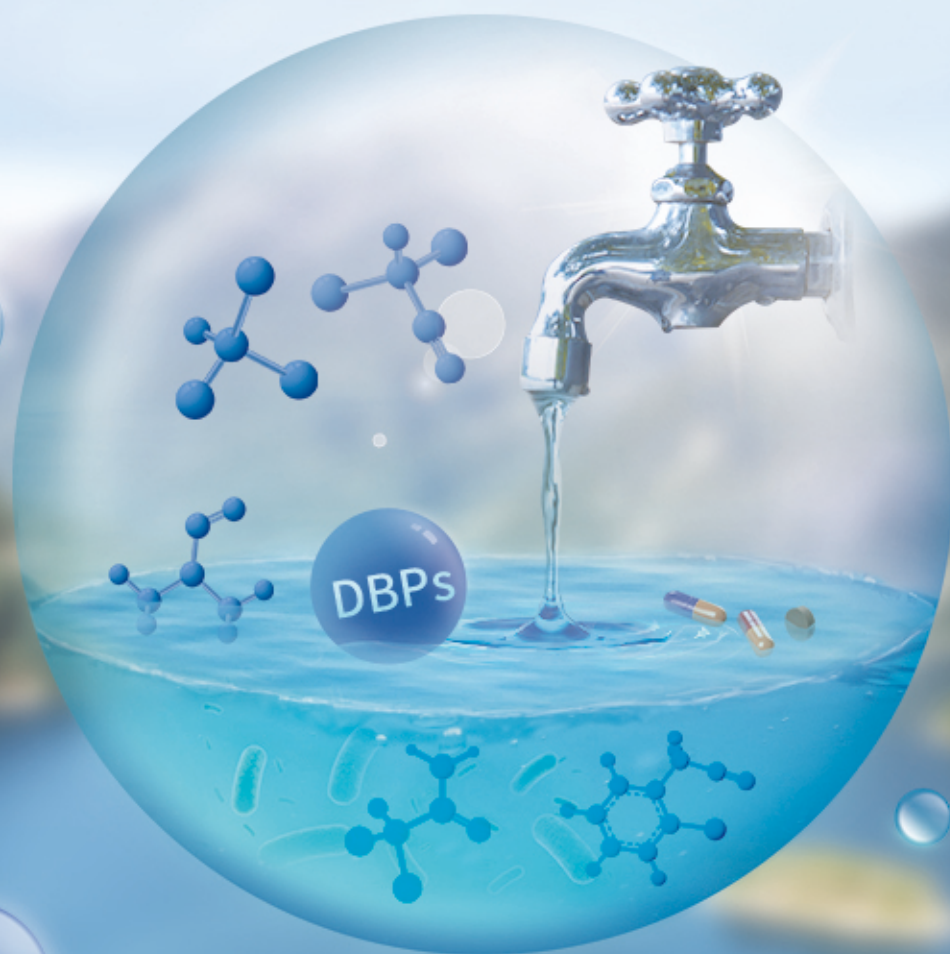
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

- 饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华 (5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹 (5086)

研究报告

- 1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑 (5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (5109)
汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华 (5122)
石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇 (5131)
天津市冬季空气湿度对 $PM_{2.5}$ 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹 (5143)
承德市 $PM_{2.5}$ 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升 (5152)
中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍 (5162)
2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (5169)
基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华 (5180)
典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润 (5193)
沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫帆, 于兴娜 (5201)
天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强 (5210)
郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙 (5220)
基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O_3 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超 (5228)
长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月 (5239)
河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞吟, 张馨童, 姚波, 崔建升 (5250)
城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋 (5264)
北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊 (5275)
太湖西岸地表水中极性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯 (5284)
河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧 (5294)
白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升 (5303)
雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊 (5312)
基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南 (5322)
千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮 (5333)
巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠 (5346)
洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞 (5355)
成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛 (5364)
雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰 (5375)
粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀 (5384)
红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇 (5394)
减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璇骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲 (5405)
互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞 (5414)
基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邱琰茗, 郭道宇 (5424)
硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘 (5433)
高锰酸钾改性松木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹄, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华 (5440)
混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤 (5450)
负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟 (5460)
一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送 (5472)
生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳 (5481)
紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳 (5491)
南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京 (5500)
城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君 (5510)
我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平 (5519)
典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平 (5526)
稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠 (5535)
镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 彭杰, 李佳欣, 陈文清 (5545)
纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5554)
《环境科学》征订启事 (5108) 《环境科学》征稿简则 (5151) 信息 (5249, 5263, 5283)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应

张紫薇, 周石磊*, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑀晗, 张馨童, 姚波, 崔建升

(河北科技大学环境科学与工程学院, 河北省污染防治生物技术实验室, 石家庄 050018)

摘要: 溶解性有机物(DOM)是大气环境有机物的重要组成部分,为了探究大气环境中DOM的演变特征,结合紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱对河北省夏季降雨雨水DOM的组分和光谱特征进行解析和研究.结果表明,该时期雨水DOM的分子量存在显著差异,北部地区要显著低于中部和南部地区($P < 0.05$);平行因子法解析出2种腐殖质组分(C1和C4),1种类蛋白组分(C2)和1种富里酸组分(C3),组分C2与组分C3和C4呈现显著正相关($P < 0.001$),可能具有相似的来源;平行因子法中类蛋白组分(C2)占主体、其均值达到40.59%,与此同时各组分的荧光强度和相对丰度空间差异不显著($P > 0.05$)、城乡间差异显著($P < 0.05$);荧光区域积分得到的各组分呈现出空间差异不显著($P > 0.05$),城乡差异显著的特征($P < 0.05$);荧光区域积分得到的DOM类蛋白质占主体(61.59%~89.01%),与平行因子法的结果相一致.与此同时,冗余分析(RDA)显示雨水中总氮、硝氮和氨氮是影响雨水DOM组成分布的主要水质参数;三维荧光光谱指数分布呈现出显著的城乡差异,高FI和BIX值以及低HIX显示夏季雨水呈现强自生源、低腐殖化的特征,并且乡村相比于城市自生源特征更强;基于雨水DOM组分的回归分析显示,城市地区的雨水水质参数预测精确度更高.综上可知,河北地区夏季雨水DOM空间差异不显著、城乡差异显著,整体呈现出较强自生源特征,还可以在一定程度上基于雨水DOM组分为雨水氮素预测提供技术支持.

关键词: 河北省; 降雨; 溶解性有机物(DOM); 平行因子分析; 荧光区域积分; 回归分析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5250-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202102108

Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province

ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei*, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, DONG Wan-jia, ZHEN Yu-han, ZHANG Xin-tong, YAO Bo, CUI Jian-sheng
(Pollution Prevention Biotechnology Laboratory of Hebei Province, School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Dissolved organic matter(DOM) is an important component of the organic matter in the environment. This study explored the characteristics of DOM. The components and spectral characteristics of rainwater DOM were measured using Ultraviolet-visible absorption spectrum(UV-vis) and three-dimensional fluorescence spectrum in the Hebei province. The results showed significant differences for DOM molecular weight in the northern, central, and southern region; the DOM of the northern region exhibited the lowest molecular weight. Two humic-like(C1 and C4), one protein-like(C2) and one fulvic-like(C3) components were identified by parallel factor(PARAFAC) analysis. Component C2 had a significant positive correlation with components C3 and C4($P < 0.001$), which may have similar sources. The C2(protein-like substances) accounted for the major proportion of DOM with the average abundance 40.59%. The DOM components based on PARAFAC exhibited significantly difference between city and country regions without spatial difference, which was consistent with the result of fluorescence regional integration(FRI). The protein-like substances based on FRI were the main components, which accounted for 61.59%-89.01%. Redundancy analysis(RDA) showed that total nitrogen, nitrate, and ammonia were the main environmental factors determining the distribution of DOM. Spectral indices presented a significant difference between city and country regions. High fluorescence(FI) and biological(BIX) and low humification(HIX) values showed that summer rain exhibited the strong autochthonous and low humification characteristics, and country region have stronger autochthonous characteristics than city region. The regression analysis demonstrates that the prediction accuracy of rainwater quality parameters in city region is high. From all the results, rainwater DOM, showing strong autogenous characteristics, exhibited significant differences between city and country regions without spatial difference in Hebei. Meanwhile, it can also provide technical support for rainwater nitrogen concentration prediction based on DOM components.

Key words: Hebei province; rainwater; dissolved organic matter(DOM); parallel factor analysis; fluorescence regional integration; regression analysis

溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)广泛存在于环境中,不仅可以作为微生物的碳源,参与微生物的代谢过程^[1,2];而且还可以与各种污染物相结合,影响其迁移转化过程^[3,4].其中,作为DOM重要组成部分的有色溶解有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM),因其能够强烈吸收紫外辐射及蓝光波段,故能一定程度上揭示DOM的组成和结构特征.因而,目前众多研

究者利用紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱来对CDOM进行分析,揭示DOM的组成和来源,进而探

收稿日期: 2021-02-17; 修订日期: 2021-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909056); 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(QN2021064); 中国科学院饮用水科学与技术重点实验室专项(20K04KLDWST); 河北科技大学引进人才科研启动基金项目(1181278); 河北省自然科学基金项目(E2021208011)

作者简介: 张紫薇(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为水质微污染控制与水资源保护, E-mail: hbkjzw@163.com

* 通信作者, E-mail: ZSLZhouShilei@126.com

索其重要的环境指示意义. 近年来, 广泛应用于湖泊^[5]、水库^[6,7]、河流^[8]、海洋^[9]以及地下水^[10]中 CDOM 的特性研究.

降雨作为大气湿沉降的重要形式, 在污染物迁移转化中起着重要作用. 其中, 雨水 DOM 作为大气有机物的重要组分, 其组成和特性不仅影响环境中的碳循环过程, 而且还会影响与其结合的污染物的迁移转化^[11]. 因此, 了解降雨中 DOM 的组成及其特征, 有助于进一步认识 DOM 在大气环境中的作用. 然而, 目前关于降雨 DOM 的相关研究关注较少. 已有研究主要集中于局部区域和南方地区, 比如程远月等^[12]在厦门大学楼顶定期采样, 分析了梅雨季节雨水中 DOM 的光学特性; Bao 等^[13]研究了厦门湾沿海雨水中的溶解有机物的生物可利用性和沉积通量; 梁俭等^[14]在西南大学楼顶采集了夏季和冬季的降雨, 并研究了 DOM 的光谱特征和来源; 本课题组对山东枣庄周村水库夏秋季降雨中不同分子量 DOM 的光谱特征进行了分析^[15]. 而有关内陆和北方地区降雨中 DOM 组成和特征的研究较少, 特别是有机物与雨水氮素的响应鲜见报道.

河北省作为典型的北方省份, 是京津冀地区的重要组成部分, 其大气污染相对较重, 挥发性有机物和氮氧化物是其重要成分, 研究其降雨中 DOM 的组成、特性以及与氮素的关系, 将有助于进一步认识河北地区大气有机物的特征. 本文选取河北 10 个地级市的城市和乡村为研究对象, 在夏季汛期收集大气降雨, 结合紫外-可见以及三维荧光光谱的分析来研究雨水中 DOM 的组成及特征. 通过平行因子法^[16]和荧光区域积分法^[17]对雨水中 DOM 组分进行解析; 分析河北省北部地区、中部地区以及南部地区的 DOM 分布特征, 同时分析河北地区城市和乡村不同经济条件下雨水 DOM 的差异; 并结合 DOM 各组分间以及与雨水氮素指标的关系, 以期将来探究大气有机物的迁移转化提供必要的技术支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

本研究于 2020 年 7 ~ 8 月 (夏季汛期) 对河北省主要地区进行降雨样品取样. 河北省的整个采样区域划分为北部地区 (张家口市、承德市、唐山市、廊坊市)、中部地区 (保定市、石家庄市、衡水市、沧州市) 和南部地区 (邢台市、邯郸市), 每个地区依据地区经济差异进行城市和乡村区域的采样 (图 1). 具体过程为, 采用自制量雨器 (采集前用纯水润洗) 进行降雨的收集, 收集后的降雨用纯水清洗过

的聚乙烯瓶冷冻保存, 冷藏避光运回实验室, 用于分析水体溶解性有机物特征. 其中, 雨水水样用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后进行光谱测定, 3 d 内测定完成.

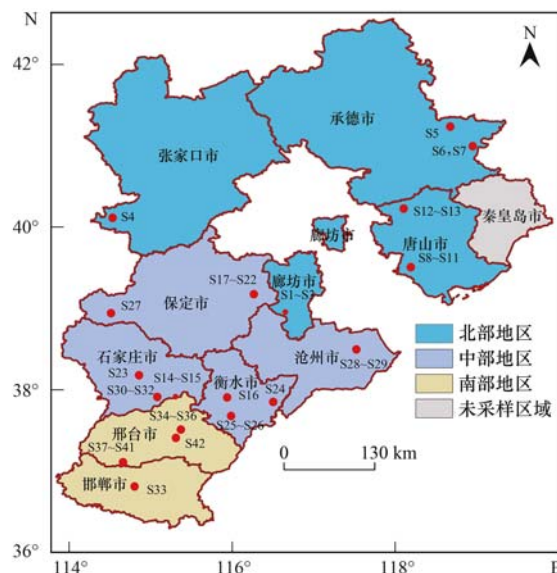


图 1 白洋淀采样点示意

Fig. 1 Locations of the sampling sites in the Baiyangdian Lake

1.2 紫外-可见吸收光谱分析

利用紫外-可见分光光度计 (DR6000, 美国) 在波长 200 ~ 700 nm 进行紫外-可见光谱的测定, 并结合相关光谱指数分析降雨中溶解性有机物的特征. 光谱指数包括: E2/E3 (波长在 250 和 365 nm 处的吸光度之比), 表征 DOM 相对分子质量的大小^[18]; E2/E4 (波长在 254 和 436 nm 处的吸光度之比), 表征 DOM 自生源的相对组成^[19]; E2/E6 (波长在 280 和 436 nm 处的吸光度之比), 表征 DOM 的来源^[19]; E3/E4 (波长在 300 和 400 nm 处的吸光度之比), 表征 DOM 腐殖化程度^[18].

1.3 三维荧光光谱分析

荧光分光光度计 (F-7000, 日本) 测量过滤雨水水样的三维荧光光谱, 其中激发波长 (E_x) 为 200 ~ 450 nm (波长间隔 5 nm), 发射波长 (E_m) 为 250 ~ 550 nm (波长间隔 1 nm), 扫描速度为 1 000 $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$, 同时利用超纯水口处散射影响^[6,16], 荧光强度值用 R. U 进行表示, 计算方法详见文献^[20]. 采用三维荧光平行因子法^[16]和荧光区域积分法^[17]对三维荧光光谱的组分进行解析.

平行因子法通过 MATLAB (R2014a) 中 DOMFluor 工具箱的 “N-way toolbox” 和 “DOMFluor toolbox” 程序包的运行, 对导入的雨水样品三维荧光光谱进行平行因子解析, 结合半拆分析和残差分析得到荧光组分. 荧光区域积分法是通过将三维荧光

光谱划分为 5 个区域,每个区域分别对应不同物质. 主要包括:第 I 区域($P1, E_x/E_m = 200 \sim 250 \text{ nm}/250 \sim 330 \text{ nm}$),表示酪氨酸类蛋白质;第 II 区域($P2, E_x/E_m = 200 \sim 250 \text{ nm}/330 \sim 380 \text{ nm}$),表示色氨酸类蛋白质;第 III 区域($P3, E_x/E_m = 200 \sim 250 \text{ nm}/380 \sim 600 \text{ nm}$),表示类富里酸物质;第 IV 区域($P4, E_x/E_m = 250 \sim 450 \text{ nm}/250 \sim 380 \text{ nm}$),表示微生物代谢产物;第 V 区域($P5, E_x/E_m = 250 \sim 450 \text{ nm}/380 \sim 600 \text{ nm}$),表示类腐殖酸物质.与此同时,选用了一系列三维荧光光谱的光谱指数来表征 DOM 的特征,荧光指数(FI)、腐殖化指数(HIX)、生物源指数(BIX)以及新鲜度指数($\beta: \alpha$)等(详见表 1).

表 1 三维荧光光谱特征指数的计算方法和环境意义¹⁾

Table 1 Calculation method and environmental significance of spectra indices based on EEM

具体指标	计算公式	环境意义
荧光指数 (FI)	$FI = F(E_m = 450 \text{ nm}, E_x = 370 \text{ nm}) / F(E_m = 500 \text{ nm}, E_x = 370 \text{ nm})$	评估 DOM 的来源 ^[21]
腐殖化指数 (HIX)	$HIX = \text{AREA}(E_m = 435 \sim 480 \text{ nm}, E_x = 370 \text{ nm}) / \text{AREA}(E_m = 300 \sim 345 \text{ nm}, E_x = 370 \text{ nm})$	评估 DOM 的腐殖化程度 ^[22]
生物源指数 (BIX)	$BIX = F(E_m = 380 \text{ nm}, E_x = 310 \text{ nm}) / F(E_m = 430 \text{ nm}, E_x = 310 \text{ nm})$	反映内源 DOM 的贡献程度 ^[23]
新鲜度指数 ($\beta: \alpha$)	$\beta: \alpha = F(E_m = 380 \text{ nm}, E_x = 310 \text{ nm}) / F_{\max}(E_m = 420 \sim 435 \text{ nm}, E_x = 310 \text{ nm})$	反映新生 DOM 所占的比例 ^[24]
Fn280	$F_{\max}(E_m = 340 \sim 360 \text{ nm}, E_x = 280 \text{ nm})$	反映类蛋白相对丰度 ^[25]
Fn555	$F_{\max}(E_m = 440 \sim 470 \text{ nm}, E_x = 355 \text{ nm})$	反映类腐殖质相对丰度 ^[25]

1) F 表示荧光强度; AREA 表示荧光区域的积分面积; $F_{\max}$ 表示区域内最大的荧光强度

1.4 数据分析

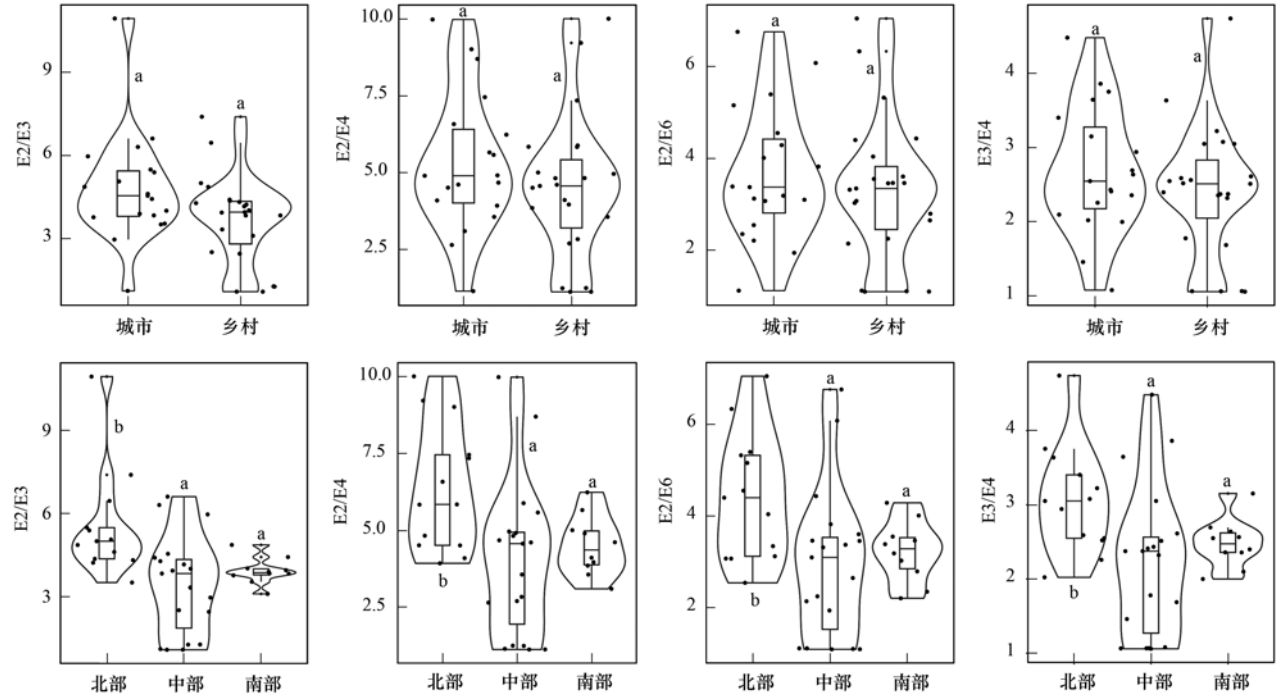
利用 R 语言对雨水样品进行统计学分析和图形绘制 (<http://www.r-project.org/>). 具体分析如下,通过小提琴图展示不同区域的采样点分布情况;通过方差分析和非参数检验来分析不同分类下的数据差异 (<https://gitee.com/wentaomicro/EasyStat>);通过多层饼图展示荧光区域积分的组分差异;通过主成分分析 (PCA) 来研究不同区域降雨中溶解性有机物的差异;基于冗余分析 (RDA) 分析影响雨水溶解性有机物组成的环境因子^[26];通过溶解性有机物各组分间以及与环境因子的相互关系探究组分间的相互关系以及与环境因子的联系. 本文数据统计

分析中通过 $P < 0.05$, $0.001 < P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 来表示存在显著差异.

2 结果与分析

2.1 雨水 DOM 紫外-可见吸收光谱分析

从统计学上看,河北省城市区域和乡村区域的 E2/E3 不存在显著差异 ($P > 0.05$),但是城市的 E2/E3 达到 4.79 ± 1.97 高于乡村的 3.71 ± 1.59 ,数据表明乡村的雨水 DOM 的分子量要高于城市;空间上北部地区雨水 E2/E3 显著高于中部和南部地区 ($P < 0.05$),表明北部地区雨水分子量显著低于中部和南部地区,中部和南部区域的 E2/E3 不存在



城市表示城市区域采样点,乡村表示乡村区域采样点,图中黑色实心点表示样品采样点,不同小写字母表示存在显著差异

图 2 夏季降雨溶解性有机物紫外-可见吸收光谱特征指数

Fig. 2 Spectral indices based on UV-vis of the rainwater DOM in summer

显著差异(图 2). 紫外-可见吸收光谱指数 E2/E4、E2/E6 以及 E4/E4 呈现出与 E2/E3 一致的变化特征,具体如下: E2/E4 显示城市与乡村间自生源相对组成差异不显著($P > 0.05$),北部地区显著高于中部和南部地区($P < 0.05$); E2/E6 显示城市与乡村间来源差异不显著($P > 0.05$),北部地区显著高于中部和南部地区($P < 0.05$); E3/E4 显示城市与乡村间雨水 DOM 腐殖化程度差异不显著($P > 0.05$),北部地区雨水腐殖化程度显著低于中部和南部地区($P < 0.05$).

2.2 基于平行因子法的 DOM 组分解析及分布特征

通过平行因子分析得出 4 种荧光组分(表 2 和图 3): 组分 C1($E_x/E_m = 260\text{ nm}/400\text{ nm}$)为类腐殖质物质; 组分 C2($E_x/E_m = 220\text{ nm}/300\text{ nm}$)为类酪氨酸; 组分 C3($E_x/E_m = 230\text{ nm}/460\text{ nm}$)为富里酸物质,属于腐殖质类较难降解; 组分 C4($E_x/E_m = 250\text{ nm}/500\text{ nm}$)为 UVA 类腐殖质,分子量较高. C1 组分的荧光强度变化范围为 0 ~ 17.44 R. U,空间上北部地区、中部地区以及南部地区不存在显著差异($P > 0.05$),城市和乡村间存在显著差异,城市区域 C1 荧光强度(均值为 4.28 R. U)显著高于乡村区域(均值为 0.85 R. U)($P < 0.05$); C1 组分相对丰度的变化范围为 0 ~ 66.40%,空间上不存在显著差异,

城市的 C1 相对丰度(均值为 21.35%)显著高于乡村(均值为 5.77%)($P < 0.05$). C2 组分的荧光强度和相对丰度在空间分布上不存在显著差异($P > 0.05$),乡村区域的 C2 荧光强度和相对丰度显著高于城市($P < 0.05$); 乡村的 C2 荧光强度均值为 6.52 R. U 明显高于城市的均值 4.71 R. U,乡村的 C2 荧光相对丰度均值为 45.91%,明显高于城市的均值 34.14%. C3 组分荧光强度在空间上不存在显著差异($P > 0.05$),其北部地区的相对丰度(均值为 20.83%),显著低于中部地区(均值为 24.38%)和南部地区(均值为 25.27%)($P < 0.05$); C3 组分荧光强度和相对丰度在城市和乡村间不存在显著差异($P > 0.05$). C4 组分荧光强度和相对丰度在空间上的分布与 C3 组分呈现相同的分布特征,在空间上不存在显著差异($P > 0.05$),其北部地区的相对丰度(均值为 20.88%),显著低于中部地区(均值为 23.54%)和南部地区(均值为 25.16%)($P < 0.05$); 城市区域 C4 组分荧光强度(均值为 2.96 R. U)显著低于乡村区域(均值为 3.28 R. U)($P < 0.05$),相对丰度在城乡间不存在显著差异($P > 0.05$). 综上, DOM 荧光组分在空间分布上差异不显著($P > 0.05$),在城乡间存在显著差异($P < 0.05$).

表 2 雨水 DOM 荧光组分特征
Table 2 Characteristics of components in rainwater DOM

组分	$E_x/E_m/\text{nm}$	物质	文献中数值/nm
C1	260/400	类腐殖质	252/395 ^[27]
C2	220/300	类酪氨酸	215 ~ 225/295 ~ 315 ^[28, 29]
C3	230/460	类富里酸	230(250)/430(460) ^[30]
C4	250/500	UVA 类腐殖质(分子量较高,芳香氨基酸)	255/505 ^[31]

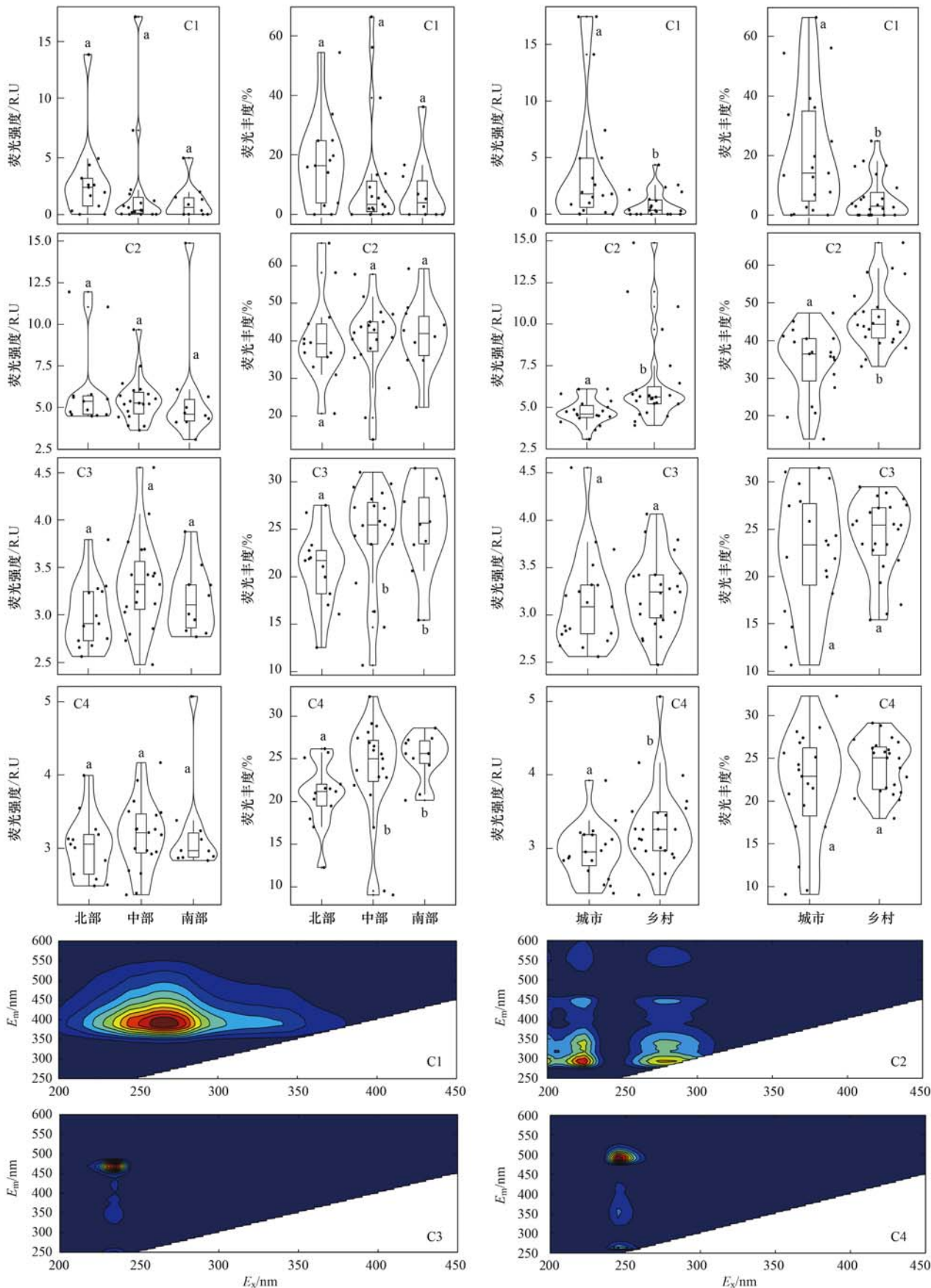
2.3 基于荧光区域积分法的 DOM 组分解析及分布特征

荧光区域积分解析的 5 种组分的分布情况如图 4 和图 5 所示. 在空间分布上,各个组分在统计学上都不存在显著差异,北部、中部以及南部的类蛋白质(P1、P2 和 P4)为 76.02%、74.14% 以及 75.64%; 北部、中部以及南部的类腐殖质物质(P3 和 P5)为 23.98%、25.86% 以及 24.36%; 空间上各个组分(P1 ~ P5)占比差异不显著($P > 0.05$,图 5). 在城乡分类上,类蛋白质和类腐殖质物质存在显著差异($P < 0.05$),其中城市的类蛋白质(均值为 68.79%)显著低于乡村(均值为 72.12%)($P < 0.05$),而城市的类腐殖质物质(均值为 31.21%)显著高于乡村(均值为 27.88%)($P < 0.05$). 组分 P1、P3 和 P5 在城乡间存在显著差异($P < 0.05$),对于 P1 而言,城市占比(均值为 22.38%)显著低于乡村

(均值为 30.20%)($P < 0.05$); 对于 P3 和 P5 而言,城市占比显著高于乡村($P < 0.05$). 综上,荧光区域积分法显示, DOM 组分在空间分布上不存在显著差异($P > 0.05$),在城乡间存在显著差异($P < 0.05$).

2.4 雨水 DOM 组分差异分析

本研究分别对平行因子分析法和荧光区域积分法得到的 DOM 组分进行 PCA 分析(图 6). 基于平行因子法的 PCA 分析显示,前两轴分别解释了总体变化的 53.80% 和 27.91%,共解释了总体变化的 81.71%[图 6(a)]; 空间北部、中部和南部不存在显著差异(Adonis, $P > 0.05$),城市和乡村呈现显著差异(Adonis, $P < 0.01$). 荧光组分分布在不同区域, C1 组分位于第一象限、C2 和 C4 组分位于第三象限、C3 组分位于第二象限; C1 组分位于 PCA1 的正半轴、C2、C3 以及 C4 组分位于 PCA1 的负半



城市表示城市区域采样点,乡村表示乡村区域采样点,图中黑色实心点表示样品采样点,不同小写字母表示存在显著差异

图3 基于平行因子法解析出的雨水 CDOM 的荧光组分及分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics and fluorescence components identified by PARAFAC model in rainwater

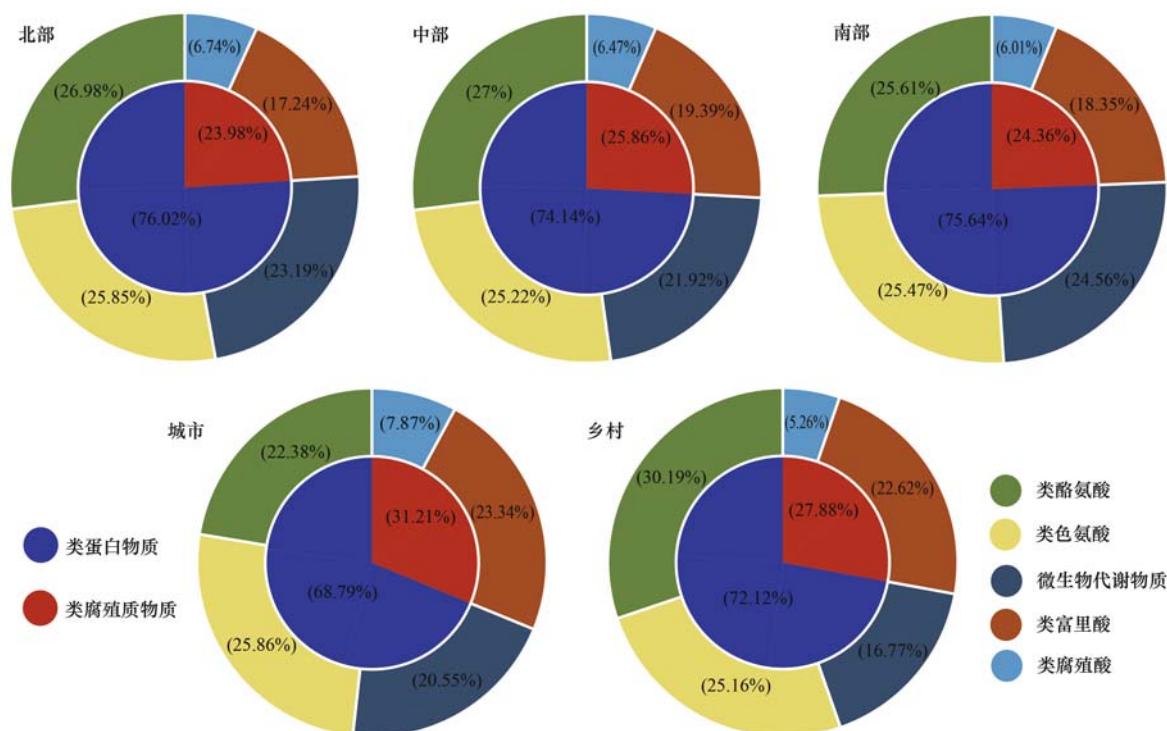


图4 基于荧光区域积分法的雨水组分分布特征

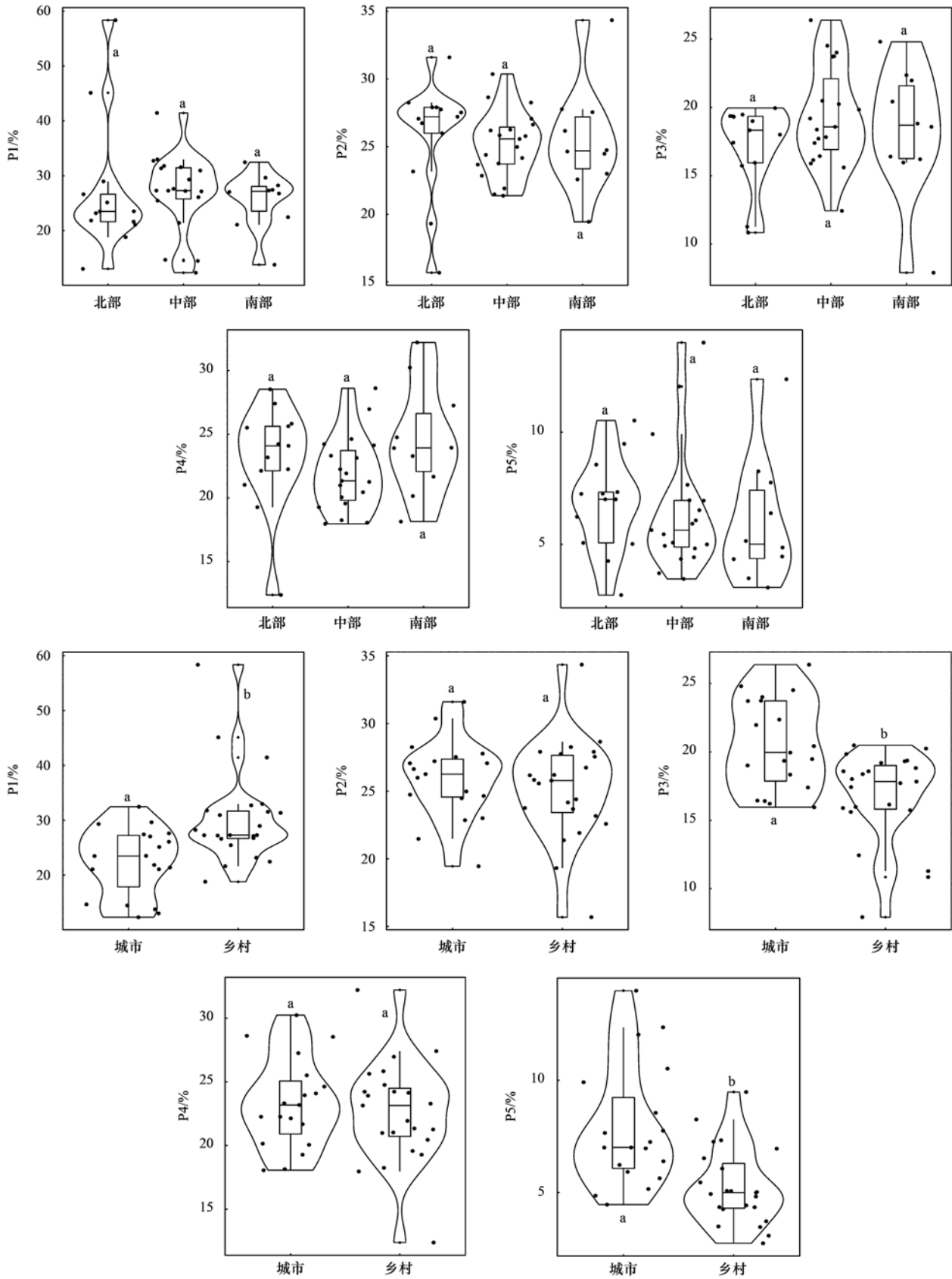
Fig. 4 Distribution characteristics of components identified by FRI model in rainwater

轴[图 6(b)]. 荧光组分相关性分析显示[图 6(c)], C2 组分与 C3 组分和 C4 组分呈现显著相关, 相关系数达到 0.34 ($P < 0.05$) 和 0.70 ($P < 0.001$); C3 组分与 C4 组分呈现显著正相关, 相关系数达到 0.66 ($P < 0.001$). 基于荧光区域积分组分的 PCA 分析显示, 前两轴共解释了总体变化的 86.29% [图 6(d)]; 空间北部、中部和南部不存在显著差异 (Adonis, $P > 0.05$), 城市和乡村呈现显著差异 (Adonis, $P < 0.001$). 荧光区域积分组分分布在不同区域, P1 组分位于第一象限、P2 和 P4 组分位于第二象限、P3 和 P5 组分位于第三象限; 类蛋白质 (P1、P2 和 P4 组分) 位于 PCA2 的正半轴、类腐殖质物质 (P3 和 P5 组分) 位于 PCA2 的负半轴 [图 6(e)]. 荧光组分相关性分析显示 [图 6(f)], 荧光区域积分组分 P1 与 P2、P3、P4 和 P5 呈现显著负相关 ($P < 0.01$), P2 与 P4 呈现显著正相关 ($P < 0.001$), P3 与 P5 呈现显著正相关 ($P < 0.001$), 表明 P2 和 P4 存在相似的来源, P3 和 P5 存在相似的来源. 综上可知, 平行因子法解析的组分和荧光区域积分划分的组分呈现较高的一致性.

2.5 相关性分析

为进一步探索城市和乡村区域雨水 DOM 的差异, 本文分别基于城市区域、乡村区域以及全部区域对雨水水质参数和光谱指数进行相关性分析 (图 7). 对于平行因子法解析的组分来说, 在城市区域 C1 组分与雨水硝氮呈现显著正相关 ($P < 0.05$),

C2 组分与雨水硝氮呈现显著负相关 ($P < 0.05$); 在乡村区域 C1 组分与雨水总氮和铁呈现显著正相关 ($P < 0.05$), 锰与 C3 和 C4 组分呈现显著正相关 ($P < 0.05$); 整体区域 C1 组分与雨水总氮、溶解性总氮和硝氮呈现显著正相关 ($P < 0.05$). 在城市区域 C1 组分与 P1、P1 + P2 + P4、BIX、FI 和 $\beta:\alpha$ 呈现显著负相关, 与 P2、P3 + P5、HIX、Fn280 和 Fn355 呈现显著正相关; C2 组分与 P2、E2/E4、E2/E6 和 E3/E4 呈现显著正相关. 在乡村区域 C1 组分与 P1 呈现显著负相关, 与 P5、HIX、Fn355、E2/E4 和 E2/E6 呈现显著正相关; C2 组分与 P3、P5 和 P3 + P5 呈现显著负相关, 与 P1、P1 + P2 + P4 和 Fn280 呈现显著正相关; C4 组分与 P3 显著负相关, 与 Fn280 呈现显著正相关. 整体区域 C1 组分与 P1、P1 + P2 + P4 和 FI 呈现显著负相关, 与 P5、P3 + P5、HIX 和 Fn355 呈现显著正相关; C2 组分与 P3、P5 和 P3 + P5 呈现显著负相关, 与 P1、P1 + P2 + P4、BIX 和 Fn280 呈现显著正相关; C4 组分与 P3 和 P3 + P5 显著负相关, 与 P1 + P2 + P4 和 Fn280 呈现显著正相关. 综上, 在城乡间平行因子法解析出的组分与水质参数和光谱指数的相关关系存在明显差异. 对于荧光区域积分法解析的组分来说, 在城市区域 P1 组分与雨水氨氮、亚硝氮、硝氮、总氮和溶解性总氮呈现显著负相关 ($P < 0.05$), P4 组分与雨水氨氮、硝氮、总氮、溶解性总氮、总磷、溶解性总磷和铁呈现显著正相关 ($P < 0.01$); 在乡村区域 P4 组

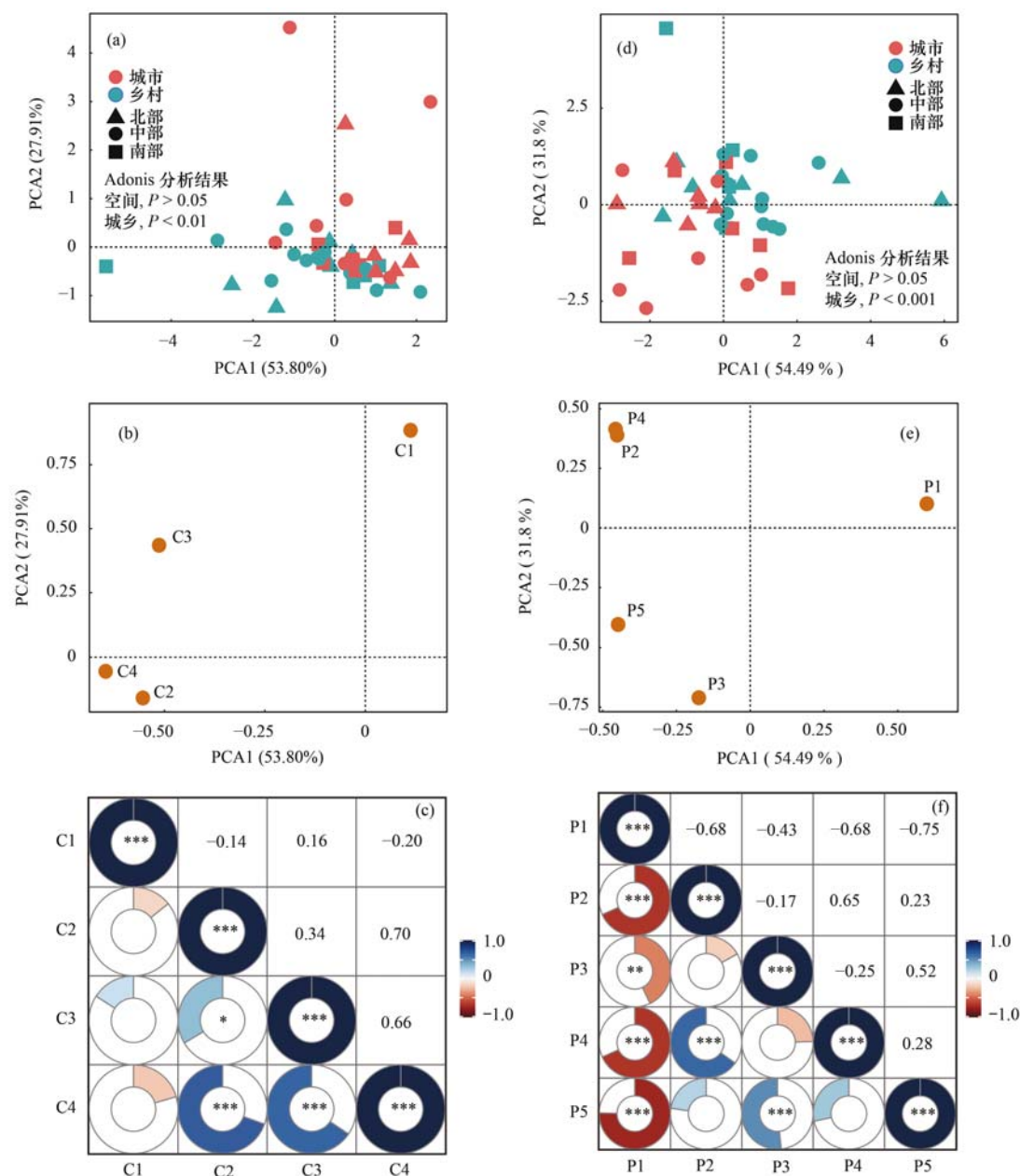


城市表示城市区域采样点,乡村表示乡村区域采样点,图中黑色实心点表示样品点,不同小写字母表示存在显著差异

图5 荧光区域积分组分的空间及城乡分布特征

Fig. 5 Spatial and urban-rural distribution characteristics of FRI components in rainwater

分与雨水总磷和溶解性总磷呈现显著负相关($P < 0.05$),P5 组分与硝氮和总氮呈现显著正相关($P < 0.05$);整体区域 P4 和 P5 组分与雨水氨氮、硝氮、总氮和溶解性总氮呈现显著正相关($P < 0.05$). 在



(a) ~ (c) 基于平行因子分析法结果的分析, (d) ~ (f) 基于荧光区域积分法结果的分析; (e) 和 (f) 中数值表示其相关系数; * 表示在 $P < 0.05$ 水平存在显著差异, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平存在显著差异, *** 表示在 $P < 0.001$ 水平存在显著差异, 下同

图 6 雨水 DOM 组分的主成分分析以及相关性分析

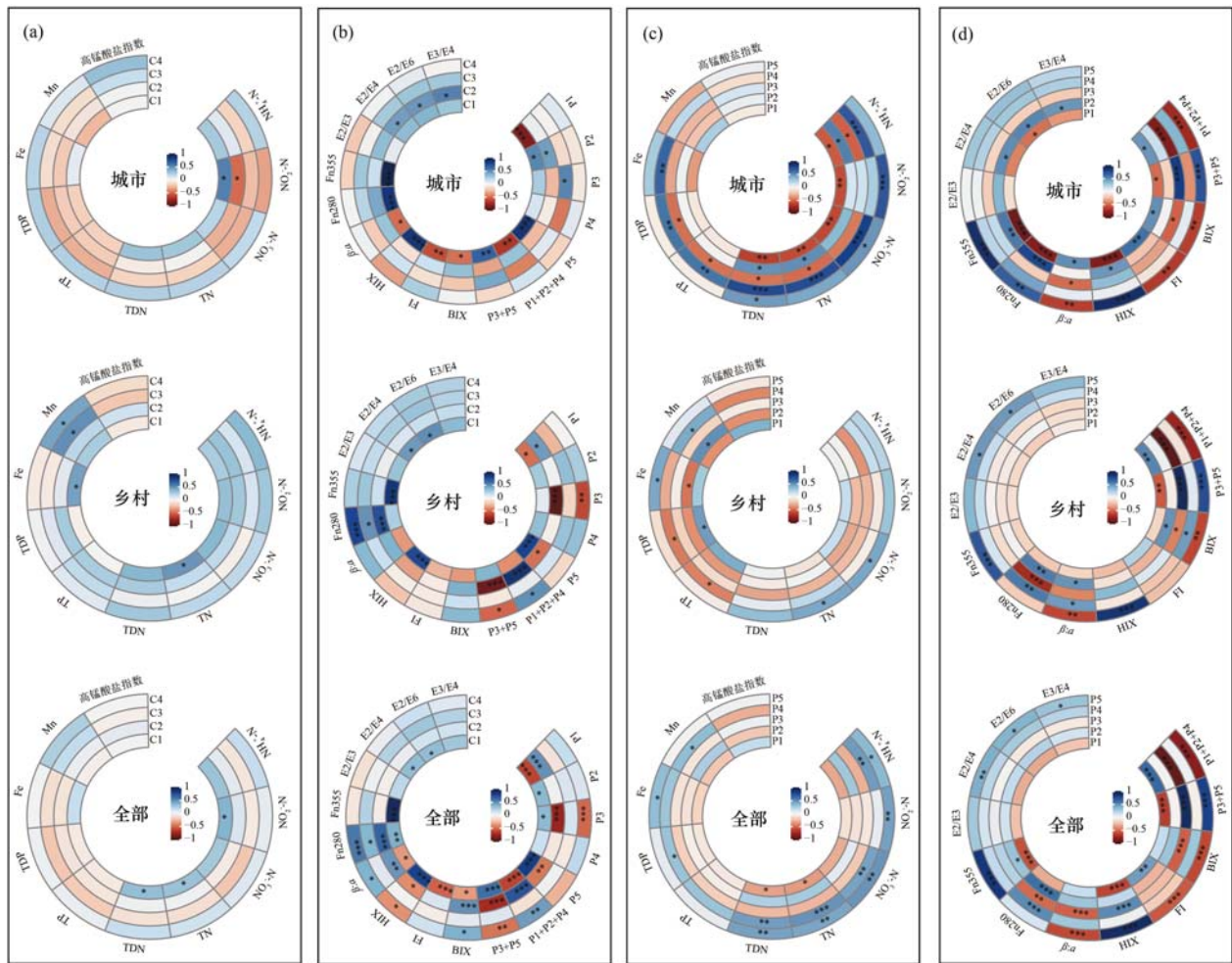
Fig. 6 Correlation analysis and PCA of DOM components in rainwater

城市区域 P1 组分与 HIX、Fn280 以及 Fn355 呈现显著负相关 ($P < 0.001$); P5 组分与 BIX、FI 和 $\beta:\alpha$ 呈现显著负相关, 与 HIX、Fn280 以及 Fn355 呈现显著正相关. 在乡村区域 P2 和 P4 组分与 BIX、 $\beta:\alpha$ 和 Fn280 呈现显著正相关; P3 组分与 BIX、 $\beta:\alpha$ 和 Fn280 呈现显著负相关; P5 组分与 BIX 和 $\beta:\alpha$ 呈现显著负相关, 与 HIX 和 Fn355 呈现显著正相关. 整体区域 P1 组分与 HIX 和 Fn355 呈现显著负相关, 与 FI 呈现显著正相关; P2 和 P4 组分与 Fn280 呈现显著正相关; P3 组分与 BIX、 $\beta:\alpha$ 和 Fn280 呈现显著负相关, 与 HIX 呈现显著正相关; P5 组分与 BIX、FI 和 $\beta:\alpha$ 呈现显著负相关, 与 HIX 和 Fn355

呈现显著正相关. 综上, 在城乡间 DOM 组分与水质参数和光谱指数的相关关系存在明显差异.

2.6 DOM 与环境因子的冗余分析

为进一步探讨雨水水质参数与 DOM 组分的相关关系, 本文基于平行因子法和荧光区域积分法分别进行了与雨水水质参数的冗余分析 (RDA). 基于平行因子法的结果显示 [图 8(a)], RDA1 和 RDA2 分别解释了总体变化的 33.44% 和 0.72%, 其中 RDA1 起主要作用; 基于膨胀因子分析 ($VIF < 10$) 筛选得到亚硝氮 ($VIF = 1.32$)、氨氮 ($VIF = 6.89$)、总氮 ($VIF = 7.43$) 和硝氮 ($VIF = 4.59$) 是影响雨水 DOM 组成分布的主要水质参数, 其与 RDA1 的相关



(a) 平行因子分析法解析的荧光组分与水质参数的相关性分析; (b) 平行因子分析法解析的荧光组分与光谱指数的相关性分析; (c) 荧光区域积分法解析的荧光组分与水质参数的相关性分析; (d) 荧光区域积分法解析的荧光组分与光谱指数的相关性分析; 图例表示相关系数

图 7 三维荧光组分与光谱特征以及水质参数的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of DOM components and spectral characteristics/water parameters

系数达到 $-0.97 \sim -1.00$ ($P < 0.01$, 表 3). 基于荧光区域积分的结果显示[图 8(b)], RDA1 和 RDA2 共同解释了总体变化的 17.04%, 总氮 ($VIF = 7.33$)、硝氮 ($VIF = 4.03$) 和氨氮 ($VIF = 6.52$) 是其

主要影响因子, 与 RDA1 的相关性系数达到 -0.98 、 -0.90 和 -0.99 . 综合平行因子分析和荧光区域积分分析的结果, 雨水中总氮、硝氮和氨氮是影响整体雨水 DOM 分布的主要水质参数.

表 3 基于平行因子法和荧光区域积分法解析的雨水组分冗余分析相关结果

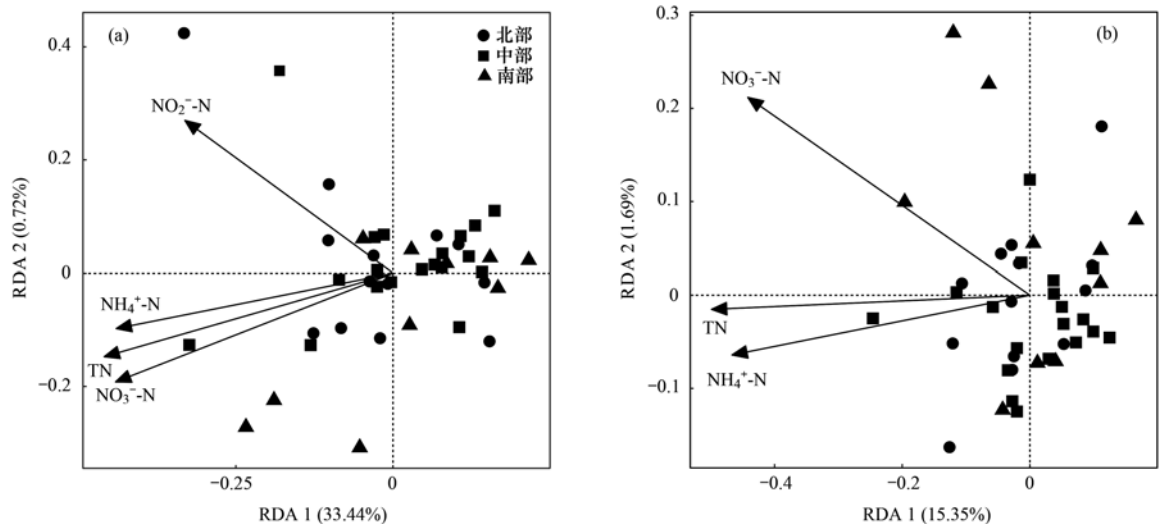
Table 3 Results of RDA of components of DOM based on PARAFAC and FRI in rainwater

项目	类型	VIF	RDA1	RDA2	R^2	P
平行因子法	TN	7.43	-1.00	-0.06	0.33	<0.001
	NO_3^- -N	4.59	-1.00	-0.09	0.31	<0.01
	NH_4^+ -N	6.89	-1.00	-0.03	0.30	<0.01
	NO_2^- -N	1.32	-0.97	0.25	0.21	<0.05
区域积分法	TN	7.33	-0.98	0.21	0.29	<0.01
	NO_3^- -N	4.03	-0.90	0.43	0.32	<0.01
	NH_4^+ -N	6.52	-0.99	0.15	0.25	<0.05

2.7 三维荧光光谱指数特征

河北省夏季雨水 DOM 的 FI 值变化范围为 1.70 ~ 2.21 (图 9), 空间分布上北部、中部和南部不存在显著差异 ($P > 0.05$), 北部地区 FI 达到 1.92 ± 0.12 、中部地区 FI 达到 1.92 ± 0.14 、南部地区

FI 达到 1.94 ± 0.11 ; 城乡间 FI 存在显著差异 ($P < 0.05$), 城市的 FI 值 (1.88 ± 0.13) 显著低于乡村 (1.96 ± 0.11), 表明乡村区域雨水 DOM 的自生源特征要强于城市区域^[21]. 河北省夏季雨水 DOM 的 BIX 值变化范围为 0.81 ~ 4.80, 空间分布上不存在



(a) 基于平行因子分析的 RDA, (b) 基于荧光区域积分的 RDA

图 8 夏季降雨 DOM 的冗余分析

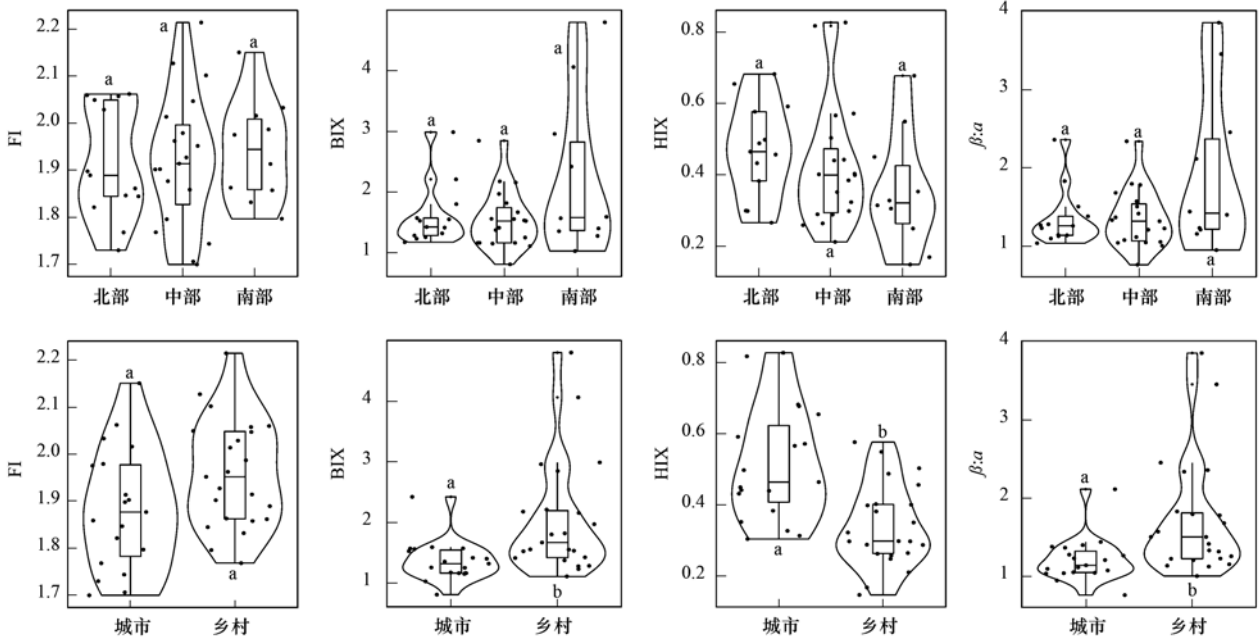
Fig. 8 RDA of rainwater DOM during summer

显著差异,城市区域的 BIX 达到 1.36 ± 0.33 显著低于乡村(2.03 ± 0.94),表明乡村相比于城市呈现较强的自生源特征(图 9). 河北省夏季雨水 DOM 的 HIX 值不存在显著的空间差异($P > 0.05$),北部的 HIX 值为 0.47 ± 0.13 ,高于中部(0.42 ± 0.17)和南部地区(0.35 ± 0.17);城乡间存在显著差异($P < 0.05$),城市 HIX 值(0.52 ± 0.16)显著高于乡村(0.34 ± 0.12);表明北部地区雨水腐殖化程度高于中部和南部,城市雨水腐殖化程度高于乡村(图 9). 新鲜度指数的分布情况与 BIX 指数相同,呈现出空间差异不显著,城乡差异显著的特征;并且乡村雨

水中新生 DOM 占比要显著高于城市雨水. 综上,河北省夏季雨水呈现出较强自生源、低腐殖化特征,空间差异不显著,乡村相比于城市有更强的自生源和低腐殖化程度.

2.8 DOM 对雨水氮素的响应

为了探究 DOM 对雨水氮素的指示意义,本文分别基于平行因子法和荧光区域积分法解析出的 DOM 组分,对雨水氮素指标进行了回归分析(表 4). 基于平行因子法的结果显示,在城市地区雨水中总氮、氨氮和硝氮与 C1、C3 和 C4 呈现显著相关($P < 0.05$),相关系数 R^2 达到 $0.42 \sim 0.49$;在乡村



城市表示城市区域采样点,乡村表示乡村区域采样点,图中黑色实心点表示样品采样点,不同小写字母表示存在显著差异

图 9 夏季雨水 DOM 三维荧光光谱指数分布

Fig. 9 Distributions of spectral indices of rainwater DOM during summer

地区雨水中总氮和硝氮与 C1、C3 和 C4 呈现显著相关($P < 0.05$),相关系数 R^2 达到 0.35 ~ 0.41;在整个区域雨水中总氮、氨氮和硝氮与 C1、C3 和 C4 呈现显著相关($P < 0.05$),相关系数 R^2 达到 0.33 ~ 0.46;城市地区相比于乡村地区具有更高的拟合精度. 基于荧光区域积分法的结果显示,在城市地区雨水中总氮、氨氮和硝氮与 P1、P2、P3 和 P4 呈现显著相关($P < 0.05$),相关系数 R^2 达到 0.55 ~ 0.78;在乡村地区雨水中总氮和硝氮与 P1、P2、

P3 和 P4 呈现显著相关($P < 0.05$),相关系数 R^2 达到 0.25 ~ 0.48;在整个区域雨水中总氮、氨氮和硝氮与 P1、P2、P3 和 P4 呈现显著相关($P < 0.001$),相关系数 R^2 达到 0.44 ~ 0.63;城市地区相比于乡村地区具有更高的拟合精度. 综上,基于荧光区域积分法解析出的组分拟合精度要高于基于平行因子法,城市地区的拟合精度要高于乡村地区,基于此可以为将来的雨水水质监测提供一定技术支持.

表 4 雨水氮素与 DOM 组分的回归分析¹⁾

Table 4 Regression analysis of water parameters and DOM components

方法	分类	回归方程	R^2
平行因子法	城市	TN = 0.26C1 - 3.32C3 + 4.71C4 - 1.49	0.44 *
		NH ₄ ⁺ -N = 0.15C1 - 2.01C3 + 2.87C4 - 1.03	0.42 *
		NO ₃ ⁻ -N = 0.11C1 - 1.72C3 + 2.11C4 - 0.28	0.49 **
	乡村	TN = 0.73C1 - 2.61C3 + 1.81C4 + 4.44	0.41 *
		NH ₄ ⁺ -N = 0.21C1 - 1.29C3 + 1.16C4 + 1.57	0.30
		NO ₃ ⁻ -N = 0.20C1 - 1.00C3 + 0.69C4 + 1.55	0.35 *
	全部	TN = 0.25C1 - 2.76C3 + 2.50C4 + 3.15	0.33 **
		NH ₄ ⁺ -N = 0.15C1 - 1.63C3 + 1.57C4 + 1.50	0.34 **
		NO ₃ ⁻ -N = 0.41C1 - 0.15C2 - 1.56C3 + 1.66C4 + 1.21	0.46 ***
区域积分法	城市	TN = 0.09P2 - 0.03P1 + 0.16P3 + 0.57P4 - 15.27	0.63 **
		NH ₄ ⁺ -N = 0.01P1 + 0.14P2 + 0.09P3 + 0.31P4 - 11.00	0.55 *
		NO ₃ ⁻ -N = 0.07P4 - 0.16P1 - 0.28P2 - 0.21P3 + 14.67	0.78 ***
	乡村	TN = 67.82 - 0.64P1 - 0.65P2 - 0.92P3 - 0.63P4	0.48 *
		NH ₄ ⁺ -N = 25.61 - 0.23P1 - 0.26P2 - 0.37P3 - 0.20P4	0.36 *
		NO ₃ ⁻ -N = 25.12 - 0.23P1 - 0.27P2 - 0.33P3 - 0.23P4	0.25 *
	全部	TN = 56.33 - 0.52P1 - 0.61P2 - 0.82P3 - 0.39P4	0.53 ***
		NH ₄ ⁺ -N = 29.29 - 0.27P1 - 0.30P2 - 0.44P3 - 0.21P4	0.44 ***
		NO ₃ ⁻ -N = 27.24 - 0.25P1 - 0.35P2 - 0.37P3 - 0.17P4	0.63 ***

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

3 讨论

河北夏季雨水中 DOM 的 FI > 1.9 且 HIX < 4, 表明降雨 DOM 中呈现微生物活动产生的内源类蛋白为主要成分的特征,且 BIX > 1 显示出自生源为主的特点^[14]. 乡村区域雨水 BIX 较高的原因可能与该区域大气中 DOM 光降解程度低,有机物结构中存在较多易降解的类蛋白组分有关^[14]. 本文中 FI 的均值为 1.92,明显高于重庆市北碚城区夏季雨水的 FI(均值 1.44)^[14],南京市郊降雨中 FI(1.45 ~ 1.84)^[32]和周村水库降雨中 FI(1.34 ~ 1.67)^[15, 33],表明河北地区降雨 DOM 的外源输入更明显;本文中 BIX 的均值为 1.73,与印度南部拉梅斯沃勒姆天然雨水的 BIX(1.05 ~ 1.63)相接近^[34],明显高于重庆市北碚城区夏季雨水的 BIX(均值 0.81)^[14],南京市郊降雨中 BIX(0.59 ~ 0.74)^[32]和周村水库降雨中 BIX(0.78 ~ 0.87)^[15, 33],表明河北地区的自生源特征更明显;本文的 HIX 的均值为 0.42,明显低于重庆市北碚城区夏季雨水的 HIX(均值 2.19)^[14],

南京市郊降雨中 HIX(3.06 ~ 5.63)^[32]和周村水库降雨中 HIX(1.03 ~ 2.07)^[15],表明河北雨水 DOM 腐殖化程度比南方雨水水体 DOM 腐殖化要低. 有研究表明城市化程度高的地区地表水体 DOM 组分中类蛋白成分占比高,呈现腐殖化程度低的特点^[35, 36];但是李昀^[37]研究 DOM 与土地利用的关系时发现,城市区域 DOM 的类腐殖质物质占比高,达到 61.3%. 城市化程度对于 DOM 的影响涉及到土地利用、点源面源污染以及产业结构,因此会造成 DOM 特征和组成的错综复杂. 本研究发现河北地区夏季大气降雨呈现出城市高腐殖化特征,可能相比于乡村,城市地区具有更多的汽车尾气、餐厨废气以及工业废气的排放,在一定程度上解释了城市地区雨水中腐殖化程度要高于乡村区域. 由于本文主要聚焦在雨水的组成和特征分析. 关于基于大气气团运移来解析雨水形成在本文并未涉及,对于影响雨水运移的气象因素作者会在将来的研究中进行探讨.

基于相关性分析和回归分析得到雨水中氮素与

DOM 的组分存在显著相关, 暗示大气中有机物与氮素存在相似的来源, 与 Li 等^[32] 研究南京市郊雨水 DOM 与雨水氮素关系得到的结果相一致。比如, 氨氮大多源于化肥和家禽家畜的粪便^[38]; 交通汽车尾气以及化石燃料的燃烧会造成大量氮氧化物的排放, 在大气中进一步转换为硝氮^[39, 40]; 有些无机氮来源于大气中含氮 DOM 的光降解^[41]。而且, 对于其他研究对象也发现相类似的结论。比如, 王晓江等^[42] 的研究发现金盆水库表层沉积物 DOM 各组分与可溶性无机氮呈现显著正相关, 表明 DOM 与氮素的迁移转化密切相关。本文中得到的氮素与 DOM 组分的相关关系, 可以在一定程度上指导环境管理者进行雨水水质预测, 便于环境管理。对于如何更精确地通过雨水水体 DOM 组分预测雨水水质或者通过雨水水质预测 DOM 的组分和特征, 需要更多样品的采集以及结合大气气象数据和区域产业结构等信息更细致深入地分析。

4 结论

(1) 平行因子法识别出雨水 DOM 的 4 种组分, 分别为类腐殖质组分 C1 和 C4, 类酪氨酸组分 C2 和富里酸组分 C3; 各组分荧光强度和相对丰度的空间差异不显著, 城乡间差异显著 ($P < 0.01$)。荧光区域积分法得到的各组分呈现出显著的城乡差异 ($P < 0.001$), 类蛋白质物质占主体。

(2) 雨水中总氮、硝氮和氨氮是影响雨水 DOM 组分分布的主要水质参数; 河北夏季雨水 DOM 呈现较强的自生源和低腐殖化特征, 光谱指数空间差异不显著、城乡差异显著; 回归分析显示城市地区 DOM 组分与雨水氮素指标拟合精度更高。

参考文献:

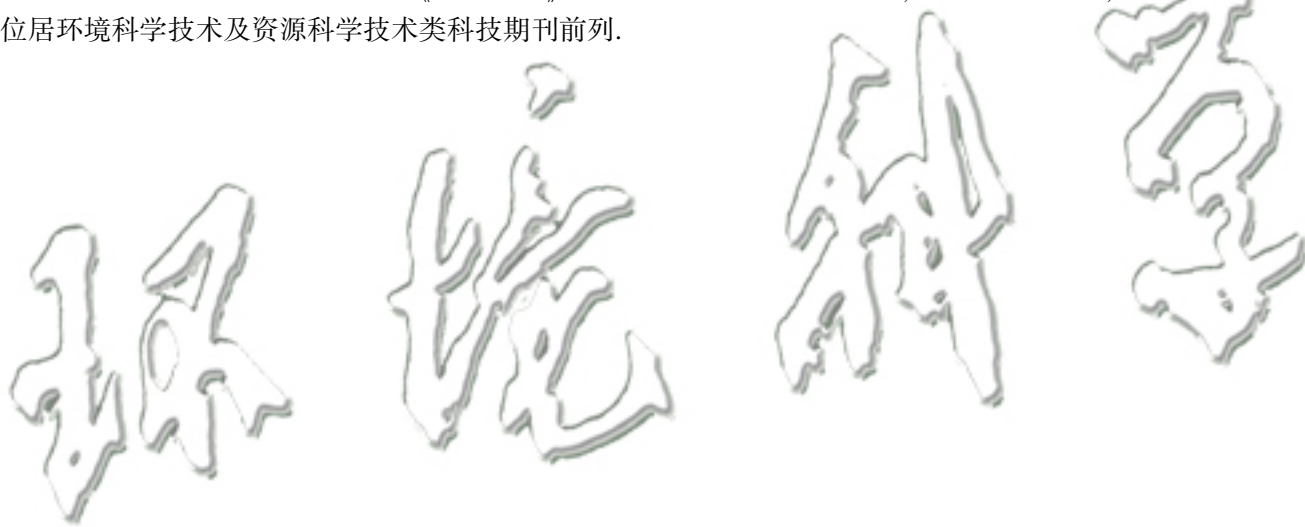
- [1] Zhang L, Fang W K, Li X C, *et al.* Linking bacterial community shifts with changes in the dissolved organic matter pool in a eutrophic lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **719**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137387.
- [2] Zhang W, Zhou Y Q, Jeppesen E, *et al.* Linking heterotrophic bacterioplankton community composition to the optical dynamics of dissolved organic matter in a large eutrophic Chinese lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **679**: 136-147.
- [3] Xu H C, Jiang H L. UV-induced photochemical heterogeneity of dissolved and attached organic matter associated with cyanobacterial blooms in a eutrophic freshwater lake [J]. *Water Research*, 2013, **47**(17): 6506-6515.
- [4] Yamin G, Borisover M, Cohen E, *et al.* Accumulation of humic-like and proteinaceous dissolved organic matter in zero-discharge aquaculture systems as revealed by fluorescence EEM spectroscopy [J]. *Water Research*, 2017, **108**: 412-421.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 等. 周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5451-5463.
- [9] Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* Spectral evolution characteristics of dom in sediment interstitial water during the formation stage of thermal stratification in the main reservoir area of the Zhoucun Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5451-5463.
- [10] 陈昭宇, 李思悦. 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5309-5317.
- [11] Chen Z Y, Li S Y. Absorption and fluorescence spectra of dissolved organic matter in rivers of the three gorges reservoir area under the background of urbanization [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5309-5317.
- [12] 刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 等. 渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1198-1208.
- [13] Liu Z B, Liang W J, Qin L P, *et al.* Distribution and seasonal variations of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1198-1208.
- [14] 王翔, 罗艳丽, 邓雯文, 等. 新疆奎屯地区高砷地下水 DOM 三维荧光特征 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(11): 4974-4981.
- [15] Wang X, Luo Y L, Deng W W, *et al.* The 3D-EEM characteristics of DOM in high arsenic groundwater of Kuitun, Xinjian [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(11): 4974-4981.
- [16] Huang M, Li Z W, Luo N L, *et al.* Application potential of biochar in environment: insight from degradation of biochar-derived DOM and complexation of DOM with heavy metals [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **646**: 220-228.
- [17] 程远月, 郭卫东, 龙爱民, 等. 利用三维荧光光谱和吸收光谱研究雨水中 CDOM 的光学特性 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(9): 2413-2416.
- [18] Cheng Y Y, Guo W D, Long A M, *et al.* Study on optical characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rainwater by fluorescence excitation-emission matrix and absorbance spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(9): 2413-2416.
- [19] Bao H Y, Yi Y Y, Wang C, *et al.* Dissolved organic matter in coastal rainwater: concentration, bioavailability and depositional flux to seawater in southeastern China [J]. *Marine Chemistry*, 2018, **205**: 48-55.
- [20] 梁俭, 江韬, 魏世强, 等. 夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 888-897.
- [21] Liang J, Jiang T, Wei S Q, *et al.* Absorption and fluorescence characteristics of dissolved organic matter (DOM) in rainwater and sources analysis in summer and winter season [J]. *Environmental*

- Science, 2015, **36**(3): 888-897.
- [15] 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 等. 基于 UV-vis 及 EEMs 解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量 DOM 的光谱特征及来源[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 172-184.
- Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* Spectral characteristics and sources of dissolved organic matter with different relative molecular weight from rainwater from summer and autumn in the Zhoucun Reservoir based on UV-Vis and EEMs [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 172-184.
- [16] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 基于 UV-vis 和 EEMs 解析白洋淀冬季冰封期间隙水 DOM 的光谱特征及来源[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 604-614.
- Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spectral characteristics and sources of DOM in sediment interstitial water from Baiyangdian Lake in Xiong'an new area during the winter freezing period based on UV-Vis and EEMs[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(2): 604-614.
- [17] Song K S, Shang Y X, Wen Z D, *et al.* Characterization of CDOM in saline and freshwater lakes across China using spectroscopic analysis[J]. Water Research, 2019, **150**: 403-417.
- [18] Li P H, Hur J. Utilization of UV-Vis spectroscopy and related data analyses for dissolved organic matter (DOM) studies: a review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2017, **47**(3): 131-154.
- [19] Chen W, Yu H Q. Advances in the characterization and monitoring of natural organic matter using spectroscopic approaches[J]. Water Research, 2021, **190**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116759.
- [20] Lawaetz A J, Stedmon C A. Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water [J]. Applied Spectroscopy, 2009, **63**(8): 936-940.
- [21] Lavonen E E, Kothawala D N, Tranvik L J, *et al.* Tracking changes in the optical properties and molecular composition of dissolved organic matter during drinking water production [J]. Water Research, 2015, **85**: 286-294.
- [22] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(4): 742-746.
- [23] 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.
- [24] Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* Microbial aerobic denitrification dominates nitrogen losses from reservoir ecosystem in the spring of Zhoucun reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 998-1010.
- [25] Zhang Y L, Liu M L, Qin B Q, *et al.* Photochemical degradation of chromophoric-dissolved organic matter exposed to simulated UV-B and natural solar radiation[J]. Hydrobiologia, 2009, **627**(1): 159-168.
- [26] Kernan M R, Helliwell R C. Partitioning the variation within the acid neutralizing capacity of surface waters in Scotland in relation to land cover, soil and atmospheric depositional factors [J]. Science of the Total Environment, 2001, **265**(1-3): 39-49.
- [27] Zablocka M, Kowalczyk P, Meler J, *et al.* Compositional differences of fluorescent dissolved organic matter in Arctic Ocean spring sea ice and surface waters north of Svalbard[J]. Marine Chemistry, 2020, **227**, doi: 10.1016/j.marchem.2020.103893.
- [28] 施俊, 王志刚, 封克. 水体溶解有机物三维荧光光谱表征技术及其在环境分析中的应用[J]. 大气与环境光学报, 2011, **6**(4): 243-251.
- Shi J, Wang Z G, Feng K. Characterization techniques of dissolved organic pollutants in wastewater by three-dimensional fluorescent spectroscopy and its application in environmental analysis[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, **6**(4): 243-251.
- [29] 欧阳二明, 张锡辉, 王伟. 城市水体有机污染类型的三维荧光光谱分析法[J]. 水资源保护, 2007, **23**(3): 56-59.
- Ouyang E M, Zhang X H, Wang W. Three-dimensional fluorescence spectroscopy in the analysis of organic pollution type of urban waters[J]. Water Resources Protection, 2007, **23**(3): 56-59.
- [30] Yu G H, He P J, Shao L M. Novel insights into sludge dewaterability by fluorescence excitation-emission matrix combined with parallel factor analysis [J]. Water Research, 2010, **44**(3): 797-806.
- [31] 蔡文良, 许晓毅, 罗固源, 等. 长江重庆段溶解性有机物的荧光特性分析[J]. 环境化学, 2012, **31**(7): 1003-1008.
- Cai W L, Xu X Y, Luo G Y, *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved organic matter in the Chongqing section of Yangtze River [J]. Environmental Chemistry, 2012, **31**(7): 1003-1008.
- [32] Li S D, Fan R, Luo D, *et al.* Variation in quantity and quality of rainwater dissolved organic matter (DOM) in a peri-urban region: implications for the effect of seasonal patterns on DOM fates[J]. Atmospheric Environment, 2020, **239**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117769.
- [33] 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 等. 周村水库汛期暴雨中溶解有机物 (DOM) 的光谱特征及来源解析[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 493-506.
- Zhou S L, Zhang Y R, Huang T L, *et al.* Spectral characteristics and sources of rainstorms dissolved organic matter in Zhoucun Reservoir during flood season [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(2): 493-506.
- [34] Salve P R, Lohkare H, Gobre T, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rainwater using fluorescence spectrophotometry [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, **88**(2): 215-218.
- [35] Lyu L L, Liu G, Shang Y X, *et al.* Characterization of dissolved organic matter (DOM) in an urbanized watershed using spectroscopic analysis[J]. Chemosphere, 2021, **277**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130210.
- [36] Shang Y X, Song K S, Jacinthe P A, *et al.* Fluorescence spectroscopy of CDOM in urbanized waters across gradients of development/industrialization of China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **415**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125630.
- [37] 李响, 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.
- [38] Chen Z L, Huang T, Huang X H, *et al.* Characteristics, sources and environmental implications of atmospheric wet nitrogen and sulfur deposition in Yangtze River Delta [J]. Atmospheric Environment, 2019, **219**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116904.
- [39] Xing J W, Song J M, Yuan H M, *et al.* Atmospheric wet deposition of dissolved organic carbon to a typical anthropogenic-

- influenced semi-enclosed bay in the western Yellow Sea, China: flux, sources and potential ecological environmental effects[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **182**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109371.
- [40] Wu S P, Zhang Y J, Schwab J J, *et al.* High-resolution ammonia emissions inventories in Fujian, China, 2009- 2015 [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **162**: 100-114.
- [41] Stedmon C A, Markager S, Tranvik L, *et al.* Photochemical production of ammonium and transformation of dissolved organic matter in the Baltic Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2007, **104** (3-4): 227-240.
- [42] 王晓江, 黄廷林, 李楠, 等. 峡谷分层型水源水库表层沉积物溶解性有机物光谱特征[J]. *湖泊科学*, 2018, **30** (6): 1625-1635.
- Wang X J, Huang T L, Li N, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter in the surface sediments from a canyon-shaped, stratified, water-source reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30** (6): 1625-1635.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2020 年 12 月 29 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2019 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2019 年度总被引频次12 057,影响因子 2. 256,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i> (5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i> (5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i> (5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOW Wei, <i>et al.</i> (5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i> (5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i> (5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i> (5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i> (5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i> (5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i> (5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i> (5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i> (5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i> (5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i> (5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i> (5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i> (5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i> (5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i> (5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i> (5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i> (5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i> (5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i> (5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i> (5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i> (5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i> (5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i> (5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i> (5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i> (5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i> (5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i> (5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i> (5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i> (5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i> (5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i> (5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i> (5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i> (5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i> (5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i> (5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i> (5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i> (5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i> (5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i> (5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i> (5554)