

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618)	《环境科学》征稿简则 (1635)
信息 (1724, 1769, 1800)	

北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性

陈梦瑶¹, 杜晓丽^{1,2*}, 于振亚¹, 朱英杰¹, 梁卉¹, 吴凡¹

(1. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘要: 为探究北京市道路雨水径流溶解性有机物 (DOM) 的化学特性, 采用三维荧光光谱、紫外-可见吸收光谱及红外光谱技术, 对北京市不同交通密度道路雨水径流溶解性有机物的化学组分进行分析。结果表明, 北京市道路雨水径流 DOM 以疏水性组分为主, 且主要为疏水中性组分。道路雨水径流 DOM 亲水性组分主要由类芳香蛋白物质组成, 疏水性组分除含大量类芳香蛋白物质外, 还含有大量类富里酸物质。道路雨水径流 DOM 疏水性组分的芳香化程度较高, 腐殖化程度较低, 亲水性组分与之相反。道路雨水径流 DOM 酸性组分中含异构化的羧基和苯环等官能团, 碱性组分和中性组分中含醚键、酯基、酚类和醇类等官能团。交通密度对道路雨水径流 DOM 化学组分的物质组成、特性等无明显影响, 仅影响各化学组分中的物质含量; 交通密度越大, 各化学组分中物质的含量越多和芳香化程度越高, 腐殖化程度越低。

关键词: 道路雨水径流; 溶解性有机物 (DOM); 化学组分; 树脂分级; 三维荧光光谱 (EEMs)

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1709-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201908158

Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing

CHEN Meng-yao¹, DU Xiao-li^{1,2*}, YU Zhen-ya¹, ZHU Ying-jie¹, LIANG Hui¹, WU Fan¹

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The characteristics of DOM chemical fractions in road runoff with different traffic density were analyzed using excitation emission matrix spectroscopy (EEMs) technology, UV-vis spectra, and FTIR spectroscopy. The results showed that hydrophobic organics were the dominant components in DOM of road runoff, and hydrophobic neutral organics was the most abundant fraction. The hydrophilic organics in DOM of road runoff were mainly composed of protein-like substances. Both protein-like substances and fulvic-like acid substances were found in the hydrophobic organic matters. A high degree of aromatization and a low degree of humification were detected in hydrophobic organics, whereas the characteristics of hydrophilic organics were opposite. Some functional groups such as isomerized carboxyl and unsaturated C=C bonds were featured in acidic organics, and ether and ester groups, phenol, and alcohol were detected in alkaline and neutral organics. The substance composition and characteristics of DOM chemical fractions in road runoff were not affected by the traffic density. Traffic density influenced the quantity of substances in each chemical fraction only. With traffic density increasing, the matter content and the aromatization degree of DOM chemical fractions in road runoff increased, whereas the degree of humification decreased.

Key words: road runoff; dissolved organic matter (DOM); chemical fractions; resin isolation; excitation emission matrix spectroscopy (EEMs)

城市地表径流中的溶解性有机物 (dissolved organic matter, DOM) 是一种具有较高活性的物质, 可作为重金属、药物等污染物的迁移载体或配位体, 使地表径流中的污染物更加易于迁移且难以去除^[1-4], 进而影响其在环境中的生物毒性。具体来说, DOM 的化学组成是影响 DOM 与其他污染物结合迁移潜力及协同去除的主要因素。如, 席玥等^[5]研究了黄河干流宁蒙段 DOM 不同化学组分与重金属的结合能力, 发现亲水性组分更易与 Pb、Zn、Cu、Cd 和 As 等络合; Polubesova 等^[6]和吴东明等^[7]的研究发现, 铁-蒙脱石和铁铝土对 DOM 中疏水酸性和疏水中性组分的吸附去除效果较好; Du 等^[8]的研究也发现垂直流人工湿地系统对生活污水 DOM 疏

水性组分的去除效果较好, 对疏水酸性组分的去除效果最好。

目前, 对地表径流 DOM 化学组分特性的研究还鲜有报道, 多数研究集中于道路径流 DOM 及其与其它物质的结合污染特性。如, Yuan 等^[9]、Zhao 等^[10]和于振亚等^[11]的研究表明道路雨水径流 DOM 是由芳香族和脂肪族构成的复杂化合物, 含大量的

收稿日期: 2019-08-19; 修订日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878024); 北京市自然科学基金项目 (8162016); 北京市教委科研计划一般项目 (KM201810016008); 北京建筑大学科学研究基金项目 (KYJJ2017030)

作者简介: 陈梦瑶 (1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市雨洪控制利用, E-mail: cmyyao@163.com

* 通信作者, E-mail: duxiaoli@bucea.edu.cn

多环芳烃和腐殖质,主要含有一OH、—COOH 和苯环等官能团. Zhao 等^[12]和于振亚等^[13]的研究表明道路雨水径流 DOM 能络合铜、铅、铬等重金属,在一定程度上影响了重金属的迁移转化;Wang 等^[14]的研究发现径流雨水 DOM 可与药物卡马西平(carbamazepine, CBZ)络合形成 DOM-CBZ 络合物,增加 CBZ 在水环境中的顽固性和生物毒性.

针对地表径流 DOM 及与其他物质的结合污染,笔者课题组已深入研究了北京市道路雨水径流 DOM 特性及其与几种常见重金属 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 之间的结合作用^[11, 13]. 由于 DOM 化学组成对 DOM 与其他污染物结合迁移潜力及协同去除的影响巨大,本研究拟在前期研究的基础上,系统分析北京市道路径流 DOM 的化学组成,以期为进一步控制地表径流 DOM 复合污染提供研究基础.

1 材料与方法

1.1 道路雨水径流样品采集

本研究选取北京市两条不同交通密度的道路作为雨水径流样品采样点,分别为北京市西城区车公庄大街(道路 A)和大兴区北京建筑大学园区道路(道路 B). 采样点下垫面和车流量状况等具体信息详见表 1.

表 1 采样点下垫面特征情况
Table 1 Characteristics of the roads for sampling

道路	道路 A	道路 B
位置	车公庄大街	北京建筑大学园区道路
汇水面积/ m^2	200	45
路面材料	不透水沥青	不透水沥青
径流系数	0.90	0.90
单向车道数/条	2	1
日交通量/辆	10 000	30

雨水径流样品采集时间为 2018 年 8 月 8 日,此次降雨持续时间 7 h,总降雨量 5.90 mm,且在 07:00 时降雨量达到峰值 2.20 mm,每小时降雨量如图 1 所示. 分别于两条道路产生地表径流后 0、15、30、60、90、120 和 180 min 时各采集样品 500 mL. 采样结束后立即送回实验室,各时段径流样品经 0.45 μm 滤膜过滤后混合,置于棕色样品瓶中于 4℃ 冰箱中保存,一周内完成 DOM 分级提取及相关指标测定.

1.2 样品分析

1.2.1 DOM 化学组分分级提取^[8, 15]

DOM 化学组分的分级提取参考文献^[8, 15]的方法,采用 XAD-8 树脂、强酸性大孔阳离子交换树脂 MSC-H 和阴离子交换树脂 IRA-958 串联树脂柱,

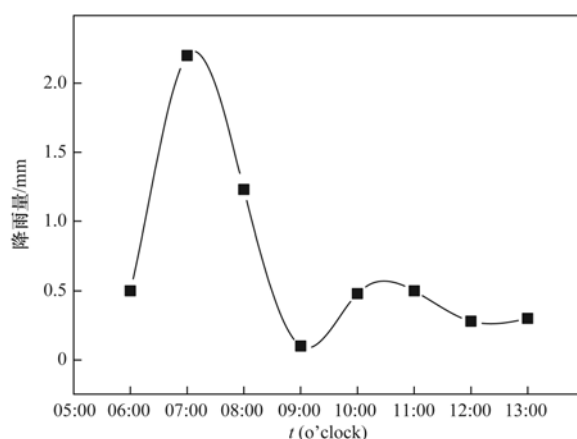


图 1 2018 年 8 月 8 日降雨特征

Fig. 1 Rainfall characteristics on August 8, 2018

按 DOM 在树脂上不同的吸附特性将道路雨水径流 DOM 分为亲水酸性(HiA)、亲水碱性(HiB)、亲水中性(HiN)、疏水酸性(HoA)、疏水碱性(HoB)和疏水中性(HoN)这 6 种化学组分.

1.2.2 溶解性有机碳测定

采用 Jena multi N/C 3100 型总有机碳分析仪(德国耶拿分析仪器股份公司)测定过 0.45 μm 滤膜的雨水径流样品及经树脂分级所得到的各化学组分中溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)含量.

1.2.3 三维荧光及同步荧光光谱

取道路雨水径流 DOM 不同化学组分样品 5 mL 置于四面石英比色皿中进行三维荧光光谱扫描. 三维荧光光谱采用 Hitachi F-7000 型荧光光度计(日本日立公司)测定,激发光源为 150 W 氙弧灯,PTM 电压为 700 V,信噪比大于 110. 设置发射光及激发光的带通均为 5 nm,光谱仪扫描范围为激发波长/发射波长(E_x/E_m) = 200 ~ 450 nm/250 ~ 550 nm,扫描速度为 1 200 $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$. 待扫描结束后使用 Origin 8.5 软件将 E_x/E_m 所对应的荧光强度进行处理,形成等高图. 在进行三维荧光光谱分析之前,将瑞利散射上方的光谱数据置零以去除瑞利散射的影响;以超纯水做空白参比,减去超纯水的三维荧光光谱数据,以消除拉曼散射的影响.

采用荧光光度计进行同步荧光光谱扫描时,扫描范围为 200 ~ 550 nm,取互定波长差($\Delta\lambda$ = 30 nm),扫描速度为 240 $\text{nm} \cdot \text{s}^{-1}$.

1.2.4 紫外-可见吸收光谱

采用 Perkin-Elmer lambda 650S 型紫外-可见分光光度计(美国珀金埃尔默公司)对道路雨水径流 DOM 不同化学组分样品进行全波长扫描.

1.2.5 红外光谱

取 30 mL 经树脂分级后的道路 A 径流 DOM 不同化学组分溶液,经德国 Christ ALPHA 1-4 LSC 冷

冻干燥机(-55°C , 6.8 Pa)冷冻干燥 48 h 至粉状后,与光谱纯 KBr 以 1:100 的比例混合压片,在 NICOLET 6700 型傅立叶变换红外光谱仪(美国热电公司)上进行红外光谱分析。

2 结果与讨论

2.1 道路雨水径流 DOM 不同化学组分含量

道路 A、B 雨水径流 DOM 不同化学组分的 DOC 浓度及占比分别如图 2 所示。由图 2(a)可见,道路 A 雨水径流 DOM 不同化学组分的 DOC 浓度均高于道路 B,其中疏水中性组分 HoN、亲水中性组分 HiN 和疏水酸性组分 HoA 的浓度均远高于道路 B;说明交通密度越大,道路雨水径流 DOM 含量越高,各化学组分的含量也越高。从图 2(b)道路雨水径流

DOM 不同化学组分 DOC 浓度所占比例来看,道路 A、B 雨水径流 DOM 均以疏水性组分为主,分别占总 DOM 的 65.26% 和 73.91%;其中,疏水中性物质 HoN 含量最高,分别占 38.00% 和 58.29%;且道路 A 雨水径流中疏水酸性组分 HoA 占比高于道路 B。可见,交通密度并未影响道路径流 DOM 化学组成,道路径流 DOM 含大量疏水性组分,且 HoN 含量最多;交通密度越大,疏水性组分中 HoA 含量越多。一般认为,DOM 中的疏水性组分由芳香族化合物和多环芳烃类物质等组成,亲水性组分由多糖和蛋白质等化合物组成^[16, 17]。道路径流 DOM 中大量的疏水性组分可能是由于车辆行驶过程中汽油滴漏、汽车尾气排放、沥青溶出或轮胎磨损出的沥青颗粒等致使径流中含多环芳烃的物质较多而造成的^[18]。

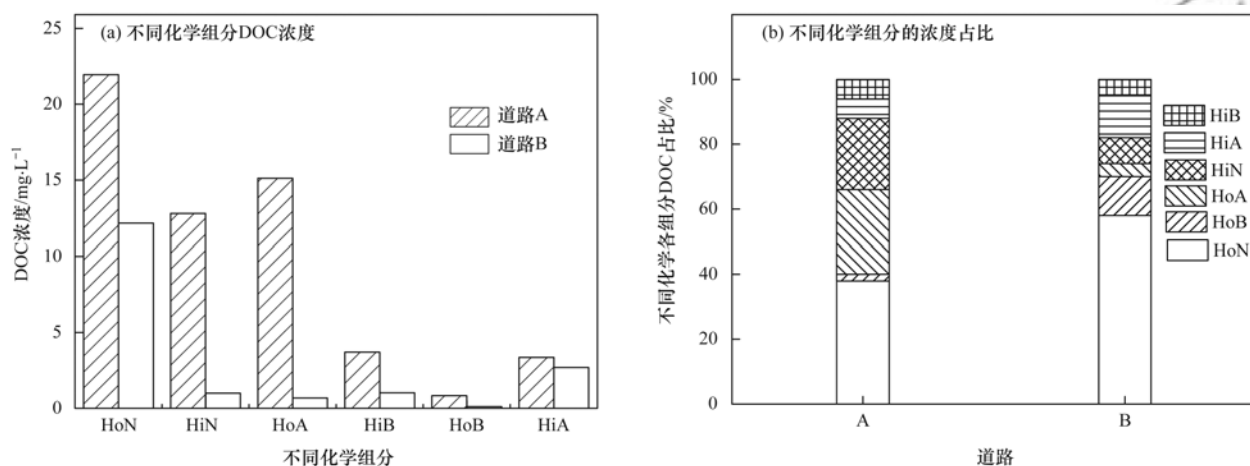


图 2 道路雨水径流 DOM 不同化学组分 DOC 浓度及其占比

Fig. 2 DOC concentration and proportion of different chemical fractions of DOM in road runoff

相关研究表明,DOM 疏水性组分可采用混凝、氧化和吸附等方法去除,亲水性组分则可通过微生物降解去除^[19~21]。因此,针对道路径流 DOM 的化学组分分布特点,可通过路旁生物滞留带源头控制实现径流 DOM 去除,降低径流 DOM 与其他污染物的结合迁移能力,减少其对地表水体造成的污染。如,采用活性填料介质吸附实现 DOM 中大量疏水性组分的去除,生物滞留内部微生物作用实现其亲水性组分去除。

2.2 道路雨水径流 DOM 不同化学组分荧光光谱分析

2.2.1 三维荧光光谱

道路 A、B 雨水径流 DOM 不同化学组分的三维荧光光谱图如图 3 所示。一般而言,三维荧光光谱图中不同位置的荧光峰代表着不同物质:A 峰($E_x/E_m = 240 \sim 250\text{ nm}/400 \sim 420\text{ nm}$)代表类富里酸物质,C 峰($E_x/E_m = 200 \sim 230\text{ nm}/300 \sim 320\text{ nm}$)代表类络氨酸物质,D 峰($E_x/E_m = 270 \sim 280\text{ nm}/330 \sim 370\text{ nm}$)代表类色氨酸物质;其中类色氨酸物质和类络

氨酸物质均属于类芳香蛋白物质^[8]。

由图 3 可见,道路 A、B 径流 DOM 不同化学组分三维荧光光谱图中均含有 C 峰或 D 峰,说明各组分中均含有类芳香蛋白物质;且亲水碱性组分和所有疏水性组分的三维荧光光谱图中还均含有 A 峰,说明这些组分中除含类芳香蛋白物质外,还含类富里酸物质。此外,道路 A 和道路 B 径流 DOM 相同化学组分三维荧光光谱图中出现的峰一致,如 HiN 和 HiA 均以 C 峰为主,HiB 和疏水性组分谱图中均存在 A、C 和 D 峰,说明交通密度不会改变径流 DOM 相同性质化学组分中物质的组成。

通常,三维荧光光谱图中峰的强弱可代表物质含量的多少。由图 3 可见,道路 A 雨水径流 DOM 不同化学组分的荧光峰强度均高于道路 B 雨水径流 DOM 中相应的化学组分;且除碱性物质外,同一道路雨水径流 DOM 疏水性组分的荧光强度均高于相应性质的亲水性组分;疏水中性组分 HoN 荧光峰的强度明显高于其他化学组分的荧光强度。三维荧光

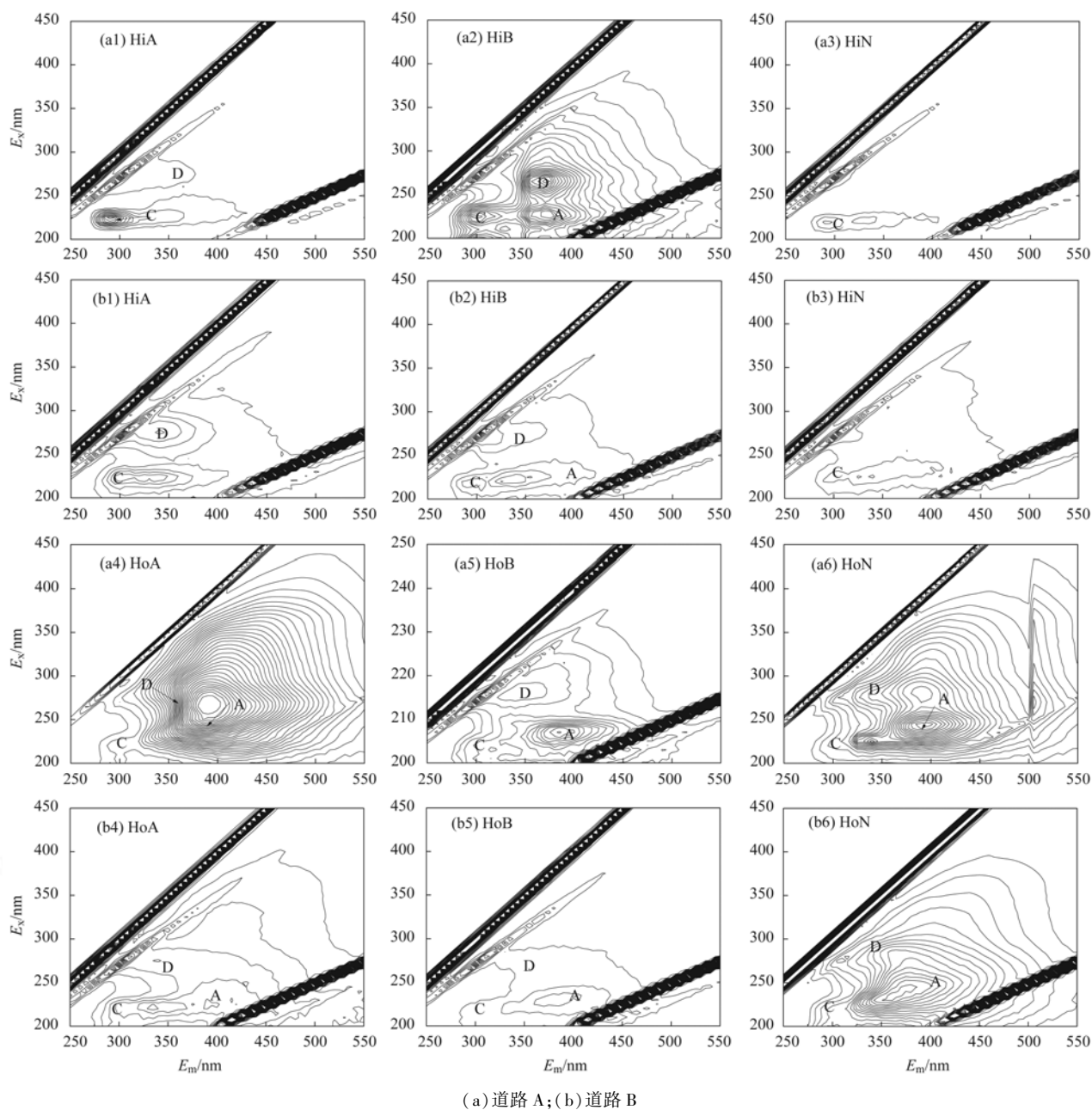


图 3 道路雨水径流 DOM 不同化学组分三维荧光光谱图

Fig. 3 Three-dimensional fluorescence spectrum of different chemical fractions of DOM in road runoff

光谱结果同样指示道路径流 DOM 疏水性组分含量较高,且 HoN 组分含量最高,这与 DOC 浓度结果一致。

综上所述,道路雨水径流 DOM 亲水性组分主要由类芳香蛋白质组成,疏水性组分除含大量类芳香蛋白质外,还含有大量类富里酸物质;且交通密度越大,疏水性组分中类富里酸物质含量越多。据报道,类蛋白质与重金属具有较强的络合作用,可与重金属结合产生协同污染,并影响雨水径流中重金属的迁移转化^[5,13];由此推断道路径流亲水性组分更易与重金属结合并产生协同污染。因此,针对道路径流 DOM-重金属协同污染,尤其是交通密度较大的道路径流,应采取措施强化对径流 DOM 亲水

性组分的去除。

2.2.2 同步荧光光谱

通常,同步荧光光谱中 250 ~ 308 nm 波长范围内的峰与类蛋白质物质和芳香性化合物的存在有关;308 ~ 363 nm 波长范围内的峰与类富里酸类物质中带 3 ~ 4 个苯环的多环芳香烃和带 2 ~ 3 个共轭体系的不饱和脂肪族结构有关^[22]。为进一步考察道路径流各化学组分的物质组成,对道路雨水径流 DOM 不同化学组分进行同步荧光光谱扫描,结果如图 4 所示。

由图 4 可见,道路 A、B 雨水径流 DOM 不同化学组分同步荧光光谱图的荧光峰主要集中在 250 ~ 300 nm 波长范围内,说明道路雨水径流 DOM 不同

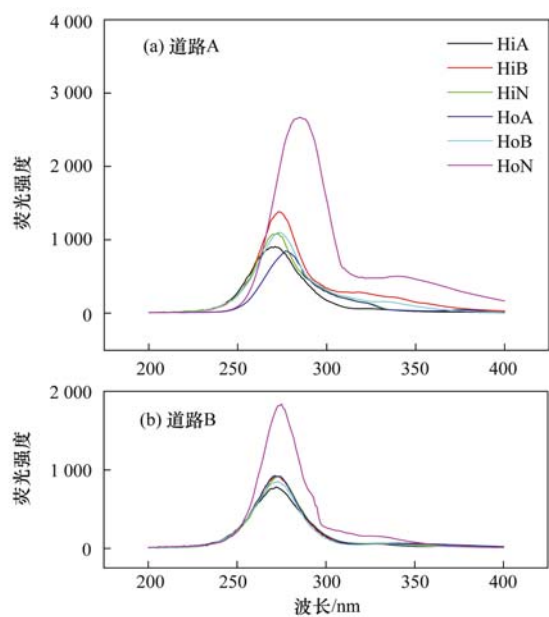


图4 道路雨水径流 DOM 不同化学组分同步荧光光谱
Fig. 4 Synchronous fluorescence spectra of different chemical fractions of DOM in road runoff

化学组分均含类芳香蛋白质;且 HoN、HoA、HoB 和 HiB 这 4 种组分在 308 ~ 363 nm 处还出现了一个微弱的波峰,说明这 4 种组分中还含有类富里酸物质,这与三维荧光光谱的结论一致.从道路 A、B 径流 DOM 不同化学组分同步荧光峰的峰强来看,道路 A 径流 DOM 不同化学组分在 250 ~ 300 nm 范围内峰强度均高于道路 B 相应的化学组分;说明交通密度越大,各化学组分中所含的类芳香蛋白质也越高;但不管交通密度如何, HoN 均为道路雨水径流 DOM 的主要组分.从道路雨水径流 DOM 不同化学组分同步荧光峰的波长来看,道路 A 雨水径流样品的 HoN 和 HoA 组分在 250 ~ 300 nm 波长范围内均发生了明显红移,这可能是由于交通密度增加致使 HoN 和 HoA 组分中类富里酸物质增加,进而导致组分中所含的物质结构发生变化^[23].

2.3 道路雨水径流 DOM 不同化学组分紫外可见吸收光谱分析

通常,紫外-可见吸收光谱中 253 nm 和 203 nm 处的吸光度之比 A_{253}/A_{203} 可表征 DOM 的芳香化程度以及芳环取代程度^[24], A_{253}/A_{203} 值较低说明有机物的芳香性较低且芳环上的取代基多是脂肪族官能团结构, A_{253}/A_{203} 值较高表示芳香性较高且芳环上的取代基多为含氧官能团(如羟基、羧基、羰基和酯类等);紫外-可见吸收光谱中 300 nm 和 400 nm 处的吸光度之比 A_{300}/A_{400} 可表征有机物的腐殖化程度^[25], A_{300}/A_{400} 的值小于 3, 表示物质结构复杂, 苯环含量较多, 腐殖化程度较高; A_{300}/A_{400} 的值大于 3, 表示物质的腐殖化程度较低, 富里酸含量较多, 腐殖

酸含量较少^[26].道路雨水径流 DOM 不同化学组分的紫外-可见吸收光谱指数结果见表 2.

表2 道路雨水径流 DOM 不同化学组分紫外-可见吸收光谱指数值

Table 2 UV-visible absorption spectral index values of different chemical fractions of DOM in road runoff				
组分	A_{253}/A_{203}		A_{300}/A_{400}	
	道路 A	道路 B	道路 A	道路 B
HiA	0.02	0.00	1.59	0.52
HiB	0.27	0.18	2.37	1.31
HiN	0.14	0.03	0.51	0.50
HoA	0.39	0.28	6.48	1.63
HoB	0.43	0.19	4.20	1.82
HoN	1.11	0.35	4.67	3.00

由表 2 可知,道路 A 雨水径流 DOM 不同化学组分的 A_{253}/A_{203} 和 A_{300}/A_{400} 值均高于道路 B 的相应组分,且同一路径流 DOM 中疏水性组分的值也均高于亲水性组分;说明交通密度越大,道路雨水径流 DOM 的芳香化程度越高,腐殖化程度越低;且疏水性组分的芳香化程度高于亲水性组分,腐殖化程度低于亲水性组分.此外,道路 A 雨水径流 DOM 中疏水中性组分 HoN 的 A_{253}/A_{203} 值远高于其他疏水性组分,说明道路 A 径流中的 HoN 组分芳香性最强、且芳环上的含氧取代基也较多.道路 A 雨水径流 DOM 疏水性组分的 A_{300}/A_{400} 值均大于 3,说明其腐殖化程度较低,含有较多的富里酸物质,易被去除^[27];反之,道路 A 雨水径流 DOM 亲水性组分和道路 B 雨水径流 DOM 各化学组分的 A_{300}/A_{400} 值均小于 3,说明其腐殖化程度较高,物质结构复杂,含有较多的苯环,难以被去除.

2.4 道路雨水径流 DOM 不同化学组分官能团分析

选取交通密度较大的道路 A 雨水径流 DOM 不同化学组分的样品进行红外光谱分析,其结果如图 5 所示.从中可知,道路雨水径流 DOM 各化学组分红外光谱图中均出现了在 3 300 ~ 3 500 cm^{-1} 处的 —OH 伸缩振动峰, 1 590 ~ 1 670 cm^{-1} 处的 C=O 键或芳香环上的 C=C 伸缩振动峰,以及 1 370 ~ 1 465 cm^{-1} 范围内的脂肪族化合物中的 C—H 变形,羧酸类化合物中的 O—H 弯曲振动及醇类化合物的 C—O 振动^[28~31],说明所有组分均含有 —OH、—C=O 基团、—COOH 和 C=C 双键等官能团;且亲水性组分在 1 370 ~ 1 465 cm^{-1} 范围和 1 590 ~ 1 670 cm^{-1} 范围内的吸收峰强度明显高于疏水性组分,说明亲水性组分中的 —C=O 基团、C=C 双键、—COOH 等官能团的含量较高,这些官能团使得亲水性组分更易与重金属等结合^[13].此外,道路雨水径流 DOM 中疏水性组分和相同性质的亲水性组

分之间的红外光谱图差异不大,而酸性、碱性和中性组分之间略有差异.如,酸性组分均在 $605 \sim 860 \text{ cm}^{-1}$ 范围内出现了羧酸化合物中 O—H 变形振动或苯环 C—H 的弯曲振动吸收峰^[32],说明酸性组分中含有异构化的羧基和不饱和烷烃等官能团.碱性组分和中性组分均在 $1\,000 \sim 1\,137 \text{ cm}^{-1}$ 范围内出现了 C—O 的伸缩振动峰^[29],说明碱性组分和中性组分中含有醚键、酯基、酚类和醇类等官能团.

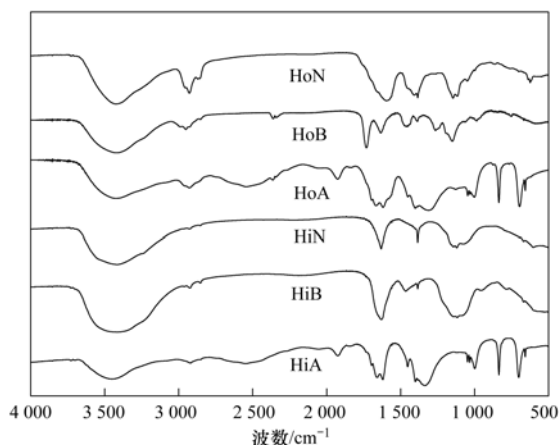


图5 道路A雨水径流DOM不同化学组分红外光谱图

Fig. 5 Fourier infrared spectroscopy of different chemical fractions of DOM in road A runoff

3 结论

(1)道路雨水径流DOM不同化学组分以疏水性组分为主,且HoN组分最多.交通密度对道路雨水径流DOM的化学组成无明显影响,仅会影响不同化学组分的含量;交通密度越大,道路雨水径流DOM不同化学组分的含量越高.

(2)道路雨水径流DOM亲水性组分主要由类芳香蛋白物质组成,疏水性组分除含大量类芳香蛋白物质外,还含有大量类富里酸物质;交通密度越大,疏水性组分中类富里酸物质含量越多.

(3)道路雨水径流疏水性组分的芳香化程度高于亲水性组分,腐殖化程度低于亲水性组分.随交通密度增加,道路雨水径流DOM不同化学组分的芳香化程度越高,腐殖化程度越低.

(4)道路雨水径流DOM不同化学组分均含有—OH、—C=O、—COOH基团和C=C双键以及醇类羟基等官能团;酸性组分含有异构化的羧基和苯环等官能团;碱性组分和中性组分还含有醚键、酯基、酚类和醇类等官能团.

参考文献:

[1] Markiewicz A, Björklund K, Eriksson E, *et al.* Emissions of organic pollutants from traffic and roads: priority pollutants selection and substance flow analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 1162-1174.
[2] Yan M Q, Fu Q W, Li D C, *et al.* Study of the pH influence on

the optical properties of dissolved organic matter using fluorescence excitation-emission matrix and parallel factor analysis [J]. *Journal of Luminescence*, 2013, **142**: 103-109.

- [3] Cao B, Jiang Z, Li J M, *et al.* Different dissolved organic matter (DOM) characteristics lead to diverse atrazine adsorption traits on the non-rhizosphere and rhizosphere soil of *Pennisetum americanum* (L.) K. Schum [J]. *Chemosphere*, 2018, **209**: 608-616.
[4] Jeremiason J D, Baumann E I, Sebestyen S D, *et al.* Contemporary mobilization of legacy Pb stores by DOM in a boreal peatland [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52** (6): 3375-3383.
[5] 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.
[6] Polubesova T, Chen Y, Navon R, *et al.* Interactions of hydrophobic fractions of dissolved organic matter with Fe^{3+} - and Cu^{2+} -Montmorillonite [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42** (13): 4797-4803.
[7] 吴东明, 李勤奋, 武春媛. 铁铝土对溶解性有机质的吸附特性[J]. *环境化学*, 2016, **35** (4): 639-650.
Wu D M, Li Q F, Wu C Y. Adsorption of dissolved organic matter on ferrallitic soils [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35** (4): 639-650.
[8] Du X L, Xu Z X, Li J Q, *et al.* Characterization and removal of dissolved organic matter in a vertical flow constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **73**: 610-615.
[9] Yuan D H, Cui L J, An Y C, *et al.* Investigating the pollutant-removal performance and DOM characteristics of rainfall surface runoff during different ecological concrete revetments treatment [J]. *Ecological Indicators*, 2019, **105**: 655-662, doi: 10.1016/j.ecolind.2018.07.033.
[10] Zhao C, Wang C C, Li J Q, *et al.* Chemical characteristics of chromophoric dissolved organic matter in stormwater runoff of a typical residential area, Beijing [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57** (42): 19727-19740.
[11] 于振亚, 杜晓丽, 王蕊, 等. 交通密度对道路雨水径流溶解性有机物污染特性的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, **38** (2): 528-535.
Yu Z Y, Du X L, Wang R, *et al.* Impact of traffic density on dissolved organic matter in road stormwater runoff [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38** (2): 528-535.
[12] Zhao C, Wang C C, Li J Q, *et al.* Interactions between copper (II) and DOM in the urban stormwater runoff: modeling and characterizations [J]. *Environmental Technology*, 2018, **39** (1): 120-129.
[13] 于振亚, 杜晓丽, 高参, 等. 道路雨水径流溶解性有机物与重金属结合作用分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38** (8): 3004-3011.
Yu Z Y, Du X L, Gao C, *et al.* Complexation between heavy metals and dissolved organic matters in road stormwater runoffs [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38** (8): 3004-3011.
[14] Wang Y, Zhang M M, Fu J, *et al.* Insights into the interaction between carbamazepine and natural dissolved organic matter in the Yangtze Estuary using fluorescence excitation-emission matrix spectra coupled with parallel factor analysis [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23** (19): 19887-19896.

- [15] Thurman E M, Malcolm R L. Preparative isolation of aquatic humic substances[J]. Environmental Science & Technology, 1981, **15**(4): 463-466.
- [16] 孙青亮, 吴昌永, 胡翔, 等. 石化污水厂二级出水溶解性有机物分级解析研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(11): 2017-2022.
- Sun Q L, Wu C Y, Hu X, *et al.* Classification and analysis of dissolved organic matter in the effluent of a petrochemical wastewater treatment plant[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(11): 2017-2022.
- [17] 薛同站, 李卫华, 伍鲛, 等. 污水厂尾水及受纳河流样品溶解有机物(DOM)的分子光谱解析及识别[J]. 生态与农村环境学报, 2018, **34**(12): 1131-1138.
- Xue T Z, Li W H, Wu G, *et al.* Molecular spectroscopy analysis and recognition research on the dissolved organic matter (DOM) of effluents from sewage treatment plants and the samples from receiving waters[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, **34**(12): 1131-1138.
- [18] 吴杰, 熊丽君, 吴健, 等. 上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2240-2248.
- Wu J, Xiong L J, Wu J, *et al.* Comparison and source apportionment of PAHs pollution of runoff from roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2240-2248.
- [19] Ma H Z, Allen H E, Yin Y J. Characterization of isolated fractions of dissolved organic matter from natural waters and a wastewater effluent[J]. Water Research, 2001, **35**(4): 985-996.
- [20] Wang Z, Zhao W Y, Xu L W, *et al.* Analysis of genotoxicity and characterization of dissolved organic matter in the aniline industrial wastewater[J]. Advanced Materials Research, 2014, **1010-1012**: 472-477.
- [21] Tseng L Y, Gonsior M, Schmitt-Kopplin P, *et al.* Molecular characteristics and differences of effluent organic matter from parallel activated sludge and integrated fixed-film activated sludge (IFAS) processes[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(18): 10277-10284.
- [22] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [23] dos Santos L M, Simões M L, de Melo W J, *et al.* Application of chemometric methods in the evaluation of chemical and spectroscopic data on organic matter from oxisols in sewage sludge applications[J]. Geoderma, 2010, **155**(1-2): 121-127.
- [24] 何小松, 张慧, 黄彩红, 等. 地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3813-3820.
- He X S, Zhang H, Huang C H, *et al.* Vertical distribution characteristics of dissolved organic matter in groundwater and its cause[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3813-3820.
- [25] 范春辉, 张颖超, 王家宏. pH 值对秸秆腐殖化溶解性有机物紫外光谱和荧光光谱的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, **35**(7): 1933-1937.
- Fan C H, Zhang Y C, Wang J H. Effect of pH on the ultraviolet spectra and fluorescence characteristics of dissolved organic matter in the process of straw humification[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, **35**(7): 1933-1937.
- [26] 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.
- [27] 刘晓明, 余震, 周普雄, 等. 污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3807-3815.
- Liu X M, Yu Z, Zhou P X, *et al.* Spectroscopic characterization of DOM during hyperthermophilic composting of sewage sludge[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3807-3815.
- [28] de Zaruk K K, Scholer G, Dudal Y. Fluorescence fingerprints and Cu^{2+} -complexing ability of individual molecular size fractions in soil- and waste-borne DOM[J]. Chemosphere, 2007, **69**(4): 540-548.
- [29] 周江敏, 代静玉, 潘根兴. 应用光谱分析技术研究土壤水溶性有机质的分组及其结构特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, **24**(9): 1060-1065.
- Zhou J M, Dai J Y, Pan G X. Fractionation and spectroscopic property of dissolved organic matters in soils[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, **24**(9): 1060-1065.
- [30] El Fels L, Zamama M, El Asli A, *et al.* Assessment of biotransformation of organic matter during co-composting of sewage sludge-lignocellulosic waste by chemical, FTIR analyses, and phytotoxicity tests[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, **87**: 128-137.
- [31] He X S, Xi B D, Jiang Y H, *et al.* Structural transformation study of water-extractable organic matter during the industrial composting of cattle manure[J]. Microchemical Journal, 2013, **106**: 160-166.
- [32] 牛天浩, 周振, 胡大龙, 等. 污水处理厂污泥水溶解性有机物的光谱特性分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1460-1466.
- Niu T H, Zhou Z, Hu D L, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matters in reject water from wastewater treatment plants[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1460-1466.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)