Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦，刘怀庆，吕恒，李云梅，朱利，周亚明，李玲玲，毕顺

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年5月
第42卷 第5期
Vol.42 No.5

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 42 卷　第 5 期
2021 年 5 月 15 日

目　次

北京冬季 $PM_{2.5}$ 中有机气溶胶的化学特征和来源解析 …… 徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束前后两次污染过程特征分析 …… 尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析 …… 廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比 …… 孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民区采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价 …… 黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价 …… 范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征 …… 胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析 …… 姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响 …… 董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳滨, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析 …… 钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征 …… 张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提于·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法 …… 杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化 …… 李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水质空间差异及富营养化空间自相关分析 …… 丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价 …… 朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素 …… 程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响 …… 罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮氧同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋 …… 任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下达里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异 …… 李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析:以京津冀北运河为例 …… 邱莹, 靳燕, 苏振华, 邸琰茗, 赵栋梁, 郭逍宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素 …… 赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系 …… 陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷 …… 桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析 …… 罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附 …… 王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag_3PO_4/g-C_3N_4 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能 …… 高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A …… 张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱发表面双反应中心催化臭氧化去除水中污染物 …… 张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制 …… 屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制 …… 曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制 …… 李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响 …… 吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺 …… 薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响 …… 马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制 …… 凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素 …… 李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征 …… 刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦,祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析:以祁连山和藏东南地区为例 …… 何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价 …… 胡梦珺, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响 …… 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因 …… 韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价 …… 杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性 …… 庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响 …… 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响 …… 蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响 …… 徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落 …… 程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响 …… 李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨 …… 陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事(2439)　《环境科学》征稿简则(2479)　信息(2152, 2231, 2286)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第42卷第5期 2021年5月
Vol.42,No.5 May,2021

6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制

凌宇, 闫国凯, 王海燕*, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇
(中国环境科学研究院环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100012)

摘要: 针对农业废弃物作为反硝化碳源初期有机物释放过多,N、P 和色度物质释放以及溶解性有机物成分、释放机制及潜在影响不清楚等问题,选取水稻秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆、玉米芯、大豆秸秆和大豆壳作为反硝化碳源,研究其碳源、二次污染物及溶解性有机物的释放情况,并分析其可能产生的影响. 结果表明,6 种材料均可作为反硝化碳源,小麦秸秆中 C 元素含量最高,而玉米芯释放二次污染的风险最低; 6 种材料在 1 ~ 120 h 的碳源释放过程符合二级反应动力学和 Ritger-Peppas 方程,二级反应动力学拟合结果表明玉米芯因具有适中的 c_m 值和较大的 $t_{1/2}$ 值更适合作为反硝化碳源,Ritger-Peppas 方程拟合结果表明释放机制为扩散过程; 水稻秸秆浸出液中 NH_4^+-N、TN 和 TP 浓度显著高于其他 5 种材料,小麦秸秆和玉米秸秆在浸泡过程中释放色度严重,玉米芯释放的 N、P 和色度物质均最少; 玉米芯和大豆秸秆浸出液的可生化性好,造成出水二次污染的风险较低; 浸出液中 DOM 芳香性和分子量随时间逐渐增大,腐殖化程度较低; 利用平行因子法分析出 5 种荧光组分,主要为以类酪氨酸和类色氨酸为主的类蛋白物质,类胡敏酸为主的类腐殖酸含量较少,对后续水处理过程可能存在不利影响. 本研究结果能为农业废弃物作为反硝化碳源时对初期阶段的出水水质影响及风险评估提供理论支撑.

关键词:农业废弃物; 反硝化碳源; 二次污染物; 溶解性有机物(DOM); 释放机制
中图分类号: X703 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)05-2422-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202010177

Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage

LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan*, DONG Wei-yang, WANG Huan, CHANG Yang, LI Cong-yu
(Research Center of Environmental Pollution Control Technology, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: As carbon sources for the denitrification process, agricultural wastes have some problems, such as excess release of organic carbon; unclear release characteristics of nitrogen, phosphorus, and colorimetric substances; and unclear components, release mechanisms, and potential effects of the released dissolved organic matter (DOM) in the start-up period. To resolve those problems, rice straw, wheat straw, corn stalk, corncob, soybean stalk, and soybean hull were selected as denitrification carbon sources to investigate the release mechanisms and potential influences of the organic matter, secondary pollutants, and DOM. The results showed that the six agricultural wastes could be used as the denitrification carbon source. The carbon content in the wheat straw was the highest and the secondary pollution risk from the corncob was the lowest. For the six carbon sources, the second-order kinetic equation and Ritger-Peppas equation were followed during the 1-120 h carbon release process. The fitting results demonstrated that corncob was more suitable for use as the denitrification carbon source because of its moderate c_m value and longer $t_{1/2}$ value, and the release mechanisms of the six types of carbon sources were mainly controlled by the diffusion process. The NH_4^+-N, TN, and TP contents in the immersion water of the rice straw were higher than those of the five other agricultural wastes, and there was heavy chromaticity in the immersion water of the wheat straw and corn stalk. The amounts of nitrogen, phosphorus, and chromatic substances released from the corncob were the lowest. The leachates of the corncob and soybean hull had higher biodegradability and lower risks of secondary pollution than those of the other sources. The aromaticity and molecular weight of DOM increased as the reaction time increased, and the humification of DOM was low. Five components were identified by PARAFAC. The main component was protein-like matter, which was mainly composed of tyrosine-like and tryptophan-like substances. There was less humic acid-like matter in the immersion water. The component characteristics of DOM might have had an adverse effect on the subsequent water treatment process. These results could provide theoretical support for the impact on effluent water quality and risk assessment when the agricultural wastes are used as an additional denitrification carbon source at the start-up stage.

Key words: agricultural wastes; denitrification carbon source; secondary pollutant; dissolved organic matter (DOM); release mechanism

随着社会经济的快速发展,氮污染日益加剧,易引起湖泊富营养化等问题,从而威胁水体和人类的健康[1]. 如何处理低碳氮比类农田退水和城市污水等含氮污水成为研究的热点,生物异养反硝化因其成本低、脱氮效率高等优点而被广泛应用,但需要提供充足的反硝化碳源[2]. 一般低碳氮比类城市污水

收稿日期: 2020-10-24; **修订日期**: 2020-11-06
基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0408602); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2020YSKY-011); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07401003-05-01)
作者简介: 凌宇(1995 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制理论与技术,E-mail:865369928@qq.com
* 通信作者,E-mail:wanghy@craes.org.cn

在处理时必须额外添加甲醇、乙醇和乙酸等液体碳源以保证反硝化过程有充足的电子供体[3,4],但是需要增加在线监测和定量投加设备,以避免碳源添加过多或不足导致出水水质不达标[5],增加了脱氮成本. 近年来,固相反硝化工艺(solid-phase denitrification process)引起了学者们的广泛关注,该方法利用天然纤维素物质或人工合成高分子聚合物作为固体缓释碳源和微生物附着载体,通过微生物酶解作用为反硝化过程提供电子供体,是一种可行的反硝化方法[6~8].

农业废弃物富含天然纤维素和半纤维类物质,是一种良好的固体缓释碳源. 目前多数学者对农业废弃物的研究主要着眼于筛选高效的碳源种类和预处理方式,评价稳定期的脱氮效能及揭示微生物群落的演替规律等[9~11],但是对于农业废弃物碳源存在的初期有机物释放过多、出水具有色度和反应器启动期较长等问题关注较少,在碳源投加及更换时可能会引起出水水质较大波动,有关初期碳源及溶解性有机物(DOM)的释放机制不明,这些问题限制了其作为反硝化碳源的实际应用.

DOM 是一类分子量分布宽,结构复杂的有机物,广泛存在于土壤、沉积物和自然水体中[12],影响其他污染物的迁移转化和自然水体中的生物化学过程[13]. 由于秸秆还田在全球范围内广泛应用,以秸秆为主的农业废弃物正成为土壤环境中 DOM 的重要来源[14]. 但在水环境中,尤其是在脱氮过程中,有关农业废弃物作为碳源所释放的 DOM 成分和结构以及对后续处理工艺影响的报道较少,目前,对上述领域的认知还较为有限.

因此针对上述问题,本文对 6 种常见农业废弃物(水稻秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆、玉米芯、大豆秸秆和大豆壳)在水环境中初期阶段 C、N、P 和溶解性有机物的释放规律和可生化性进行了研究,结合紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱法对 6 种农业废弃物释放溶解性有机物的组成和结构进行了分析,以期为实际应用中农业废弃物作为反硝化碳源时初期阶段对出水水质影响及风险评估提供理论依据.

1　材料与方法

1.1　试验材料

将来自山东省临沂市某农村的 6 种常见农业废弃物水稻秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆、玉米芯、大豆秸秆和大豆壳,自然风干,并将水稻秸秆、小麦秸秆、大豆秸秆和大豆壳剪成 1 cm 左右的小段,玉米秸秆和玉米芯剪成 1 cm^3 左右的小块.

1.2　试验设计

1.2.1　释放试验

将 1.1 节准备好的 6 种材料各取 3 g 放入 250 mL 锥形瓶中,加入 250 mL 纯水浸泡,并在试验开始后 1、3、6、12、24、36、48、72、96 和 120 h 取样浸出液,每次取样后彻底换水,设置两组平行试验. 测量水样的 COD、TOC、NO_3^--N、NO_2^--N、TN、NH_4^+-N、TP 及色度指标,同时利用紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱法分析 1、3、6、12、24、72 和 120 h 浸出液中的 DOM,并对农业废弃物进行元素分析,测定材料中 C、N 和 P 元素含量.

1.2.2　浸出液反硝化试验

取 6 种材料浸泡 24 h 后浸出液 300 mL 放入 500 mL 锥形瓶中,加入去离子水洗过的 100 mL 活性污泥(取自北京市肖家河污水处理厂缺氧池)接种,使锥形瓶内 MLSS 为 1 000 $mg\cdot L^{-1}$,并投加 50 $mg\cdot L^{-1}$ NO_3^--N当量的 $NaNO_3$ 和 5 $mg\cdot L^{-1}$ TP 当量的 KH_2PO_4,曝氮气将溶解氧降至 0.5 $mg\cdot L^{-1}$,密封放入恒温摇床(25℃, 120 $r\cdot min^{-1}$)充分反应 24 h,测量上清液的 COD、NO_3^--N、NO_2^--N和 TN 以分析浸出液的可生化性.

1.3　测试指标及方法

化学需氧量(COD)采用哈希试剂快速消解-分光光度法(Hach DRB200, DR1010,美国), 溶解性总有机碳 TOC(DOC)采用 TOC 测定仪(岛津 TOC-VCPH,日本),氨氮(NH_4^+-N)采用纳氏试剂-分光光度法,硝态氮(NO_3^--N)和亚硝态氮(NO_2^--N)采用离子色谱仪(DIONEX ICS-1000,美国),总氮(TN)采用 TOC 测定仪 TN 测定单元,总磷(TP)采用过硫酸钾消解-分光光度法,色度采用铂钴比色法,C 和 N 元素采用元素分析仪(Thermo fisher Flash 2000,美国),P 元素采用电感耦合等离子体发射光谱仪(Thermo Fisher iCAPQ,美国)测定.

为了降低内滤效应[15]和浓度饱和淬灭[16]的影响,增强样品间的可比性,在测定紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱前,所有水样的 DOC 浓度统一使用超纯水稀释至 10 $mg\cdot L^{-1}$. 紫外-可见吸收光谱采用紫外-可见分光光度计(岛津 UV-1700,日本)测定,以 Mill-Q 水为参比,波长范围 200 ~ 700 nm,间隔 1 nm,中速扫描. 三维荧光光谱采用荧光分光光度计(Hitachi F7000,日本)测定,光源为氙气灯,PMT 电压为 700 V,波长范围为激发波长 E_x 从 200 ~450 nm,发射波长 E_m 从 280 ~550 nm,扫描间隔 5 nm,扫描速度2 400 $nm\cdot min^{-1}$.

1.4　数据分析方法

利用 Origin 2018 和 Excel 软件进行数据分析、

动力学公式拟合和图形绘制,利用 Matlab 2018 软件和 DOMFluor 工具包进行平行因子分析和图形绘制.

2 结果与讨论

2.1 不同农业废弃物 C、N 和 P 元素含量分析

不同农业废弃物含 C、N 和 P 的含量如表 1 所示,6 种材料的 C 元素含量为 43.88%~69.84%,表示其作为反硝化碳源具有可行性. 6 种材料的 C 元素含量由高到低为:小麦秸秆 > 水稻秸秆 > 玉米秸秆 > 大豆壳 > 玉米芯 > 大豆秸秆,C 元素含量越高,表示材料的释碳潜力越大. N 和 P 元素含量反映农业废弃物二次污染释放的潜在风险,其中水稻秸秆的 N 和 P 元素含量最高(14.38% 和 0.22%),玉米芯含量最低(3.22% 和 0.04%),说明水稻秸秆作为外加碳源时可能会释放较多的 N 和 P 污染物,从而影响出水水质; 而玉米芯造成二次污染的潜在风险最低.

表 1 6 种农业废弃物 C、N 和 P 含量

Table1 Contents of C, N, and P of the six agricultural wastes

材料	C/%	N/%	P/%
水稻秸秆	69.84	14.38	0.22
小麦秸秆	72.39	11.02	0.06
玉米秸秆	62.19	5.34	0.06
玉米芯	51.25	3.22	0.04
大豆秸秆	43.88	4.59	0.04
大豆壳	61.75	11	0.07

2.2 不同农业废弃物释碳特征及动力学分析

水稻秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆、玉米芯、大豆秸秆和大豆壳的累计释碳特征(以 COD 计)曲线如图 1(a)所示,6 种农业废弃物具有类似的释放规律,随着时间的延长,废弃物的释碳量逐渐增加,且释碳速率具有明显的先快后慢特征,但由于种类不同,6 种试验材料的释碳总量存在差异. 1~6 h,6 种材料具有相对较高但持续下降的释碳速率,为快速释碳期. 在 6~120 h,所有材料的释碳速率迅速降低并稳定在较低的水平,此时 6 种材料的释碳速率无明显差异,释碳阶段进入稳定期. 在 120 h 内,6 种材料的累计释碳量由大到小为玉米秸秆 > 水稻秸秆 > 大豆壳 > 玉米芯 > 小麦秸秆 > 大豆秸秆. 对于释碳特征可能的解释为:农业废弃物属于天然纤维素类材料,纤维素、半纤维素和木质素为其主要组分和碳来源[17],同时在材料表面和内部也含有大量易溶易水解的小分子有机物[18],在快速释碳期,这些小分子有机物在浓度差的作用下迅速释放到水中,同时材料受到浸泡缓慢溶胀,内部的小分子物质也持续释放到水中,表现为释碳速率在较高水平上逐渐下降. 在稳定期内,小分子物质的浓度处在较低的水平,而难溶于水的纤维素和半纤维素在材料表面附着的微量微生物作用下缓慢分解,释放到水体中,由于微生物量较少,释放和分解速率很低,表现为释碳速率稳定在较低水平上. 在实际应用中,农业废弃物初期阶段快速释放的碳源如果不采取措施将会造成污水处理设施出水 COD 超标,因此应根据其释碳动力学做水浸泡预处理; 同时在反硝化应用过程中,随着其缓释碳源的不断被消耗,要在供给反硝化碳源不足时及时补充新的预处理农业废弃物,或者进行打捞更换,打捞出的农业废弃物因为富含木质素,可以进行木质素的资源化利用; 应选择碳释放可利用性较高、碳源生化性较好的农业废弃物; 通过上述措施可以降低农业废弃物作为碳源时对出水水质波动的影响.

相较于 COD,TOC 更能反映微生物可利用的碳源量. 通过分析浸出液中 TOC/COD 值可以更直观地显示出农业废弃物释放有机碳的情况. 如图 1(b)所示,6 种材料浸出液的 TOC 与 COD 具有明显的线性关系,其中玉米芯浸出液中 TOC/COD 最大,表示玉米芯释放出有机碳的相对含量更高; 相反,小麦秸秆释放出有机碳的相对含量最低,在脱氮过程中

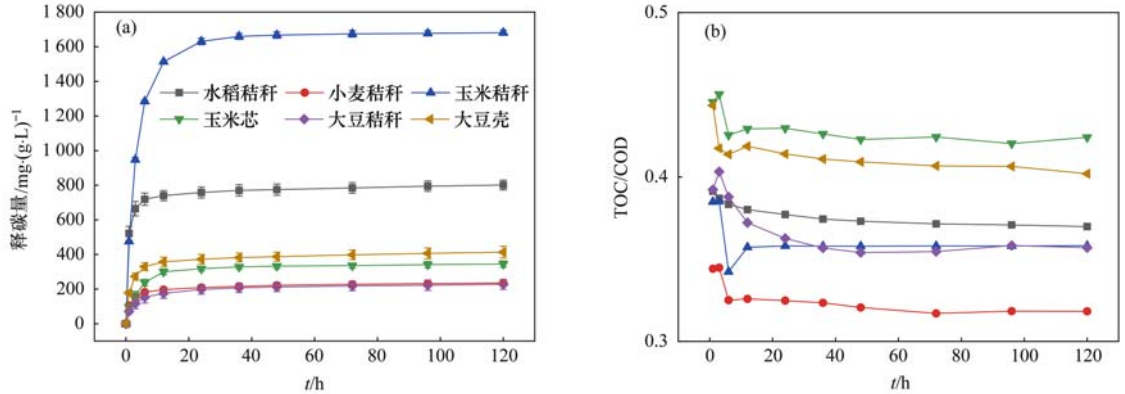

图 1 6 种农业废弃物的释碳特征曲线

Fig. 1 Characteristic curve of carbon release of the six agricultural wastes

可被利用量更低,可能会造成反硝化效率低和出水 COD 值偏高的问题.

对 6 种农业废弃物的释碳过程进行二级动力学方程和 Ritger-Peppas 方程拟合,二级动力学方程为:

$$dc/dt = kc^2 \quad (1)$$

即:

$$(1/c) - (1/c_m) = k/t \quad (2)$$

式中,c 为单位质量材料在 t 时的累计释放量(以 COD 计),mg·(g·L)$^{-1}$; c_m 为单位质量材料在水中的最大释碳量, mg·(g·L)$^{-1}$; k 为常数, h·g·L·mg^{-1}; t 为时间,h.

令 $K = 1/k$,则式(2)为:

$$(1/c) - (1/c_m) = 1/Kt \quad (3)$$

式中,K 为传质系数,mg·(h·L·g)$^{-1}$.

$$K = c_m/t_{1/2} \quad (4)$$

式中,$t_{1/2}$ 是碳源释放至最大浓度一半时所用的时间,h.

Ritger-Peppas 方程为:

$$M_t/M_\infty = kt^n \quad (5)$$

式中,M_t 为 t 时间的累计释放量(以 COD 计), mg·(g·L)$^{-1}$; M_∞为总释放量,mg·(g·L)$^{-1}$; k 为释放系数,n 为释放指数,当 $n < 0.45$ 时,释碳主要为扩散过程,$n > 0.89$ 时,主要为骨架溶蚀过程,$0.45 < n < 0.89$ 时,两种过程同时作用[19].

6 种农业废弃物释碳过程的拟合方程及参数如表 2 所示,可以看出,释碳过程满足二级反应动力学方程,与拟合结果具有很高的相关性; 同时总体满足 Ritger-Peppas 方程,与拟合结果具有较高的相关性. 6 种农业废弃物均具有较小的 $t_{1/2}$,表明各类农业废弃物可以很快释放出较多的碳源. 玉米秸秆和水稻秸秆具有较高的 c_m 值,表明玉米秸秆和水稻秸秆内含有较多的易溶易水解的小分子有机物,在快速释放期会释放大量碳源,在反硝化初期,如果这部分碳源量超过反硝化微生物代谢增殖过程的利用量,就会导致出水 COD 过高,造成出水超标和碳源浪费. 小麦秸秆和大豆秸秆具有较低的 c_m 值,在反硝化初期,释放碳源相对较低,可能导致生物膜生长速率慢和启动期长等问题. 玉米芯和大豆壳的 c_m 值相对适中,且玉米芯的 $t_{1/2}$ 较大,快速释放时的速率较缓,有利于提高反硝化效能,缩短反应器启动期,同时可以避免出水 COD 过高难以处理的问题,与邵留等[20]的研究结论一致. 从 Ritger-Peppas 方程拟合结果可以看出,释放指数 n 均小于 0.45,释碳机制主要为扩散过程.

表 2　释碳过程动力学拟合结果

Table 2　Kinetic fitting results of the carbon release process

材料	二级反应动力学方程					Ritger-Peppas 方程		
	拟合公式	R^2	c_m	K	$t_{1/2}$	拟合公式	R^2	n
水稻秸秆	$1/c = 0.000\,6/t + 0.001\,3$	0.992 4	769.23	1 666.67	0.46	$M_t/M_\infty = 0.746\,2t^{0.07}$	0.832 4	0.07
小麦秸秆	$1/c = 0.005\,2/t + 0.004\,5$	0.982 1	222.22	192.31	1.16	$M_t/M_\infty = 0.562\,1t^{0.13}$	0.904 5	0.13
玉米秸秆	$1/c = 0.001\,5/t + 0.000\,6$	0.998 2	1 666.67	666.67	2.50	$M_t/M_\infty = 0.509\,7t^{0.16}$	0.779 8	0.16
玉米芯	$1/c = 0.007\,7/t + 0.002\,9$	0.990 4	344.83	129.87	2.66	$M_t/M_\infty = 0.458\,8t^{0.18}$	0.829 4	0.18
大豆秸秆	$1/c = 0.009\,8/t + 0.004\,6$	0.988 2	217.39	102.04	2.13	$M_t/M_\infty = 0.447\,9t^{0.18}$	0.908 1	0.18
大豆壳	$1/c = 0.003\,1/t + 0.002\,5$	0.995 6	400.00	322.58	1.24	$M_t/M_\infty = 0.574\,4t^{0.13}$	0.860 1	0.13

2.3　农业废弃物浸出液中 N 和 P 等二次污染物释放情况

6 种材料浸出液中 N 和 P 等二次污染物的释放情况如图 2 所示. NH_4^+-N、TN 和 TP 的累计释放特征与碳源释放特征类似,在 1 ~ 6 h 快速释放,6 ~ 120 h 释放速率降至较低的水平. 由图 2(a)可知,水稻秸秆浸出液中的NH_4^+-N累计量显著高于其他5 种材料,为(13.82 ±0.09) mg·(g·L)$^{-1}$; 相反,玉米芯浸出液中 NH_4^+-N 累计最低,仅为(0.87 ±0.02) mg·(g·L)$^{-1}$. 6 种材料中只有水稻秸秆、小麦秸秆和大豆壳在 1h 时释放出少量NO_3^--N(图中未展示),分别为(0.67 ±0.31)、(0.37 ±0.26)和(0.09 ±0.04) mg·(g·L)$^{-1}$,这可能是由于农业废弃物表面存在的活性基团,对NO_3^--N具有一定的吸附作用[21]. 由图 2(b)可以看出水稻秸秆 TN 的释放量显著高于其他 5 种材料,为(20.77 ± 1.67) mg·(g·L)$^{-1}$; 小麦秸秆、大豆秸秆和玉米芯 TN 释放量较低,均在 5 mg·(g·L)$^{-1}$以下,在实际应用中,农业废弃物释放的 TN 可能会导致处理系统中污水 C/N 降低,反硝化不完全,从而出水 TN 偏高的问题[22]. 图 2(c)为 6 种材料的 TP 释放情况,其中水稻秸秆 TP 释放量显著高于其他 5 种材料,为(4.48 ±0.25) mg·(g·L)$^{-1}$; 玉米芯 TP 释放量最低,仅为(0.37 ±0.01) mg·(g·L)$^{-1}$. 由图 2(d)可知,除玉米芯外,其他 5 种材料的浸出液在初期均具有明显的色度,且均为淡黄色,其中小麦秸秆和玉米秸秆色度最高,可能由于秸秆在水中释放出大量含发色基团的有机物导致[23].

由于农业作物生长、培育条件以及生理结构的不同,其废弃物对于 N、P 及色度的释放情况也不尽

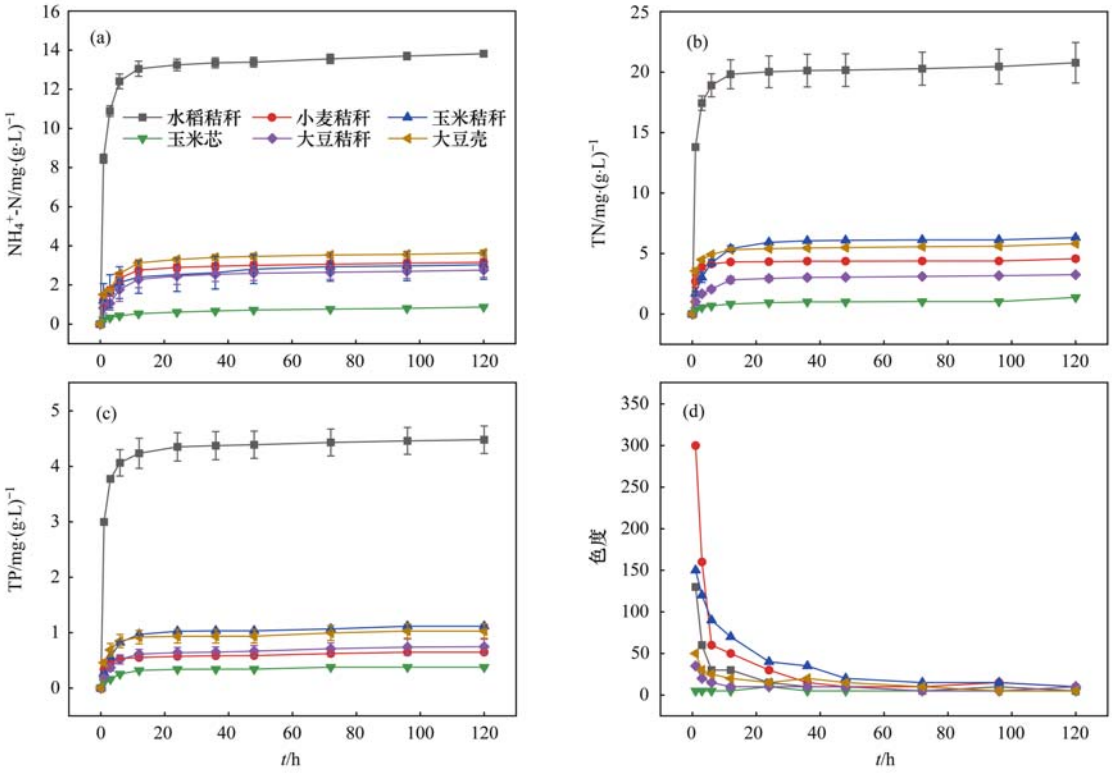

图 2 6 种农业废弃物的NH_4^+-N、TN、TP 及色度的释放情况

Fig. 2 Release of NH_4^+-N, TN, TP, and chromaticity of the six agricultural wastes

相同. 此类物质可能影响反硝化及整个污水处理过程,释放 N、P 物质过多可能会增加后续处理压力,易造成初期出水 TN 和 TP 超标等问题. Aslan 等[24]和 Cao 等[25]在利用农业废弃物作为反硝化外加碳源时,出现了出水色度偏高的问题. 所以,在选择农业废弃物作为反硝化碳源填料时,应考虑其二次污染物的释放情况,选择碳源含量较高且 N、P 和色度等释放量较低的材料,综上比较,玉米芯相较于其他农业废弃物更适合作为反硝化外加碳源填料.

2.4 农业废弃物浸出液的可生化性分析

6 种农业废弃物浸出液作为碳源的反硝化能力如图 3 所示. 其中 COD 利用率越高表示浸出液可生化性越好,造成出水 COD 超标的风险越低,而NO_3^--N和 TN 去除率则表示有机物作为反硝化碳源的可利用性. COD 利用率由高到低分别为大豆秸秆(80.41% ±4.41%) > 玉米芯(76.50% ±3.35%) > 大豆壳(73.57% ±6.79%) > 水稻秸秆(49.40% ±8.01%) > 小麦秸秆(33.45% ±0.94%) > 玉米秸秆(29.14% ±3.86%),其中玉米芯和大豆壳的 TN 去除率最高,分别为 24.47% ±2.18% 和 21.57% ±9.35%,说明其浸出液中有机物更易被反硝化菌所利用;大豆秸秆浸出液中 COD 利用率最高,但是其NO_3^--N和 TN 去除率均较低,可能是由于大豆秸秆释放的有机物更适合其他缺氧或厌氧微生物利用;水稻秸秆和玉米秸秆的NO_3^--N去除率最高,但 TN 去除率很低甚至为负值,一是由于水稻秸秆和玉米秸秆释放出大量的含氮物质,二是其反硝化过程不充分,产生NO_2^--N累积,由此得出其浸出液对于反硝化菌而言可利用性较差;而小麦秸秆浸出液几乎无NO_3^--N去除能力,去除率仅为 0.94% ±0.29%,不适合作为反硝化碳源. 综上比较,玉米芯和大豆壳初期释放的有机物可生化性好,更易被反硝化菌利用且造成二次污染的风险较低,所得结论与 2.2 节基本一致.

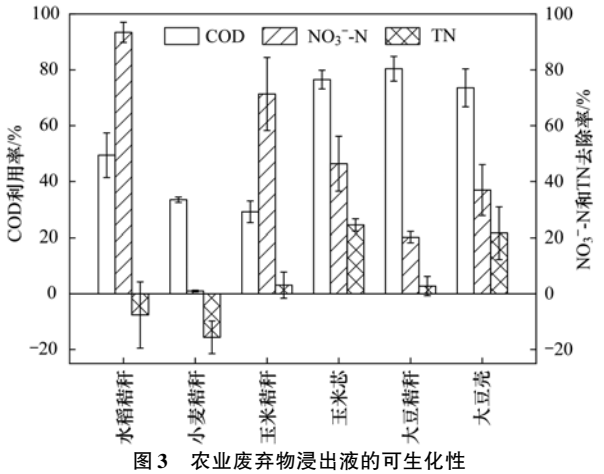

图 3 农业废弃物浸出液的可生化性

Fig. 3 Biodegradability of the leachates of the agricultural waste

2.5 农业废弃物浸出液的紫外-可见吸收光谱特征

6 种紫外-可见吸收光谱特征参数随时间变化情况如图 4 所示. $SUVA_{254}$常用来表征 DOM 的芳香

性与分子量的大小，该值越大表示 DOM 的芳香性和分子量越大[26,27]，以样品在 254 nm 处的吸光度乘 100 与 DOC 浓度比值表示. 由图 4(a)可以看出小麦秸秆、大豆秸秆和玉米芯浸出液中 DOM 芳香性随时间延长有明显地增大，这表明前期有机物快速释放后，小分子有机物释放速率降低而芳香类物质比重升高[14]. 水稻秸秆的 $SUVA_{254}$ 值随时间延长先增大后减小，这可能是由于后期释放的部分带含氧官能团的芳香型物质被微生物利用，导致芳香性略微下降[28]. 且小麦秸秆释放出 DOM 的芳香性始终大于其他 5 种材料.

E_2/E_3 为样品在 250 nm 和 365 nm 处吸光系数的比值，常用来表征 DOM 分子量大小，该值越大表明分子量越小[29]. 由图 4(b)可知 6 种废弃物所释放的 DOM 分子量随时间延长均有不同程度地变大，玉米秸秆的变化程度要显著大于其他 6 种材料，这可能由于玉米秸秆在初期释放大量的乙酸、奎宁酸、D-苹果酸、柠檬酸和葡萄糖等小分子有机物[21]，这些物质相对浓度要高于其他材料所释放的小分子物质的浓度，在释放稳定期，剩下难溶的纤维素和半纤维素在微生物的作用下缓慢分解，表现为 E_2/E_3 保持在相对稳定且较低的水平，谢理等[30]在研究茭草和芦苇降解过程中也得到类似的结论.

E_3/E_4 为样品在 300 nm 和 400 nm 处吸光系数的比值，用来表征 DOM 的腐殖化程度，当 $E_3/E_4 > 3.5$ 时腐殖化较低，$E_3/E_4 < 3.5$ 时腐殖化较高[31]. 由图 4(c)可知，72 h 水稻秸秆浸出液的 E_3/E_4 为 3.23，其他样品的 E_3/E_4 为 3.75 ~ 23.50，表明腐殖化程度均较低.

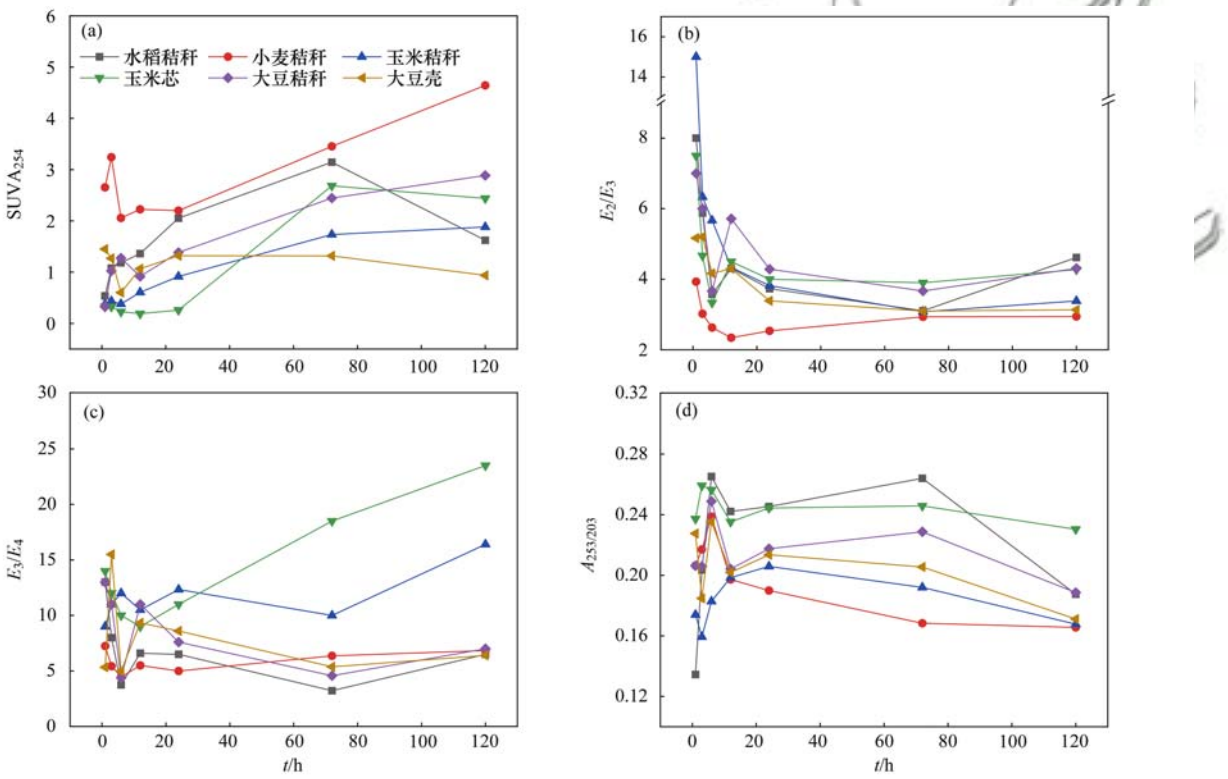

图 4　农业废弃物浸出液的紫外-可见吸收光谱特征参数变化

Fig. 4　Changes in the characteristic parameters of UV-vis spectroscopy in the leachates of the agricultural waste

$A_{253/203}$ 是反映芳香环上取代基的种类和取代程度高低的特征参数，为样品在 253 nm 和 203 nm 处吸光度比值[32]. 玉米芯浸出液的 $A_{253/203}$ 稳定在 0.23 ~ 0.26 之间，高于其他 5 种材料浸出液在大部分时间的 $A_{253/203}$ 值，表明玉米芯浸出液 DOM 中芳香环取代基的羧基、羰基和酯基的含量相对较高. 水稻秸秆、小麦秸秆、玉米秸秆、大豆秸秆和大豆壳浸出液中 $A_{253/203}$ 值随时间呈现先升后降的趋势，表示其浸出液 DOM 中芳香环取代基的脂肪链的相对含量先低后高，而羧基、羰基和酯基的含量先高后低.

2.6　农业废弃物浸出液的三维荧光光谱特征

通过平行因子法对 6 种农业废弃物不同时间的浸出液进行分析，共分离出 5 种荧光组分(图 5)，分别是以类色氨酸为主的类蛋白质组分 C1，以类酪氨酸为主的类蛋白质组分 C2、C3、C4 和以类胡敏酸为主的类腐殖酸组分 C5. 表 3 列出了农业废弃物浸出液中各荧光组分的荧光峰位置，基本落在已有文献给出的波长范围内. 其中 C2 组分在发射波长 325 nm 处有 3 个明显的激发峰，其中激发波长 205 nm 处的荧光峰相较于 Bridgeman 等[33]给出的类酪氨酸

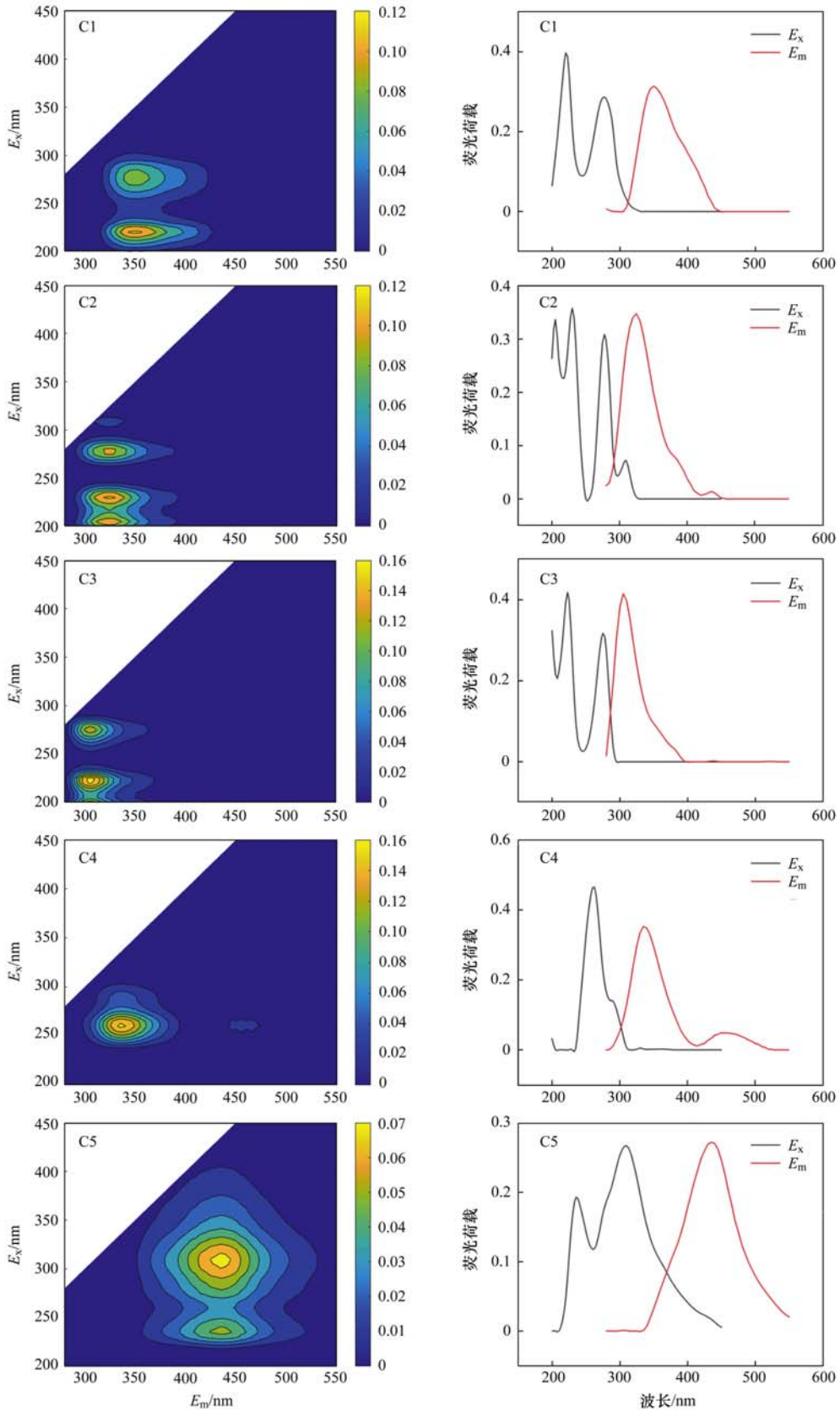

图 5 平行因子法解析出的 DOM 中 5 个荧光组分及其激发发射波长位置

Fig. 5 Fluorescence spectra of the five components identified by PARAFAC

范围稍有蓝移.

图 6 为平行因子法分析得出的 6 种材料浸出液中各组分随时间变化的最大荧光强度,不同农业废弃物随时间释放的各组分荧光强度间存在较大差异. 整体来看,水稻秸秆、玉米秸秆、玉米芯和大豆秸秆释放的 DOM 荧光强度呈现明显的上升趋势,小

麦秸秆和大豆壳并无明显变化趋势. 6 种农业废弃物在 1 ~ 120 h 内释放的 DOM 以类蛋白物质为主，类腐殖酸的相对含量较少，腐殖化程度较低，与 2.5 节紫外-可见吸收光谱的分析结果一致.

表 3　浸出液中 DOM 的荧光组分特征

Table 3　Characteristics of the DOM components in the leachates

组分	E_x/E_m/nm	物质	文献中的波长/nm
C1	220(280)/350	类色氨酸	225 ~ 237/340 ~ 381[33]，280/350[34]
C2	205(230,280)/325	类酪氨酸	225 ~ 237/309 ~ 321，270 ~ 280/305 ~ 320[33]
C3	225(275)/305	类酪氨酸	270 ~ 280/300 ~ 320[35]，270 ~ 275/304 ~ 312[36]
C4	260/335	类酪氨酸	280/325[37]
C5	235(305)/435	类胡敏酸	300 ~ 360/400 ~ 500[38]

水环境中的 DOM 常具有较高的反应活性，易被物理、化学和生物过程影响[39]，不仅能为微生物生长提供营养，还能改变水体污染物的结构组成、性质以及生态风险等[40]. 董倩倩等[41]在研究黄浦江溶解有机质与消毒副产物 *N*-亚硝基二甲胺生成关系时发现，其生成潜能随 DOM 浓度增加而增加，且与类酪氨酸和类色氨酸等类蛋白物质的荧光强度具有显著的正相关关系. 孙迎雪等[42]的研究发现城市污水厂出水中三卤甲烷和卤乙酸的生成潜能与生物源腐殖质和芳香族蛋白质类物质含量有明显的正相关关系，是氯消毒副产物的主要前体物. 由图 6 可以看出，玉米芯在浸泡过程中释放的类蛋白和类腐殖酸含量与其他材料比均较低，若将其应用于低碳氮

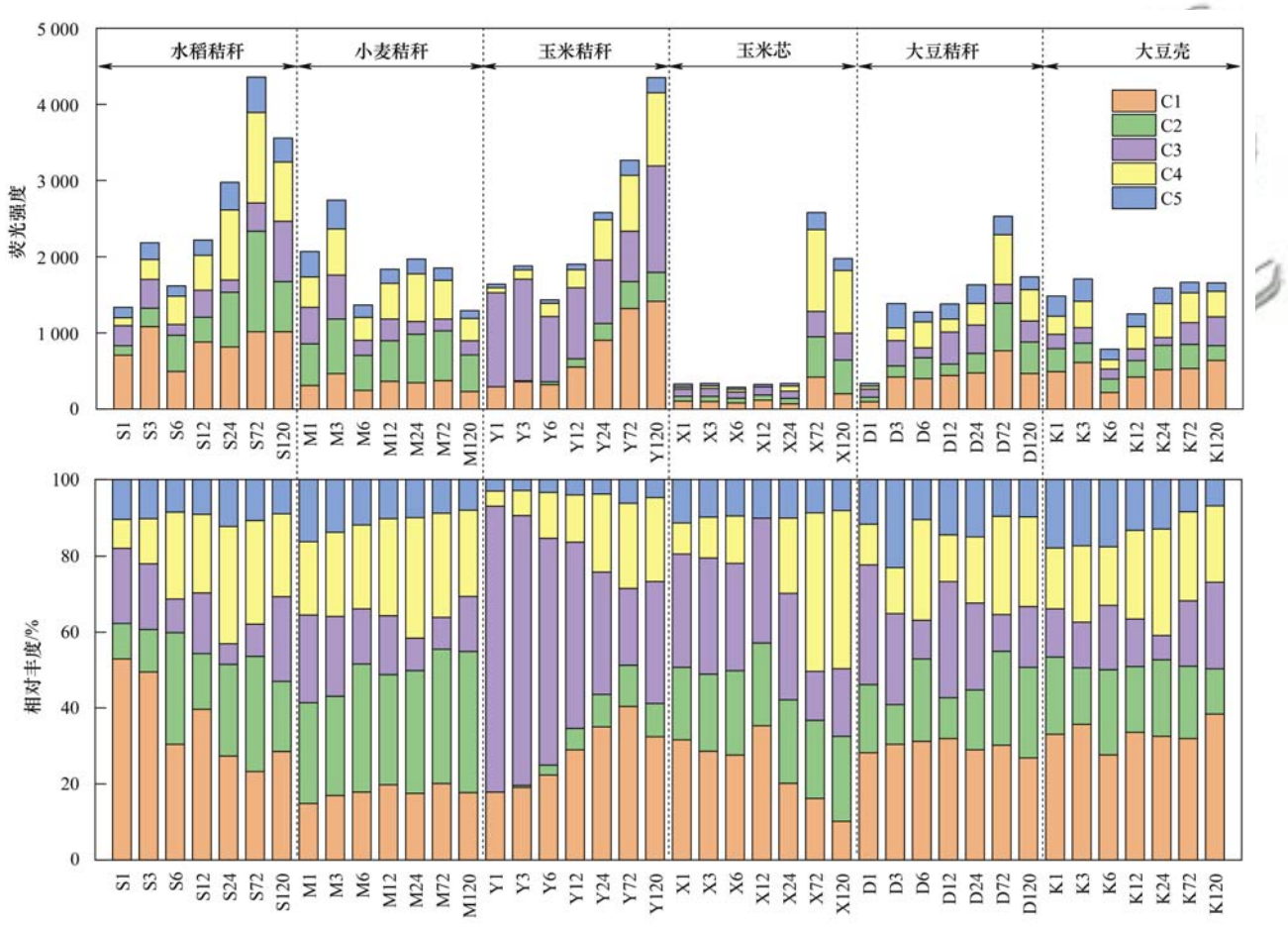

图 6　农业废弃物浸出液中 DOM 各组分的荧光强度和相对丰度

Fig. 6　Fluorescence intensity and percentages of components of the DOM in the leachates of the agricultural waste

比城市污水处理，出水消毒时产生各类消毒副产物的风险更小. 但是，农业废弃物作为反硝化碳源释放的溶解性有机物对后续处理过程的具体影响还需进一步深入研究.

3　结论

（1）6 种农业废弃物 C 元素含量为 43.88% ~ 69.84%，小麦秸秆的释碳潜力最大，玉米芯造成二次污染的风险最低；6 种农业废弃物的碳释放过程满足二级反应动力学方程，其中玉米芯具有合适的 c_m 值和 $t_{1/2}$ 值，有利于提高反硝化能力，缩短反应器启动期，同时避免出水 COD 过高的问题. 6 种材料的释碳过程同时满足 Ritger-Peppas 方程，碳释放机制主要为扩散过程.

(2) 6 种农业废弃物除玉米芯外初期均有明显的 N、P 和色度物质释放,水稻秸秆浸出液中NH_4^+-N [(13.82 ± 0.09) mg·(g·L)$^{-1}$]、TN [(20.77 ± 1.67) mg·(g·L)$^{-1}$] 和 TP [(4.48 ± 0.25) mg·(g·L)$^{-1}$]浓度均最高,小麦秸秆和玉米秸秆释放色度较严重,玉米芯释放的 N、P 和色度物质释放量均少,造成二次污染的风险低.

(3)玉米芯和大豆壳浸出液的可生化性好,更易被反硝化菌利用,不易造成二次污染,而大豆秸秆、水稻秸秆、玉米秸秆和小麦秸秆浸出液对反硝化菌而言可生化性较差; $SUVA_{254}$、E_2/E_3、E_3/E_4 和 $A_{253/203}$ 紫外参数表明,碳源释放随时间延长,释放出有机物芳香性和分子量逐渐增大,腐殖化程度较低.

(4) 采用平行因子法分离出浸出液中 DOM 有 5 种组分,包括以类色氨酸为主的类蛋白 C1, 3 种以类酪氨酸为主的类蛋白 C2、C3、C4 和以类胡敏酸为主的类腐殖酸 C5. 6 种农业废弃物释放的 DOM 以类蛋白物质为主,可能会成为后续污水设施出水消毒副产物的前体物,玉米芯释放出的类蛋白和类腐殖酸量较少,产生各类消毒副产物的风险较低.

参考文献:

[1] Liu Y R, Wei D, Xu W Y, *et al*. Nitrogen removal in a combined aerobic granular sludge and solid-phase biological denitrification system: System evaluation and community structure [J]. Bioresource Technology, 2019, **288**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121504.

[2] Qi W H, Taherzadeh M J, Ruan Y J, *et al*. Denitrification performance and microbial communities of solid-phase denitrifying reactors using poly (butylene succinate)/bamboo powder composite[J]. Bioresource Technology, 2020, **305**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123033.

[3] Modin O, Fukushi K, Yamamoto K. Denitrification with methane as external carbon source[J]. Water Research, 2007, **41**(12): 2726-2738.

[4] Qiu T L, Xu Y, Gao M, *et al*. Bacterial community dynamics in a biodenitrification reactor packed with polylactic acid/poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) blend as the carbon source and biofilm carrier [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2017, **123**(5): 606-612.

[5] Zhang S S, Sun X B, Wang X M, *et al*. Bioaugmentation with *Diaphorobacter polyhydroxybutyrativorans* to enhance nitrate removal in a poly (3-hydroxybutyrate-co- 3-hydroxyvalerate)-supported denitrification reactor[J]. Bioresource Technology, 2018, **263**: 499-507.

[6] Li H, Zhang J S, Zhou Z M, *et al*. A green porous solid carbon source supports denitrification in low C/N salinity wastewater [J]. RSC Advances, 2017, **7**(30): 18305-18310.

[7] Wang J L, Chu L B. Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process [J]. Biotechnology Advances, 2016, **34**(6): 1103-1112.

[8] Sun H M, Yang Z C, Wei C J, *et al*. Nitrogen removal performance and functional genes distribution patterns in solid-phase denitrification sub-surface constructed wetland with micro aeration[J]. Bioresource Technology, 2018, **263**: 223-231.

[9] Xiong R, Yu X X, Zhang Y E, *et al*. Comparison of agricultural wastes and synthetic macromolecules as solid carbon source in treating low carbon nitrogen wastewater[J]. Science of the Total Environment, 2020, **739**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139885.

[10] Li T, Yang X L, Song H L, *et al*. Alkali-treated cellulose carrier enhancing denitrification in membrane bioreactor [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2019, **145**, doi: 10.1016/j.ibiod.2019.104813.

[11] Xu Z S, Dai X H, Chai X L. Effect of different carbon sources on denitrification performance, microbial community structure and denitrification genes[J]. Science of the Total Environment, 2018, **634**: 195-204.

[12] Tipping E, Woof C, Rigg E, *et al*. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soils, investigated by a field manipulation experiment [J]. Environment International, 1999, **25**(1): 83-95.

[13] Lyon B A, Cory R M, Weinberg H S. Changes in dissolved organic matter fluorescence and disinfection byproduct formation from UV and subsequent chlorination/chloramination [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **264**: 411-419.

[14] 张海洋, 杨清贤, 杨倩, 等. 水环境中秸秆源溶解有机质的组成及光化学活性特征[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(6): 2521-2528.
Zhang H Y, Yang Q X, Yang Q, *et al*. Compositional characteristics and photochemical activity of dissolved organic matter derived from straw in aquatic environment[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(6): 2521-2528.

[15] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(4): 742-746.

[16] 陈东, 刘文清, 张玉钧, 等. 污染水体溶解有机物诱导荧光猝灭特性的实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(12): 2283-2286.
Chen D, Liu W Q, Zhang Y J, *et al*. Experimental investigation on the quenching characters of induced fluorescence of dissolved organic matter in polluted water[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, **26**(12): 2283-2286.

[17] Cao X, Li Y X, Jiang X Y, *et al*. Treatment of artificial secondary effluent for effective nitrogen removal using a combination of corncob carbon source and bamboo charcoal filter [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, **115**: 164-170.

[18] Zhao Y Z, Wang H Y, Dong W Y, *et al*. Nitrogen removal and microbial community for the treatment of rural domestic sewage with low C/N ratio by A/O biofilter with *Arundo donax* as carbon source and filter media [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, **37**, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101509.

[19] Ritger P L, Peppas N A. A simple equation for description of solute release Ⅱ. Fickian and anomalous release from swellable devices[J]. Journal of Controlled Release, 1987, **5**(1): 37-42.

[20] 邵留, 徐祖信, 王晟, 等. 新型反硝化固体碳源释碳性能研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2323-2327.
Shao L, Xu Z X, Wang S, *et al*. Performance of new solid carbon source materials for denitrification[J]. Environmental Science, 2011, **32**(8): 2323-2327.

[21] 张雯, 张亚平, 尹琳, 等. 以 10 种农业废弃物为基料的地下水反硝化碳源属性的实验研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(5): 1787-1797.

Zhang W, Zhang Y P, Yin L, *et al*. The characteristics of carbon sources for denitrification in groundwater from ten kinds of agricultural wastes[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(5): 1787-1797.

[22] Huang L P, Ye J Y, Xiang H W, *et al*. Enhanced nitrogen removal from low C/N wastewater using biodegradable and inert carriers: performance and microbial shift [J]. Bioresource Technology, 2020, **300**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122658.

[23] 于孝东, 唐晓红, 吕家恪, 等. 稻草腐解过程中形成胡敏酸的组成和结构研究[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(1): 224-228.
Yu X D, Tang X H, Lv J K, *et al*. Chemical composition and structure of humic acids from decomposited paddy straw residue [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, **25**(1): 224-228.

[24] Aslan Ş, Türkman A. Biological denitrification of drinking water using various natural organic solid substrates[J]. Water Science & Technology, 2004, **48**(11-12): 489-495.

[25] Cao W P, Wang Y M, Sun L, *et al*. Removal of nitrogenous compounds from polluted river water by floating constructed wetlands using rice straw and ceramsite as substrates under low temperature conditions[J]. Ecological Engineering, 2016, **88**: 77-81.

[26] Shao Z H, He P J, Zhang D Q, *et al*. Characterization of water-extractable organic matter during the biostabilization of municipal solid waste[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **164**(2-3): 1191-1197.

[27] He X S, Xi B D, Wei Z M, *et al*. Spectroscopic characterization of water extractable organic matter during composting of municipal solid waste[J]. Chemosphere, 2011, **82**(4): 541-548.

[28] 韦梦雪, 王彬, 湛书, 等. 川西平原还田秸秆腐解释放 DOM 的光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, **37**(9): 2861-2868.
Wei M X, Wang B, Chen S, *et al*. Study on spectral characteristics of dissolved organic matter collected from the decomposing process of crop straw in west Sichuan plain[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, **37**(9): 2861-2868.

[29] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 213-223.
Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al*. Spatial distribution, spectral characteristics, and sources analysis of dissolved organic matter from Baiyangdian lake in Xiong'an new district during the winter freezing period[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 213-223.

[30] 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 等. 滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中 DOM 释放特征研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3458-3466.
Xie L, Yang H, Qu X X, *et al*. Dissolved organic matter release of zizania caduciflora and phragmites australis from lake Dianchi [J]. Environmental Science, 2013, **34**(9): 3458-3466.

[31] 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.

[32] Kumke M U, Specht C H, Brinkmann T, *et al*. Alkaline hydrolysis of humic substances-Spectroscopic and chromatographic investigations[J]. Chemosphere, 2001, **45**(6-7): 1023-1031.

[33] Bridgeman J, Bieroza M, Baker A. The application of fluorescence spectroscopy to organic matter characterisation in drinking water treatment[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2011, **10**(3), doi: 10.1007/s11157-011-9243-x.

[34] Stedmon C A, Markager 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.

[35] Chen X F, Chuai X M, Yang L Y, *et al*. Climatic warming and overgrazing induced the high concentration of organic matter in Lake Hulun, a large shallow eutrophic steppe lake in northern China[J]. Science of the Total Environment, 2012, **431**: 332-338.

[36] Fellman J B, Hood E, Spencer R G M. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: a review[J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(6): 2452-2462.

[37] Guo W D, Yang L Y, Hong H S, *et al*. Assessing the dynamics of chromophoric dissolved organic matter in a subtropical estuary using parallel factor analysis[J]. Marine Chemistry, 2011, **124**(1-4): 125-133.

[38] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 基于三维荧光和平行因子分析法的太湖水体 CDOM 组分光学特征[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(3): 375-382.
Huang C C, Li Y M, Wang Q, *et al*. Components optical property of CDOM in Lake Taihu based on three-dimensional excitation emission matrix fluorescence [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(3): 375-382.

[39] 任东, 陈芳, 蒲红玉, 等. 溶解有机质的光化学行为及其环境效应[J]. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(5): 563-572.
Ren D, Chen F, Pu H Y, *et al*. Photochemical behaviors and environmental effects of dissolved organic matter[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, **35**(5): 563-572.

[40] Chu C H, Erickson P R, Lundeen R A, *et al*. Photochemical and nonphotochemical transformations of cysteine with dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(12): 6363-6373.

[41] 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 等. 黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 958-963.
Dong Q Q, Zhang A, Li Y M, *et al*. Linking optical properties of dissolved organic matter with NDMA formation potential in the Huangpu river[J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 958-963.

[42] 孙迎雪, 吴乾元, 田杰, 等. 污水中溶解性有机物组分特性及其氯消毒副产物生成潜能[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2282-2287.
Sun Y X, Wu Q Y, Tian J, *et al*. Characteristics and chlorinated disinfection by-products formation potential of dissolved organic matter fractions in treated wastewater [J]. Environmental Science, 2009, **30**(8): 2282-2287.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 5

May 15, 2021

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric $PM_{2.5}$ in Winter in Beijing ····· XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, *et al.* (2101)

Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019 ····· YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, *et al.* (2110)

Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019 ····· LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, *et al.* (2121)

New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China ····· SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, *et al.* (2133)

Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season ····· HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, *et al.* (2143)

Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an ····· FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, *et al.* (2153)

Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission ····· HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, *et al.* (2159)

High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City ····· JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, *et al.* (2169)

Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou ····· DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, *et al.* (2179)

Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province ····· QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, *et al.* (2190)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains ····· ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, *et al.* (2202)

Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images ····· YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, *et al.* (2213)

Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu ····· LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, *et al.* (2223)

Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake ····· DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, *et al.* (2232)

Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China ····· ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, *et al.* (2240)

Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal ····· CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, *et al.* (2251)

Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events ····· LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, *et al.* (2260)

Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes ····· REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, *et al.* (2268)

Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake ····· LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, *et al.* (2276)

Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments: A Case Study of the North Canal River ····· QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, *et al.* (2287)

Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu ····· ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, *et al.* (2296)

Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region ····· CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, *et al.* (2303)

Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water ····· SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, *et al.* (2313)

Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag ····· LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, *et al.* (2324)

Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants ····· WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, *et al.* (2334)

Preparation of Ag_3PO_4/g-C_3N_4 Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance ····· GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, *et al.* (2343)

Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation ····· ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, *et al.* (2353)

Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water ····· ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, *et al.* (2360)

Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Composited Material and Its Mechanism for Chromium Removal ····· QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, *et al.* (2370)

Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems ····· QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, *et al.* (2378)

Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System ····· LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, *et al.* (2385)

In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates ····· LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, *et al.* (2396)

In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation ····· XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, *et al.* (2402)

Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste ····· MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, *et al.* (2413)

Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage ····· LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, *et al.* (2422)

Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China ····· LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, *et al.* (2432)

Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels ····· LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, *et al.* (2440)

Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau: A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet ····· HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, *et al.* (2449)

Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City ····· HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, *et al.* (2457)

Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil ····· XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, *et al.* (2469)

Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan ····· HAN Wei, WANG Cheng-wen, PNEG Min, *et al.* (2480)

Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base ····· YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, *et al.* (2490)

Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce ····· PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, *et al.* (2502)

Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (*Oryza sativa* L.) Growing in Typical Paddy Soil ····· ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, *et al.* (2512)

Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology ····· CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, *et al.* (2522)

Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River ····· XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, *et al.* (2531)

Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area ····· CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)

Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance ····· LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, *et al.* (2550)

Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods ····· CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, *et al.* (2558)