

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



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琚(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文辉, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	
《环境科学》征稿简则(5039)	
信息(4782, 4979, 5056)	

水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能

刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳*

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

摘要: 在富营养化水体的生物修复中, 将产生大量的水生植物, 如何进行合理的处置是需要解决的问题. 本文采用水生植物制得生物质炭, 并通过镁改性, 提高了生物质炭对水体中氮磷的吸附性能. 材料性质表征结果表明, 镁改性不仅在生物质炭表面形成纳米 MgO 片层, 增加比表面积, 而且引入了羟基官能团促进对铵态氮的吸附. 改性生物质炭对硝态氮和铵态氮的吸附过程均属于多层吸附, 吸附等温线符合 Freundlich 模型. 改性后生物质炭对磷的吸附机制由单层吸附变为多层扩散. 改性生物质炭对硝态氮、铵态氮和磷的最大吸附量分别为 5.66、62.53 和 90.92 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中对铵态氮的吸附量是未改性生物质炭的 178 倍. 在磷、硝态氮和铵态氮共存时, 改性生物质炭对其吸附量分别增加 79.1%、67.5% 和 47.1%. 本文结果表明通过生物质炭制备可以实现水生植物资源化, 并可回用于水体氮磷污染的修复, 具有很好的应用前景.

关键词: 水生植物; 改性生物质炭; 吸附; 氮; 磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4980-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201905038

Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants

LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, XIAO Lin*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In the bioremediation of eutrophic water, a large number of aquatic plants will be produced. How to continue the reasonable disposition is the question that needs to be solved. In this paper, biomass carbon was prepared from aquatic plants, and the adsorption capacity of the biomass carbon on nitrogen and phosphorus in water was improved by magnesium modification. The characterization results of material properties showed that magnesium modification not only formed nanometer MgO sheets on the surface of biomass carbon to increase the specific surface area, but also introduced hydroxyl functional groups to promote the adsorption of ammonium nitrogen. The adsorption processes of modified biomass carbon on nitrates and ammonium nitrogen belonged to multi-layer adsorption, and the adsorption isotherms conformed to the Freundlich model. The adsorption mechanism of modified biomass carbon changed from single layer adsorption to multi-layer diffusion. The maximum adsorption capacity of the modified biomass carbon on nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, and phosphorus were 5.66, 62.53, and 90.92 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The adsorption capacity of the modified biomass carbon on ammonium nitrogen is 178 times that of unmodified biomass carbon. When phosphorus, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen coexist, the adsorption amounts of modified biomass carbon increase by 79.1%, 67.5%, and 47.1%, respectively. The results of this paper showed that the preparation of biomass carbon can realize the resource recovery of aquatic plants, and can be used for the removal of nitrogen and phosphorus pollution from water, which has good prospects for application.

Key words: aquatic plants; modified biomass carbon; adsorption; nitrogen; phosphorus

近年来, 水体氮、磷营养盐增加导致的富营养化的加剧严重破坏水生生态系统, 进而影响人类健康^[1]. 通过构建人工湿地、生态浮床等水生态修复技术在去除氮、磷的同时还能降解其他的有毒有害污染物^[2,3], 已经被广泛采用. 但随之而来的是所产生的大量水生植物生物质需要进行合理的处置, 以防氮磷再次释放进入水体及引起二次污染^[4].

生物质炭是生物质能原料经热裂解之后形成的产物^[5,6], 有巨大的比表面积、发达的孔隙结构、含量丰富的矿物成分, 可以吸附环境中多种污染物^[7~10]. 但往往存在着表面基团种类少, 吸附性能差的问题. 对生物质炭表面进行改性, 是提高生物质炭吸附性能的有效方法^[11~14]. Tang 等^[15]的研究结果表明, La 改性的稻壳生物

质炭对磷酸盐的吸附能力增强, 高介孔率增强了改性生物质炭的稳定性; Tao 等^[16]利用 Mg 改性的生物质炭修复受抗生素和重金属污染的沉积物取得良好效果.

本实验室已经采用水生植物空心莲子草制备了生物质炭, 并发现其对重金属具有良好的去除效果^[17]. 本研究利用 MgCl_2 对空心莲子草进行改性, 探究了空心莲子草生物质炭对溶液中氮磷的吸附效果和机制探究, 以期水生植物生物质炭吸附水体氮磷研究提供一定的理论基础和数据支撑.

收稿日期: 2019-05-07; 修订日期: 2019-06-14

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07204002)

作者简介: 刘舒蕾 (1997 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: 623643253@qq.com

* 通信作者, E-mail: xiaolin@nju.edu.cn

1 材料与方法

1.1 改性生物质炭的制备

空心莲子草(AP)采自江苏省南京市栖霞区羊山公园,采用 Yang 等^[17]的方法制备生物质炭(APB).取一定量干燥备用的 AP 浸泡在 $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MgCl_2 溶液中,搅拌 2 h,将 AP 置于 80°C 的烘箱中干燥,获得 AP 同 MgCl_2 的混合物.同样采用限氧升温炭化法制备改性生物质炭,炭化条件同 APB 制备方法相同.过筛保留 Mg 改性生物质炭(MAPB).

1.2 吸附材料表征^[17]

采用扫描电子显微镜(SEM, S-3400N, Hitachi)分析生物质炭微观形貌特征;等电点(pH_{PZC})采用 Zeta 电位分析仪(NanoBrook Ommi, Brookhaven Instruments)测定;生物质炭以及空心莲子草的 C、H、O 和 N 元素含量使用元素分析仪(CHN-O-Rapid, Heraeus)测定;金属元素含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES, Optima 5300DV, PE)分析;官能团通过傅里叶红外光谱(FT-IR, Nicolet-6700, Thermo Scientific)测定.

1.3 等温吸附实验

用超纯水将分析纯试剂 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 和 NaNO_3 分别配制成质量浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (浓度以 N、P 计)的储备液,各浓度溶液由超纯水稀释储备液获得.

称取 0.1 g 生物质炭样品(APB 或 MAPB)于 50 mL 的 $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ NaNO_3 溶液中, 25°C , $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 恒温振荡 24 h 后,过 $0.22 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜,测定滤液中剩余硝态氮浓度.以上实验均重复两次.

用式(1)计算生物质炭的吸附量^[18]:

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e) \times V}{m} \quad (1)$$

式中, q_e 为吸附平衡时的吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; c_0 为初始溶液浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_e 为吸附平衡时溶液浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为溶液体积, L ; m 为生物质炭用量, g .

铵态氮和磷的等温吸附实验做法同硝态氮的一致,初始浓度均为 $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

分别用 Freundlich 模型[式(2)]和 Langmuir 模型[式(3)]来拟合生物质炭在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 环境下的吸附等温线^[18],公式如下:

$$\ln q_e = \ln k_f + \frac{1}{n} \times \ln c_e \quad (2)$$

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{1}{b \times q_m} + \frac{c_e}{q_m} \quad (3)$$

式中, q_e 表示平衡时的吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; c_e 表示平衡时的溶液浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; k_f 是吸附容量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; n 是 Freundlich 常数,表示吸附强度; q_m 为最大吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; b 表征吸附材料表面的吸附位点对重金属离子亲和力大小, $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$.

1.4 混合离子共存实验

配制硝态氮、铵态氮和磷离子浓度各为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的混合溶液,称取 0.1 g 改性生物质炭样品于 50 mL 混合溶液中,在 25°C 、 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 恒温振荡 24 h,经 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后分别测定滤液中剩余 3 种离子浓度.

硝态氮、铵态氮和磷酸根离子分别采用紫外分光光度法、纳氏试剂比色法以及钼锑抗分光光度法进行测试.

2 结果与讨论

2.1 材料表征

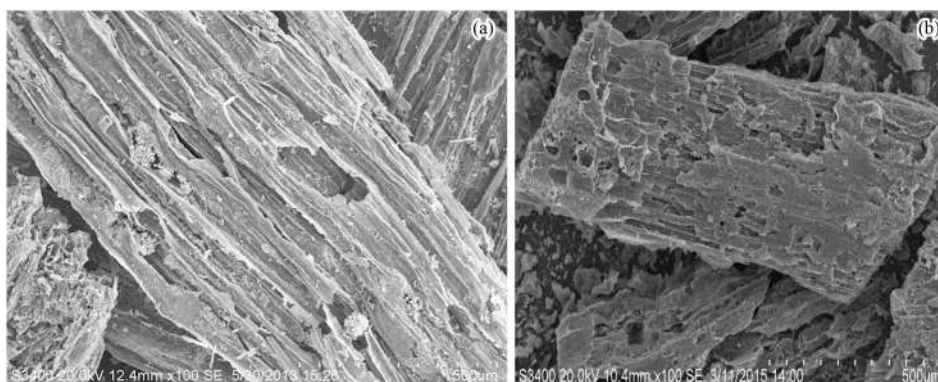
元素组成、比表面积等是影响生物质炭吸附特性的重要因素.表 1 数据表明,同 AP 相比,APB 和 MAPB 的 H/C 摩尔比均比 AP 的小很多,说明生物质炭的芳香化程度更高^[19].MAPB 的 O/C 摩尔比要比 APB 大,表明 MAPB 含有更多的含氧官能团,这些基团表面产生负电荷,增强生物质炭表面亲水性,使生物质炭具有更高的阳离子交换能力,提高生物质炭对污染物的吸附能力.此外,MAPB 中 Mg 含量达 33.1%,表面有片层状物质的形成,并且比未改性生物质炭 APB 含有更多孔隙(图 1).X 射线衍射图谱证实了改性生物质炭 MAPB 的表面矿物相主要为 MgO 纳米颗粒(图 2).MAPB 的比表面积是 APB 的 5 倍以上,说明改性生物质炭表面形成的纳米 MgO 片层,增大了生物质炭的比表面积^[11,20].

APB 和 MAPB 的 pH 分别为 10.43 和 10.11,

表 1 AP、APB 和 MAPB 的元素组成和比表面积

Table 1 Element composition and specific surface area

of AP, APB, and MAPB			
项目	AP	APB	MAPB
C/%	34.70	49.63	28.93
H/%	5.20	2.26	1.80
O/%	31.89	15.27	14.28
N/%	4.45	3.51	0.82
Na/%	0.61	1.40	1.11
K/%	2.80	0.16	0.24
Ca/%	2.70	9.00	0.44
Mg/%	0.41	2.20	33.1
灰分/%	—	29.33	54.17
H/C(摩尔比)	1.80	0.55	0.75
O/C(摩尔比)	0.26	0.23	0.37
$S_{\text{BET}}/\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	—	19.79	109.85



(a) APB 和(b) MAPB

图1 APB 和 MAPB 的 SEM 图

Fig. 1 SEM images of APB and MAPB

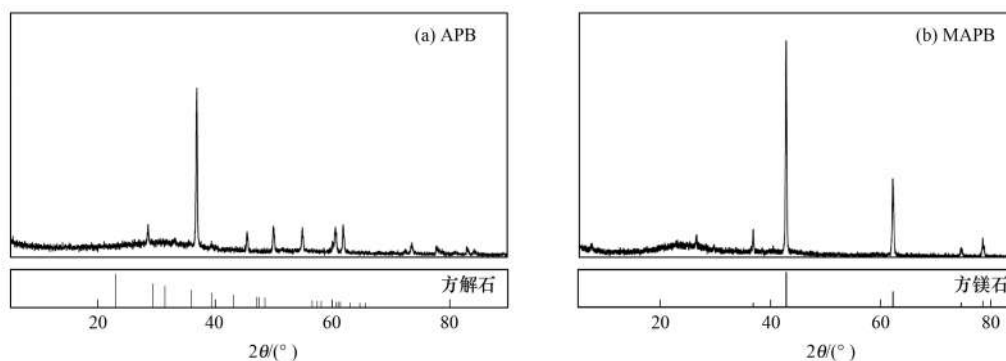


图2 APB 和 MAPB 的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of APB and MAPB

呈强碱性. 刘项等^[21]的研究表明刺桐生物质炭 pH 也呈碱性. 而 APB 和 MAPB 的等电点 (pH_{PZC}) 分别为 3.08 和 3.69, 说明这两种生物质炭表面含有较多的酸性基团. MAPB 和 APB 的傅里叶变换红外光谱均有明显的官能团振动峰, 而 AC 的红外谱图十分平缓(图3), 说明 MAPB 和 APB 在官能团数量占明显优势, 与 Akgül 等^[11]的研究结果一致. 对比 MAPB 和 APB 的官能团特征吸收峰可发现, 在波长 $2\,000 \sim 500\text{ cm}^{-1}$ 之间, 两种生物质炭含有的官能团基本相同. MAPB 在波长 $3\,800 \sim 3\,200\text{ cm}^{-1}$ 之间有羟基伸缩振动峰, 说明 Mg 改性后引入了羟基, 这有利于吸附反应的进行^[22].

2.2 等温吸附实验

2.2.1 生物质炭对硝态氮的等温吸附特性

分别用 Freundlich 和 Langmuir 模型拟合两种生物质炭对硝态氮的吸附等温线(图4), 拟合参数见表2. 拟合结果显示 APB 和 MAPB 对硝态氮的吸附等温线更符合 Freundlich 等温吸附方程, 吸附过程属于多层吸附^[23]. 分析 Langmuir 吸附方程拟合出的最大吸附量 q_m 可发现, MAPB 的最大吸附量为 $5.66\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 大于 APB 的最大吸附量 $4.07\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 说明改性后的生物质炭对硝态氮的吸附能

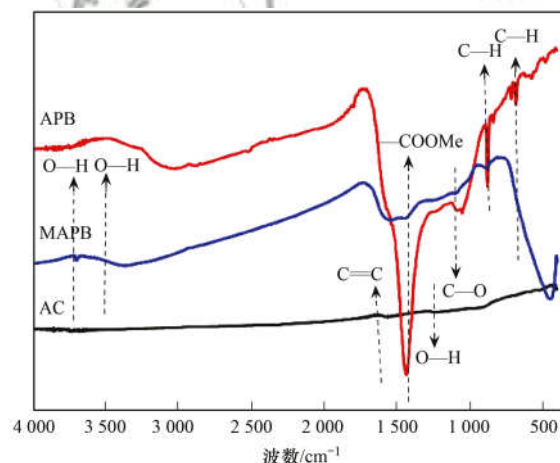


图3 不同吸附材料的 FT-IR 图谱

Fig. 3 FT-IR spectra of different adsorption materials

力增加. 可能是 MAPB 表面形成 MgO 纳米颗粒表面带正电荷, 从而促进了对硝酸根的吸附. 但与王博等^[24]利用盐酸改性的芦苇生物质炭对硝态氮的最大吸附量 $14.67\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 相比, MAPB 对硝态氮的吸附能力较弱.

2.2.2 生物质炭对铵态氮的等温吸附特性

采用 2 种模型拟合生物质炭对铵态氮的等温吸附线(图5), 拟合参数见表3. 结果显示, APB 对铵态氮的最大吸附量未超过 $0.35\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 模型无法

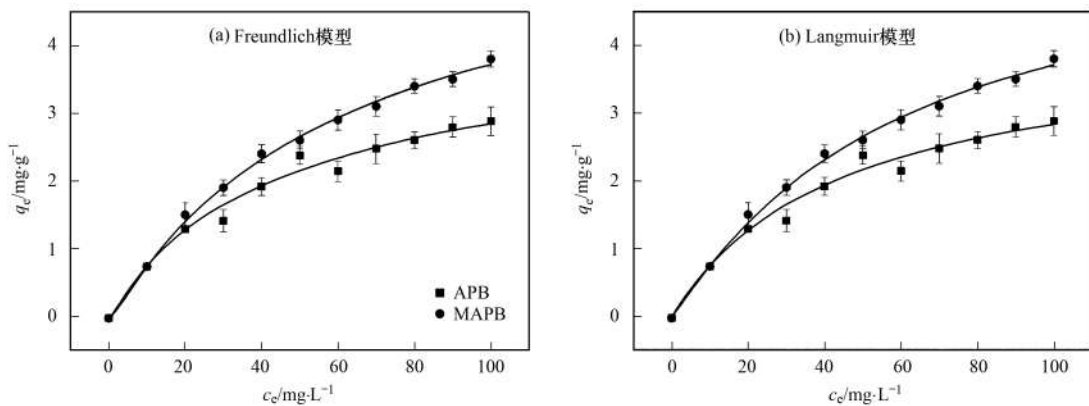


图 4 生物质炭对硝态氮的 Freundlich 和 Langmuir 吸附模型

Fig. 4 Freundlich and Langmuir adsorption models of nitrate nitrogen by biochar

表 2 生物质炭对硝态氮的吸附等温线拟合结果

Table 2 Results of adsorption isotherm fitting of biochar to nitrate nitrogen

项目	Freundlich 模型			Langmuir 模型		
	$k_f/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$1/n$	R^2	$q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$b/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	R^2
APB	0.038	1.78	0.982 6	4.07	0.022	0.982 2
MAPB	0.022	2.09	0.998 9	5.66	0.012	0.998 6

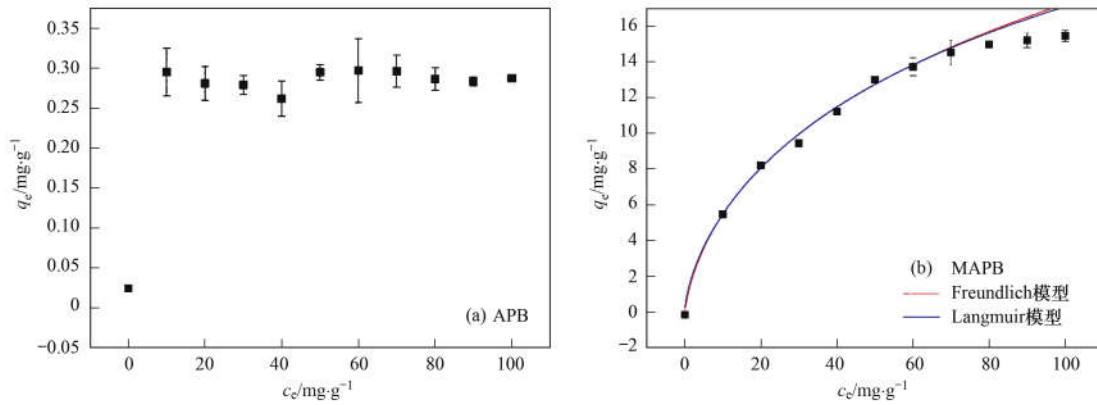


图 5 生物质炭对铵态氮的吸附模型

Fig. 5 Adsorption model of ammonium nitrogen by biochar

表 3 MAPB 对铵态氮的吸附等温线拟合结果

Table 3 Adsorption isotherm fitting results of MAPB for ammonium nitrogen

项目	Freundlich 模型			Langmuir 模型		
	$k_f/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$1/n$	R^2	$q_m/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$b/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	R^2
参数值	0.092	1.45	0.995 9	62.53	0.000 3	0.988 2

拟合等温吸附线. 而改性后的 MAPB 对铵态氮的吸附能力显著升高, Langmuir 模型拟合的最大吸附量为 $62.53\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 是未改性生物质炭最大吸附量的 178 倍. 陈靖等^[25] 用改性竹炭吸附水中氨氮, Langmuir 模型拟合得到 q_m 为 $10.155\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 说明 MAPB 具有较好地吸附能力. Freundlich 模型较好地反映改性生物质炭对铵态氮的吸附行为 ($R^2 = 0.9959$), 说明 MAPB 对铵态氮的吸附属于多层吸附, 吸附剂表面具有异质性^[25]. FT-IR 图谱结果表明羟基官能团促进吸附反应的发生. Jiang 等^[26] 的研究表明, 铵态氮在生物质炭上的吸附主要是因为

其在生物质炭表面与羟基官能团络合引起的, 与本文结果一致. 同时, 改性使生物质炭亲水性增强, 阳离子交换性能提高, 从而促进对铵态氮的吸附.

2.2.3 生物质炭对磷的等温吸附特性

分别用 2 种模型拟合两种生物质炭对磷的吸附等温线(图 6), 拟合参数见表 4. 比较 R^2 可知, APB 对磷的吸附等温线适合 Langmuir 模型, 而 MAPB 对磷的吸附等温线则更适合 Freundlich 模型, 与易蔓^[18] 的研究结果一致. 这表明改性前后生物质炭对磷的吸附机制发生了变化, 改性前生物质炭对磷为单层吸附, 而磷在改性后的生物质炭上则

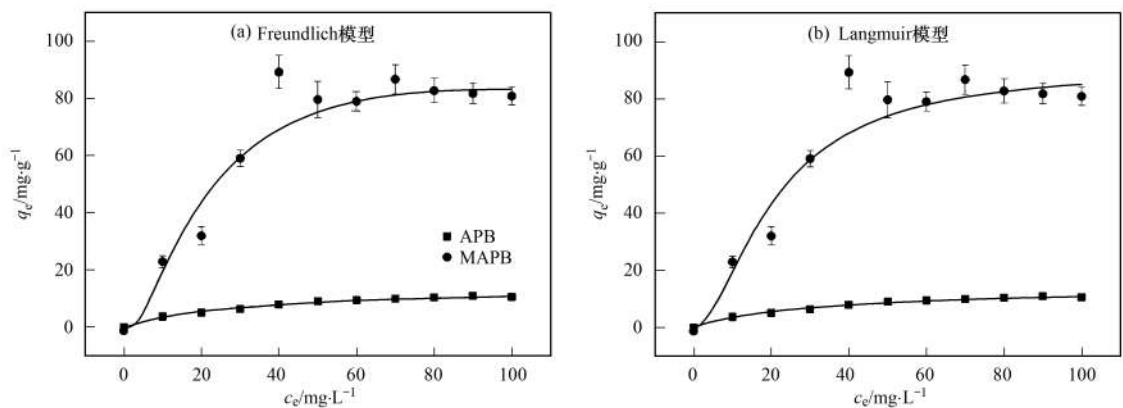


图 6 生物质炭对磷的 Freundlich 和 Langmuir 吸附模型

Fig. 6 Freundlich and Langmuir adsorption models of phosphorus by biochar

发生了多层扩散现象. 对比 q_m 发现, MAPB 的最大吸附量为 $90.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 是 APB 的 6 倍左右, 说明改性大大提高了生物质炭对磷的吸附能力. 蒋艳红等^[27]的研究结果表明, 室温条件下镁香蕉秆基生物炭对水中磷的最大吸附量 q_m 为 $15.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,

说明 MAPB 对磷的吸附性能更优. 溶液 pH 小于 MgO 零电荷点 ($\text{pH}_{\text{PZC}} = 12$), 羟基化的 MgO 与磷酸氢根等阴离子可以发生静电吸引形成沉淀^[28]. 同时 MAPB 较大的比表面积增加了 MgO 与磷酸盐的反应位点, 促进其吸附性能.

表 4 生物质炭对磷的吸附等温线拟合结果

Table 4 Results of adsorption isotherm fitting of phosphorus by biochar						
项目	Freundlich 模型			Langmuir 模型		
	$k_f/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$1/n$	R^2	$q_m/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$b/\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$	R^2
APB	0.22	1.69	0.982 1	14.80	0.034	0.983 7
MAPB	0.02	5.00	0.932 3	90.92	0.0054	0.929 5

2.2.4 改性生物质炭对硝氮、铵态氮和磷共存时的吸附

在硝态氮、铵态氮和磷同时存在的情况下, 改性生物质炭对这 3 种离子的吸附量均有所增加, 其中对磷的吸附增加最多, 增加 79.1%. 对硝态氮、铵态氮两种离子的吸附量分别增加 67.5% 和 47.1% (表 5). 分别用 2 种模型拟合 MAPB 对 3 种离子的吸附等温线 (图 7), 拟合结果见表 6. 混合离子共存时, MAPB 对硝态氮和磷的吸附更符合 Langmuir 模型, 即近似为单层吸附, 与单独离子存

表 5 改性生物质炭对不同形式存在下离子的吸附结果

Table 5 Adsorption results of modified biomass carbon on ions in different forms			
项目	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	PO_4^{3-}
单独存在吸附量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	3.02	12.55	27.6
混合离子共存吸附量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	12.55	18.46	49.44

在时多层吸附机制不同. 而 MAPB 对铵态氮的吸附更符合 Freundlich 模型, 与单独离子存在时一致. Freundlich 指数 $1/n$ 越小表明吸附越容易进行. 从 $1/n$ 值看出 MAPB 对硝态氮的吸附效果较好. MAPB

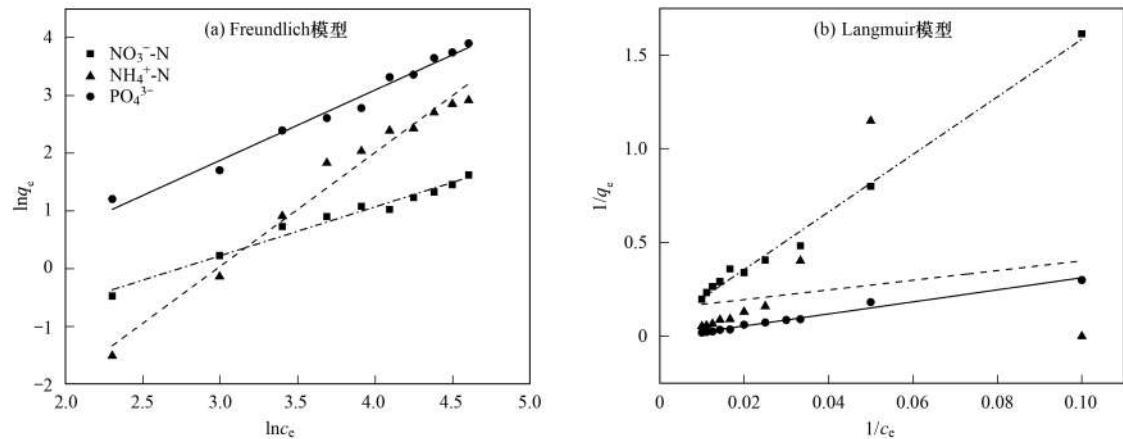


图 7 MAPB 对混合离子的吸附模型

Fig. 7 Adsorption model of MAPB on mixed ions

对磷吸附量的提高可能是由于 MgO 与磷酸根反应生成磷酸氢镁。Kiani 等^[29]的研究发现当 $[\text{NH}_4^+]: [\text{PO}_4^{3-}] = 1:1$ 时, 以 MgO 为前驱体可合成鸟粪石 $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 同时对水中铵态氮和磷酸根的去

除率达 70% 以上。因此混合离子共存时 MAPB 吸附量的提高可能由于磷酸铵镁的生成, 进一步促进了对磷酸根和铵离子的吸附^[30]。改性生物质炭在混合离子共存时对氮磷处理有较好的应用前景。

表 6 MAPB 对混合离子的吸附等温线拟合结果

Table 6 Adsorption isotherm fitting results of MAPB for mixed ions

项目	Freundlich 模型			Langmuir 模型		
	$k_f/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$1/n$	R^2	$q_m/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$b/\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$	R^2
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.098	0.85	0.9771	20.24	0.0032	0.9924
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.003	1.97	0.9770	6.91	0.0561	0.0430
PO_4^{3-}	0.169	1.22	0.9806	109.89	0.0028	0.9821

3 结论

(1) 本研究以空心莲子草为原料, 与 MgCl_2 混合后采用限氧升温炭化法制备改性生物质炭。吸附材料表征结果表明, 纳米 MgO 成功负载到生物质炭上, 改性增大了生物质炭比表面积, 并且增加了羟基官能团的含量, 促进吸附反应的进行。

(2) APB 和 MAPB 对硝态氮的吸附等温线均更符合 Freundlich 等温吸附方程, 吸附过程属于多层吸附。改性后 MAPB 对硝态氮的吸附能力增大, 最大吸附量为 $5.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

(3) APB 对铵态氮的吸附能力基本为零, 而改性大大提高了其对铵态氮的吸附能力, 最大吸附量达 $62.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。MAPB 对铵态氮吸附更符合 Freundlich 模型, 吸附过程为多层吸附。

(4) 改性前后生物质炭对磷的吸附机制发生了变化。改性前 APB 对磷的吸附为单层吸附, 改性后 MAPB 发生了多层扩散现象。改性大大提高了生物质炭对磷的吸附能力, 吸附量最大可达 $90.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

(5) 混合离子共存时 MAPB 对硝态氮、铵态氮和磷的吸附量增大, 其中对磷的吸附量增加 79.1%。说明 MAPB 在混合离子共存时能发挥更好的吸附作用。

参考文献:

[1] Le Moal M, Gascuel-Odoux C, Ménesguen A, et al. Eutrophication: a new wine in an old bottle? [J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 1-11.

[2] Ting W H T, Tan I A W, Salleh S F, et al. Application of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phytoremediation of ammoniacal nitrogen: a review [J]. Journal of Water Process Engineering, 2018, **22**: 239-249.

[3] Álvarez-Rogel J, del Carmen Tercero M, Arce M I, et al. Nitrate removal and potential soil N_2O emissions in eutrophic salt marshes with and without *Phragmites australis* [J]. Geoderma, 2016, **282**: 49-58.

[4] Zhao D H, Li J J, Lv L P, et al. Effect of cadmium contamination on the eutrophic secondary pollution of aquatic macrophytes by litter decomposition [J]. Journal of

Environmental Management, 2019, **231**: 1100-1105.

[5] Manyà J J. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(15): 7939-7954.

[6] Yuan P, Wang J Q, Pan Y J, et al. Review of biochar for the management of contaminated soil: preparation, application and prospect [J]. Science of the Total Environment, 2019, **659**: 473-490.

[7] 李江遐, 吴林春, 张军, 等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展 [J]. 生态环境学报, 2015, **24**(12): 2075-2081.

Li J X, Wu L C, Zhang J, et al. Research progresses in remediation of heavy metal contaminated soils by biochar [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(12): 2075-2081.

[8] 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 等. 针铁矿改性生物炭对砷吸附性能 [J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2773-2782.

Zhu S H, Zhao J J, Yin Y J, et al. Application of goethite modified biochar for arsenic removal from aqueous solution [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2773-2782.

[9] Zhang C, Shan B Q, Zhu Y Y, et al. Remediation effectiveness of *Phyllostachys pubescens* biochar in reducing the bioavailability and bioaccumulation of metals in sediments [J]. Environmental Pollution, 2018, **242**: 1768-1776.

[10] Yang G X, Jiang H. Amino modification of biochar for enhanced adsorption of copper ions from synthetic wastewater [J]. Water Research, 2014, **48**: 396-405.

[11] Akgül G, Maden T B, Diaz E, et al. Modification of tea biochar with Mg, Fe, Mn and Al salts for efficient sorption of PO_4^{3-} and Cd^{2+} from aqueous solutions [J]. Journal of Water Reuse & Desalination, 2019, **9**(1): 57-66.

[12] Lin L N, Li Z Y, Liu X W, et al. Effects of Fe-Mn modified biochar composite treatment on the properties of As-polluted paddy soil [J]. Environmental Pollution, 2019, **244**: 600-607.

[13] Yu J D, Jiang C Y, Guan Q Q, et al. Enhanced removal of Cr (VI) from aqueous solution by supported ZnO nanoparticles on biochar derived from waste water hyacinth [J]. Chemosphere, 2018, **195**: 632-640.

[14] Yang Q, Wang X L, Luo W, et al. Effectiveness and mechanisms of phosphate adsorption on iron-modified biochars derived from waste activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2018, **247**: 537-544.

[15] Tang Q, Shi C H, Shi W M, et al. Preferable phosphate removal by Nano-La (III) hydroxides modified mesoporous rice husk biochars: role of the host pore structure and point of zero charge [J]. Science of the Total Environment, 2019, **662**: 511-520.

[16] Tao Q, Li B, Li Q Q, et al. Simultaneous remediation of sediments contaminated with sulfamethoxazole and cadmium using

- magnesium-modified biochar derived from *Thalia dealbata* [J]. Science of the Total Environment, 2019, **659**: 1448-1456.
- [17] Yang Y, Wei Z B, Zhang X L, *et al.* Biochar from *Alternanthera philoxeroides* could remove Pb (II) efficiently [J]. Bioresource Technology, 2014, **171**: 227-232.
- [18] 易蔓, 李婷婷, 李海红, 等. Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性[J]. 环境科学, 2019, **40** (3): 1318-1327.
- Yi M, Li T T, Li H H, *et al.* Characteristics of phosphorus adsorption in aqueous solution by Ca/Mg-loaded biogas residue biochar[J]. Environmental Science, 2019, **40** (3): 1318-1327.
- [19] 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 等. 改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果[J]. 环境科学, 2019, **40** (4): 1842-1848.
- Chen T, Zhou Z Y, Meng R H, *et al.* Characteristics and heavy metal adsorption performance of sewage sludge-derived biochar from co-pyrolysis with transition metals [J]. Environmental Science, 2019, **40** (4): 1842-1848.
- [20] 史月月, 单锐, 袁浩然. 改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制[J]. 环境科学, 2019, **40** (6): 2783-2792.
- Shi Y Y, Shan R, Yuan H R. Effects and mechanisms of methyl orange removal from aqueous solutions by modified rice shell biochar[J]. Environmental Science, 2019, **40** (6): 2783-2792.
- [21] 刘项, 南红岩, 安强. 刺桐生物炭对水中氨氮和磷的吸附[J]. 农业资源与环境学报, 2018, **35** (1): 66-73.
- Liu X, Nan H Y, An Q. The *Erythrina Variegata* biochar's adsorption to NH_4^+ -N and P from aqueous solution[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, **35** (1): 66-73.
- [22] Leng L J, Yuan X Z, Huang H J, *et al.* Characterization and application of bio-chars from liquefaction of microalgae, lignocellulosic biomass and sewage sludge[J]. Fuel Processing Technology, 2015, **129**: 8-14.
- [23] Stromer B S, Woodbury B, Williams C F. Tylosin sorption to diatomaceous earth described by Langmuir isotherm and Freundlich isotherm models[J]. Chemosphere, 2018, **193**: 912-920.
- [24] 王博, 叶春, 李法云, 等. 水生植物制生物炭对硝态氮的吸附规律研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37** (1): 116-122.
- Wang B, Ye C, Li F Y, *et al.* Studies on adsorption of nitrate from modified hydrophyte biochars [J]. China Environmental Science, 2017, **37** (1): 116-122.
- [25] 陈靖, 李伟民, 丁文川, 等. Fe/Mg 负载改性竹炭去除水中的氨氮[J]. 环境工程学报, 2015, **9** (11): 5187-5192.
- Chen J, Li W M, Ding W C, *et al.* Removal of ammonia nitrogen by Fe/Mg-modified bamboo charcoal [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9** (11): 5187-5192.
- [26] Jiang Y H, Li A Y, Deng H, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus adsorption by Mg-loaded biochar from different feedstocks[J]. Bioresource Technology, 2019, **276**: 183-189.
- [27] 蒋艳红, 李安玉, 严发, 等. 载镁香蕉秆基生物炭对氮磷的吸附性能研究[J]. 农业资源与环境学报, 2018, **35** (6): 559-567.
- Jiang Y H, Li A Y, Yan F, *et al.* Research on adsorption properties of Mg-loaded banana stalk biochar on nitrogen and phosphorus [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, **35** (6): 559-567.
- [28] Jung K W, Jeong T U, Hwang M J, *et al.* Phosphate adsorption ability of biochar/Mg-Al assembled nanocomposites prepared by aluminum-electrode based electro-assisted modification method with MgCl_2 as electrolyte[J]. Bioresource Technology, 2015, **198**: 603-610.
- [29] Kiani D, Sheng Y Y, Lu B Y, *et al.* Transient struvite formation during stoichiometric (1:1) NH_4^+ and PO_4^{3-} adsorption/reaction on magnesium oxide (MgO) particles [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, **7** (1): 1545-1556.
- [30] 郭琳, 聂锦霞, 刘晨, 等. 磷酸铵镁结晶法处理含磷废水试验研究[J]. 应用化工, 2019, **48** (1): 122-125.
- Guo L, Nie J X, Liu C, *et al.* Removal of phosphorus from simulated wastewater by the crystallization of magnesium ammonium phosphate[J]. Applied Chemical Industry, 2019, **48** (1): 122-125.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)