

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.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响	李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 PM _{2.5} 来源解析	王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)
四川省典型工业行业 PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)
新乡冬季 PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071)
烟台市环境受体 PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)
常州市冬季 PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)
中国城市 O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩, 张兴赢 (1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立	高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化	刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析	张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析	徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)
不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征	付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)
温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响	于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军, 郭胜利 (1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)
《环境科学》征订启事 (1042)	《环境科学》征稿简则 (1162)
信息 (1208, 1235, 1286)	

鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除

邓曼君, 王学江*, 成雪君, 景焕平, 赵建夫

(同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 将一种含鸟粪石的氮磷回收产物(NZ-MAP)应用于水中重金属离子铅的去除。通过 XRD、FTIR、SEM/EDS 分析手段对 NZ-MAP 进行表征, 并探究投加量、溶液初始 pH、反应时间对去除过程的影响。结果表明 NZ-MAP 材料主要成分为负载有鸟粪石的天然沸石; 当投加量为 $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 最大吸附量为 $749.74 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 同时 NZ-MAP 对溶液中 Pb^{2+} 的吸附量随 pH 的增大呈先增加后趋于平衡的趋势, 其去除机理主要为 $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ 沉淀作用, 且当 pH 为 5.0 时效果最佳。该材料对于水中铅离子的去除过程更加符合准二级动力学模型。为深入探讨共存重金属离子对 NZ-MAP 去除水中铅离子的影响, 发现共存 Ni^{2+} 和 Cu^{2+} 对 NZ-MAP 吸附 Pb^{2+} 的影响较小, 共存 Zn^{2+} 和 Al^{3+} 明显抑制了 NZ-MAP 对 Pb^{2+} 的吸附。研究显示, NZ-MAP 材料可高效去除水中铅离子, 可为水体中铅离子的去除提供有效的方法

关键词: 鸟粪石; 天然沸石; 铅离子; 吸附

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1310-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201808098

Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite

DEND Man-jun, WANG Xue-jiang*, CHENG Xue-jun, JING Huan-ping, ZHAO Jian-fu

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A nitrogen and phosphorus recovery product (NZ-MAP) containing struvite was applied to remove heavy metal ions and lead from water. NZ-MAP was characterized using XRD, FTIR, and SEM/EDS. The effects of dosage, initial pH, and reaction time on the removal process were investigated. The results show that the main component of NZ-MAP is a natural zeolite loaded with struvite. When the dosage is $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, the maximum adsorption amount is $749.74 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, and the adsorption of Pb^{2+} in the solution increases first and then tends to reach a balance with increase of the pH. Its removal mechanism is mainly $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ precipitation, and the effect is best when pH is 5.0. The removal process of Pb^{2+} from water is more in line with the quasi-two stage kinetic model. In an investigation of the effect of coexisting heavy metal ions on the removal of lead ions in water by NZ-MAP, it was found that coexisting Ni^{2+} and Cu^{2+} have little effect on NZ-MAP adsorption on Pb^{2+} . Coexisting Zn^{2+} and Al^{3+} obviously inhibit the adsorption of Pb^{2+} by NZ-MAP. The research shows that NZ-MAP material can remove lead ions from water efficiently, thus offering an effective method for doing this.

Key words: struvite; natural zeolite; lead; absorb

现代工业的飞速发展引起的水体重金属污染问题已十分严重, 亟待解决^[1]。其中水体铅污染会对人类以及水中生物的生存构成严重的威胁^[2]。目前, 对于水体重金属离子的去除有以下方法: 化学沉淀法^[3]、离子交换法^[4]、吸附法^[5,6]、膜过滤法^[7]、电化学处理技术^[8]等。其中化学沉淀法由于操作简便和处理成本低并且效果较好而成为目前应用较为广泛的一种方法^[9]。有研究表明, 由于大多数重金属离子能与水中的磷酸根离子结合从而形成难溶于水的稳定化合物, 所以磷酸盐沉淀法是处理重金属离子污染十分有效的一种方法^[10,11,12]。鸟粪石作为一种磷酸盐类物质, 其通过沉淀溶解平衡释放的磷酸根离子可在一定条件下与水体中的重金属离子反应生成稳定的沉淀, 使水体中的重金属离子得到去除。

本研究所采用鸟粪石天然沸石复合材料(NZ-MAP 材料)是由镁盐改性的天然沸石回收污水中氮

磷后形成的鸟粪石天然沸石复合回收产物。研究表明, 该材料的回收过程实现了氮磷的资源化利用^[13], 因此具备一定的环境修复能力^[14]。该材料具备以下优势: ①天然沸石本身对水中的铅离子具有一定的吸附能力^[15], 也可作为鸟粪石负载的骨架^[16], 使其更容易从污水中富集回收, 有效地解决了鸟粪石回收困难的问题^[17]。②NZ-MAP 综合了天然沸石对水体中铅离子的吸附能力和鸟粪石释放的磷酸根离子对铅离子的沉淀作用, 更加有效地实现了对水体中铅离子的去除^[18]。本研究以水体中重金属离子 Pb^{2+} 为研究对象, 探究了 NZ-MAP 材料对水中 Pb^{2+} 的去除效果, 以期氮磷回收材料去除水中重金属提供了依据。

收稿日期: 2018-08-13; 修订日期: 2018-09-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07206-002)

作者简介: 邓曼君(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水体重金属离子的去除, E-mail: 15207145226@163.com

* 通信作者, E-mail: wangxj@tongji.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验材料

将天然沸石洗净烘干后, 按照 $m(\text{Mg}^{2+})/m(\text{NZ})$ 为 1:5 加入 MgCl_2 溶液. 搅拌 1 h 后, 按照 $n(\text{OH}^-)/n(\text{Mg}^{2+})$ 为 2.0, 缓慢滴加 NaOH 溶液, 振荡浸渍 3 h 后静置 12 h. 将上清液倒掉后把材料反复冲洗干净, 然后放入马弗炉中 400°C 焙烧 5 h, 即制得负载氧化镁的天然沸石 (NZ-MgO). 将一定质量的 NZ-MgO 材料加入到氮磷浓度均为 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 混合模拟废水中, 后放在摇床中控制 25°C 、 $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 反应 4 h, 抽滤后在 40°C 下烘干, 即得 NZ-MAP 材料.

1.2 实验方法

1.2.1 材料投加量优化

准确称量 0.01、0.02、0.04、0.06、0.08 和 0.10 g NZ-MAP 材料, 分别将其投加到 100 mL 浓度为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb^{2+} 溶液中, 调节溶液初始 pH 为 5.0, 后放在摇床中控制 25°C 、 $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 反应 4 h, 最后取上清液过 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜. 测定反应前后溶液中 Pb^{2+} 的浓度, 计算吸附量.

1.2.2 溶液初始 pH 的影响

准确称取 0.04 g NZ-MAP 材料数次, 将其分别投加到 100 mL 浓度为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 重金属 Pb^{2+} 溶液中, 依次调节溶液初始 pH 为 2.0、3.0、4.0、5.0、6.0, 后放在摇床中控制 25°C 、 $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 反应 4 h, 最后取溶液上清液过 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜, 测定其 Pb^{2+} 的浓度.

1.2.3 反应时间的影响

准确称取 0.04 g NZ-MAP 材料数次, 将其分别投加到 100 mL 浓度为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 重金属 Pb^{2+} 溶液中, 调节溶液初始 pH 为 5.0, 后放在恒温摇床控制

25°C 、 $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 反应, 每隔一定的时间取溶液上清液过 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜, 测定其 Pb^{2+} 的浓度.

1.2.4 共存重金属离子的影响

分别配制 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Al^{3+} 的浓度梯度为 25、50、75、100、125 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 Pb^{2+} 的混合溶液, 其中 Pb^{2+} 的初始浓度为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 调节溶液初始 pH 为 5.0, 后放在摇床中控制 25°C 、 $180 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 反应 4 h, 然后取上清液过 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜, 测定其 Pb^{2+} 的浓度.

1.2.5 铅离子溶液的测定方法

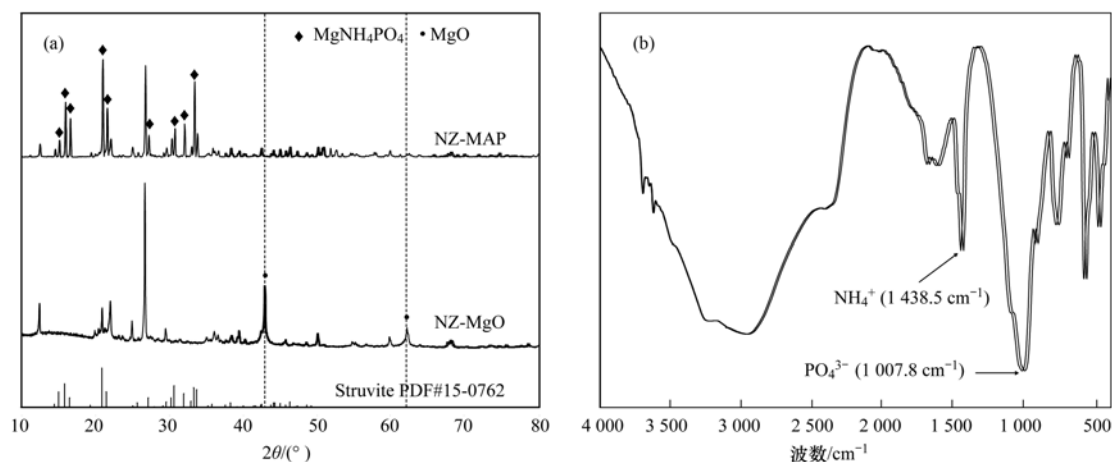
铅离子溶液的测定采用 ICP 光谱仪, 型号为 ICP-Agilent 720ES.

2 结果与讨论

2.1 氮磷回收产物的表征

图 1(a) 为最佳反应条件下的 NZ-MAP 的 XRD 图谱, 其表明回收产物 NZ-MAP 中 MgO 的特征峰消失, 在 2θ 角为 15.81° 、 20.86° 、 21.45° 和 31.93° 时出现了明显衍射峰, 与鸟粪石的标准谱图 (PDF# 15-0762) 对比, 可发现两者所在强度峰的位置基本一致, 可基本确定回收产物上的主要成分为鸟粪石. 图 1(b) 为在最佳反应条件下的 NZ-MAP 的 FTIR 图谱, 其表明在波数为 1007.8 、 571.2 和 471.6 cm^{-1} 处出现了明显的 PO_4^{3-} 特征吸收峰, 在波数为 1438.55 cm^{-1} 处出现了 NH_4^+ 的变形振动, 说明 NZ-MAP 中存在磷酸根离子和铵根离子.

图 2 为最佳条件下 NZ-MAP 的 SEM/EDS 图谱, 其表明 NZ-MAP 表面存在粗壮的棒状晶体, 表面存在明显的刻痕. 表 1 为最优反应条件下回收产品 EDS 图谱元素质量比. 从中可知, 鸟粪石晶体的构成元素 Mg 、 O 、 N 和 P 的质量比均较高. 以上的分析结果表明, 回收材料 NZ-MAP 中含有大量的鸟粪



(a) 最优反应条件下回收产物的 XRD 图谱; (b) 最优反应条件下回收产物的 FTIR 图谱

图 1 最优反应条件下的 XRD 图和 FTIR 图

Fig. 1 XRD diagram and FTIR diagram under optimal reaction conditions

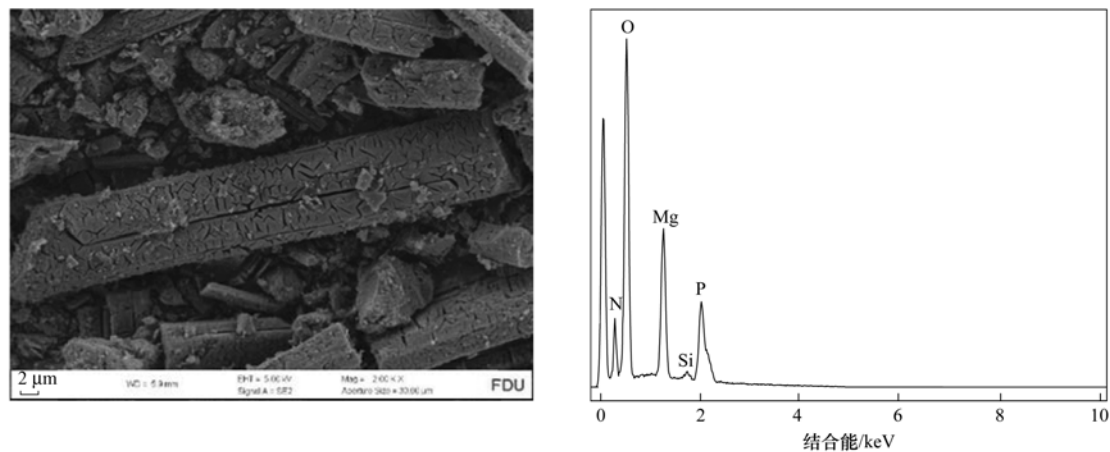


图 2 最优反应条件下回收产物的 SEM/EDS 图谱

Fig. 2 SEM/EDS atlas of recovery products under optimal reaction conditions

表 1 最优反应条件下回收产品 EDS 图谱元素质量比

Table 1 Mass ratio of EDS atlas for recovered products under optimal reaction conditions

元素	N	O	Mg	Si	P
质量比/%	15.19	40.71	21.87	1.70	20.53

石,并且可以提供磷酸根离子,对水体中铅离子进行吸附去除.

2.2 材料投加量优化

吸附剂的投加量是影响吸附特性的最重要因素^[19].图3为天然沸石NZ和NZ-MAP材料投加量对溶液中Pb²⁺吸附效果的影响.从中可知,当天然沸石投加量在0.05~0.6 g·L⁻¹时,天然沸石对溶液中Pb²⁺的单位吸附量稳定在8.2 mg·g⁻¹左右,而在同样的投加量下,NZ-MAP对溶液中Pb²⁺的吸附能力明显变强,说明NZ-MAP对Pb²⁺的吸附能力优于天然沸石.当投加量从0.05 g·L⁻¹增加到0.6 g·L⁻¹时,NZ-MAP的单位吸附量先增加后减小.在吸附剂的投加量为0.4 g·L⁻¹时,单位吸附量最高,为749.74 mg·g⁻¹,是天然沸石的91倍;当投加量大于0.4 g·L⁻¹时,NZ-MAP对溶液中Pb²⁺的单位

吸附量开始下降,这可能是由于此时溶液体系中吸附剂过量,吸附剂NZ-MAP无法得到高效利用.因此NZ-MAP对溶液中Pb²⁺的去除的最佳投加量为0.4 g·L⁻¹.

2.3 溶液初始pH的影响

pH是影响吸附剂吸附效果的重要因素,pH通过影响吸附剂表面电荷和重金属在溶液中存在形式,进而影响吸附剂的吸附效果^[20].图4为溶液初始pH对NZ-MAP吸附溶液中Pb²⁺的影响,Pb²⁺溶液初始pH范围设定在2.0~6.0之间.从中可知,随着pH的增加,NZ-MAP对溶液中Pb²⁺的吸附量先迅速增加后趋于稳定,在pH为4.0时达到稳定.当pH从2.0变化至4.0时,单位吸附量从111.12 mg·g⁻¹增至749.87 mg·g⁻¹.分析可知,当溶液pH较低时,溶液中存在大量的H⁺和Pb²⁺争夺NZ-MAP表面带有负电荷的吸附点位,形成有效竞争关系^[21],阻碍了NZ-MAP吸附溶液中的Pb²⁺.当溶液pH增大,溶液中H⁺浓度相对减少,一方面,NZ-MAP表面活性点位易于和Pb²⁺结合;另一方面,溶液中的Pb²⁺易于和NZ-MAP释放的HPO₄²⁻和H₂PO₄⁻形成沉淀,反应方程如式(1)和式(2)所示,从而表现出较好的吸附能力.

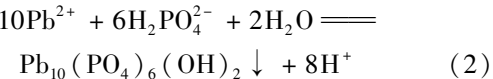
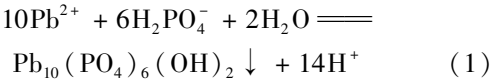


图5为不同初始pH条件下,NZ-MAP在一定浓度Pb²⁺溶液中磷酸盐的释放情况.从中可知,重

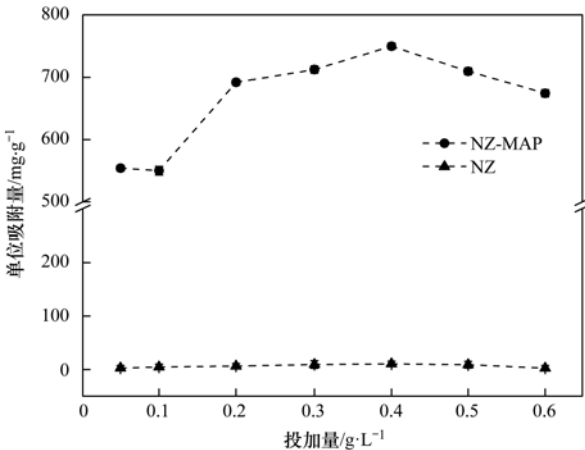


图 3 材料投加量对溶液中 Pb²⁺ 吸附效果的影响

Fig. 3 Effect of material dosage on Pb²⁺ adsorption in solution

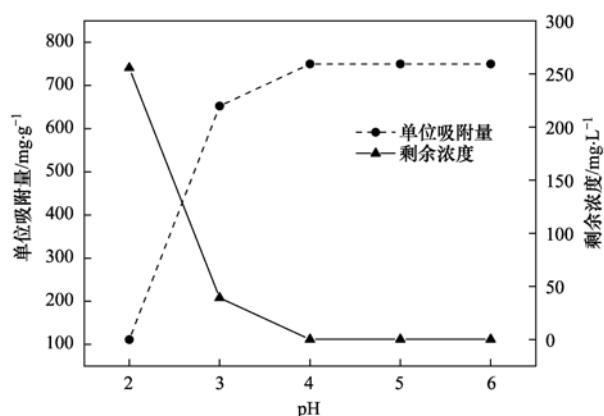
图4 初始 pH 对 NZ-MAP 吸附溶液中 Pb^{2+} 的影响

Fig. 4 Effect of initial pH on Pb^{2+} in a NZ-MAP adsorption solution

金属溶液中磷酸盐浓度明显低于去离子水中磷酸盐的浓度, 这一定程度上说明了 NZ-MAP 所释放的磷酸盐和重金属发生了化学反应. 为进一步探讨在不同初始 pH 条件下 NZ-MAP 对溶液中重金属的吸附机理, 对沉淀产物做 XRD 和 SEM 分析. 图 6 为 Pb^{2+} 溶液于不同 pH 条件下沉淀产物的 XRD 图谱, 其表明当初始 pH 为 3.0、4.0、5.0、6.0 时, 沉淀产物在 2θ 角为 30.04° 、 31.328° 和 21.57° 时出现明显的特征峰, 经与铅羟基磷灰石 $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ 的标准谱图 (PDF#87-2477) 对比, 这些特征峰所在的位置与铅羟基磷灰石 $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ 的主要强度峰所在位置基本相同, 故可基本确定沉淀产物含有 $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ 沉淀; 当 pH 为 2 时, 沉淀产物在 2θ 角为 26.60° 处出现强衍射峰, 此处为 SiO_2 特征峰, 且并未出现明显的 $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ 衍射峰, 这说明沉淀产物几乎没有 $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ 沉淀.

图 7 为 Pb^{2+} 溶液于不同 pH 条件下沉淀产物 SEM 图谱. 从中可知, $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ 沉淀呈不规则的棒状结构, 当初始 pH 为 2 时, $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ 晶体分布比较分散, 随着溶液 pH 的升高, $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ 晶体逐渐出现团聚态的较为粗壮的棒状结构.

2.4 吸附动力学和热力学

图 8(a) 为 NZ-MAP 对 Pb^{2+} 的吸附量随时间的变化. 从中可知, 随着时间的增加, NZ-MAP 对 Pb^{2+} 的单位吸附量呈先增加后趋于平衡的趋势, 并且在前 60 min 单位吸附量增长迅速. 这是因为在反应前期, 加入 NZ-MAP 后, 该材料迅速释放磷酸根离子, 与溶液中大量存在 Pb^{2+} 结合, 形成沉淀. 而在 60 min 后, 该反应体系中的反应物被消耗完, 所以 60 min 后的单位吸附量的增加不再明显, 只是略微有增加后迅速达到平衡, 平衡吸附量为 745.70

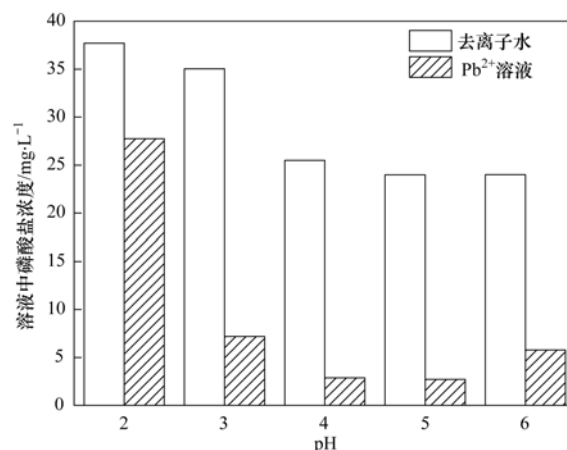


图5 不同初始 pH 条件下, NZ-MAP 在溶液中磷酸盐的释放情况

Fig. 5 Release of phosphate in solution from NZ-MAP under different initial pH conditions

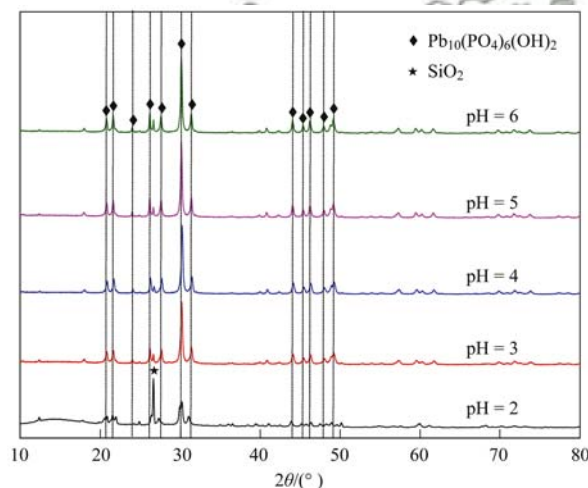
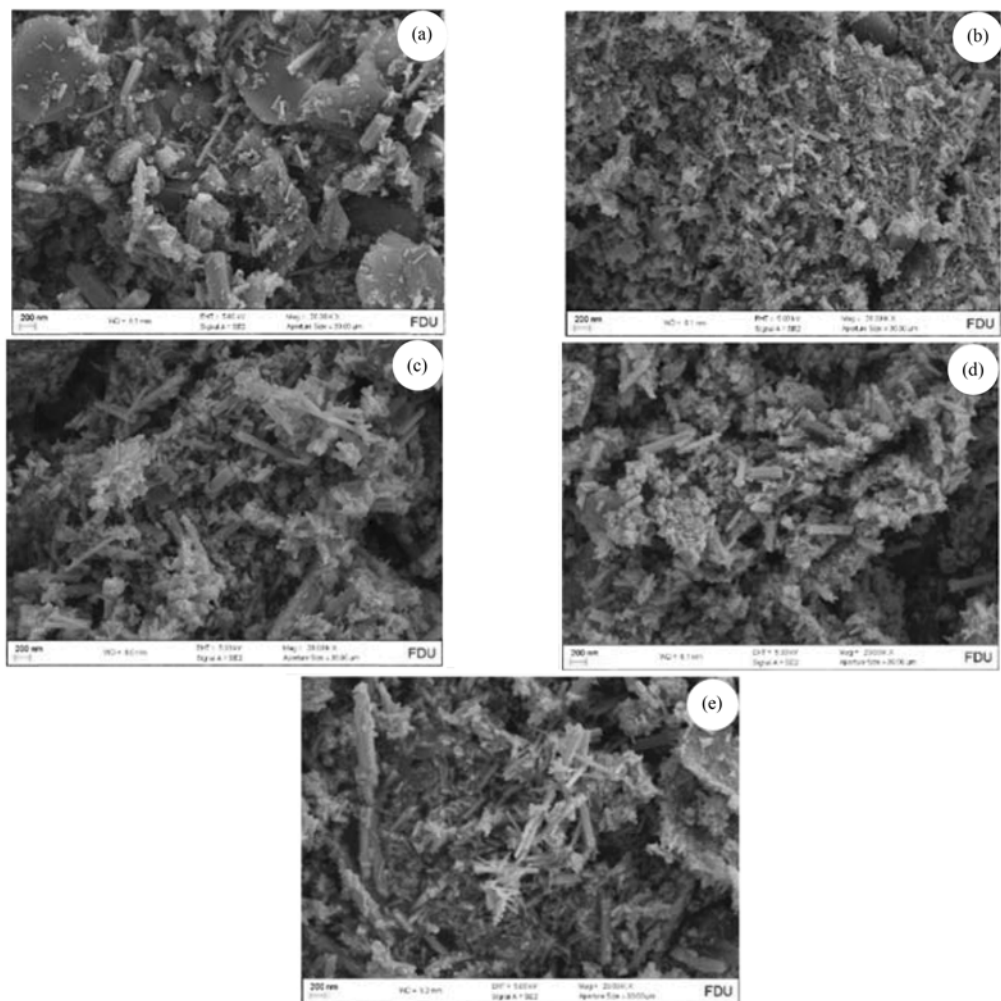
图6 Pb^{2+} 溶液于不同 pH 条件下沉淀产物 XRD 图谱

Fig. 6 XRD spectra of precipitation products of a Pb^{2+} solution under different pH conditions

$mg \cdot g^{-1}$. 图 8(b) 为 NZ-MAP 对 Pb^{2+} 的吸附量随初始铅离子浓度的变化. 从中可知, 当 Pb^{2+} 浓度在 $20 mg \cdot L^{-1}$ 以下时, NZ-MAP 对 Pb^{2+} 的单位吸附量随着 Pb^{2+} 的增加而增加, 当 Pb^{2+} 浓度超过 $20 mg \cdot L^{-1}$ 时, 单位吸附量不再有明显变化, 说明在 Pb^{2+} 浓度在 $20 mg \cdot L^{-1}$ 以下时, 随着 Pb^{2+} 浓度增加, 有更多的铅离子吸附在材料上, 而当 Pb^{2+} 浓度超过 $20 mg \cdot L^{-1}$ 时, 材料的吸附位点几乎达到饱和.

为了深入探讨 NZ-MAP 对溶液中 Pb^{2+} 的吸附过程, 将 NZ-MAP 吸附 Pb^{2+} 的数据进行准一级动力学模型和准二级动力学模型拟合, 图 9 为 NZ-MAP 吸附 Pb^{2+} 的准一级反应动力学和准二级反应动力学方程线性回归直线拟合的拟合结果, 其动力学参数如表 2 所示. 从中可知, 准二级动力学反应方程式拟合的 q_e 与实际值较为接近, 准一级动力学和准二级动力学的相关系数分别为 0.884 4 和 0.999 9,



(a) pH=2; (b) pH=3; (c) pH=4; (d) pH=5; (e) pH=6

图 7 Pb^{2+} 溶液于不同 pH 条件下沉淀产物 SEM 图谱

Fig. 7 SEM spectra of precipitation products of a Pb^{2+} solution under different pH conditions

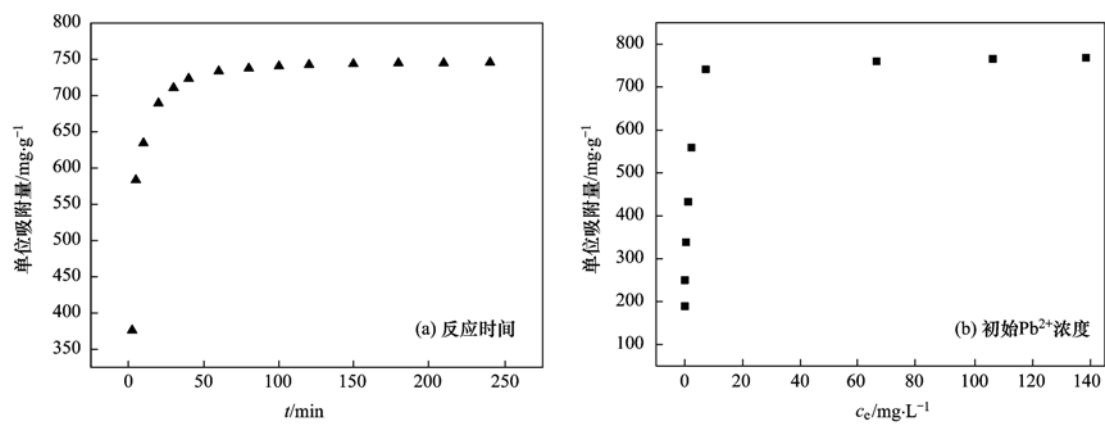


图 8 反应时间和初始 Pb^{2+} 浓度对溶液中 Pb^{2+} 吸附的影响

Fig. 8 Effect of reaction time and initial concentration Pb^{2+} on the adsorption of Pb^{2+} from solution

表 2 NZ-MAP 对溶液中 Pb^{2+} 的吸附动力学参数

Table 2 Adsorption kinetic parameters of NZ-MAP on Pb^{2+} in solution

吸附剂	准一级动力学			准二级动力学		
	$q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	k_1/min^{-1}	R^2	$q_e/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$k_2/\text{g}\cdot(\text{mg}\cdot\text{min})^{-1}$	R^2
NZ-MgO	200.91	0.019 3	0.884 4	769.23	0.000 7	0.999 9

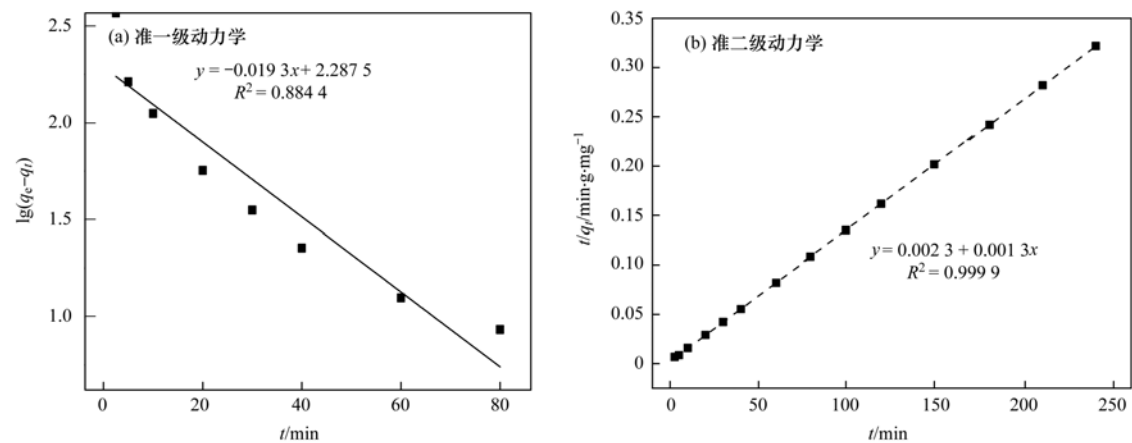


图9 NZ-MAP 吸附溶液中 Pb^{2+} 的准一级反应动力学和准二级反应动力学方程拟合结果

Fig. 9 Quasi-primary reaction kinetics and quasi-two reaction kinetic equation fitting results of Pb^{2+} in NZ-MAP adsorption solution

所以 NZ-MAP 对溶液中 Pb^{2+} 的吸附过程符合准二级动力学模型。

2.5 共存重金属离子的影响

通常情况下，实际废水中重金属离子种类繁多、成分复杂^[22]。重金属离子之间易相互竞争以争夺 NZ-MAP 材料表面活性位点，阻碍反应的进行。因此，本研究选取工业废水中常见重金属离子作为研究对象，以考察不同共存重金属离子 (Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Al^{3+}) 对 NZ-MAP 吸附溶液中 Pb^{2+} 的影响^[23]。

图 10 为不同初始浓度重金属离子对 NZ-MAP 吸附溶液中 Pb^{2+} 的影响。从中可知，共存 Ni^{2+} 和 Cu^{2+} 对 NZ-MAP 吸附 Pb^{2+} 的影响较小，共存 Zn^{2+} 和 Al^{3+} 明显抑制了 NZ-MAP 对 Pb^{2+} 的吸附作用，且作用大小与投加浓度呈正相关关系。值得注意的是，共存 Al^{3+} 的抑制作用最为明显，这可能是由于 Al^{3+} 易发生水解生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ ^[24]，同时产生大量 H^+ ，导致溶液 pH 降低并且 H^+ 和 Pb^{2+} 产生竞争，

阻碍 NZ-MAP 对溶液中 Pb^{2+} 的吸附。图 11 为在不同重金属离子共存条件下，NZ-MAP 吸附 Pb^{2+} 的沉淀产物 XRD 图谱，从中可知，共存 Ni^{2+} 和 Zn^{2+} 条件下的沉淀产物仍为 $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ 沉淀，未出现其他重金属沉淀的特征峰；共存 Cu^{2+} 条件下的沉淀产物除了存在 $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ 晶体的特征峰外，在 10.16° 、 30.24° 和 30.82° 处还出现了 $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ 晶体的特征峰^[25]；共存 Al^{3+} 条件下的沉淀产物无明显的 $\text{Pb}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ 晶体的特征峰，仅出现了 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 晶体的特征峰^[21]。图 12 为在不同重金属离子共存条件下，NZ-MAP 吸附 Pb^{2+} 的沉淀产物 SEM 图谱。从中可知，共存 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 条件下的沉淀产物的形态为细小的短棒状结构，存在明显的团聚现象；共存 Cu^{2+} 条件下的沉淀产物的形态为细长的针状结构；而 Al^{3+} 条件下的沉淀产物无特定形态。

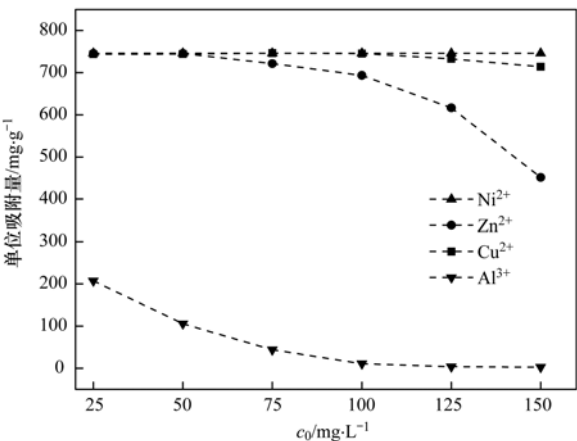


图 10 不同初始浓度重金属离子对 NZ-MAP 吸附溶液中 Pb^{2+} 的影响

Fig. 10 Effects of different initial concentrations of heavy metal ions on Pb^{2+} in NZ-MAP adsorption solution

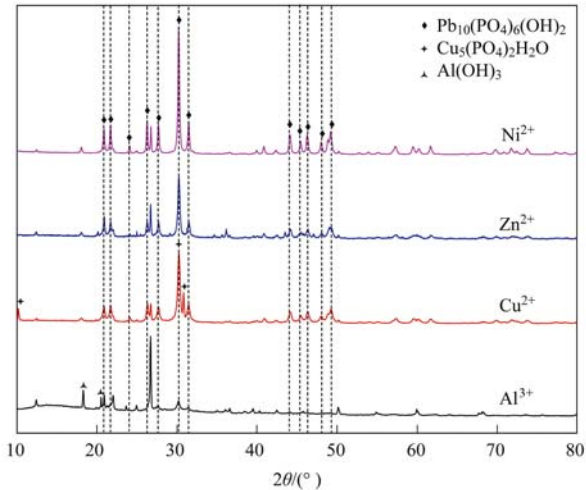


图 11 不同重金属离子共存条件下，NZ-MAP 吸附 Pb^{2+} 的沉淀产物 XRD 图谱

Fig. 11 Effects of different initial concentrations of heavy metal ions on Pb^{2+} in NZ-MAP adsorption solution

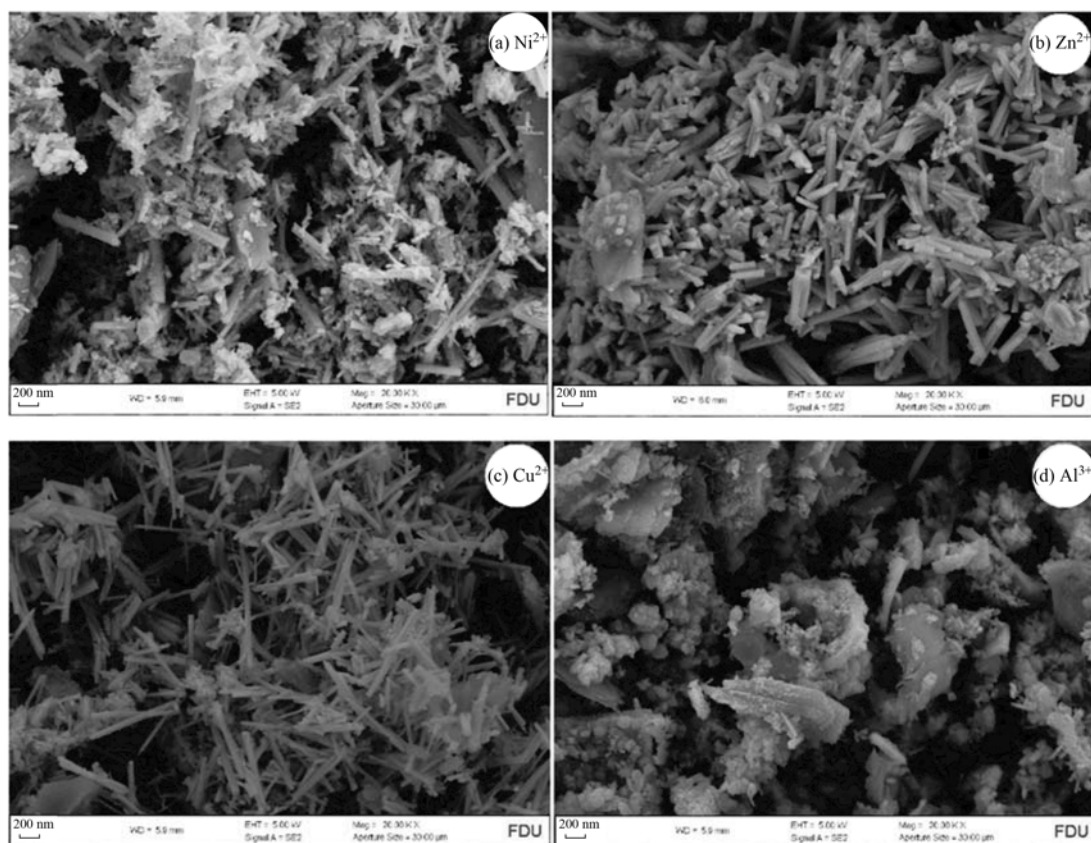


图 12 不同重金属离子共存条件下, NZ-MAP 吸附 Pb^{2+} 的沉淀产物 SEM 图谱

Fig. 12 SEM spectra of precipitation products of NZ-MAP adsorbed Pb^{2+} under the coexistence of different heavy metal ions

3 结论

(1) 当 Pb^{2+} 的初始浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NZ-MAP 的最优投加量分别为 $0.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 相对应的吸附量分别为 $749.74 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. NZ-MAP 对溶液中 Pb^{2+} 的吸附量随 pH 的增大呈先增加后趋于平衡的趋势, 在不同 pH 条件下, 回收产物的组分和形貌有一定的差异.

(2) 通过对回收产物进行 XRD 和 SEM 分析, NZ-MAP 对溶液中 Pb^{2+} 的去除主要是通过生成 $Pb_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ 沉淀的方式达到去除效果.

(3) 共存重金属离子对 NZ-MAP 去除溶液中 Pb^{2+} 的影响从大到小排列依次是 Al^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} , 同时不同共存重金属离子对其回收产物的组分和形貌有一定的影响.

参考文献:

- [1] 孙伟锋, 肖迪. 水体重金属污染现状及治理技术[J]. 能源与节能, 2012, (2): 49-50.
Sun W F, Xiao D. Status and control technology of heavy metal pollution[J]. Energy and Energy Conservation, 2012, (2): 49-50.
- [2] 于晓莉, 刘强. 水体重金属污染及其对人体健康影响的研究[J]. 绿色科技, 2011, (10): 123-126.
Yu X L, Liu Q. Research status of heavy metal pollution in waters and its effects on human health[J]. Journal of Green Science and Technology, 2011, (10): 123-126.
- [3] 王小丹, 铁绍龙. 纳米氧化锌的性能及其在涂料中的应用[J]. 电镀与涂饰, 2005, 24(3): 27-30.
Wang X D, Tie S L. Performance of nano-ZnO and its applications in coatings[J]. Electroplating & Finishing, 2005, 24(3): 27-30.
- [4] 朱一民, 王忠安, 苏秀娟, 等. 钙基膨润土对水相中铜离子的吸附[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(1): 99-102.
Zhu Y M, Wang Z A, Su X J, et al. Adsorption of Cu^{2+} by Ca-bentonite in wastewater[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2006, 27(1): 99-102.
- [5] 孟霞, 张旭东, 田燕, 等. 纳米材料在涂料中的应用[J]. 山东化工, 2004, 33(3): 19-21.
Meng X, Zhang X D, Tian Y, et al. Application of nanomaterials in coatings industry[J]. Shandong Chemical Industry, 2004, 33(3): 19-21.
- [6] Afkhami A, Saber-Tehrani M, Bagheri H. Simultaneous removal of heavy-metal ions in wastewater samples using nano-alumina modified with 2, 4-dinitrophenylhydrazine [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1-3): 836-844.
- [7] 钟常明, 方夕辉, 许振良. 膜技术及其组合工艺在重金属废水中的应用[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(1): 44-48.
Zhong C M, Fang X H, Xu Z L. Membrane technology and its application in heavy metal wastewater treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(8): 44-48.
- [8] 马楠, 刘华波, 谢鑫源. 天然矿物负载 Fe/Co 催化 H_2O_2 氧化降解阳离子红 3R[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 576-583.
Ma N, Liu H B, Xie X Y. Oxidation of cationic red 3R in water with H_2O_2 catalyzed by mineral loaded with Fe/Co [J]. Environmental Science, 2015, 36(2): 576-583.

- [9] 黄万联. 试论电镀废水处理工艺[J]. 科技与企业, 2012, (10): 107-108.
- [10] Park J H, Bolan N, Megharaj M, *et al.* Comparative value of phosphate sources on the immobilization of lead, and leaching of lead and phosphorus in lead contaminated soils [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(4): 853-860.
- [11] Huang H M, Xu C L, Zhang W. Removal of nutrients from piggery wastewater using struvite precipitation and pyrogenation technology[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2523-2528.
- [12] 刘羽, 彭明生. 磷灰石在废水治理中的应用[J]. 安全与环境学报, 2001, **1**(1): 9-12.
Liu Y, Peng M S. Applications of mineral apatites in the treatment of waste water[J]. Journal of Safety and Environment, 2001, **1**(1): 9-12.
- [13] Feng Y, Gong J L, Zeng G M, *et al.* Adsorption of Cd (II) and Zn (II) from aqueous solutions using magnetic hydroxyapatite nanoparticles as adsorbents[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, **162**(2): 487-494.
- [14] 成雪君, 王学江, 王浩, 等. 载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5139-5145.
Cheng X J, Wang X J, Wang H, *et al.* Simultaneous recovery of nutrients from wastewater by mesoporous MgO-loaded natural zeolite[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5139-5145.
- [15] Mier M V, Callejas R L, Gehr R, *et al.* Heavy metal removal with mexican clinoptilolite: multi-component ionic exchange [J]. Water Research, 2001, **35**(2): 373-378.
- [16] Demirbas A. Adsorption of lead and cadmium ions in aqueous solutions onto modified lignin from alkali glycerol delignification [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, **109**(1-3): 221-226.
- [17] Ganzagh M A A, Yousefpour M, Taherian Z, *et al.* The removal of mercury (II) from water by Ag supported on nanomesoporous silica[J]. Journal of Chemical Biology, 2016, **9**(4): 127-142.
- [18] Ho Y S. Effect of pH on lead removal from water using tree fern as the sorbent [J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(11): 1292-1296.
- [19] Han R P, Lu Z, Zou W H, *et al.* Removal of copper(II) and lead(II) from aqueous solution by manganese oxide coated sand: II. Equilibrium study and competitive adsorption[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **137**(1): 480-488.
- [20] 周莹, 潘纲, 陈源. 土壤原位覆盖对底泥的修复作用研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(11): 2459-2463.
Zhou Y, Pan G, Chen H. Effect of in-situ capping on contaminated sediment remediation using local soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(11): 2459-2463.
- [21] Hamidian A H, Atashgahi M, Khorasani N. Phytoremediation of heavy metals (Cd, Pb and V) in gas refinery wastewater using common reed (*Phragmites australis*) [J]. International Journal of Aquatic Biology, 2014, **2**(1): 29-35.
- [22] Wang H, Wang X J, Ma J X, *et al.* Removal of cadmium (II) from aqueous solution: a comparative study of raw attapulgite clay and a reusable waste-struvite/attapulgite obtained from nutrient-rich wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **329**: 66-76.
- [23] 周平, 黄汝常, 李永辉, 等. 去除废水中重金属离子的新工艺研究[J]. 中国给水排水, 2015, **14**(4): 17-20.
Zhou P, Huang R C, Li Y H, *et al.* Study of a novel process for removal of heavy metals from industrial wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2015, **14**(4): 17-20.
- [24] 蒲文斌. 给水深度处理技术在城市水厂中的应用[J]. 建材与装饰, 2017, (2): 266-267.
- [25] Wang H, Wang X J, Chen J, *et al.* Recovery of nutrients from wastewater by a $MgCl_2$ modified zeolite and their reuse as an amendment for Cu and Pb immobilization in soil [J]. RSC Advances, 2016, **6**(61): 55809-55818.

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)