

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征	王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)
北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响	闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)
不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征	方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)
大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价	王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)
2014年6月南京大气复合污染观测	郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)
嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征	王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)
应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法	田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)
福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析	张千湖,高兵,黄葳,颜晓妹,崔胜辉(3610)
珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价	蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)
贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响	谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)
东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价	刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)
基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析	刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)
太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析	连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)
黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征	赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)
三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征	黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)
网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化	沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)
高地下水位地区透水停车场的水文控制效果	金建荣,李田,王圣思,陈子隽,周佳雯(3689)
北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征	于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)
垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征	肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)
潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性	李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)
滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响	臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)
高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征	刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)
活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制	苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)
石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能	王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)
电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制	张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)
黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制	周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)
双氧水协同生化法强化处理印染废水	岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)
基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制	吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)
利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器	高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)
零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施	张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)
低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析	马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)
市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析	刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)
高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析	孟婷,杨宏(3816)
两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征	张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)
生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响	周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)
江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素	江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)
碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响	俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)
黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性	冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)
有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响	费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)
酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)
陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力	王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)
甘肃白银东大沟铅锌铜复合污染场地水泥固化稳定化原位修复	吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)
设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价	金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)
镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响	常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)
秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响	段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)
<i>Pantoea</i> sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化	张林,卢金锁(3937)
生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性	王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)
浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制	陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)
灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用	于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)
污泥生物炭制备吸附陶粒	李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)
石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能	黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)
《环境科学》征稿简则(3859)	
《环境科学》征订启事(3952)	
信息(3644, 3688, 3768)	

灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用

于胜楠, 李勇, 李大鹏*, 黄勇

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要: 研究了不同投加方式下(混匀和覆盖)灼烧净水污泥对外源磷的累积吸附效果, 以及吸附外源磷后底泥等温吸附效果和厌氧条件下内源磷释放情况。结果表明, 混匀和覆盖条件下, 底泥对上覆水中磷的累积吸附量分别为 11.496 mg 和 11.042 mg, 明显高于对照实验(7.219 mg)。通过对吸附外源磷后的底泥进行等温吸附实验, 发现混匀条件和覆盖条件下磷最大吸附量($S_{\max}$)均有所增加, 并且前者($7.795 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)要高于后者($6.807 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 但磷平衡浓度(EPC_0)前者($0.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)却明显大于后者($0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 表明混匀条件下内源磷更容易释放。在厌氧环境下, 混匀方式内源磷释放量仅为 0.93 mg, 不仅低于覆盖(1.49 mg), 也明显低于对照实验(7.76 mg)。覆盖条件下比释放速率的平均值(0.006 14)大于混匀(0.003 96), 并均低于对照实验。这说明混匀对内源磷的持留能力更强。暗示了单纯用 EPC_0 值来评价底泥对磷的固定能力是不妥的。

关键词: 灼烧; 净水污泥; 混匀; 覆盖; 等温吸附; 厌氧

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3962-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612271

External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge

YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng*, HUANG Yong

(School of Environmental Science and Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215009, China)

Abstract: The cumulative adsorption of external phosphorus (P) by water purification sludge after ignition under different addition methods (mix and cover) was investigated along with the adsorption isotherm and the release of internal P after external P adsorption. The cumulative adsorption of external P was 11.496 mg (mix) and 11.042 mg (cover) and these values were higher than those in the control (7.219 mg). The maximum sorption capacity ($S_{\max}$) increased under the mix and cover and the former ($7.795 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) was higher than the latter ($6.807 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$). However, the zero equilibrium P concentration (EPC_0) in the mix was $0.83 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, higher than that in the cover ($0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). The result suggests that the internal P was easily released in the mix method, compared to the cover method. Under anaerobic conditions, the release of the internal P was 0.93 mg in the mix, lower than that in the cover (1.49 mg) and in the control (7.76 mg). In addition, the specific release rate in the cover method was 0.006 14 (mean), higher than that (0.003 96) in the mix method. Noticeably, these data were lower than those in the control, indicating that the retention of P under the mix method was higher, compared to the cover and the control and it is challenging to evaluate the P retention with EPC_0 .

Key words: ignition; water purification sludge; mix; cover; isothermal adsorption; anaerobic

磷是造成湖泊富营养化的关键限制性因子^[1~4], 外源磷进入湖泊水体会通过各种作用沉积于底泥中, 外界环境条件的改变会使沉积于底泥中的磷释放出来, 成为湖泊水体中磷的内源^[5~8], 因此对于地表水体而言, 如何控制内源磷释放愈加引起关注。

覆盖法作为受到国内外重视的底泥内源磷控制技术, 是指将清洁物质放置于污染的底泥上面以有效地控制底泥对上覆水体影响的技术。其目的是: ①物理性地分开污染底泥和底栖环境; ②使污染底泥固定, 阻止底泥的再悬浮和迁移; ③降低进入上覆水体的溶解性底泥污染物的释放通量, 进而达到抑制内源磷释放的目的^[9~12]。覆盖技术因其简单、经济、起效快而得到广泛应用。但是覆盖效果与覆

盖材料粒径密切相关, 而覆盖材料粒径越小, 则导致覆盖层下厌氧愈加严重, 从而对底泥微环境、生态系统产生影响。如厌氧下释放的磷被大量累积在间隙水中, 一旦覆盖层因扰动破坏, 将致使间隙水中的磷加快进入上覆水。因此, 也有学者采用将覆盖材料与表层底泥混匀的方式来控制内源磷释放。张亚雷等^[13]在研究 CaO_2 混匀对内源磷释放的影响中发现, 实验初期, 混匀抑制了内源磷释放, 但后期则大

收稿日期: 2016-12-31; 修订日期: 2017-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278523); 江苏省“六大人才高峰”项目(2013-JNHB-022); 水处理技术与材料协同创新中心项目

作者简介: 于胜楠(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为净水污泥资源化利用及水体修复, E-mail: shengnanyucqu@163.com

* 通信作者, E-mail: ustslp@163.com

量释放.其认为主要原因是 CaO_2 混匀致使微生物大量生长导致底泥重新厌氧所致.这种情况在其他覆盖材料中是否出现尚无定论.此外,在以往有关覆盖效果研究中,主要关注了覆盖材料对磷的吸附能力,而对被吸附磷的去向和再次释放能力等方面的研究关注甚少.

净水污泥是自来水厂净化过程中产生的固体废弃物,主要成分为原水中的悬浮物、溶解状胶体、淤泥、有机物和残留的净水药剂等^[14].由于给水厂中广泛应用硫酸铝、聚合氯化铝等作为水处理混凝剂,因此污泥中铝的含量较高,污泥固体中含铝率为 15% ~ 40%^[15].净水污泥在灼烧过程中所含有的铝、铁元素会生成相应的金属氧化物,可进一步提高污泥的吸附效果,而且通过灼烧去除有机质,避免有机质对水体的影响^[16~19].基于此,本研究以净水污泥为原材料对其进行灼烧改性,对比其采用覆盖和混匀这两种方式对外源磷的累积吸附能力,并采用 Langmuir 方程评价了底泥对磷的持续吸附能力,通过磷形态分析以及极端厌氧下磷释放效果评价磷持留能力,以期净水污泥资源化用于水体内源磷控制提供理论依据与数据支持.

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用底泥及上覆水于 2016 年 7 月采自于苏州城区学士河 ($\text{N}31^\circ18'26.96''$, $\text{E}120^\circ36'27.10''$).利用大口径柱状采样器 (Rigo Co. 直径 110 mm 高 500 mm) 采取无扰动柱状水样和泥样,并现场切得表层 5 cm 的沉积物样品,立即用冰盒保存 (4°C) 送至实验室,将采集的沉积物过 60 目筛,对筛过的底泥进行充分混匀,同时取采样点上覆水 50 L 备用.

上覆水 $\text{pH} = 6.98$, 溶解氧质量浓度为 $2.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总磷 (TP) 质量浓度为 $0.599 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.底泥含水率为 58.39%, 烧失率 5.98%, SiO_2 质量分数为 51.34%, Al_2O_3 质量分数为 13.45%, CaO 质量分数为 10.58%, Fe_3O_2 质量分数为 6.34%.实验所用净水污泥为苏南某净水厂压滤后污泥,含水率为 62.56%, 烧失率 6.31%, SiO_2 质量分数为 44.60%, Al_2O_3 质量分数为 23.87%, CaO 质量分数为 11.83%, Fe_3O_2 质量分数为 8.13%.灼烧后净水污泥 SiO_2 质量分数为 52.68%, Al_2O_3 质量分数为 23.83%, CaO 质量分数为 11.97%, Fe_3O_2 质量分数为 9.10%.

1.2 样品制备

净水污泥经过干燥、磨碎、过 100 目筛网后备用.污泥灼烧在恒温条件 (550°C) 下进行,首先放入盛装一定量净水污泥样品的坩埚,然后将马福炉设定在固定温度 550°C ,灼烧 2.5 h 后取出并冷却,放入干燥器中备用.

1.3 底泥磷吸附实验

3 个自制圆形单元培养管作为实验反应装置 (如图 1), 培养管材料为有机玻璃 (长 40 cm, 内径 20 cm), 用对应大小橡胶塞密封住底部; 管壁垂直方向上预制孔径为 2 mm 的小孔, 用于安装荷兰 Rhizon 公司生产的间隙水采样器 (Rhizon core solution sampler), 安装前先用软胶封住小孔.同时将采集的河道沉积物通过 60 目金属筛以除去其中的底栖生物和大颗粒物, 之后混匀装入培养管中.在培养管中以不同方式加入灼烧后的净水污泥, E1 是 350 g 净水污泥混匀于上层 5 cm 的沉积物中, 沉积物的高度是 10 cm, E2 是 350 g 净水污泥覆盖在 10 cm 的沉积物上, 约 1 cm 厚度, E3 是空白样.

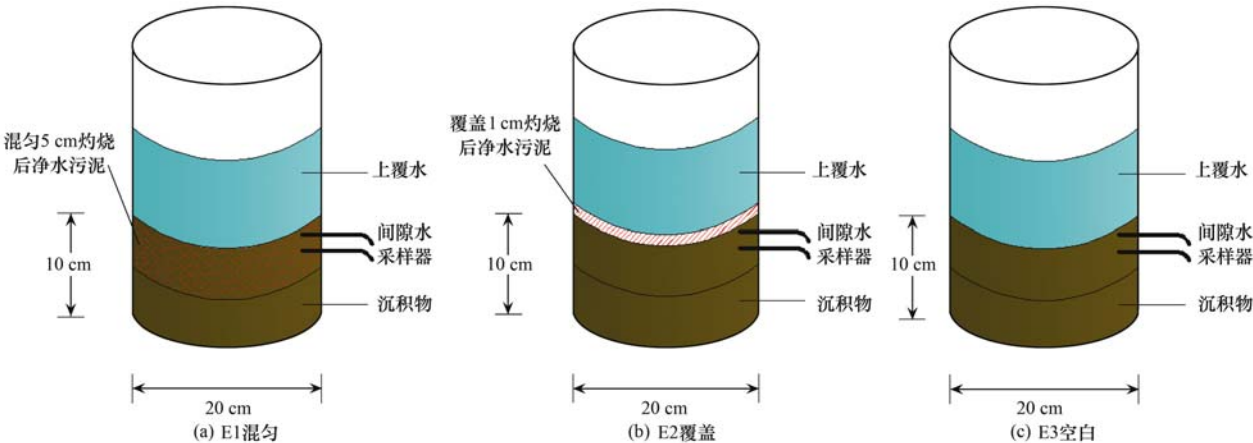


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Experimental design

用切片将 3 个有机玻璃容器中底泥-水界面切成完全平整,将滤后的河道上覆水虹吸到底泥上,尽量避免扰动表层底泥.在底部增加橡胶塞用于调整泥样柱的位置,使两个采样孔分别处于泥-水界面以下 1.5 cm 和 2.5 cm 处采集底泥 1~2 cm 和 2~3 cm 段的间隙水,将 Rhizon 间隙水采样管水平插入培养管壁上选定的两个小孔中,同时注意保证密封,在自然环境下放置.

实验从第 0 d 开始,每天同一时间采集水面以下 5 cm 处水样 40 mL.采集水样后立即向容器中补充等量河水,再用一级水对蒸发水量进行补充.每次采集完水样,河水中均加入 1 mL 的 $1.25 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 溶液,目的是模拟外源磷的加入.间隙水 DIP(溶解性磷酸盐)取样时,用 2 mL 注射器抽取 1 mL 间隙水,每隔 3 d 采集一次.该实验共进行 30 d.

1.4 厌氧释放实验

灼烧净水污泥的磷吸附实验结束后,用虹吸法取出上覆水,并小心抽出间隙水采样器,立即用软胶带封住管壁小孔保持密封.用 2 根直径 8.4 cm 有机玻璃管垂直插入底泥中,从下方顶出橡胶塞,然后立即用橡胶塞将 2 根有机玻璃管密封.取出的 2 管底泥,一个缓慢加入 500 mL 一级水,用于厌氧释放实验;另一个用特定器材将底部上顶,切取上层 5 cm 底泥测定各指标及进行等温吸附实验.

厌氧释放实验的培养管上部用橡胶塞塞住,橡胶塞上有 3 根管,一根通向泥水界面,用于取水和进水,一根没入上覆水中,用于进氮气,另一根用于出氮气(如图 2).每天用虹吸的方式从进水管中取出所有上覆水,测其 DIP,算出 1 d 内底泥的释放量.然后缓慢地从进水管中加入一级水 500 mL,从进气口通入足量氮气后,堵住出气口,保证厌氧环境.每天重复上述操作,实验进行 20 d.

1.5 等温吸附实验

将磷吸附实验结束后取出的各上层底泥烘干后进行等温吸附实验.配置不同浓度的 KH_2PO_4 溶液(0、0.05、0.10、0.20、0.40、1.00、2.00、4.00、10.00、20.00、50.00、80.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),浓度以 P 计.将 0.5 g 不同底泥和 50 mL 不同浓度 KH_2PO_4 溶液分别加入到 100 mL 锥形瓶中,然后放入水浴恒温振荡器中,在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下,振荡至吸附平衡状态(24 h),取上清液离心($3500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 20 min),经 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜抽滤,测定平衡时的溶解性磷酸盐(DIP)浓度,根据初始磷浓度和平衡时的

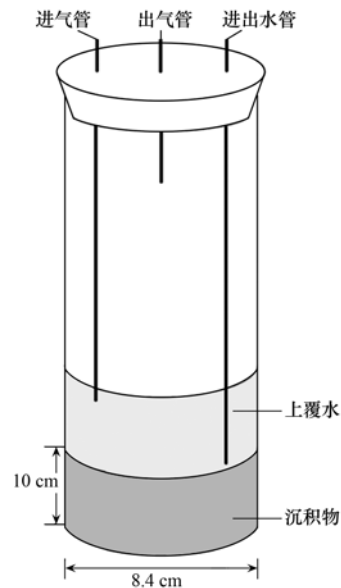


图 2 厌氧释放实验所用单元培养管构造

Fig. 2 Anaerobic experiment incubation tube

磷浓度之差,计算出底泥吸附的 DIP 量.

采用交叉型 Langmuir 模型^[20]对等温吸附实验数据进行拟合.

底泥磷平衡浓度(EPC_0)是指底泥表面对溶液中磷没有吸附,同时也没有磷从底泥表面解吸下来,此时溶液中溶解性磷酸盐的浓度,计算公式如下:

$$\text{EPC}_0 = \frac{S_0}{K \times S_{\max} - K \times S_0}$$

磷饱和度 DPS(%) 可以通过 $S_{\max}$ 和 S_0 计算,公式如下:

$$\text{DPS} = \frac{S_0}{S_{\max}} \times 100\%$$

式中, $S_{\max}$: 磷吸附最大值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); K : 键能常数 ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$); EPC_0 : 磷平衡浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); S_0 : 初始状态下吸附的磷量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.6 样品分析方法

上覆水中溶解氧(DO)和 pH 值分别通过便携式溶解氧测定仪(HQ30d)和数显 pH 计(pHs-3TC)测定.

含水率为 105°C 烘干 12 h 的质量损失,烧失量(LOI)为 105°C 烘干底泥在 550°C 灼烧 2.5 h 的质量损失.

TP: 将水样消解后,采用钼锑抗分光光度法测定(美国 HACH DR2800 分光光度计); DIP: 将水样经过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后用钼锑抗分光光度法测定.

2 结果与讨论

2.1 灼烧净水污泥的加入方式对底泥吸附磷的影响

不同方式投加的净水污泥对底泥中磷存在某些性质的改变,对外源磷的持续吸收能力有影响(如图3).

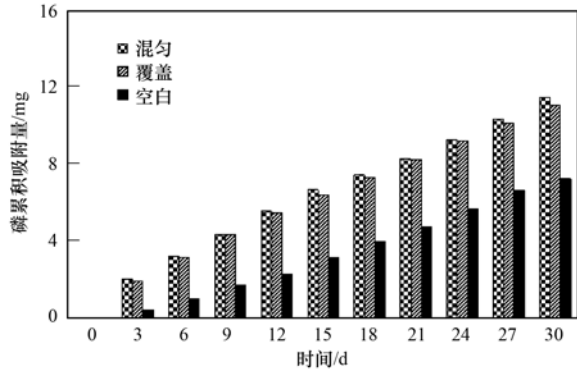


图3 灼烧净水污泥的加入方式对底泥吸附磷的影响

Fig. 3 Phosphorus adsorption by sediments in different addition methods of IWPS

从图3可以看出,随着时间的推移,混匀和覆盖条件下底泥对磷的累积吸附量一直增加,且远高于空白实验,并且混匀条件下的累积吸附量一直处于高于覆盖的水平.实验结束时,混匀的吸附量(11.496 mg)略多于覆盖(11.042 mg),但都明显高于空白实验(7.219 mg).这是因为:净水厂在工艺中使用了铝系无机混凝剂,故而污泥中含有较多的铝、铁成分.污泥所含有的铝、铁元素在灼烧过程中会生成相应的金属氧化物,可进一步提高对磷的吸附效果.

底泥在覆盖和混匀灼烧净水污泥后,都能很好地增加底泥对外源磷的吸附能力.从总的吸附量来看,混匀和覆盖的吸附量相差不多,并不能判断究竟是混匀的效果好还是覆盖的效果好.但是从吸附量的增加趋势来看,并不是这样,将3组数据分别用Liner模型($y = kx + b$, k 为斜率, b 为截距)拟合,得到的数据见表1.

表1 净水污泥磷Liner吸附模型参数

Table 1 Liner parameters for phosphorus on sediments by water purification sludge

项目	<i>k</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
混匀	0.360	0.835	0.990
覆盖	0.348	1.044	0.982
空白	0.251	-0.421	0.992

3组数据经过拟合, R^2 均高于0.98,说明用线性模型来描述底泥对磷的累积吸附量,匹配度较高.

从表1可以看出,混匀条件的 k 值是0.360,高于覆盖的0.348,这说明随着时间的增加,混匀的累积吸附量与覆盖的差值将越来越大,吸附效果将会越来越好.因此,通过混匀的方式加入灼烧净水污泥,可以很大程度地提高底泥对磷的累积吸附能力.这主要是由于混匀和覆盖条件下孔隙度不同,导致溶解氧下渗能力不同.前者,将350 g灼烧净水污泥(过100目筛网)均匀混入表层5 cm底泥(过60目筛网),致使粒径以60目的底泥为主;而将同样质量的灼烧净水污泥(过100目筛网)覆盖于底泥上(厚度为1 cm),则粒径以100目的灼烧净水污泥为主,随着粒径减小,孔隙度急剧降低^[21],并大幅度削弱溶解氧下渗能力.因此,在覆盖层下更易形成厌氧环境.林建伟等^[22,23]的研究也发现对底泥修复材料而言,粒径大小影响铁铝化合物与磷通过表面吸附或形成不溶络合物沉降的速率,进而影响磷的吸附能力.

2.2 吸附磷之后底泥的等温吸附曲线

底泥以不同方式加入灼烧净水污泥,在经过30 d的外源磷吸附实验后,再次考察底泥对磷的等温吸附效果,发现其对磷的等温吸附量有明显差异(如图4).

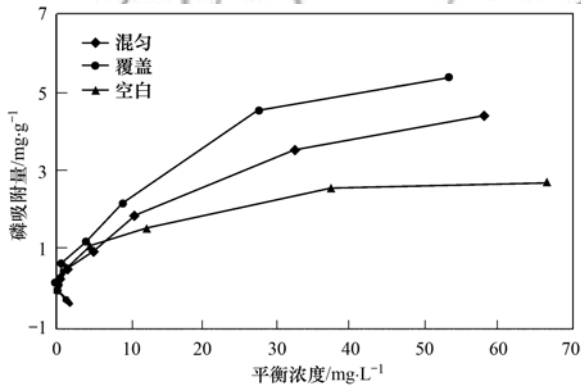


图4 净水污泥以不同方式吸附磷之后底泥的等温吸附曲线

Fig. 4 Sorption isotherm for phosphorus on sediments in different addition methods of IWPS

从图4中可以看出,混匀条件下底泥对磷的吸附能力明显高于覆盖,且都高于空白实验.说明灼烧净水污泥与底泥混匀后,因灼烧净水污泥与底泥的接触几率增加,明显改变了原底泥的物理化学性质以及部分结构特性,所以导致混匀条件下,底泥仍保存了数量众多的吸附点.与混匀相比,在覆盖条件下,灼烧净水污泥仅覆盖在表层,所以灼烧净水污泥与原底泥的接触几率偏小,导致其对原底泥的改造效果较差,致使吸附外源磷后的底泥对磷的

等温吸附效果变差.

采用交叉型 Langmuir 等温吸附模型对图 4 数据进行了拟合得到模型参数(表 2), 包括 S_0 : 初始状态下吸附的磷量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$); S_{max} : 磷吸附最大值 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$); K : 键能常数 ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$); EPC_0 : 底泥磷

平衡浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); DPS : 磷饱和浓度 (%) 参照 Li 等^[24] 的计算方法,从表 2 中可以看出, 回归系数 R^2 的值均高于 0.95, 说明 Langmuir 吸附曲线可以很好地拟合磷吸附曲线, 因此用 Langmuir 吸附曲线拟合出的参数具有参考意义.

表 2 不同投加方式净水污泥磷 Langmuir 吸附模型参数

Table 2 Langmuir parameters for phosphorus on sediments by water purification sludge in different addition methods						
实验	S_0 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	S_{max} / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	K / $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	EPC_0 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{DPS}/\%$	R_2
混匀	0.285	7.795	0.046	0.83	3.66%	0.979
覆盖	0.154	6.807	0.036	0.64	2.26%	0.978
空白	0.077	3.070	0.028	0.91	2.49%	0.987

从表 2 可以看出, 混匀条件下底泥的 S_{max} 值 ($7.795 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 相比于覆盖 ($6.807 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 更大, 但两者明显大于空白样的 S_{max} 值 ($3.070 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$). 这说明不管以何种方式在底泥中加入灼烧净水污泥, 都会提高底泥对磷的吸附容量. 其原因是净水污泥含有丰富的铝、铁等化合物以及腐殖质、有机质和硅酸盐等物质, 而灼烧又能提高单位质量污泥中金属氧化物的含量, 去除有机质后可以增加比表面积以及表面的活性吸附点位, 从而使投加净水污泥后的底泥具有较高的 K 值, 而 K 值越高说明底泥对磷的持留能力越高^[25], 所以对磷的吸附效果较为显著.

初始状态下吸附的磷量 (S_0) 可以表明外源磷在底泥中形成易交换态磷的程度^[26], 其中易交换态磷 (NAP) 主要是指被沉积物中活性氧化物等颗粒表面吸附或共沉淀的磷^[27]. 混匀条件下 S_0 值 ($0.285 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 是空白实验 S_0 值 ($0.077 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 的 3.7 倍, 而覆盖条件下 S_0 值 ($0.154 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 是空白实验 S_0 值的 2.0 倍. 说明通过投加相同质量的净水污泥, 混匀条件下大部分外源磷在底泥中形成了易交换态磷, 且效果优于覆盖.

底泥磷平衡浓度 (EPC_0) 可以反映底泥/水系统中磷的迁移方向^[28,29], 较低的 EPC_0 可以体现出底泥对磷的持留能力. 与空白样相比, 覆盖和混匀的 EPC_0 均有降低. 因为混匀更容易对原底泥的物理化学性质以及结构特性进行改造, 导致原底泥对磷的吸附容量和持留能力增加, 因此, 预测 EPC_0 会明显低于覆盖, 但实验结果却恰恰相反. 原因可能是: 等温吸附实验是将覆盖层与下层底泥混合后进行实验, EPC_0 值反映的是覆盖层与下层底泥都达到最大吸附量时的吸附平衡的理论值, 但是在实际实验中, 下层底泥因为溶解氧水平较低, 吸附情况是不

可知的. 从初始浓度值 S_0 可以看出, 在同等泥量和吸收的外源磷也几乎相等的情况下, 混匀方式的底泥 S_0 值为 $0.285 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 而覆盖方式的 S_0 值为 $0.154 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 仅有混匀方式的 54%, 由此说明, 覆盖方式中外源磷进入到底泥中, 可能更多地存在于底泥的间隙水中, 而不是被底泥所吸附. 而较大的 S_0 值会使得 EPC_0 值升高. 因此, 在底泥微环境不同的情况下, 单纯地用 EPC_0 值来反映底泥对磷的固定和持留能力是不妥的. 在后继研究中, 可以分层对底泥进行等温吸附实验, 以研究覆盖层和下层底泥对磷的不同吸附效果.

磷饱和度 $\text{DPS}(\%)$ 被定义为底泥吸附的磷占底泥磷最大吸附容量的百分比^[24]. 磷饱和度通常与水体外源磷负荷和底泥内部 Ox-Al 、 Ox-Fe 含量有关^[27]. 混匀投加方式的磷饱和度 (3.66%) 相比于覆盖方式的 DPS 值 (2.26%) 略高. 这与这两种投加方式有关, 从而导致铁铝氧化物与底泥的单位接触面积不同.

2.3 厌氧条件下不同底泥磷的释放效果

经过 30 d 底泥对磷的吸附后, 将底泥在厌氧环境下培养, 磷的累积释放量如图 5 所示.

由图 5 可以看出: 空白样对于磷的持留能力最弱, 在第 20 d, 磷的释放量达到了 7.76 mg, 在前期的吸附实验中, 空白样底泥吸收的外源磷总量是 7.219 mg, 这说明不仅吸收的外源磷没有被持留, 原底泥中的磷也被释放出来. 对于覆盖和混匀实验, 20 d 的释放量分别仅有 1.49 mg 和 0.93 mg, 外源磷的吸附量分别为 11.042 mg 和 11.496 mg, 外源磷的释放率分别为 13.5% 和 8.1%. 原因有二: ① 覆盖实验中与上覆水接触的是 350 g 灼烧底泥 (厚度 1 cm), 都是经过 100 目筛网, 粒径基本一致, 覆盖层致密性好, 导致内源磷进入上覆水的渠

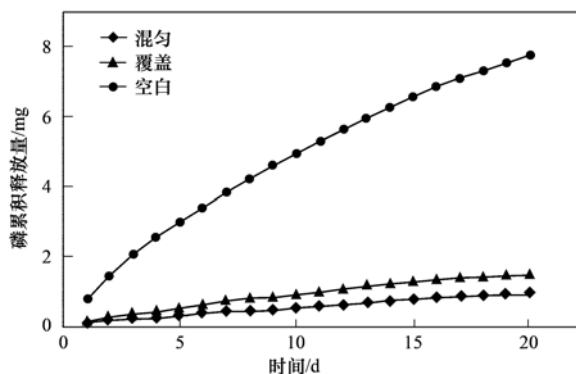


图5 厌氧状态下底泥磷的累积释放量

Fig. 5 Accumulative release amount of phosphate without oxygen

道受阻, 相反, 将灼烧净水污泥(过 100 目筛网)均匀混入表层 5 cm 底泥(过 60 目筛网), 致使粒径以 60 目的底泥为主, 导致颗粒间孔隙率较大, 释放的内源磷相比较更容易进入水体. ② 灼烧净水污泥中含有大量铁铝等金属氧化物, 对吸附磷的固定能力要明显强于空白实验.

对比覆盖和混匀发现其在 20 d 时内源磷的释放量分别为 1.49 mg 和 0.93 mg, 两者相差不多. 但是, 如果考虑到实际的投加方式, 则会发现两者对磷的持留能力明显不同. 混匀条件下有大量原底泥直接与上覆水接触, 而覆盖则无任何原底泥与上覆水接触, 并且, 由于覆盖条件下净水污泥的致密性较好, 所以覆盖层下的磷很难释放至上覆水. 因此, 如果参照空白实验的释放量, 那么混匀条件下, 理论上的释放量要远大于 0.93 mg. 但事实上没有, 原因在于加入的灼烧净水污泥对原底泥某些物理化学性质有所改变, 如颗粒的比表面积. 原底泥的晶体结构表面光滑, 粗糙程度较低, 且絮状程度不明显^[30], 而灼烧后的净水污泥晶体结构遭到破坏, 表面粗糙程度较高, 孔隙发达且孔径分布广泛, 絮状程度高, 这使得灼烧后的净水污泥具有比较大的比表面积. 而且灼烧的净水污泥具有氧化性, 里面的部分成分除了能通过范德华力和静电力使磷被结合在颗粒物表面形成弱吸附态磷外, 也会通过化学键的结合而形成其它形态磷. 这说明加入灼烧净水污泥不仅能提高底泥对磷的吸附容量, 且其对底泥的微环境进行了改造, 从而提高了对磷的持留能力.

底泥的比释放速率也可以用来描述底泥对磷的持留能力(如图 6).

从图 6 中可以看出空白组的比释放速率远远高于覆盖和混匀实验, 在实验进行到第 20 d 时空白实验的比释放速率(0.029 3) 远大于覆盖(0.002 78)

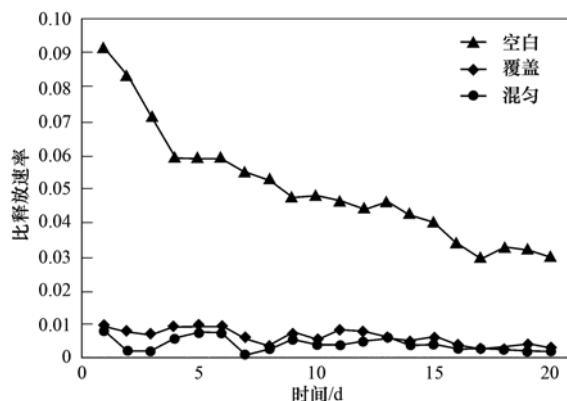


图6 厌氧状态下不同投加方式底泥磷的比释放速率

Fig. 6 Specific release rate of phosphate by sediment without oxygen in different addition methods

和混匀(0.002 02). 而且覆盖条件下比释放速率的平均值(0.006 14) 整体上大于混匀(0.003 96). 从图 6 中也可以看出, 同样是加入了灼烧的净水污泥, 混匀方式的底泥对磷的持留能力要好于覆盖方式, 其原因是: 虽然灼烧后的净水污泥对磷有很好的吸附作用, 但仅仅是表层的覆盖, 并未对下层底泥起到改善作用, 并且覆盖层阻止溶解氧进入到下层底泥中, 造成下层底泥的厌氧状态, 厌氧状态会促使底泥中的磷由难释放态转化为易释放态, 甚至可能从底泥中释放到间隙水中. 因此, 覆盖实验吸附的外源磷可能更多的存在于间隙水中或者以易释放态的不稳定形式存在于下层底泥中, 当外界环境处于厌氧状态时, 底泥中本身存在一些钙磷在厌氧状态下被活化, 从而加大内源磷释放量. 而将灼烧净水污泥混匀在底泥中, 使得表层底泥的粒径并不一致, 从而不会对溶解氧渗透产生抑制作用. 此外, 以混匀方式投加的净水污泥由于含有较高含量的金属氧化物, 会对原底泥微环境进行改造, 如氧化还原电位等, 从而增加底泥中好氧体积的比例. 这有利于对磷的吸附和固定, 并促进磷由易释放态转化为难释放态. 因而, 磷更多地被吸附、固定在底泥上, 而不是仅仅停留在间隙水中. 因此, 在外环境处于厌氧状态时, 内源磷释放的速率明显低于覆盖实验.

3 结论

(1) 底泥分别以混匀和覆盖的方式加入灼烧净水污泥后, 对磷的累积吸附量分别增加至(11.496 mg 和 11.042 mg), 明显高于原底泥(7.219 mg).

(2) 底泥吸附外源磷后, 混匀条件下等温吸附效果仍优于覆盖. 混匀条件下 $S_{\max}$ 值最大, 为 7.795

$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 高于覆盖和空白, 但不能单纯用 EPC_0 值来反映底泥对磷的固定能力. 应考虑 K 值以及 S_0 来综合评价覆盖和混匀对底泥吸附磷的影响.

(3) 在厌氧环境下, 20d 内覆盖和混匀条件下磷释放量相比于空白 (7.76 mg) 分别仅有 1.49 mg 和 0.93 mg, 吸收的外源磷释放率为 13.5% 和 8.1%. 而考虑到比释放速率以及灼烧净水污泥的投加方式, 混匀对内生磷的持留能力还要更高.

参考文献:

- [1] 王忠威, 王圣瑞, 戴建军, 等. 洱海沉积物中磷的赋存形态[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(6): 652-658.
Wang Z W, Wang S R, Dai J J, *et al.* Fractions of phosphorus in sediments of Lake Erhai[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(6): 652-658.
- [2] 王琼, 卢聪, 范志平, 等. 辽河流域太子河流域 N、P 和叶绿素 a 浓度空间分布及富营养化[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 297-307.
Wang Q, Lu C, Fan Z P, *et al.* Eutrophication and spatial distribution of N, P and chlorophyll-a in the Taizihe River Basin, Liaoh River Catchment[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(2): 297-307.
- [3] 张雷, 曹伟, 马迎群, 等. 大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1677-1684.
Zhang L, Cao W, Ma Y Q, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in the tidal reach and estuary of the Daliao River and analysis of potential eutrophication[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1677-1684.
- [4] 林建伟, 王虹, 詹艳慧, 等. 氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 208-219.
Lin J W, Wang H, Zhan Y H, *et al.* Adsorption of phosphate by lanthanum hydroxide/natural zeolite composites from low concentration phosphate solution[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 208-219.
- [5] 王振华, 王圣瑞, 刘元英, 等. Fe 和 Al 对湖泊沉积物中磷赋存形态的影响[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(5): 556-562.
Wang Z H, Wang S R, Liu Y Y, *et al.* Effects of iron and aluminum on phosphorus fractions in lake sediments[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(5): 556-562.
- [6] 杨孟娟, 林建伟, 詹艳慧, 等. 铝和锆改性沸石对太湖底泥-水系统中溶解性磷酸盐的固定作用[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(11): 1351-1359.
Yang M J, Lin J W, Zhan Y H, *et al.* Immobilization of phosphate in Taihu Lake sediment-water systems using aluminum-modified zeolites and zirconium-modified zeolites as amendments[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(11): 1351-1359.
- [7] Kim L H, Choi E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments[J]. Chemosphere, 2003, **50**(1): 53-61.
- [8] Chau K W, Jin H S. Two-layered, 2D unsteady eutrophication model in boundary-fitted coordinate system[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, **45**(1-12): 300-310.
- [9] Palermo M R. Design considerations for *in-situ* capping of contaminated sediments[J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(6-7): 315-321.
- [10] Hart B, Roberts S, James R, *et al.* Use of active barriers to reduce eutrophication problems in urban lakes[J]. Water Science and Technology, 2003, **47**(7-8): 157-163.
- [11] 胡小贞, 金相灿, 卢少勇, 等. 湖泊底泥污染控制技术及其适用性探讨[J]. 中国工程科学, 2009, **11**(9): 28-33.
Hu X Z, Jin X C, Lu S Y, *et al.* Techniques for sediment pollution control and discussion on the applicability in lakes of China[J]. Engineering Sciences, 2009, **11**(9): 28-33.
- [12] 唐艳, 胡小贞, 卢少勇. 污染底泥原位覆盖技术综述[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(7): 1125-1128.
Tang Y, Hu X Z, Lu S Y. In situ capping technology for remediation of contaminated sediment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, **26**(7): 1125-1128.
- [13] 张亚雷, 章明, 李建华, 等. CaO_2 不同投加方式对底泥磷释放的抑制效果分析[J]. 环境科学, 2006, **27**(11): 2188-2193.
Zhang Y L, Zhang M, Li J H, *et al.* Effect on different adding means of calcium peroxide to control phosphorus release from sediment[J]. Environmental Science, 2006, **27**(11): 2188-2193.
- [14] 崔寒, 任新, 赵雪松, 等. 净水厂污泥在污水处理中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2015, **31**(6): 16-21.
Cui H, Ren X, Zhao X S, *et al.* Application of sludge from water purification plant to wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2015, **31**(6): 16-21.
- [15] Parsons S A, Daniels S J. The use of recovered coagulants in wastewater treatment[J]. Environmental Technology, 1999, **20**(9): 979-986.
- [16] 方晖, 张易培, 陈丁丁, 等. 净水厂聚合氯化铝铁污泥对污水中磷的吸附作用[J]. 工业用水与废水, 2013, **44**(3): 17-20.
Fang H, Zhang Y P, Chen D D, *et al.* Adsorption performance of PAFC sludge from water purification plant on phosphorus in sewage[J]. Industrial Water & Wastewater, 2013, **44**(3): 17-20.
- [17] Wang C H, Gao S J, Pei Y S, *et al.* Use of drinking water treatment residuals to control the internal phosphorus loading from lake sediments: laboratory scale investigation[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **225**: 93-99.
- [18] Ippolito J A, Barbarick K A, Elliott H A. Drinking water treatment residuals: a review of recent uses[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, **40**(1): 1-12.
- [19] Wang C H, Yuan N N, Pei Y S, *et al.* Aging of aluminum/iron-based drinking water treatment residuals in lake water and their association with phosphorus immobilization capability[J]. Journal of Environmental Management, 2015, **159**: 178-185.
- [20] Pan G, Krom M D, Herut B. Adsorption-desorption of phosphate on airborne dust and riverborne particulates in East Mediterranean seawater[J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(16): 3519-3524.
- [21] 李斗争. 组成成分及颗粒粒径对基质孔隙特性的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006. 1-77.
Li D Z. Study on effects of components and particle sizes on pore properties of media[D]. Tai'an: Shandong Agricultural

- University, 2006. 1-77.
- [22] 林建伟, 朱志良, 赵建夫. 天然沸石覆盖层控制底泥氮磷释放的影响因素[J]. 环境科学, 2006, **27**(5): 880-884.
Lin J W, Zhu Z L, Zhao J F. Influencing factor of natural zeolite barrier for controlling nitrogen and phosphorus release from sediments[J]. Environmental Science, 2006, **27**(5): 880-884.
- [23] 林建伟, 朱志良, 赵建夫, 等. 方解石活性覆盖系统抑制底泥磷释放的影响因素研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 121-126.
Li J W, Zhu Z L, Zhao J F, *et al.* Influencing factors of calcite active barrier system to control phosphorus release from sediments[J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 121-126.
- [24] Li W, Recknagel F. Balancing phosphorus adsorption and consumption processes in experimental treatment ponds for agricultural drainage water[J]. Ecological Engineering, 2006, **28**(1): 14-24.
- [25] 周爱民, 王东升, 汤鸿霄. 磷(P)在天然沉积物-水界面上的吸附[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(1): 64-69.
Zhou A M, Wang D S, Tang H X. Adsorption of phosphorus on sediment-water interface[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, **25**(1): 64-69.
- [26] 李大鹏, 黄勇, 袁砚, 等. 城市重污染河道底泥对外源磷的吸附和固定机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 96-101.
Li D P, Huang Y, Yuan Y, *et al.* Mechanism of phosphorus adsorption and immobility by sediments in inner-city heavily polluted canal[J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 96-101.
- [27] 许春雪, 袁建, 王亚平, 等. 沉积物中磷的赋存形态及磷形态顺序提取分析方法[J]. 岩矿测试, 2011, **30**(6): 785-794.
Xu C X, Yuan J, Wang Y P, *et al.* Speciation and release mechanism of phosphorus in sediments and analysis methods for sequential extraction[J]. Rock and Mineral Analysis, 2011, **30**(6): 785-794.
- [28] House W A, Denison F H. Factors influencing the measurement of equilibrium phosphate concentrations in river sediments[J]. Water Research, 2000, **34**(4): 1187-1200.
- [29] Lai D Y F, Lam K C. Phosphorus retention and release by sediments in the eutrophic Mai Po Marshes, Hong Kong[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, **57**(6-12): 349-356.
- [30] 程杨, 杨月红, 于珊珊, 等. 高温焙烧底泥吸附重金属 Mn^{2+} 和 Ni^{2+} 的动力学与热力学研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, **34**(7): 1850-1856.
Cheng Y, Yang Y H, Yu S S, *et al.* Kinetics and thermodynamics research of Mn^{2+} and Ni^{2+} adsorption heavy metals onto high temperature roasting sediment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, **34**(7): 1850-1856.



CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaying	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	 HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region	 FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles	 FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation	 JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH	 ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance	 HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)