

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

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

南京工业区分冬季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 刘静达,安俊琳,张玉欣,师远哲,林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 梁静舒,安俊琳,王红磊,张玉欣,王俊秀,施双双,王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 高元官,张凯,王体健,陈志明,耿红,孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 金梦云,邢新丽,柯艳萍,郑煌,胡天鹏,孙焰,丁洋,李绘,张泽洲,祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 段菁春,周雪明,张鹤丰,谭吉华,胡京南,柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 梁云平,张大伟,林安国,马召辉,邹晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 邵珠泽,郑国砥,王元刚,高定,朱彦莉,陈同斌,聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 姜理英,张迪,郭海倩,缪晶晶,陈怡伶,李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 武媛媛,李如梅,彭林,端允,王海京,李颖慧,白慧玲,牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例 姚静波,王明新,齐今笛,孙向武,张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 董小芳,邓黄月,张杰,朱志鹏,王琳,郑祥民,周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 张允华,楼狄明,谭丕强,胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 张秋秋,潘申龄,刘伟,张昱,安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 王阳,徐明芳,耿梦梦,黎明,陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,赵晓辉,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 孙语嫣,白莹,苏荣国,石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 肖骁,何小松,高如泰,席北斗,张慧,黄彩红,李丹,袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 李立青,胡楠,刘雨情,涂声亮,陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华 (1889)

NO₃⁻-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 姜应和,李瑶,张莹,张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 李薛晓,程思超,方舟,李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 丁为俊,于立亮,陈杰,成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 刘海龙,付晶森,郭雪峰,柴建恬,张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 徐丽梅,张崇森,王晓昌,吉铮,周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 王星星,林建伟,詹艳慧,张志斌,邢云青,姜博汇,储鸣 (1936)

树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 陈家凯,聂广泽,刘志英,姚远,徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 朱培颖,李大鹏,于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 桑浪涛,石烜,张彤,付博文,金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 周林军,古文,刘济宁,石利利,徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 金鹏康,杨珍瑞,李蓉,李岩,周立辉 (1982)

Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 吕永涛,刘婷,曾玉莲,孙婷,张瑶,王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 李惠娟,彭党聪,陈国燕,王博,姚倩,卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 闰刚,徐乐中,沈耀良,吴鹏,张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 范军辉,郝瑞霞,朱晓霞,万京京,刘思远,王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 杨波,徐辉,冯修平,李方,田晴,马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 徐伟超,吴翠平,张玉秀,张琪,张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 万文结,薛芷筠,张泽文,何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 周同,于德爽,李津,吴国栋,王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 许晓毅,尤晓露,吕晨培,王斌,胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 曹知平,吴静,左剑恶,王晓璐,王翀,王广启,王凯军,钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 秦红,任庆水,杨文航,李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 田琳琳,朱波,汪涛,赵原,董宏伟,任光前,胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N₂O 排放的影响 伍延正,张苗苗,秦红灵,陈春兰,王娟,魏文学,李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N₂O 的排放特征 邹娟,胡学玉,张阳阳,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 熊瑛,王龙昌,杜娟,赵琳璐,周泉,张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 孙慧,郭治兴,郭颖,袁宇志,柴敏,毕如田,杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 张鹏岩,康国华,庞博,郭依,何坚坚,秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 王青清,蒋珍茂,王俊,魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 李秋言,赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 吴志娟,毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 王彤彤,马江波,曲东,张晓媛,郑纪勇,张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附特性 杜文慧,朱维琴,潘晓慧,沈旭阳,陈思远,陈可乐,坎吉汗·木沙拉,张杭君,丁颖 (2172)

C₃N₄/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 鲍玥,周旻昀,邹骏华,史宇滨,万先凯,史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响

朱培颖, 李大鹏*, 于胜楠

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要: 以灼烧净水污泥为研究对象, 探讨在其不同投加方式(混匀和覆盖)下, 各底泥对外源磷的吸附效果以及间隙水和底泥中各形态磷的数量分布。结果表明, 相比未灼烧净水污泥, 灼烧净水污泥对磷的吸附能力显著改善, 磷最大吸附量(S_{\max})提高了 43.7%、底泥磷平衡浓度(EPC_0)降低 69.1%、磷饱和度(DPS)降低 54.4%。混匀和覆盖对上覆水中磷消失的贡献率几乎一致, 但明显高于对照实验。但如果考虑灼烧净水污泥与上覆水的接触几率, 则混匀条件下, 单位净水污泥对磷的吸附量为覆盖条件下的 2.3 倍。覆盖条件下, 间隙水(1~2 cm)中溶解性磷酸盐浓度是混匀条件的 33.17 倍(平均值), 这主要源于覆盖导致溶解氧渗透深度明显降低。混匀条件下, 外源磷更易形成 Ca-P, 而覆盖条件下, 易释放的 NH_4Cl -P 和 Fe/Al-P 占比更多, 这暗示了混匀对底泥微环境的改造更有利于外源磷的吸附和内源磷的持留。

关键词: 净水污泥; 灼烧; 覆盖; 混匀; 间隙水; 磷形态

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1957-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201610120

Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms

ZHU Pei-ying, LI Da-peng*, YU Sheng-nan

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

Abstract: The adsorption of external phosphorus (P) and the distribution of dissolved inorganic P (DIP) in the sediment interstitial water and sedimentary P forms were researched under the ignited water purification sludge (IWPS) addition (mixing and capping). The results showed that the adsorption ability of the IWPS increased obviously, compared with the water purification sludge (WPS). It indicated that the S_{\max} increased by 43.7%, the EPC_0 decreased by 69.1% and the DPS decreased by 54.4%. The contribution of P disappearance in the overlying water had almost no difference between the mixing and capping with IWPS, but it was obviously higher than the control in both cases. Under the mixing condition, the adsorption of external P by unit IWPS was 2.3 times of that under the capping condition, if the contacting probability between the IWPS and the overlying water was considered. Under the capping condition, the DIP in the sediment interstitial water (1-2 cm) was 33.17 times (average) of that under the mixing condition. It was attributed to the decrease of the dissolved oxygen penetration due to capping. Under the mixing condition, the external P tended to form Ca-P, while the percentages of NH_4Cl -P and Fe/Al-P to Tot-P were bigger under the capping condition. It was suggested that the improvement of the sedimentary microenvironment by mixing with the IWPS was favorable for the adsorption of the external P and the immobilization of the internal P.

Key words: water purification sludge; ignition; capping; mixing; sediment interstitial water; phosphorus forms

磷是湖泊富营养化最主要的限制性因子^[1], 湖泊磷的来源主要包括外源输入和内源释放, 在外源污染得到逐步控制的条件下, 底泥中磷的释放被认为是许多湖泊富营养化发生的重要因素。因此, 抑制底泥中的磷的释放是目前亟待解决的问题^[2~5]。其中, 覆盖法是一种受到国内外广泛关注的底泥内源磷控制技术, 即在底泥表面覆盖一层或多层覆盖层将底泥与上覆水物理性隔开, 从而阻断内源磷进入上覆水的途径或者降低内源磷进入上覆水的量, 进而达到抑制内源磷释放的目的^[6~8], 但是, 该方法也存在一定的缺陷, 即覆盖会将底栖生物与上覆水隔绝, 并显著消减溶解氧进入底泥的量, 甚至阻断溶解氧进入底泥的途径, 从而导致底泥内部出现缺氧甚至厌氧状态^[9]。厌氧会加速内源磷释放, 由于释

放的磷不能进入上覆水, 其只能被覆盖材料吸附或者在间隙水中积累, 导致其存在暴发性释放的趋势^[10,11]。张亚雷等^[12]对比研究了 CaO_2 覆盖和混匀对内源磷释放的影响, 发现前者更有利于抑制内源磷释放, 而后者尽管初期抑制了内源磷释放, 但后期则大量释放, 甚至高于空白实验。然而, 研究者并未分析间隙水中磷的变化情况, 而这可能更好地解释两者对内源磷抑制效果的差别。因此, 在考虑覆盖材料对磷的控制效果时, 也不能忽视间隙水中磷含

收稿日期: 2016-10-19; 修订日期: 2016-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278523); 江苏省优势学科资助项目和水处理材料与技术协同创新中心项目

作者简介: 朱培颖(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水体修复, E-mail: 18862162067@163.com

* 通信作者, E-mail: ustslp@163.com

量的变化以及底泥中不同形态磷数量分布的变化。

净水污泥是指自来水厂在净水过程中将铝盐作为絮凝剂吸附水中污染物的副产物,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,较多国内外研究都指出其对磷的吸附效果尤其显著^[13~17]。黄华山等^[18]利用净水厂污泥覆盖控制底泥氮磷释放,祝成成等^[19]利用净水污泥制备陶粒,研究其对水中磷的吸附效能,都取得了一定的成果。本文净水污泥经灼烧改性处理后作为覆盖材料,一是通过灼烧去除有机质,避免有机质对水体的污染,二是灼烧可以将净水污泥中的金属离子转化成稳定的金属氧化物,使其具有一定的氧化性^[20~22]。在投加方式上,本文对比了单纯的物理性覆盖与混匀(灼烧净水污泥与表层污泥混合)对外源磷吸附效

果、滞留效果及内源磷形态数量分布的影响,以期作为净水污泥资源化利用与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

底泥采自苏州市学士河,利用进口大口径柱状采样器(Rigo Co. 直径 110 mm,高 500 mm)于 2016 年 7 月采集,并现场切得表层 5 cm 的沉积物样品,装袋,立即用冰盒保存(4℃)送至实验室,同时采集采样点上覆水 50 L。将采集的沉积物过孔径为 1 mm 的铁筛,对沉积物进行搅拌使其充分混匀,对上覆水和沉积物进行分析。实验用净水污泥采集于苏州某净水厂。实验材料理化性质见表 1。

表 1 沉积物和上覆水的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of sediments and overlying water

项目	pH 值	DO /mg·L ⁻¹	总磷 /mg·L ⁻¹	含水率 /%	烧失重 /%	Tot-P /mg·kg ⁻¹	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	CaO /%	Fe ₃ O ₂ /%
上覆水	6.98	2.73	0.599	—	—	—	—	—	—	—
底泥	—	—	—	58.39	5.98	1.634	51.34	13.45	10.58	6.34
净水污泥	—	—	—	62.56	6.31	0.932	44.60	23.87	11.83	8.13

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下进行,首先将马福炉整定在固定温度 550℃,然后放入盛装一定量底泥样品的坩埚,灼烧 2.5 h 后取出并冷却,放入干燥器中备用。

1.3 磷吸附实验

实验用培养单元培养管构造见图 1,培养管材料为有机玻璃(长 40 cm,内径 20 cm),底部用橡胶塞密封;管壁留有安装 Rhizon 间隙水采样器(Rhizon core solution sampler)的小孔,使用前用疏水胶带密封。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,将过筛后的沉积物混匀装入培养管中。在培养管中以不同方式加入灼烧后的净水污泥,具体实验分组及编号见表 2。

表 2 实验分组

Table 2 Situation of the experimental groups

编号	内容
E1	350 g 净水污泥混匀于上层 5 cm 的沉积物中
E2	350 g 净水污泥覆盖在沉积物上,约 1 cm 厚度
E3	空白样

处理完后,用切片将底泥-水界面切成完全平整,然后将滤后的河道上覆水虹吸到底泥上,尽可能

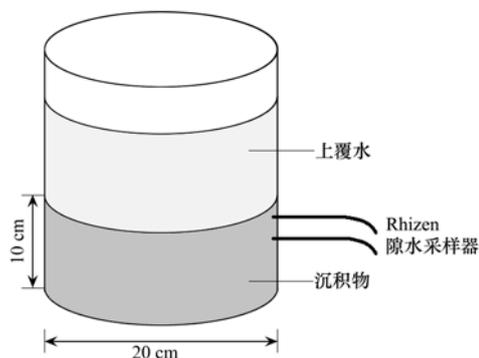


图 1 实验培养管示意

Fig. 1 Experimental incubation tube

不扰动表层底泥,且保持底泥-水界面平整。将泥样柱上顶至适当位置,使得采样孔位于底泥-水界面以下 1.5 cm、2.5 cm 处,分别采集 1~2 cm 和 2~3 cm 段的间隙水,将 Rhizon 间隙水采样管包扎生料带后,插入培养管壁预留的小孔中以保证完全密封,插入时注意采样管的水平。将 3 个培养管放在自然条件下,每天固定时间采取适量水样,每次采集水面以下 5 cm 处水样。采完水样,立即向烧杯中补充等量的河水。每 3 d 向上覆水中加入 1 mL 1.25 mg·L⁻¹ 的 KH₂PO₄ 溶液(以 P 计,人工配制),目的是模拟外源磷的加入。间隙水 DIP 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 等温吸附实验

烘干后的净水污泥和灼烧后的净水污泥分别编号 TS1、TS2. 在一系列 100 mL 锥形瓶中, 加入 0.5 g 底泥样品和 50 mL 不同浓度的 KH_2PO_4 溶液, 其初始浓度 (以 P 计) 分别为 0、0.05、0.10、0.20、0.40、1.00、2.00、4.00、10.00、20.00、50.00、80.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下, 恒温振荡至吸附平衡 (24 h), 离心 ($3\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 20 min), 抽滤, 测定 SRP 浓度 (平衡浓度), 根据初始浓度与平衡浓度之差, 计算底泥吸附 SRP 的量.

采用交叉型 Langmuir 等温吸附模型^[23] 对等温吸附实验数据进行拟合.

$$S = \left[\frac{S_{\max} \times K \times \text{EPC}}{1 + K \times \text{EPC}} \right] - S_0$$

式中, S : 磷吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$); 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 : 磷平衡浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); S_0 : 初始状态下吸附的磷量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$).

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

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

1.5 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.

底泥含水率测定采用 105°C 烘干 8 h, 烧失量

(LOI) 为对 105°C 烘干底泥在 550°C 灼烧 2.5 h 的质量损失^[24].

TP: 将水样用过硫酸钾消解后用钼锑抗分光光度法测定; DTP: 将水样先过 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜然后用过硫酸钾消解后测定; DIP: 将水样过 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜后直接测定; PP: TP 与 DTP 的差值.

磷赋存形态分类采用 SMT 法^[25], 该法将磷形态分为 4 类: $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P 、 HCl-P 、 Res-P . 每个实验 3 个平行, 相对误差 $< 5\%$.

2 结果与讨论

2.1 净水污泥的等温吸附曲线

图 2 为灼烧前后净水污泥对磷的吸附等温线.

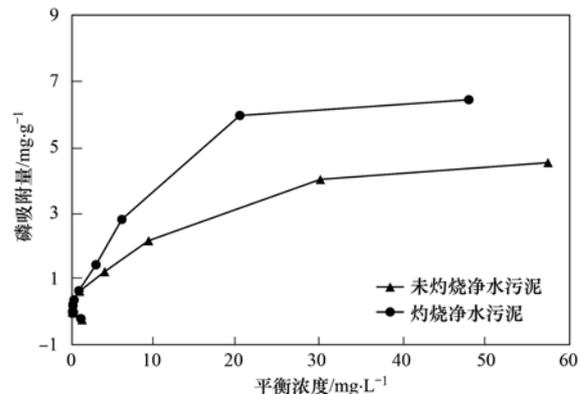


图 2 净水污泥的等温吸附曲线

Fig. 2 Sorption isotherm for phosphorus on the sediments

从图 2 中可以看出, 净水污泥灼烧后, 对磷的吸附量显著增加. 采用 Langmuir 公式对图 2 数据进行拟合, 计算得到的 Langmuir 等温吸附方程参数值见表 3. 从表 3 还可看出, 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 3 净水污泥磷 Langmuir 吸附模型参数

Table 3 Langmuir parameters for phosphorus adsorption on the sediments by water purification sludge

项目	S_{\max} $/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	S_0 $/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	K $/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	EPC_0 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DPS $/\%$	R^2
TS1	5.95	0.19	0.06	0.55	3.27	0.975
TS2	8.55	0.13	0.09	0.17	1.49	0.978

从表 3 还可看出, 净水污泥灼烧后, 磷最大吸附量 (S_{\max}) 达到了 $8.55\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 与未灼烧净水污泥相比, 提高了 43.7%. 这主要是源于灼烧提高了单位质量污泥中金属氧化物的含量以及去除有机质后增加了比表面积. 该值已经远远高于粉煤灰 ($4.041\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、炉渣 ($1.276\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 等废弃

物^[26], 但也低于镧改性沸石 ($20.1\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)^[27]. 与未灼烧净水污泥相比, 灼烧后净水污泥的 EPC_0 和 DPS 均明显降低, 前者降低了 69.1%, 后者降低了 54.4%. 这对磷的吸附和持留具有重要意义, 同时也说明了灼烧后净水污泥完全可以作为覆盖材料.

2.2 灼烧净水污泥的覆盖方式对外源磷吸附的影响

将灼烧后的净水污泥以不同方式覆盖底泥,其对上覆水中外源磷的吸附效果见图 3.

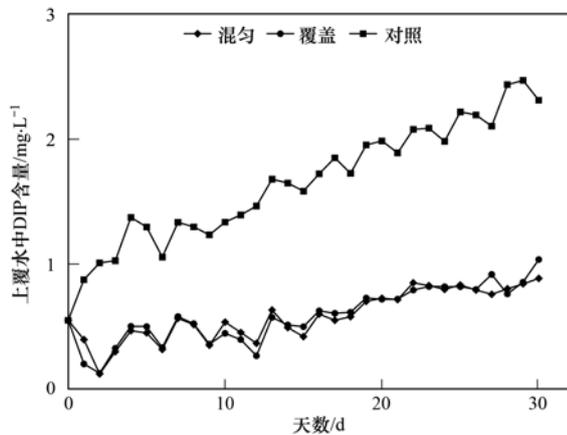


图 3 不同加入方式对磷的吸附效果

Fig. 3 Effect of WPS addition mode on phosphorus adsorption

由图 3 可以看出,在不断加入外源磷的情况下,3 种工况上覆水中的 DIP 含量总体均呈上升趋势.其中,对照实验上覆水中 DIP 上升速度最快,并且其水平也明显高于覆盖和混匀实验.在第 1~3 d, E1 和 E2 上覆水 DIP 含量由初始值 $0.549 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别下降至 $0.038 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.125 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随后呈逐步上升趋势.尽管如此,两者上覆水中 DIP 浓度仍显著低于对照实验.假设水体中消失的 DIP 就是被表层底泥吸附(E1 中为灼烧净水污泥与原底泥混合物、E2 中为灼烧净水污泥覆盖在底泥上、E3 为原底泥),则计算可知, E1、E2、E3 中共消失 9.79、10.25、5.97 mg(以 DIP 计),似乎灼烧底泥覆盖更优于混匀,但实际上并非如此.对于覆盖实验而言,350 g 灼烧底泥直接覆盖在原底泥上(约 1 cm 厚),直接与上覆水接触;相反,对于混匀而言,350 g 灼烧底泥是与 5 cm 厚的原底泥相混合.因此,假定覆盖法中所有的灼烧净水污泥都起到了对磷吸附的作

用,那么,单位净水污泥对磷的吸附量为 $0.028 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$.对于混匀而言,表层的 1 cm 吸附材料是由灼烧净水污泥和原底泥组成的,根据混合比例,两者的量分别为 70 g 和 100 g,则根据对照实验中原底泥对磷的吸附效果,计算出混匀实验中原底泥对上覆水中消失磷的吸附量,其余为灼烧净水污泥所吸附,因此,单位净水污泥对磷的吸附量为 $0.061 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$.对比可知,混匀实验中灼烧净水污泥对磷的单位吸附量为覆盖实验中的 2.2 倍,而这还是没有考虑灼烧净水污泥因其较高含量的金属氧化物含量而对原底泥微环境的改造作用.其改造作用可能包括了氧化还原电位、pH 值、有机质含量及结构等.原底泥的这些改变均有利于对磷的吸附.因此,灼烧净水污泥通过混匀方式加入,显著强化了底泥对磷的吸附能力.

2.3 净水污泥的不同加入方式对间隙水的影响

尽管从上覆水中磷消失结果来看,覆盖和混匀对磷的总体吸附量几乎一致,前者还略好于后者,并且在工程实施方面,前者还要更为简单.但是由于覆盖法通过物理性隔绝底泥与上覆水,则可能导致覆盖层下出现缺氧甚至厌氧环境,导致间隙水中磷含量明显变化,不利于对内源磷的固定^[28].因此,对比两者对间隙水中磷含量的影响显得极为重要(图 4).

由图 4 中可以看出:随着外源磷的加入,间隙水中 DIP 浓度均有所升高,特别是覆盖实验和对照实验,两者间隙水中 DIP 呈明显的上升趋势,而混匀实验中,间隙水中 DIP 升高幅度很小,并且,覆盖实验中间隙水中 DIP 含量明显高于混匀实验,在 1~2 cm,覆盖实验间隙水中 DIP 含量是混匀实验的 33.17 倍(28.97~53.60 倍);在 2~3 cm 内,则为 7.72 倍(6.43~10.86 倍).对于覆盖实验而言,1~2 cm 内, DIP 由 $4.717 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (0 d) 上升到 10.867

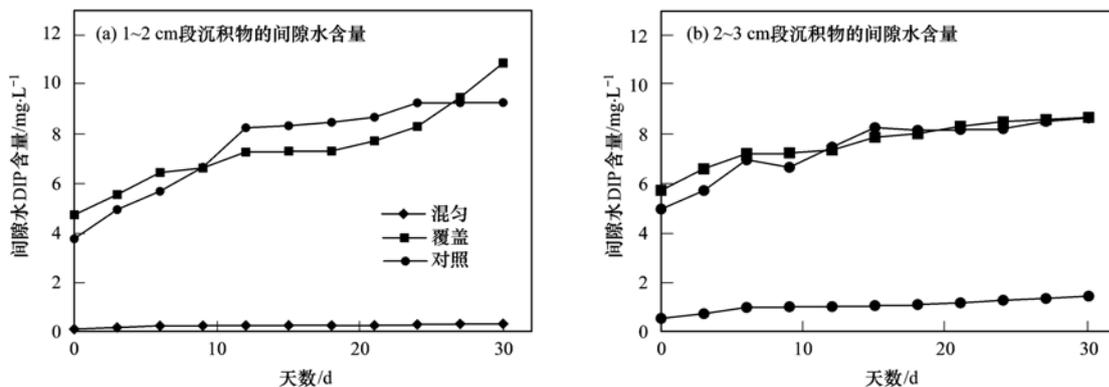


图 4 不同投加方式间隙水中的 DIP 含量

Fig. 4 DIP profiles in different WPS addition modes

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (30 d), 2~3 cm DIP 则由 $5.725 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (0 d) 上升到 $8.687 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (30 d); 对于混匀实验, 1~2 cm 内, DIP 由 $0.088 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (0 d) 上升到 $0.306 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (30 d), 2~3 cm DIP 则由 $0.527 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (0 d) 上升到 $1.432 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (30 d). 因此, 如果对比不同加入灼烧净水污泥方式下间隙水中 DIP 含量变化规律则发现, 覆盖实验中, 2~3 cm 间隙水内 DIP 浓度是 1~2 cm 的 1.08 倍(平均值). 这说明覆盖层下 DIP 浓度基本一致, 这暗示了内源磷在这 2 层间的释放量一致或者磷在 2 层间的迁移更容易发生. 推测可能是底泥微环境的氧化还原电位很低, 并且在 1~2 cm 和 2~3 cm 两层间氧化还原电位基本一致, 即明显的厌氧状态, 从而导致内源磷在 2 层间的自由迁移, 否则, 在正常的大气复氧条件下^[29,30], 1~2 cm 和 2~3 cm 内 DIP 浓度相差应该更大一些, 由下向上的迁移也更容易发生, 即使发生, 也需要更长的时间. 而这在混匀实验中似乎可以得到验证. 混匀实验中, 2~3 cm 间隙水内的 DIP 浓度是 1~2 cm 的 4.63 倍(平均值), 在混匀实验中, 由于 1~2 cm 和 2~3 cm 间隙水 DIP 浓度相差很大, 暗示了表层(1~2 cm)氧化还原电位要高于 2~3 cm, 而这也符合常规的大气复氧条件^[31]. 并且, 在持续加入外源磷条件下, 1~2 cm 间隙水内 DIP 含量更低, 也说明了经灼烧净水污泥改造后的表层底泥对磷具有更强的固定作用. 这也间接说明了覆盖法确实导致了底泥内部形成厌氧环境, 并出现 DIP 积累, 甚至存在内源磷暴发性释放的趋势.

实验结束后, 采用 Unisense 微电极^[32~34] 系统对底泥微环境进行了检测(图 5). 随着微电极从水相进入泥相, 氧浓度逐渐降低, E1(混匀)和 E2(覆盖)在水相中的氧浓度相差不多, 氧浓度分别为 $133.43 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $144.39 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 相较于对照实验(E3 水相中氧浓度为 $84.20 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 有较好的水平, 但是在进入泥水界面后, E2 与 E3 的变化趋势相同, 但 E1 的好氧程度明显高于另外 2 组, 溶解氧的渗透深度也高于另外 2 组, 这也进一步说明了为何混匀条件下间隙水中 DIP 含量明显低于覆盖实验.

间隙水中 DIP 累积的发生过程可能是: 虽然灼烧净水污泥的覆盖层对磷有较好的吸附效果, 但仅仅是表层的吸附, 并未对下层沉积物起到改造作用, 而由于覆盖材料粒径较小(100 目筛), 导致溶解氧渗透过程被抑制, 加剧了覆盖层以下底泥内部的厌氧状态. 因此, 在这种条件下, 释放的内源磷被持留在间隙水中. 此外, 持续加入的外源磷除了被灼烧

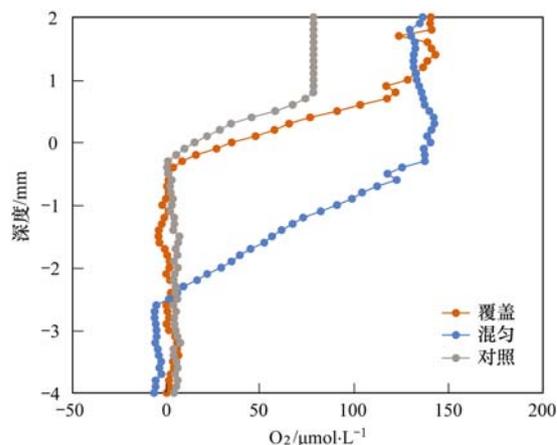


图 5 不同加入方式氧剖面曲线

Fig. 5 O_2 profiles in different WPS addition modes

的净水污泥吸附外, 其余则在浓度梯度作用下扩散至覆盖层以下, 同内源磷一样被持留在间隙水中, 进而导致间隙水中磷含量出现积累现象. 可以预测, 一旦覆盖层的阻隔能力降低, 则间隙水 DIP ($10.867 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 在浓度梯度作用下必定向上覆水 ($1.035 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 释放. 相反在混匀实验中, 由于灼烧后的净水污泥被混入表层 5 cm 底泥中, 使得表层底泥的粒径并不一致, 从而不会定溶解氧渗透产生抑制作用. 此外, 混入的净水污泥由于含有较高浓度的金属氧化物, 则对原底泥的氧化还原电位等底泥微环境指标会发生改造, 即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, 其发生内源磷暴发性释放的可能性要明显低于覆盖实验.

2.4 沉积物中不同形态磷变化规律

加入净水污泥和加入方式的不同导致内源磷不同形态数量分布发生明显变化(图 6), 易释放态磷和难释放态磷之间也发生了相互转化.

图 6(a) 和图 6(b) 显示, 随着外源磷的加入, 部分磷被表层底泥吸附, 并迁移至底泥深处, 在此过程中, 形成了不同形态磷. 从中看出, 与对照实验相比, 混匀和覆盖条件下, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 在 0~2 cm 和 2~4 cm 内增加量明显较低, 2~4 cm 内 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 明显高于 0~2 cm, 这说明了外源磷可能发生了向下迁移. 但基于间隙水中 DIP 变化规律(图 4) 和底泥内部溶解氧变化规律(图 5) 分析, 在混匀条件下, 外源磷更可能发生从上向下的迁移, 但对于覆盖而言, 更多的可能是内源磷释放, 至少对于容易释放的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 并没有很好地转化成其他形态磷, 因为覆盖条件下

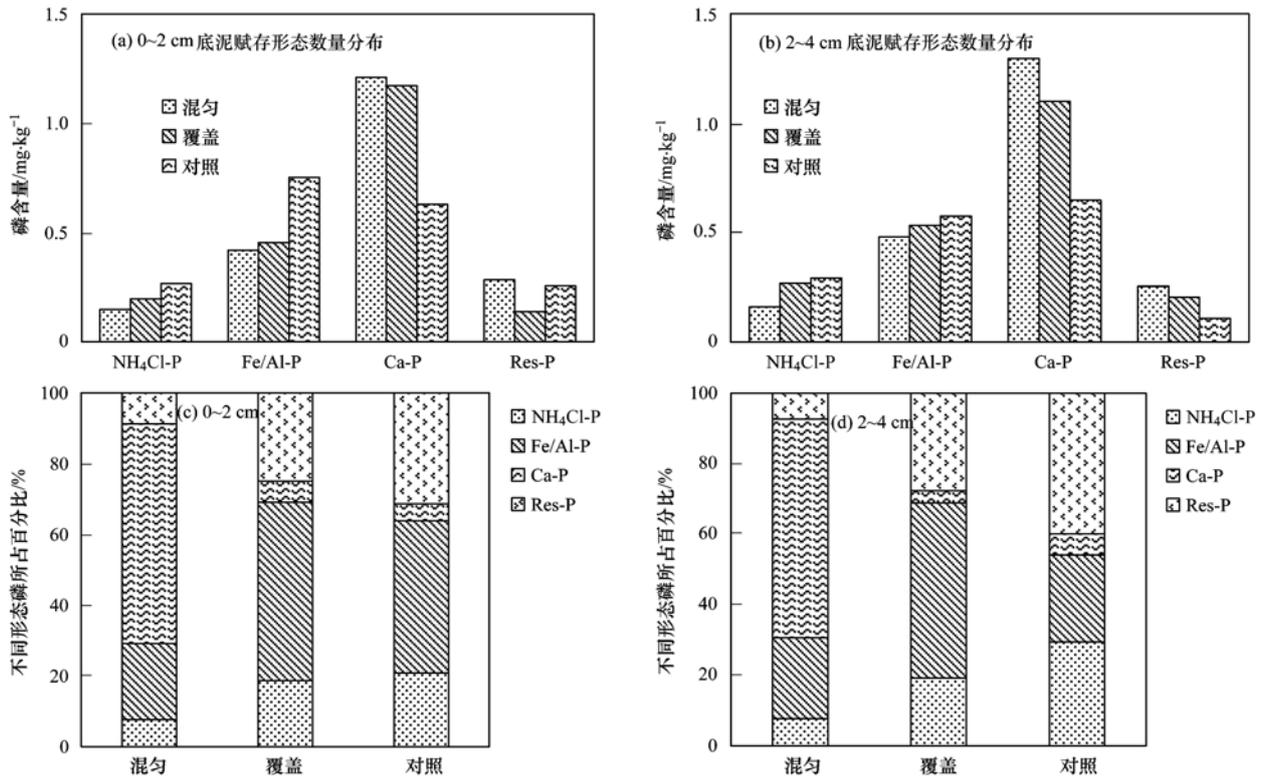


图 6 0~4 cm 底泥磷赋存形态数量分布和不同形态磷占总磷的百分比

Fig. 6 Distributions of phosphorus forms and percentage of different phosphorus forms of TP in the 0-4 cm sediment

$\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 占总磷 (Tot-P) 11.82% (平均值) 明显高于混匀 (7.66%, 平均值), 但两者均低于对照实验 (16.64%) [图 6(c) 和图 6(d)].

对于 Fe/Al-P 而言, 其厌氧条件下, 也会发生释放. 图 6(a) 显示, 对照实验中 Fe/Al-P (0~2 cm) 明显高于混匀和覆盖, 然而, 在 6(b) 中, Fe/Al-P (2~4 cm) 在对照实验中也略高于混匀、覆盖, 但幅度明显低于 0~2 cm. 通常, 由于 Fe/Al-P 属于溶解性磷酸盐被铁或者铝金属氧化物吸附而形成, 在灼烧净水污泥中, 铁或者铝金属氧化物含量明显较高, 但令人意外的是, Fe/Al-P 含量却并不高, 甚至低于 Ca-P. 此外, Li 等^[35] 曾经发现, 在无扰动状态下, 外源磷更容易形成 Fe/Al-P. 在本文中, 对照实验也证明了这一点, 但为何混匀和覆盖灼烧净水污泥条件下, Fe/Al-P 却并非是内源磷的主要形态. 其原因可能是 Fe/Al-P 向其它形态磷 (如 Ca-P) 发生了转化, 0~2 cm, Ca-P 占 Tot-P 分别为 62.11% (混匀)、61.48% (覆盖), 而对照实验中, 该值仅为 34.91%, 这说明了灼烧净水污泥的加入促进了 Fe/Al-P 向 Ca-P 的转化. 其中, 混匀条件下, 这种转化幅度更大一些, 可能是源于灼烧净水污泥对底泥微环境的改造作用 (如溶解氧渗透深度, 图 5). 对比混匀和覆盖条件下 0~2 cm 和 2~4 cm Ca-P 的增加量, 可以

发现, 覆盖条件下 2~4 cm Ca-P 并未发生增加, 与 0~2 cm 相比 (反而降低了 6.1%), 相反在混匀条件下, Ca-P 则增加了 7.1%, 两相对照, 在覆盖条件下有更多的磷并未形成 Ca-P, 这可能归因于底泥内部厌氧环境的形成, 抑制了从 Fe/Al-P 向 Ca-P 的转化, 因为图 4 间隙水中 DIP 在 1~2 cm 和 2~3 cm 几乎一致, 而混匀条件下, 后者则明显高于前者.

2.5 灼烧净水污泥的应用展望

据本实验结果, 从对外源磷的吸附、间隙水中磷的控制、底泥微环境的改造内源磷形态间的转化等方面来看, 混匀方式均优于覆盖, 但从工程实施难度和工程量来看, 前者明显难于后者. 因此, 本研究认为混匀技术还是有应用前景的, 即可以采用“注入灼烧净水污泥”的方法来代替混匀. 如对于待修复的水体而言, 根据待修复的底泥面积、体积、污染程度, 计算应混入灼烧净水污泥的量, 然后合理选择几个注入点, 将净水污泥注入, 利用灼烧净水污泥富含金属氧化物的特性对底泥微环境进行改造, 从而达到混匀的目的.

3 结论

(1) 净水污泥灼烧后, 磷最大吸附量 (S_{\max}) 由 $5.95 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (未灼烧) 提高至 $8.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 底泥磷

平衡浓度 (EPC_0) 由 $0.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (未灼烧) 降至 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 磷饱和度 (DPS) 则由 3.27% (未灼烧) 降至 1.49%。

(2) 混匀和覆盖条件下, 灼烧净水污泥对外源磷的吸附量分别为 9.79、10.25 mg, 远高于对照实验。如考虑接触几率, 则混匀下灼烧净水污泥对外源磷的单位吸附量达到覆盖条件的 2.3 倍。并且, 覆盖条件下间隙水中磷浓度远高于混匀条件, 这与溶解氧渗透深度有关。

(3) 混匀条件下与覆盖相比, Ca-P 占总磷百分比最高, 说明混匀对底泥微环境的改造促进了 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Fe/Al-P 向 Ca-P 转化。

参考文献:

- [1] 徐轶群, 熊慧欣, 赵秀兰. 底泥磷的吸附与释放研究进展[J]. 重庆环境科学, 2003, **25**(11): 147-149.
Xu Y Q, Xiong H X, Zhao L X. Advances of phosphorus absorption and release by sediment [J]. Chongqing Environmental Science, 2003, **25**(11): 147-149.
- [2] Nijboer R C, Verdonchot P F M. Variable selection for modelling effects of eutrophication on stream and river ecosystems [J]. Ecological Modelling, 2004, **177**(1-2): 17-39.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, **51**(16): 1857-1866.
Qin B Q, Yang L Y, Chen F Z, *et al.* Mechanism and control of lake eutrophication [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(19): 2401-2412.
- [6] Hart B, Roberts S, James R, *et al.* Use of active barriers to reduce eutrophication problems in urban lakes [J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2003, **47**(7-8): 157-163.
- [7] 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 Science, 2009, **11**(9): 28-33.
- [8] 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.
- [9] Fahrner S, Radke M, Karger D, *et al.* Organic matter mineralisation in the hypolimnion of an eutrophic Maar lake[J]. Aquatic Sciences, 2008, **70**(3): 225-237.
- [10] 孙慧卿, 王平, 江和龙. 不同模拟条件下太湖沉积物-水界面磷行为的研究[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(5): 141-146.
Sun H Q, Wang P, Jiang H L. Behavior of phosphorus in interface of sediment-overlying water in Taihu Lake under different simulative conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(5): 141-146.
- [11] 丁艳青, 朱广伟, 秦伯强, 等. 波浪扰动对太湖底泥磷释放影响模拟[J]. 水科学进展, 2011, **22**(2): 273-278.
Ding Y Q, Zhu G W, Qin B Q, *et al.* Experimental study on the effect of wave disturbances on the phosphorus dynamics in shallow lakes [J]. Advances in Water Science, 2011, **22**(2): 273-278.
- [12] 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.
- [13] 帖靖玺, 赵莉, 张仙娥. 净水厂污泥的磷吸附特性研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(6): 149-151, 164.
Tie J X, Zhao L, Zhang X E. Phosphorus adsorption characteristics of waterworks sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **32**(6): 149-151, 164.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 黄华山, 杨志敏, 周真明, 等. 净水厂污泥覆盖控制底泥氮磷释放效果[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, **37**(3): 347-351.
Huang H S, Yang Z M, Zhou Z M, *et al.* Efficiency of controlling nitrogen and phosphorus release from sediment using thin-layer capping with water treatment plant sludge [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2016, **37**(3): 347-351.
- [19] 祝成成, 王涌涛, 李大鹏. 净水污泥制备陶粒及其对废水中磷酸盐的吸附试验研究[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2011, **24**(4): 12-17.
Zhu C C, Wang Y T, Li D P. Adsorption of phosphate from wastewater by ceramists from purified water's sludge [J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2011, **24**(4): 12-17.
- [20] 刘丽娜, 孔海南, 吴德意, 等. 苏州河底泥中重金属的烧结无害化研究[J]. 中国环境科学, 2006, **26**(5): 524-527.

- Liu L N, Kong H N, Wu D Y, *et al.* Studies on the detoxification of heavy metals by calcinations in Suzhou River sediment[J]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(5): 524-527.
- [21] 李大鹏, 句立展, 黄勇, 等. 灼烧对河道底泥中磷迁移转化特性的影响[J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(11): 89-92.
Li D P, Ju L Z, Huang Y, *et al.* Influence of ignition on migration and transformation of phosphorus in river sediments [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, **24**(11): 89-92.
- [22] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 底泥预处理对磷等温吸附特征及磷形态的影响[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(3): 346-351.
Li D P, Huang Y, Li W G. Influence of different sediments pretreatment on phosphorus adsorption characteristics and phosphorus forms[J]. *China Environmental Science*, 2007, **27**(3): 346-351.
- [23] 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.
- [24] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 灼烧对沉积物烧失量及铁、磷测定的影响[J]. *分析实验室*, 2004, **23**(9): 72-76.
Zhu G W, Qing B Q, Gao G, *et al.* Effects of ignition on determination of loss on ignition, iron and phosphorus in sediments[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2004, **23**(9): 72-76.
- [25] Kim L H, Choi E, Gil K I, *et al.* Phosphorus release rates from sediments and pollutant characteristics in Han River, Seoul, Korea[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **321**(1-3): 115-125.
- [26] 周光红. 几种固体废弃物吸附除磷性能及其机理探讨[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. 29-30.
Zhou G H. Study of the performance and mechanism of phosphorus adsorption with solid waste [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. 29-30.
- [27] 李佳, 林建伟, 詹艳慧. 镧改性沸石活性覆盖控制重污染河道底泥溶解性磷酸盐和铵释放研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4266-4274.
Li J, Lin J W, Zhan Y H. Evaluation of in situ capping with lanthanum-modified zeolite to control phosphate and ammonium release from sediments in heavily polluted river [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4266-4274.
- [28] 王忍, 李勇, 李大鹏, 等. 河蚬或藻存在下组合扰动对内源磷迁移的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(4): 1226-1234.
Wang R, Li Y, Li D P, *et al.* Impacts of corbicula fluminea or algae under combined disturbance on internal phosphorus migration [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1226-1234.
- [29] 雒文生, 李莉红, 贺涛. 水体大气复氧理论和复氧系数研究进展与展望[J]. *水利学报*, 2003, **34**(11): 64-70.
Luo W S, Li L H, He T. Advances and prospects in the research of water reaeration theory and reaeration coefficient [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, **34**(11): 64-70.
- [30] 程香菊, 陈永灿, 袁丽蓉, 等. 水体大气复氧能力研究综述[J]. *科技导报*, 2008, **26**(17): 11.
Cheng X J, Chen Y C, Yuan L R, *et al.* Review of research on reaeration ability in water-body [J]. *Science & Technology Review*, 2008, **26**(17): 11.
- [31] 王乐. 波浪作用下水体复氧行为特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Wang L. Research on reoxygenation behavior characteristics of wave [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [32] 许昆明, 胡融刚. 微电极技术在沉积物化学原位测量中的应用[J]. *地球科学进展*, 2006, **21**(8): 863-869.
Xu K M, Hu R G. Microelectrodes for in situ chemical measurements in sediments [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, **21**(8): 863-869.
- [33] 王敬富, 陈敬安, 曾艳, 等. 微电极测量系统在湖泊沉积物-水界面生物地球化学过程研究中的应用[J]. *地球与环境*, 2013, **41**(1): 65-70.
Wang J F, Chen J A, Zeng Y, *et al.* Application of microelectrode measurement system in research on biogeochemical processes across the water-sediment interface in Hongfeng Lake [J]. *Earth and Environment*, 2013, **41**(1): 65-70.
- [34] 钱宝, 刘凌, 肖潇, 等. 环境微界面对湖泊内源磷释放的影响研究[J]. *水利学报*, 2013, **44**(3): 295-301.
Qian B, Liu L, Xiao X, *et al.* The effect of environmental micro-interface on internal phosphorus release of the lake [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(3): 295-301.
- [35] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(7): 958-962.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper (II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)