

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM ₁₀ 、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与磷的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟苏琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟苏琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应

张树楠^{1,2,3}, 肖润林^{1,2}, 刘锋^{1,2*}, 吴金水^{1,2}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙农业环境观测研究站, 长沙 410125; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 将原农业排水沟渠改建成生态沟, 以水生美人蕉、黑三棱、灯心草、铜钱草和绿狐尾藻等为试验植物, 通过沟渠水样氮、磷去除的时空变化, 各植物区泥沙和植物氮、磷含量的对比, 探讨了生态沟渠对农业面源污染的阻控效应。结果表明, 生态沟渠出水氮、磷浓度分别低于地表水环境质量标准Ⅳ类和Ⅱ类, 整条生态沟渠对水体总氮、总磷的平均去除率分别为64.3%、69.7%。整条生态沟渠2010年和2011年拦截泥沙总量的平均值为40 400 kg, 含泥沙氮52.4 kg, 泥沙磷21.4 kg; 其中各植物段拦截泥沙氮、磷量为水生美人蕉>铜钱草>黑三棱>绿狐尾藻>灯心草。生态沟渠植物每年累积带走的氮、磷量分别为7.9 kg和1.4 kg; 5种植物氮、磷吸收量最高的是水生美人蕉和绿狐尾藻, 二者的地上生物量与地下生物量比值也远高于其他3种植物。因此, 生态沟渠对氮、磷污染物有较好的拦截效应, 5种植物中氮、磷吸收效果最好的是水生美人蕉和绿狐尾藻。

关键词: 生态沟渠; 氮; 磷; 泥沙; 水生植物

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4516-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.025

Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches

ZHANG Shu-nan^{1,2,3}, XIAO Run-lin^{1,2}, LIU Feng^{1,2*}, WU Jin-shui^{1,2}

(1. Key Laboratory for Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Changsha Research Station for Agricultural Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to effectively intercept and remove nitrogen (N) and phosphorus (P) from agricultural water, *Canna glauca*, *Sparganium stoloniferum*, *Juncus effusus*, *Hydrocotyle vulgaris*, and *Myriophyllum elatinoides* were planted in an agricultural drainage ditch. The temporal and spatial variations of the dissolved N and P concentrations were monitored during the whole experimental period. In addition, the contents of N and P in sediments and plants were compared among different plant plots. The results showed the effluent TN and TP concentrations in the vegetated drainage ditch were lower than the surface water environmental quality standards for class IV and class II. The average removal rates of TN and TP in water were 64.3% and 69.7%, respectively. The average sediment interceptions in 2010 and 2011 reached 40 400 kg, containing 52.4 kg of N and 21.4 kg of P. The amounts of sediment N and P in five plant plots exhibited the descending order: *Canna glauca* > *Hydrocotyle vulgaris* > *Sparganium stoloniferum* > *Myriophyllum elatinoides* > *Juncus effusus*. The accumulated N and P amounts assimilated by five kinds of aquatic plants reached 7.9 kg·a⁻¹ and 1.4 kg·a⁻¹, respectively. Compared with other plants, *Canna glauca* and *Myriophyllum elatinoides* had the highest ratios of above-ground and below-ground tissues, and the strongest absorption capacity of N and P was also observed in these two plants. Therefore, the vegetated drainage ditch has good interception effect on N and P pollutants. Furthermore, *Canna glauca* and *Myriophyllum elatinoides* can be considered as the optimal plants for N and P uptake.

Key words: vegetated drainage ditch; nitrogen; phosphorus; sediment; aquatic plant

氮、磷是农作物生长的主要营养元素。在农业生产系统中,为了使农作物有足够的氮、磷等养分,人们通常在农田系统施用大量的化肥。中国是世界上化肥施用量最多的国家之一,但是氮、磷肥的利用率却较低,分别为30%~35%和10%~20%^[1]。未被作物吸收利用的氮、磷会因降雨和渗漏进入地表水和地下水,进而造成环境污染。近些年,随着水体富营养化和地下水污染的日益严重,以氮、磷为主导的农业非点源污染逐渐被人们关注^[2~4]。据报

道,农业氮、磷污染对中国东部湖泊、大理洱海的贡献率均超过了60%^[1];另外,近50%的地下水被农业氮、磷污染^[5]。农业非点源污染的主要控制措施有源头控制和末端治理,其中源头控制最为有效。

收稿日期: 2015-01-29; 修订日期: 2015-07-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAD14B00); 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目(KZCX2-YW-T07, 20100491005-8)

作者简介: 张树楠(1987~),女,博士研究生,主要研究方向为面源污染生态控制, E-mail: zhang-shu-nan@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liufeng@isa.ac.cn

在源头控制中,植物缓冲带,人工湿地、生态沟渠等被广泛用于农业非点源污染控制^[6~8]. 与其他控制措施相比,生态沟渠建设成本低、污染去除效率高,更适合在农村地区推广应用^[8].

沟渠,作为南方丘陵地区农田系统的重要组成部分,是农业地表径流汇入湖泊、河流的必经通道. 基流期的沟渠因水流缓慢与生态湿地的功能相似^[9, 10]. 沟渠湿地具有独特的植物-底泥-微生物系统,经植物吸收、泥沙拦截和微生物分解等理化作用,能够在某种程度上降低地表径流所携带的氮、磷浓度^[11]. 沟渠中的水生植物在水体氮、磷去除中起着重要作用,除植物直接吸收水体或底泥中氮、磷外,植物的存在还可延长水体在沟渠的停留时间,为微生物提供有利的生长环境等^[12~15]. 近年来,利用生态沟渠对水体净化和农业非点源污染控制的研究工作已逐渐展开^[16, 17]. 相关研究表明,生态沟渠对农业非点源氮、磷污染的去除率分别达到48%~64%和41%~70%^[18, 19]. 余红兵等^[20]发现对沟渠植物进行定期刈割,不仅能够转移出植物吸收的氮、磷,还可以提高底泥氮、磷的去除率. 国外研究报道,生态沟渠是农业非点源污染源头控制中的“最佳管理措施(best management practices, BMPs)”^[21]. 但目前有关生态沟渠中合适水生植物的筛选及沟渠对泥沙氮、磷拦截效应的研究报道不多. 本研究以运行近1年的生态沟渠为对象,阐述了沟渠水体中氮、磷浓度的时间及空间变化特征,比较了水生植物对氮、磷污染物的吸收作用及对泥沙氮、磷的拦截效应,以期生态沟渠的构建及有效去除氮、磷提供合理建议.

1 材料与方法

1.1 试验沟渠概况

试验沟渠位于中国科学院长沙农业环境观测站的示范区内,周围农田面积1.2 km². 该区域属于亚热带季风气候,年平均气温16.5~20.5℃,最低气温为-5.2℃,最高气温39.1℃;年平均降雨量1389 mm,降雨多集中在4~6月,占全年降雨的

76%. 该生态沟渠贯穿于水稻种植区,改建前先清淤,然后用水泥护坡,水泥墩和波浪形挡板将各植物区隔开. 试验沟渠长200 m,结构形状为倒梯形(见图1),上、下口宽分别为4 m和2.8 m,沟深1 m,水深为20 cm. 在2009年初,整条生态沟渠共设置10个植物区,每个植物区长20 m×宽2 m. 沟渠上半段种植植物为水生美人蕉(*Canna glauca*)、铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris*)、黑三棱(*Sparganium stoloniferum*)、绿狐尾藻(*Myriophyllum elatinoides*)和灯心草(*Juncus effusus*);为了防止由于植物空间前后产生的差异,沟渠下半段植物种植顺序是灯心草、绿狐尾藻、黑三棱、铜钱草和水生美人蕉(见图2). 2010~2011年监测期间,沟渠流量计监测的基流期水流量为37.5~225.9 m³·d⁻¹^[22].

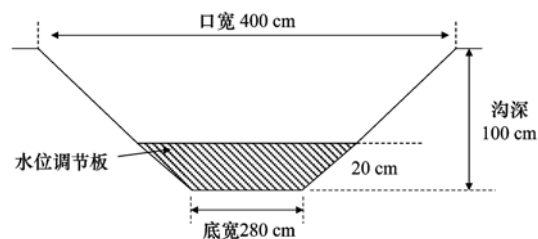


图1 生态沟渠横断面示意

Fig. 1 Cross-section of the vegetated drainage ditch

1.2 样品采集与分析

1.2.1 湿地水样

2010年5月~2011年9月,在生态沟渠入水口及各植物区的出水口取样,每月取样3次;水样运回实验室后,在24 h内处理样品,并分析总氮和总磷浓度. 水样总氮、总磷分别用碱性过硫酸钾(NaOH-K₂S₂O₈)和过硫酸钾(K₂S₂O₈)在高压灭菌锅中消化,总氮质量浓度用流动注射分析仪(Fir-5000)测定;总磷质量浓度经钼锑抗显色后,用紫外分光光度计(UV2300)测定.

1.2.2 泥沙样品

在2010年8月和2011年9月采集泥沙样. 为了区别沉积泥沙及测量泥沙深度,每个植物区泥土里插有一根带刻度的标尺. 泥沙采集方法:在每个植物区内设置3个代表性1 m²的采样点,在样方内

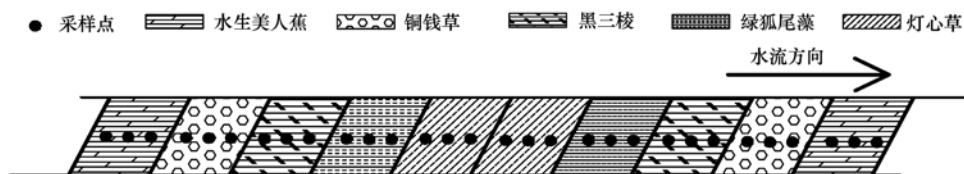


图2 水生植物分布示意

Fig. 2 Distribution diagram of aquatic plants

多点采集约 1 kg 泥沙样用于养分分析,然后将全部泥沙挖出,称重并换算出泥沙量,同时测量各植物区的泥沙深度.将泥沙样带回实验室,称取并记录其相应的鲜重,然后将其风干,泥沙样风干后混匀、磨碎、过筛(0.25 mm),用于测定氮、磷含量.底泥中全氮的测定用半微量开氏法:样品消煮前,先用高锰酸钾和还原铁粉将土样中亚硝态氮和硝态氮转化为铵态氮,再经浓硫酸高温消解,消煮液经转移定容后,用流动注射分析仪(Fir-5000)测定其氮质量浓度.底泥中全磷的测定用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法:先用氢氧化钠分解土样样品,使土样中磷转化为可溶性磷酸盐,再经钼锑抗显色后,用紫外分光光度计(UV2300)测定其磷质量浓度.

1.2.3 植物样品

从2010年5月到2011年9月,每个月中旬采集一次植物样品.植物样品采集方法:每个植物区选取植物长势较一致的3个样方,样方选取面积是1 m×1 m,先将整株植物从沟渠中挖取,然后用剪刀把各植物分割成地上部分和地下部分.各植物地上部分和地下部分鲜重用电子称先称取,然后带到实验室做进一步的清洗和烘干处理.待各植株样品在70℃烘箱中烘干到恒重时,称取各样品烘干重量,分别计算5种试验植物地上部和地下部的生物量.最后将各烘干植物样品用研磨机磨碎,过筛,用自封袋密闭保存并分析其中的氮、磷含量.植株样品的氮、磷经浓硫酸和过氧化氢消解后,有机态的氮、磷分别转化为无机态的氨氮和磷酸盐,其氮质量浓度可用流动注射分析仪(Fir-5000)测定;磷质量浓度经钼锑抗显色后,用紫外分光光度计(UV2300)测定.

1.3 数据统计与分析

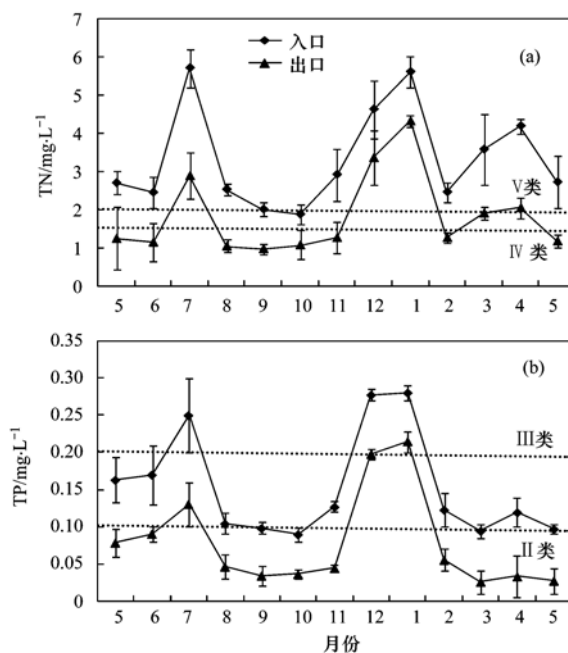
采用Excel 2003和SPSS 11.5软件进行作图和统计分析,所有测试指标的显著性检验采用Duncan法,当统计检验的显著性水平 $P < 0.05$ 时差异显著.

2 结果与分析

2.1 沟渠水体氮、磷质量浓度的时间变化

由图3可知,生态沟渠入水口氮、磷质量浓度受农田施肥、降雨、植物腐烂等外界因素影响而出现较大的变化,变化范围分别为1.88~5.71 mg·L⁻¹、0.09~0.28 mg·L⁻¹,高峰值分别出现在1、7和12月.入口总氮质量浓度较高,大部分时间高于地表水环境质量标准Ⅴ类2 mg·L⁻¹,而总磷质量浓度仅在1、7和12月高于地表水环境质量标准Ⅲ类0.2 mg·L⁻¹.经过生态沟渠的净化后,出口氮、

磷质量浓度的变化范围分别为0.98~4.32 mg·L⁻¹、0.03~0.21 mg·L⁻¹.总氮质量浓度在2、5、6、8、9、10、11月均低于地表水环境质量标准Ⅳ类,总磷质量浓度除了1、7和12月外,其他时间均低于地表水环境质量标准Ⅱ类.整个监测期间,生态沟渠对总氮、总磷的去除率分别为29.3%~69.2%和34.2%~72.8%.说明生态沟渠在发挥排水功能的同时,对水体中氮、磷有较好的削减功能.



图中数据为平均值±标准差($n=3$),下同

图3 2010~2011年沟渠水体中总氮、总磷质量浓度的时间变化

Fig. 3 Temporal changes of TN and TP concentrations in ditch water from 2010 to 2011

2.2 沟渠水体氮、磷质量浓度的空间变化

由图4(a)可知,生态沟渠入水口总氮质量浓度为3.4 mg·L⁻¹,远高于地表水环境Ⅴ类标准2 mg·L⁻¹.在沟渠80 m位置处,水体中总氮质量浓度降至地表水Ⅴ类标准以下,水流进入160 m位置时,总氮质量浓度已低于地表水环境Ⅳ类标准1.5 mg·L⁻¹.整条生态沟渠对水体总氮的去除率为64.3%.生态沟渠进水口总磷质量浓度为0.11 mg·L⁻¹[图4(b)],属于地表水Ⅲ类标准,出水口的总磷质量浓度为0.03 mg·L⁻¹,达到了Ⅱ类水质标准,并接近Ⅰ类水质标准.整条生态沟渠对总磷的去除率为69.7%.

2.3 生态沟渠对氮、磷的拦截

2.3.1 泥沙的拦截

整条生态沟渠2010年和2011年拦截泥沙总量

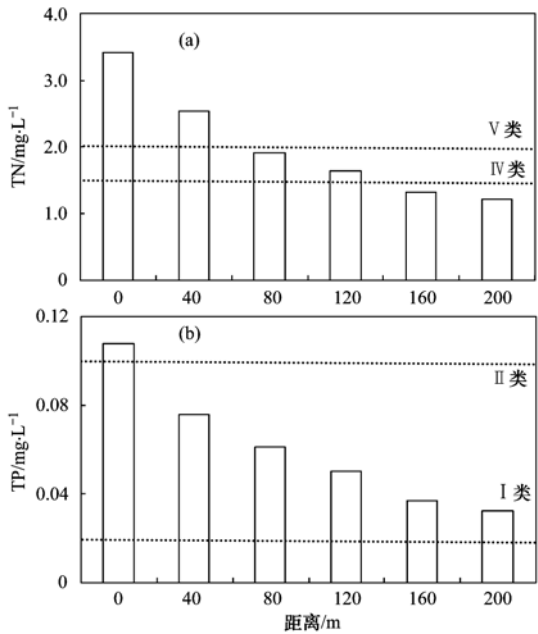


图4 沟渠水体中总氮、总磷质量浓度的空间变化

Fig. 4 Spatial changes of TN and TP concentrations in ditch water

分别为38 400 kg、42 400 kg,其中2010年泥沙氮、磷总量分别为49.6 kg、19.2 kg,2011年泥沙氮、磷总量为55.2 kg、23.6 kg(图5)。与2010年相比,2011年泥沙拦截量提高了9.4%。从空间比较,生态沟渠在水生美人蕉、黑三棱和绿狐尾藻植物区拦截的泥沙量较多,在铜钱草和灯心草植物区拦截的泥沙量较少(表1)。另外,生态沟渠从上游到下游拦截的泥沙氮、磷逐渐降低,比较相邻2个植物区拦截的泥沙氮、磷量,从黑三棱植物区到绿狐尾藻植物区泥沙氮、磷量降低最多,分别降低26.41%和32.15%。

表1 不同植物区拦截泥沙量及泥沙氮、磷的比较¹⁾

Table 1 Comparison of sediment amount and nitrogen and phosphorus contents in different plant zones

植物名	拦截泥沙量 /kg·m ⁻²	拦截泥沙氮 /g·m ⁻²	拦截泥沙磷 /g·m ⁻²
水生美人蕉	119.9±8.4	124.1±14.2	52.0±7.2
铜钱草	104.6±6.3	109.6±9.4	50.9±5.3
黑三棱	122.4±10.6	84.3±13.1	42.5±6.5
绿狐尾藻	113.8±7.0	62.0±8.6	28.8±5.8
灯心草	94.6±3.8	61.6±5.4	29.8±4.0

1)表中数据为平均值±标准差,下同

2.3.2 水生植物的吸收

从表2可知,5种水生植物中地上生物量最高的是水生美人蕉,最低的是铜钱草,水生美人蕉地上生物量是铜钱草的3.5倍。地下生物量最高的是黑三棱1.7 kg·m⁻²,其它4种植物地下生物量相差不

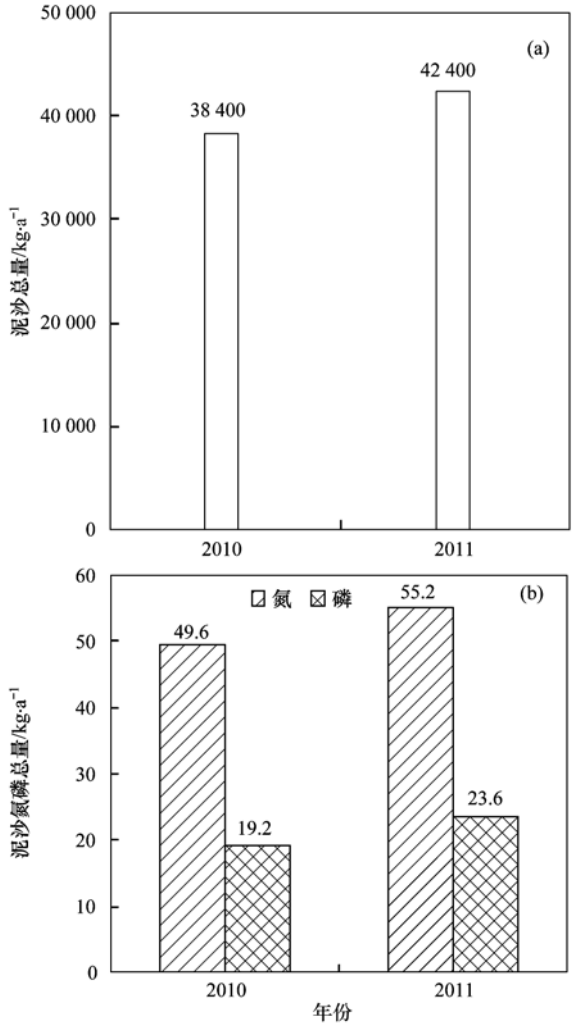


图5 泥沙总量与泥沙氮磷量

Fig. 5 Total sediment amount and nitrogen and phosphorus contents in sediment

大,分布在0.7~1.0 kg·m⁻²之间。5种水生植物地上与地下生物量比值差异较大,比值依次为:水生美人蕉(2.1)>绿狐尾藻(2.0)>灯心草(1.3)>铜钱草(0.9)>黑三棱(0.7)。

从表3可知,5种植物中整株单位氮、磷含量最高的是绿狐尾藻,分别达到35.2 g·kg⁻¹和6.1 g·kg⁻¹。5种植物地上部和地下部含氮量的比值依次为:水生美人蕉(2.8)>黑三棱(2.3)>绿狐尾藻(2.1)>灯心草(1.8)>铜钱草(1.5),含磷量的比值依次为:绿狐尾藻(2.2)>水生美人蕉(2.0)>灯心草(1.8)>铜钱草(1.7)>黑三棱(1.6)。根据5种植物的生物量、生长密度及单株茎叶氮、磷含量,计算了5种水生植物收获的氮、磷量,结果表明,单位面积收获氮、磷量最多的是水生美人蕉和绿狐尾藻,其次是灯心草、黑三棱和铜钱草。

表 2 水生植物地上生物量和地下生物量的分配

Table 2 Allocations of above-ground and below-ground biomass in aquatic plants

植物名	地上生物量 /kg·m ⁻²	地下生物量 /kg·m ⁻²	总生物量 /kg·m ⁻²	地上生物量: 地下生物量
水生美人蕉	2.1 ± 0.4	1.0 ± 0.2	3.1 ± 0.7	2.1
铜钱草	0.6 ± 0.0	0.7 ± 0.1	1.3 ± 0.1	0.9
黑三棱	1.2 ± 0.1	1.7 ± 0.2	2.9 ± 0.3	0.7
绿狐尾藻	1.4 ± 0.3	0.7 ± 0.1	2.1 ± 0.1	2.0
灯心草	1.3 ± 0.1	1.0 ± 0.3	2.3 ± 0.2	1.3

表 3 水生植物中氮、磷含量及累积量

Table 3 Contents and accumulation amounts of the total N and P in aquatic plants

植物名	含氮量/g·kg ⁻¹		含磷量/g·kg ⁻¹		收获氮 /g·m ⁻²	收获磷 /g·m ⁻²
	地上部	地下部	地上部	地下部		
水生美人蕉	16.3 ± 1.7	5.9 ± 0.9	2.0 ± 0.6	1.0 ± 0.3	34.6 ± 6.7	4.3 ± 1.7
铜钱草	13.1 ± 2.2	8.6 ± 4.1	3.1 ± 0.2	1.8 ± 0.7	8.1 ± 1.7	1.9 ± 0.1
黑三棱	9.7 ± 3.5	4.2 ± 0.2	2.7 ± 0.6	1.6 ± 0.5	11.7 ± 0.7	2.9 ± 1.4
绿狐尾藻	23.7 ± 2.5	11.5 ± 0.6	4.2 ± 0.6	1.9 ± 0.8	32.5 ± 2.6	5.8 ± 0.4
灯心草	9.8 ± 1.6	5.5 ± 0.5	2.1 ± 0.2	1.2 ± 0.1	12.4 ± 0.6	2.6 ± 0.4

3 讨论

3.1 水生植物对泥沙氮、磷拦截的影响

水生植物在水体中的生态功能使其在农业非点源污染控制中的作用十分明显^[16],其本身不仅可以从水层和底泥直接吸收氮、磷等营养物质,并通过提高水力停留时间的方式增加泥沙氮、磷的拦截量,而且它发达的根系还为微生物提供了更多的附着点和营养物质^[23-26].徐红灯等^[16]通过动态和静态模拟试验表明植物吸收只是其截留的一部分,但水生植物的存在可以加速氮、磷界面交换和传递,从而促进了氮、磷的截留和转化.王岩等^[27]研究表明,有植物生长的生态沟渠比对照沟渠的泥沙沉降效果好;在生态沟渠中,受流水走向和沟底植物拦截的影响,从上游到下游沉积的泥沙量与泥沙厚度逐渐降低.在本研究中,5个植物区拦截的平均泥沙量依次为:黑三棱(122.4 kg·m⁻²) > 水生美人蕉(119.9 kg·m⁻²) > 绿狐尾藻(113.8 kg·m⁻²) > 铜钱草(104.6 kg·m⁻²) > 灯心草(94.6 kg·m⁻²),与Lacoul等^[25]的研究结果不完全一致.除了水流走向影响泥沙在沟渠中的沉降外,植物种类和植物密度可能对泥沙拦截也有一定的影响.本研究的水生美人蕉和黑三棱长势较高大,根系发达,泥沙拦截效果较好;尽管绿狐尾藻属于矮小的须根植物,但其植物密度较大,水体中的颗粒物在流动过程中遇到的阻力较多,因此泥沙拦截效果也较好.泥沙中的氮、磷含量可能更多地受水流走向影响.本研究的5个植物区拦截泥沙氮、磷量从上游到下游逐渐减少,

这主要是由于水体中的氮、磷浓度从上游到下游是依次降低的,因此到沟渠下游水和底泥界面可交换的氮、磷量也在减少.

3.2 生物量在生态沟渠氮、磷去除中的贡献

不同种类植物因其生理生态学特性不同,单位面积上的生物量有较大差异^[28].在本研究中,5种水生植物的生物量差异较大,水生美人蕉的生物量高达3.1 kg·m⁻²,而最低的灯心草生物量仅为1.3 kg·m⁻².另外,5种试验植物的氮、磷吸收量与生物量呈极显著的正相关($R^2 = 0.93$, $P < 0.01$),这与蒋跃平等^[29]和徐德福等^[30]报道的水生植物氮、磷吸收量与其生物量呈极显著正相关的研究结论相似.说明生物量高的水生植物,能够提高其氮、磷吸收总量.葛滢等^[31]在研究重度富营养化水体时,也发现单位面积内生物量高的植物比生物量低的植物的氮、磷净化效果好.从湿地植物刈割的可操作性分析,地上部生物量在总生物量中的比例越高,越有利于湿地生态工程中通过刈割植物地上部来达到去除氮、磷污染的目的^[27].5种试验植物的地上部和地下部生物量比值依次为:水生美人蕉(2.1) > 绿狐尾藻(2.0) > 灯心草(1.3) > 铜钱草(0.9) > 黑三棱(0.7),说明绿狐尾藻和水生美人蕉的地上部生物量远高于地下部.由于绿狐尾藻和水生美人蕉的氮、磷含量在5种植物中也是最高的,因此通过刈割其地上部分,便从生态沟渠中带走大量的氮、磷^[32].尽管灯心草的地上部生物量比地下部生物量高,但其茎叶部的氮、磷含量是5种植物中最低的;铜钱草和黑三棱的茎叶部氮、磷含量较高,但

其地上部和地下部生物量比值较低。因此,铜钱草、黑三棱和灯心草这3种水生植物收获的氮、磷量并不高。

4 结论

(1)生态沟渠出水氮、磷浓度分别低于地表水环境质量标准Ⅳ类和Ⅱ类,整条生态沟渠对水体总氮、总磷的去除率分别为64.3%、69.7%,说明生态沟渠对氮、磷具有很好的拦截和去除效应。

(2)生态沟渠平均每年拦截泥沙量为40 400 kg,含泥沙氮52.4 kg,泥沙磷21.4 kg。5个植物区拦截的泥沙量依次为:黑三棱($122.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 水生美人蕉($119.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 绿狐尾藻($113.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 铜钱草($104.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 灯心草($94.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。另外,受水流方向和植物区位置的影响,水生美人蕉、铜钱草、黑三棱、绿狐尾藻和灯心草等5个植物区拦截的泥沙氮、磷从上游到下游逐渐降低。

(3)生态沟渠中植物每年累积带走的氮、磷总量分别为7.9 kg和1.4 kg。5种植物中氮、磷吸收量最高的是水生美人蕉和绿狐尾藻,二者的地上生物量与地下生物量比值也远高于其他3种植物。因此生态沟渠中氮、磷吸收效果最好的植物是水生美人蕉和绿狐尾藻。

致谢:感谢2014全国生态修复研究生论坛对本研究的指导与资助!

参考文献:

- [1] 郭鸿鹏,朱静雅,杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(4): 290-295.
- [2] 李强坤,李怀恩,胡亚伟,等. 黄河干流潼关断面非点源污染负荷估算[J]. 水科学进展, 2008, **19**(4): 460-466.
- [3] 欧阳威,蔡冠清,黄浩波,等. 小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2411-2418.
- [4] 宋立芳,王毅,吴金水,等. 水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 150-156.
- [5] 崔健,马友华,赵艳萍,等. 农业面源污染的特性及防治对策[J]. 中国农学通报, 2006, **22**(1): 335-340.
- [6] Kaushal S S, Groffman P M, Band L E, *et al.* Tracking nonpoint source nitrogen pollution in human-impacted watersheds [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(19): 8225-8232.
- [7] Coban O, Kuschik P, Kappelmeyer U, *et al.* Nitrogen transforming community in a horizontal subsurface-flow constructed wetland[J]. Water Research, 2015, **74**: 203-212.
- [8] Liu F, Xiao R L, Wang Y, *et al.* Effect of a novel constructed drainage ditch on the phosphorus sorption capacity of ditch soils in an agricultural headwater catchment in subtropical central China[J]. Ecological Engineering, 2013, **58**: 69-76.
- [9] Needelman B A, Kleinman P J A, Strock J S, *et al.* Improved management of agricultural drainage ditches for water quality protection: An overview [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, **62**(4): 171-178.
- [10] Bennett E R, Moore M T, Cooper C M, *et al.* Vegetated agricultural drainage ditches for the mitigation of pyrethroid-associated runoff[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, **24**(9): 2121-2127.
- [11] 姜翠玲,崔广柏. 湿地对农业非点源污染的去除效应[J]. 农业环境保护, 2002, **21**(5): 471-473.
- [12] Schulz M, Kozerski H P, Pluntke T, *et al.* The influence of macrophytes on sedimentation and nutrient retention in the lower River Spree (Germany) [J]. Water Research, 2003, **37**(3): 569-578.
- [13] Madsen J D, Chambers P A, James W F, *et al.* The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes[J]. Hydrobiologia, 2001, **444**(1-3): 71-84.
- [14] Bouldin J L, Farris J L, Moore M T, *et al.* Vegetative and structural characteristics of agricultural drainages in the Mississippi Delta landscapes [J]. Environmental Pollution, 2004, **132**(3): 403-411.
- [15] Reddy K R, Kadlec R H, Flaig E, *et al.* Phosphorus retention in streams and wetlands: A review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1999, **29**(1): 83-146.
- [16] 徐红灯,席北斗,王京刚,等. 水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(2): 84-88.
- [17] 杨林章,周小平,王建国,等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(11): 1371-1374.
- [18] 余红兵,肖润林,杨知建,等. 灌溉和降雨条件下生态沟渠氮、磷输出特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(5): 686-692.
- [19] Wu Y H, Kerr P G, Hu Z Y, *et al.* Eco-restoration: Simultaneous nutrient removal from soil and water in a complex residential-cropland area [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(7): 2472-2477.
- [20] 余红兵,杨知建,肖润林,等. 水生植物的氮磷吸收能力及收割管理研究[J]. 草业学报, 2013, **22**(1): 294-299.
- [21] Cooper C M, Moore M T, Bennett E R, *et al.* Innovative uses of vegetated drainage ditches for reducing agricultural runoff [J]. Water Science and Technology, 2004, **49**(3): 117-123.
- [22] 张树楠,贾兆月,肖润林,等. 生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1101-1106.
- [23] Johnson S. Effects of water level and phosphorus enrichment on seedling emergence from marsh seed banks collected from northern Belize[J]. Aquatic Botany, 2004, **79**(4): 311-323.
- [24] Cedergreen N, Streibig J C, Spliid N H. Sensitivity of aquatic

- plants to the herbicide metsulfuron-methyl[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2004, **57**(2): 153-161.
- [25] Lacoul P, Freedman B. Relationships between aquatic plants and environmental factors along a steep Himalayan altitudinal gradient[J]. *Aquatic Botany*, 2006, **84**(1): 3-16.
- [26] 罗专溪, 朱波, 唐家良, 等. 自然沟渠控制村镇降雨径流中氮磷污染的主要作用机制[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 561-568.
- [27] 王岩, 王建国, 李伟, 等. 生态沟渠对农田排水中氮磷的去除机理初探[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(6): 586-590.
- [28] 李林锋, 年跃刚, 蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(3): 337-342.
- [29] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. *生态学报*, 2004, **24**(8): 1720-1725.
- [30] 徐德福, 徐建民, 王华胜, 等. 湿地植物对富营养化水体中氮、磷吸收能力研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, **11**(5): 597-601.
- [31] 葛滢, 常杰, 王晓月, 等. 两种程度富营养化水中不同植物生理生态特性与净化能力的关系[J]. *生态学报*, 2000, **20**(6): 1050-1055.
- [32] 张树楠, 肖润林, 余红兵, 等. 水生植物刈割对生态沟渠中氮、磷拦截的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, **20**(8): 1066-1071.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行