

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

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

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筲箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对疏自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力

秦如彬¹, 李如忠^{1*}, 高苏蒂², 张瑞钢³

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽新华学院土木与环境工程学院, 合肥 230088; 3. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘要: 2015年5月~2016年7月,在合肥市城乡交错带3条溪流沟渠上,按季节采集表层沉积物样,分析沉积物的氮素污染特征,解析潜在硝化速率 PNR、表面硝化速率 ANR 及反硝化速率的时空变化性,并以偏最小二乘回归分析法进行影响因子分析. 结果表明: ①关镇河支渠氮素污染最为严重, TN 均值达 $4\,516.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别为磨店小溪流和陶冲小溪流的 2.56、1.36 倍, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量也表现为关镇河支渠最高, 磨店小溪流最低; ②3条溪流沟渠 PNR 和 ANR 几乎都表现为夏季最高, 冬季最低, 春、秋两季则大体相当, 高低排序为陶冲小溪流 > 磨店小溪流 > 关镇河支渠; ③关镇河支渠反硝化速率均值为 $10.59\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$, 分别为磨店小溪流和陶冲小溪流的 3.16、1.75 倍, 3条溪流沟渠的反硝化速率和反硝化活性都表现为夏季高于春季; ④根据参数 F_{VIP} , 各溪流沟渠 ANR、PNR 和反硝化速率几乎都与沉积物的 pH、OM、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、TP 存在较为显著的相关关系, 但不同溪流水体之间存在差异性.

关键词: 氮素污染; 潜在硝化速率(PNR); 表面硝化速率(ANR); 反硝化速率; 城乡交错带

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-0936-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201609096

Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe

QIN Ru-bin¹, LI Ru-zhong^{1*}, GAO Su-di², ZHANG Rui-gang³

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. College of Civil and Environmental Engineering, Anhui Xinhua University, Hefei 230088, China; 3. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: From May 2015 to June 2016, seasonal sediment samples were collected from three headwater streams in the urban-rural fringe of Hefei, Chaohu Lake basin, China. The nitrogen pollution characteristics of sediments were preliminarily investigated for the three streams. Three metrics, that is, potential nitrification rate (PNR), areal nitrification rate (ANR) and rate of denitrification were quantitatively determined, and their spatial and temporal variations were discussed subsequently. Moreover, the relationship between PNR, ANR or denitrification rate and a list of environmental factors was discriminated by using partial least-squares regression analysis. Results showed that: ① Guanzhenhe Distributary was the most polluted stream with a mean content of $4\,516.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for TN, which was 2.56 and 1.36 times higher than those of Modian Stream and Taochong Stream, respectively. Similarly, the highest values for NH_4^+-N and NO_3^--N emerged in Guanzhenhe Distributary while the lowest existed in Modian Stream. ② There were distinct seasonal variations in PNR and ANR, namely, the maximum values emerged in summer, minimum in winter, and almost equivalent in spring and autumn. And the arrangement in order for PNR and ANR was Taochong Stream > Modian Stream > Guanzhenhe Distributary. ③ The mean rate of denitrification in Guanzhenhe Distributary was $10.59\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$, which was 3.16 and 1.75 times higher than those in Modian Stream and Taochong Stream, respectively. In addition, both denitrification rate and denitrification activity in summer were higher than those in spring for the three streams. ④ According to the variable importance plot (F_{VIP}), ANR, PNR and rate of denitrification were almost all significantly correlated with such physical and chemical factors as pH, OM, NH_4^+-N , NO_3^--N , TN and TP in sediments for the three streams.

Key words: nitrogen pollution; potential nitrification rate (PNR); areal nitrification rate (ANR); rate of denitrification; urban-rural fringe

近30年来,欧美发达国家针对河、湖水系统沉积物的硝化/反硝化作用,开展了大量的、卓有成效的研究,初步揭示了硝化/反硝化作用机制和作用过程^[1-3]. 即便今日,相关问题依旧是环境水文地质学、环境科学、水生态学等学科领域的研究热点^[4-6]. 尽管国内已就大型河口滩涂湿地沉积物的

硝化/反硝化作用开展了一些研究^[7,8],但对处于河流源头地区的溪流沟渠,相关研究报道则还十分少

收稿日期: 2016-09-11; 修订日期: 2016-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579061, 51179042)

作者简介: 秦如彬(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为水环境保护, E-mail: 1144070358@qq.com

* 通信作者, E-mail: Lrz1970@163.com

见。目前,源头溪流、排水沟渠等对于汇流区输入养分截留和净化的重要性已被大量研究所证实,如 Peterson 等^[9]研究发现,在微生物活性较强的生长季节,源头溪流甚至可以将 50% 以上的输入性无机氮进行滞留和转化; Alexander 等^[10]在对密西西比河流域不同等级河流的研究中发现,等级较低的小河流水体可以将 60% 以上的氮滞留下来,而等级较高的大河流的滞留率往往仅为 10% 左右。因此,开展源头溪流氮素滞留机制研究,无疑具有十分重要的理论和实际意义。

尽管有学者认为小河流水系统的氮素滞留主要来自于生物吸收作用^[11],但将硝化/反硝化作用作为氮素滞留主要机制和重要循环过程的观点仍占主导地位^[2,6]。在城乡交错带地区,由于城市排水管网系统不够完善,一部分生活污水、工业废水可能直接或间接地进入附近的小河流或排水沟渠中,导致水体氮素污染较为突出。不仅如此,位于城市外围的城市污水处理厂尾水排放,也会造成水体氮含量上升,从而影响水体氮滞留潜力和滞留特征,甚至可能使河流沉积物由氮的“汇”变为“源”^[12,13]。合肥市位于巢湖西半湖北侧,目前该市境内水体普遍面临严峻的氮素污染局面^[14,15]。为了解该市城乡交错带小河流水系统沉积物的硝化/反硝化行为特点,本文拟以 3 条分别以城市污水厂尾水、食品加工废水和农业排水与地下水渗流为主要补给水源的溪流沟渠为研究对象,在对水体沉积物氮素污染特征分析的基础上,开展沉积物硝化/反硝化潜力分析和评估,以期为合肥地区水环境保护和水质调控管理提供依据。

表 1 溪流水文水力特征及补给情况

Table 1 Hydrologic and hydraulic characteristics and replenishment of the three streams			
指标	磨店小溪流	陶冲小溪流	关镇河支渠
长度/km	2.5	2.0	2.5
水面宽度/m	0.5~2.0	0.7~3.0	1.5~3.0
水深/m	0.10~0.30	0.15~0.40	0.15~0.60
流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.085~0.30	0.10~0.50	0.15~0.55
流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	0.010~0.360	0.030~0.255	0.030~0.650
河道情况	自然冲刷溪流、土质岸坡	自然冲刷沟渠、土质岸坡	人工开挖排洪沟渠、土质岸坡
主要补给水源	农田排水、潜层地下水	城市污水处理厂尾水	食品加工坊废水和生活污水

达到国家《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的劣 V 类标准,而磨店小溪流则勉强可以达到 IV 类标准^[16]。

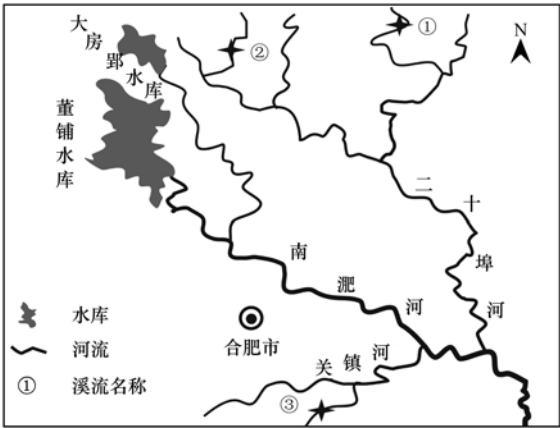
2 材料与方法

2.1 沉积物采集及预处理

在 3 条溪流上各选择 6 个采样点位(与水质采

1 研究区概况

南淝河位于合肥市境内,是巢湖主要入湖河流之一。本研究选定的 3 条溪流沟渠分别位于南淝河两条支流——二十埠河和关镇河上,且地处合肥市城乡交错带。其中,磨店小溪流和陶冲小溪流位于北部、东北部城市边缘,关镇河支渠则处于城市东南方,见图 1。



①为磨店小溪流;②为陶冲小溪流;③为关镇河支渠

图 1 3 条溪流沟渠大致位置示意

Fig. 1 Sketch-map of the three studied streams

作为天然冲刷形成的小河流,磨店小溪流在形态结构、滨岸植被覆盖情况以及污染来源方面都较其它两条溪流沟渠更为复杂一些,3 条溪流沟渠的水文水力特征及补给来源情况见表 1。

2015 年 5、7、10 和 12 月,分别在 3 条溪流上采集水样,水质分析结果见表 2。从中可知,关镇河支渠和陶冲小溪流的氮、磷浓度都很高,几乎全部

样点一一对应),从上游至下游依次编号为 1~6 号。2015 年 5、7、10、12 月,对 3 条溪流沟渠采集表层沉积物,并置于通风阴凉处风干,去除杂物,再经研磨、过 100 目筛后,测定 TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 及 OM、TP 和 pH 等。其中,在 2015 年 10、12 月采集的沉积物中,有一部分新鲜沉积物用于测定硝化速率。另外,在 2016 年 4、7 月也采集了表层沉积

表 2 溪流水体基本理化指标

Table 2 Physicochemical properties of water quality

水质指标	磨店小溪流				陶冲小溪流				关镇河支渠			
	最大值	最小值	平均值	中值	最大值	最小值	平均值	中值	最大值	最小值	平均值	中值
pH	8.36	6.96	7.62	7.68	8.61	7.45	7.94	8.00	8.63	7.66	8.11	8.10
EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	762	369	548	517	740	305	445	432	947	732	846	855
水温/ $^{\circ}\text{C}$	32.3	8.6	21.7	22.7	30.6	12.0	22.0	22.6	33.9	10.2	22.3	22.8
ORP/mV	256	104	167	155	272	83	162	163	68	-121	47	41
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.11	0.12	0.40	0.32	1.91	0.31	0.91	0.90	6.08	1.40	3.23	3.35
$\text{PO}_4^{3-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.94	0.04	0.29	0.17	1.61	0.12	0.67	0.53	5.38	1.16	2.64	2.61
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.51	0.53	1.70	1.62	7.79	1.96	4.14	3.62	37.12	20.50	31.88	34.95
$\text{NH}_4^{+}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.72	0.30	1.23	1.03	5.27	1.06	2.95	3.03	35.70	15.23	25.23	25.53
$\text{NO}_3^{-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.75	0.04	0.23	0.15	1.90	0.15	0.84	0.69	1.02	0.15	0.57	0.63

物,并将其中一部分用于测定硝化速率,另一部分用于厌氧条件下反硝化培养及相应反硝化速率的测定.

2.2 样品分析测试

沉积物 TN 采用过硫酸钾消化法测定; $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 采用 KCl 浸提法测定; $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定. 根据烧失量 LOI 估算沉积物中有机质含量 OM, 采用 pH 计测定沉积物 pH 值(水土比 = 5:1), TP 由七步连续提取法获得的磷含量累加计算得到^[16].

2.3 硝化速率测定

2.3.1 潜在硝化速率

采用氯酸钾抑制法测定潜在硝化速率,大体过程如下^[17]: 称取沉积物样 70 g 置于 250 mL 锥形瓶中,加入去离子水至 250 mL,将沉积物分散均匀,形成悬浊液. 取 5 mL 悬浊液于 50 mL 小锥形瓶中,加入 5 mL $60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯酸钾溶液和 10 mL $8\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸铵溶液,于恒温振荡培养箱中振荡培养(20°C , $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),培养时间设置为 0、2、4、6 h 等 4 个梯度,每个梯度 3 个平行样. 达到培养时间后,将小锥形瓶从培养箱取出,加入 20 mL $4\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钾溶液作为浸提液,再放入培养箱中振荡 30 min. 振荡完成后,从小锥形瓶取 5 mL 悬浊液,并以 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤,采用分光光度计测定亚硝态氮含量. 这里,亚硝态氮标准曲线母液采用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钾溶液配制. 沉积物的潜在硝化速率按下式计算,即:

$$\text{PNR} = \frac{k_p \times V_1}{\text{TSS} \times V_2} \quad (1)$$

式中,PNR(potential nitrification rate)为沉积物潜在硝化速率, $\mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; k_p 为亚硝态氮累积浓度与培养时间的线性拟合斜率, $\mu\text{mol}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$; V_1 为提取体系体积,取值 0.04 L; TSS 为沉积物悬浊液

固体物质浓度, $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$; V_2 为加入小锥形瓶的沉积物悬浊液体积,取值 5 mL.

有关 TSS 的测定方法参见文献[17].

2.3.2 表面硝化速率

取 30 mL 沉积物悬浊液于 50 mL 离心管中,每个沉积物样品设置 3 个平行样. 待沉积物完全沉降后,小心加入 10 mL $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸铵溶液和 10 mL $75\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯酸钾溶液,并以氯酸钾加入的时间为 0 h,分别在 16.8、21.8 和 27.5 h 从离心管中取 3 mL. 从第二次取样开始,取样前先向离心管中加入 3 mL 去离子水,待混匀后再进行取样. 样品经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤,用分光光度计测定亚硝态氮含量,所有操作均在室温下进行,表面硝化速率计算公式为^[17]:

$$\text{ANR} = \frac{k_a \times V_3}{S} \times 10 \quad (2)$$

式中,ANR(areal nitrification rate)为沉积物表面硝化速率, $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; k_a 为亚硝态氮累积浓度与培养时间的线性拟合斜率, $\mu\text{mol}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$; V_3 为上覆水体积,按 40 mL 计; S 为沉积物表面积或离心管截面积,取值 5.73 cm^2 ; 10 为单位转换系数.

2.4 反硝化速率测定

采用硝酸盐剩余量法^[18],测定厌氧环境下反硝化速率. 该方法基于沉积物对 NO_3^{-} 吸附能力弱,玻璃器皿中 NO_3^{-} 不可能通过淋失途径产生损失的特点,将一定量的 NO_3^{-} 加入装有少量沉积物的三角瓶中,利用厌氧培养前后三角瓶中 NO_3^{-} 变化量(即损失量)刻画沉积物反硝化作用的强弱. 具体测定方法如下: 称取相当于 1 g 烘干样的新鲜沉积物于 50 mL 平底三角瓶中,加入 20 mL $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KNO_3 溶液,加塞密封并在恒温箱内 35°C 环境条件下培养 48 h. 然后,采用 $3\text{ }500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,分离过滤后,测定 NO_3^{-} 含量. 为确定新鲜沉积物样的 NO_3^{-}

含量,称取相同质量的新鲜沉积物样,加入 20 mL 4 mol·L⁻¹的氯化钾溶液,采用3 500 r·min⁻¹离心 10 min,经过滤后测定滤液 NO₃⁻ 含量,并将测定值加上添加的 NO₃⁻ 含量作为初始量. 不妨将厌氧培养前后三角瓶中 NO₃⁻ 变化量除以初始量来表征 NO₃⁻ 的反硝化活性,而以 NO₃⁻ 变化量除以培养时间来计算 NO₃⁻ 的反硝化速率^[7,19].

需要特别指出的是,这里的硝化和反硝化测定使用的都是新鲜沉积物样,因此彼此含水率差异可能较大. 为便于样本结果的比较,有必要消除这一因素的干扰,即将相应的计算结果折算为干样.

2.5 数据处理

采用 SPSS 17.0、Excel 10.0 软件完成数据处理

及相关图件的绘制,偏最小二乘回归分析(PLSR)利用 Minitab 17.0 软件完成.

3 结果与讨论

3.1 沉积物氮素污染特征

表 3 列出了 3 条溪流沟渠表层沉积物中各形态氮含量及其它理化指标. 可以看出,3 条溪流沉积物 TN 含量差异十分显著,关镇河支渠明显高于陶冲小溪流,远高于磨店小溪流,而且三者均超过了加拿大安大略省环境和能源部发布指南中能引起最低级别生物毒性效应的 TN 浓度(550 mg·kg⁻¹). 特别是,关镇河支渠沉积物 TN 均值高达 4 516.39 mg·kg⁻¹,接近该指南中的严重级别(4 800

表 3 溪流沟渠表层沉积物各形态氮含量及其它理化指标

Table 3 Contents of nitrogen fractions and other physicochemical indexes in the surface sediments of the studied streams								
溪流	季节	统计值	各形态氮含量/mg·kg ⁻¹			OM/%	TP/mg·kg ⁻¹	pH
			NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN			
磨店小溪流	春季	最大值	502.53	39.15	2 449.72	11.23	533.63	7.24
		最小值	302.24	11.64	1 172.24	7.40	357.27	5.98
		平均值	390.27	18.69	1 719.40	8.92	462.17	6.65
	夏季	最大值	488.65	48.45	2 291.03	9.03	497.87	7.84
		最小值	273.51	16.43	1 132.48	6.34	347.06	6.93
		平均值	346.71	24.15	1 593.93	7.70	414.96	7.26
	秋季	最大值	532.53	24.56	2 465.70	10.56	572.39	7.12
		最小值	292.21	13.34	1 224.23	8.79	381.76	5.74
		平均值	372.42	20.77	1 788.71	9.39	466.59	6.45
	冬季	最大值	547.11	26.46	2 613.84	9.43	685.90	7.49
		最小值	321.51	14.32	1 392.57	8.37	423.18	6.20
		平均值	408.12	20.17	1 863.69	8.90	529.40	6.98
陶冲小溪流	春季	最大值	565.03	81.04	4 701.45	10.80	875.27	7.82
		最小值	407.35	25.46	2 617.31	6.57	433.84	7.31
		平均值	467.61	49.19	3 491.13	8.06	719.76	7.53
	夏季	最大值	500.15	97.43	4 295.01	8.52	799.01	7.88
		最小值	405.81	27.56	2 448.29	4.19	384.33	7.20
		平均值	451.44	55.20	3 409.20	6.12	663.89	7.57
	秋季	最大值	537.72	46.21	4 496.82	8.97	830.68	7.84
		最小值	430.55	18.79	2 666.25	4.08	433.49	7.19
		平均值	474.66	33.30	3 486.40	6.96	735.86	7.44
	冬季	最大值	577.64	40.92	4 302.25	8.83	873.16	8.30
		最小值	438.23	18.80	2 733.16	4.87	479.33	7.73
		平均值	494.52	28.38	3 441.41	6.71	766.70	7.98
关镇河支渠	春季	最大值	637.15	113.29	5 305.09	13.76	1 781.24	8.03
		最小值	522.72	40.71	4 172.00	10.25	1 145.24	7.62
		平均值	574.53	82.76	4 567.60	11.90	1 367.69	7.77
	夏季	最大值	602.40	133.59	5 047.87	10.27	1 714.56	8.14
		最小值	468.93	63.12	4 009.69	8.23	1 048.78	7.82
		平均值	526.46	89.14	4 278.72	9.14	1 305.95	8.01
	秋季	最大值	645.90	86.83	5 117.32	17.05	1 768.24	8.09
		最小值	530.24	52.52	4 238.18	12.71	1 140.79	7.76
		平均值	576.39	69.75	4 539.50	14.52	1 375.61	7.87
	冬季	最大值	712.86	52.87	5 419.87	12.18	1 727.12	8.41
		最小值	540.52	36.04	4 083.28	8.56	1 206.05	7.81
		平均值	612.00	42.56	4 679.76	10.33	1 458.54	8.06

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[20], 分别为磨店小溪流和陶冲小溪流的 2.56、1.36 倍。磨店小溪流 TN 含量为 1 232.49 ~ 2 613.84 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 1 741.44 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由于受到陶冲湖城市污水处理厂尾水排放的影响, 陶冲小溪流沉积物 TN 平均值高达 3 457.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 接近滇池^[21]表层沉积物均值(3 515.60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。而且, 各溪流沟渠 TN 含量总体上呈现出夏季较低, 秋、冬季相对较高的特点。

从形态上看, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量的数据分布特征与 TN 一致, 即表现出关镇河支渠 > 陶冲小溪流 > 磨店小溪流的变化规律, 且 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 含量最大值均出现在关镇河支渠, 最小值均出现在磨店小溪流。就 NH_4^+ -N 而言, 关镇河支渠处于较高水平, 均值高达 572.34 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别是磨店小溪流和陶冲小溪流的 1.49、1.21 倍。根据实地勘察, 关镇河支渠接纳大量来自豆制品、米制品生产的小作坊加工废水和部分生活污水, 造成大量氮素沉积于底泥中。由表 3 可见, 3 条溪流 NH_4^+ -N 均呈夏季低而秋、冬季高的特点, 这可能与夏季气温较高, 硝化细菌活性增强, 使得更多的 NH_4^+ -N 转化为 NO_3^- -N。另外, NH_4^+ -N 易于被水生植物吸收利用, 夏季时节 3 条溪流沟渠滨岸水生植物以及水底生物膜和藻类生长旺盛, 对于水体 NH_4^+ -N 的吸收利用增强, 也促使沉积物中 NH_4^+ -N 向上覆水或间隙水的释放。磨店小溪

流表层沉积物 NO_3^- -N 含量为 11.64 ~ 48.45 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 20.92 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 关镇河支渠和陶冲小溪流均值分别为 71.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 41.51 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从时间上看, 除了磨店小溪流无明显季节性变化外, 其他两条溪流 NO_3^- -N 含量均表现为夏季略高于春季, 秋、冬季则较低, 在一定程度上与 NH_4^+ -N 刚好相反, 这可能与二者之间存在相互转化关系有关。

另外, 关镇河支渠和陶冲小溪流各季度 TP 平均含量也都高于加拿大安大略省环境和能源部发布指南中能引起最低级别生物毒性效应的 TP 浓度(600 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。而且, 3 条溪流沉积物 pH 值也表现出一定的规律性, 即关镇河支渠 > 陶冲小溪流 > 磨店小溪流。

3.2 硝化潜力分析与评估

3.2.1 潜在硝化速率及其变化特征

磨店小溪流沉积物含水率的变化范围为 52.98% ~ 84.23%, 均值为 69.79%; 陶冲小溪流变化范围为 58.42% ~ 86.14%, 均值为 72.47%; 关镇河支渠为 72.12% ~ 88.42%, 均值为 81.72%。采样中发现, 关镇河支渠沉积物大多发黑发臭且较为细腻, 陶冲小溪流多为灰黑色, 磨店小溪流沉积物接近土壤本底颜色, 即呈灰黄色。3 条溪流表层沉积物的 PNR 统计结果, 见图 2。

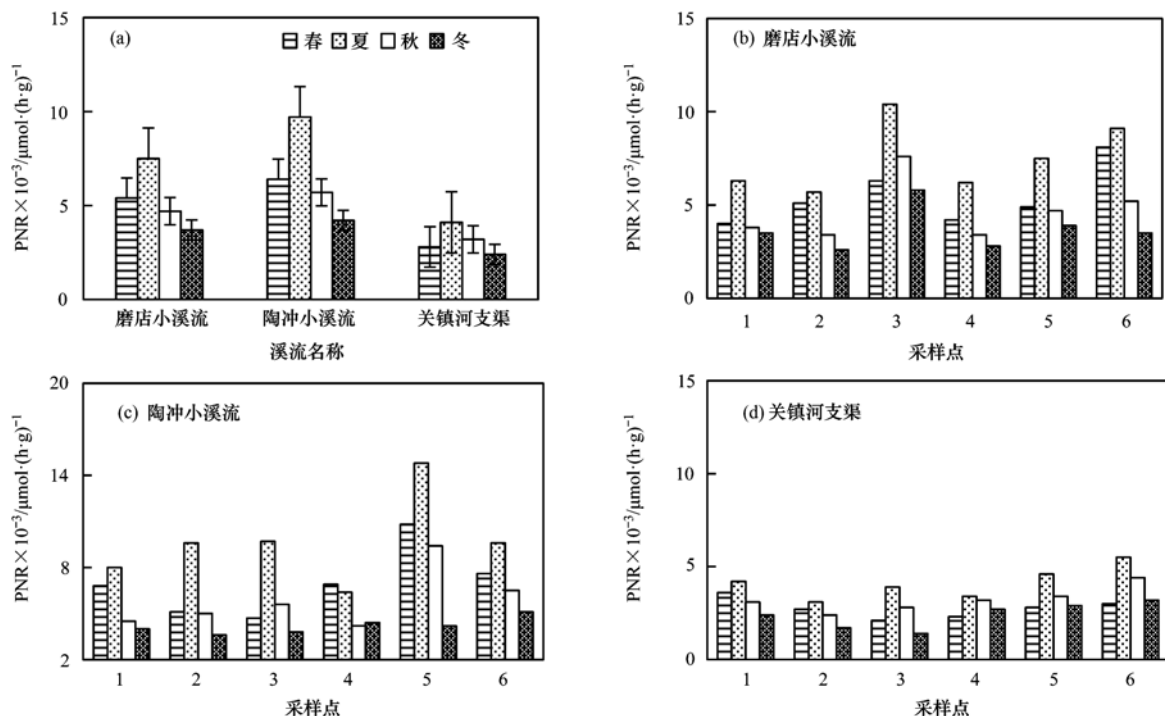


图 2 溪流沟渠潜在硝化速率分布

Fig. 2 Distribution of potential nitrification rate (PNR) in the studied streams

可以看出,各溪流 PNR 差异性较明显,整体呈现出陶冲小溪流 > 磨店小溪流 > 关镇河支渠,且都表现为夏季最高、冬季最低。尽管陶冲小溪流和磨店小溪流的春季 PNR 高于秋季,关镇河支渠为秋季 PNR 高于春季,但数值悬殊不大。陶冲小溪流 PNR 变幅为 $0.004 \sim 0.015 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,均值为 $0.007 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,磨店小溪流次之,均值为 $0.005 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,关镇河支渠最低,仅为 $0.003 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。关镇河支渠接纳了大量未经处理的豆制品、米制品小作坊的食品加工废水和一部分生活污水,溶解氧含量低,多个采样点的氧化还原电位呈还原性,影响了硝化反应的进行;陶冲小溪流虽然接受污水处理厂尾水补给,但与磨店小溪流一样,氧化还原电位整体上还是表现为氧化性特征。Vogeler 等^[22]认为氨氧化过程将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 是硝化作用的限制性步骤,溶解氧增高能促进 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 形成,关镇河支渠 PNR 最低,可能与溶解氧不足有关。王超等^[17]针对滢阳河水系沉积物的研究得到 PNR 范围为 $0.001 \sim 0.387 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,中值为 $0.103 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,显著高于本研究 3 条溪流沟渠。Strauss 等^[23]在对美国中西部 36 条小溪流沉积物硝化速率的研究中,发现 PNR 最小值为 0,最大值也仅为 $0.0016 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,低于本研究的溪流沟渠。

从时空变化性来看,磨店小溪流 PNR 呈现出下游略高于上游的特点,而且夏季最高,春季次之,冬季最低。其中 3 号采样点位于芦苇生长旺盛的河段边缘,芦苇植株密度较大,有利于硝化细菌的生长,植物的根际效应和对氧气及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的传输促进了硝化作用,这可能是 3 号采样点夏季 PNR 偏高的主要原因。陶冲小溪流 PNR 最小值出现在 4 号点位,由于该处水流冲刷作用较强,沉积物很少。PNR 最高值点位于溪流与水塘汇水区下游的 5 号采样点,由于水塘的稀释作用,此处水质明显好于上游。另外,该点位处于深潭中,水体流速显著下降,悬浮物质大量沉降,氨氮等营养物质不断积累,硝化速率显著提高,氨氮浓度优势得以发挥。除此之外,其余 4 个点位差异性不大。与其他两条溪流相比,关镇河支渠 PNR 的时空变化性明显偏低,有些点位的春、秋和冬季的 PNR 较为接近。

3.2.2 表面硝化速率及其变化特征

潜在硝化速率代表没有溶解氧限制情况下沉积物的硝化潜能,而表面硝化速率是表征沉积物在实际溶解氧扩散条件下的硝化能力^[17]。沉积物表面硝化速率 ANR 的分布特征见图 3。与 PNR 分布规律相同,ANR 也呈现出陶冲小溪流 > 磨店小溪流 > 关镇河支渠的特点。从季节上看,磨店小溪流和陶冲小溪流总体表现为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,关

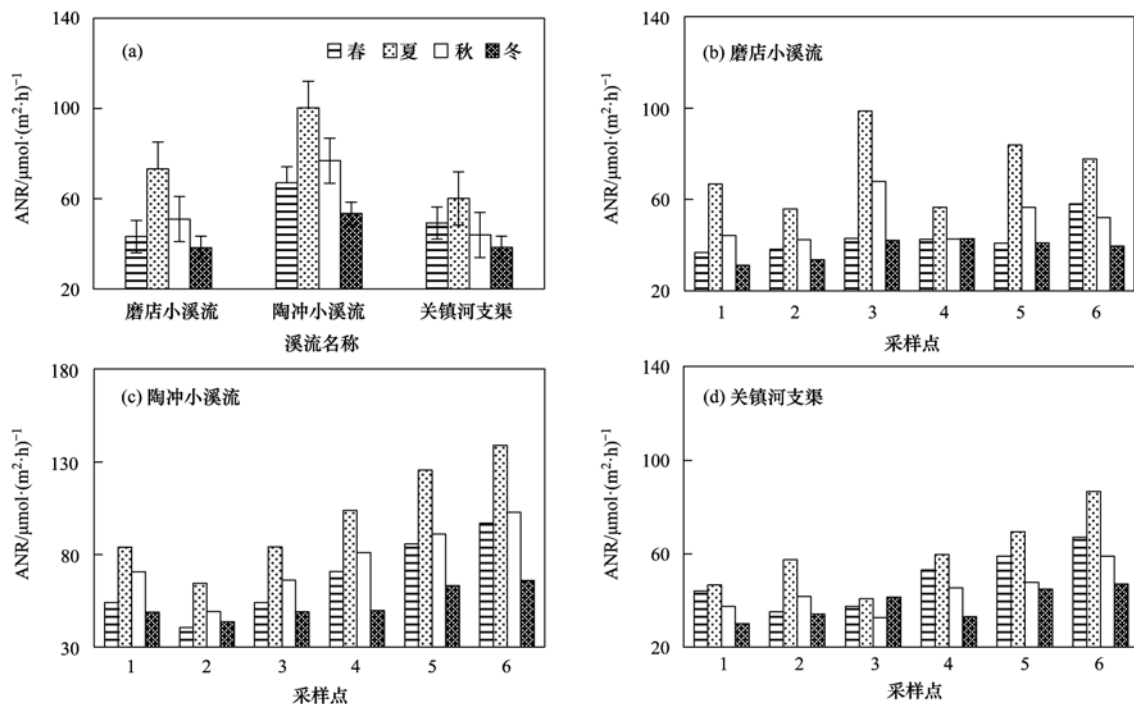


图 3 溪流沟渠表面硝化速率分布

Fig. 3 Distribution of areal nitrification rate (ANR) in the studied streams

镇河支渠季节性变化存在一定差异,表现为夏季最强,春季略高于秋季,冬季最弱.众所周知,温度升高会促进微生物的新陈代谢,有利于硝化细菌生长和硝化活性.而且,一般认为 28~30℃ 为硝化细菌最适生长温度,低于 5℃ 或高于 42℃ 环境下硝化细菌均很难存活^[24],这可能是 3 条溪流沟渠夏季 ANR 相对最高,冬季最低的主要原因.

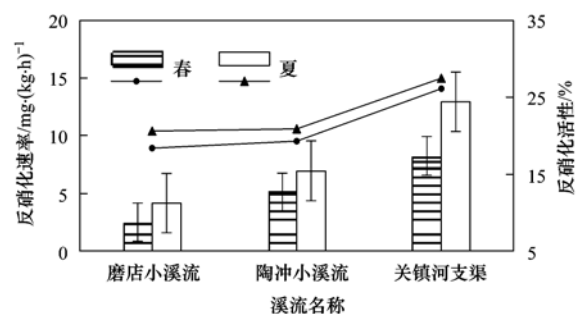
磨店小溪流 ANR 变幅为 31.10~98.67 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,均值为 51.45 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,变异系数为 32.93%.春、秋和冬季的各点位 ANR 差异性较小,基本保持在 30~50 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 范围内,而夏季时各点位 ANR 差异性明显.其中,3 号采样点 ANR 达到最大值,2 号点最小,最大值是最小值的 1.77 倍.陶冲小溪流和关镇河支渠的 ANR 均值分别为 74.39 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 47.96 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,整体均表现出由上游至下游逐渐增大的趋势,但关镇河支渠增长趋势略显和缓一些.从数值上看,本研究的 ANR 总体上高于濠阳河水系 [3~143 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,中值为 38 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$],但低于长江口邻近海域 [101.3~514.3 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]^[25].Dedieu 等^[26]在对地中海泻湖沉积物的研究中得到 ANR 约 140~620 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ [中值为 300 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$],Kemp 等^[27]得到美国曼哈顿东南部二级支流沉积物的 ANR 约为 218~413 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ [中值为 276 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$],也都明显高于本研究的 3 条溪流沟渠.

3.3 反硝化潜力分析与评估

总体上,各溪流沟渠反硝化速率差异性较为明显(图 4),高低排序依次为:关镇河支渠>陶冲小溪流>磨店小溪流,季节性变化均为夏季>春季.笔者认为,随着夏季气温的升高,微生物活性增强,沉积物的矿化和硝化作用可以为反硝化作用提供 NO_3^- ;同时,温度亦可通过影响沉积物的耗氧速率来左右反硝化速率.这里,磨店小溪流反硝化速率的变化范围为 2.06~5.84 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$,均值为 3.35 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ (变异系数为 33.88%),各采样点呈现出由上游至下游缓慢增大的变化态势.陶冲小溪流变幅为 3.84~9.53 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$,均值为 6.04 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ (变异系数为 28.94%),而且除了 4 号采样点反硝化速率偏小以外,其他点位均呈下游高于上游的变化规律.进一步调查发现,4 号点位处渠道明显收窄、水流速度快、湍流特征显著,较强的水力冲刷导致表层沉积物较少,加之湍流

曝气作用,使得底泥表层溶解氧含量较高,从而影响反硝化进程.关镇河支渠反硝化速率变化范围为 7.18~15.51 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$,均值为 10.59 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ (变异系数达 26.44%),约为磨店小溪流和陶冲小溪流的 3.16、1.75 倍,最小值和最大值分别出现在春季 1 号和夏季 3 号采样点.牟晓杰等^[7]对闽江河口湿地的研究中,得到反硝化速率为 0.74~3.68 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$,王东启等^[28]得到长江口崇明东滩沉积物反硝化速率为 21.91~35.87 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$.显然,与大河口滩涂湿地相比,3 条溪流沉积物的反硝化速率处在正常范围内,并没有出现异常增大或减小现象.

3 条溪流沉积物反硝化活性存在一定的差异性(图 4),表现为陶冲小溪流总体略高于磨店小溪流,但却明显低于关镇河支渠.其中,磨店小溪流反硝化活性变幅为 14.31%~25.63%,均值为 18.46%,在 3 号芦苇区和氮磷污染相对最严重的 6 号采样点较高.陶冲小溪流和关镇河支渠变幅分别为 15.36%~25.25% 和 24.12%~29.52%,均值依次是 20.14%、26.78%.在季节变化上,3 条溪流反硝化活性都表现出夏季高于春季的特点.尽管 3 条溪流沟渠补给方式、污染状况、形态结构等各不相同,但其硝化-反硝化速率的季节性变化规律与濠阳河水系^[17]、长江口邻近海域^[25]、闽江河口湿地^[19]等水体相似,表明硝化-反硝化过程虽很复杂、受诸多环境因素的影响,但不同水体沉积物对硝化-反硝化的季节性影响具有一致性特征.



柱状图对应反硝化速率,折线图对应反硝化活性

图 4 溪流沟渠沉积物反硝化速率分布

Fig. 4 Distribution of denitrification rate in the sediments of the three streams

3.4 影响因子的偏最小二乘分析

偏最小二乘回归分析 (PLSR) 是在普通多元回归分析的基础上,揉进了主成分分析和典型相关分析的思想,可有效解决自变量间的多重共线性问题^[29].回归分析生成的 F_{VIP} (variable importance

plot) 参数可反映自变量对因变量的贡献水平,即 F_{VIP} 值越大,自变量对因变量的解释能力越大. 一般认为, F_{VIP} 大于 1 的自变量重要,在 0.5 ~ 1 之间的比较重要,小于 0.5 的则不重要^[30]. 针对 3 条溪流沟渠,分别构建偏最小二乘回归模型,从而对 ANR (y_1)、PNR(y_2)、反硝化速率(y_3) 及其影响因子 pH (x_1)、OM(x_2)、 NH_4^+ -N(x_3)、 NO_3^- -N(x_4)、TN(x_5)、TP(x_6)的相关关系进行定量分析,结果见表 4.

可以看出,磨店小溪流的 ANR、PNR 均与 OM、 NO_3^- -N 含量呈显著相关性,且 F_{VIP} 值大于 1. 实际上,沉积物 OM 的存在有利于为某些异养硝化微生物提供大量基质,促进硝化作用的发生^[31],而

NO_3^- -N 含量可反映氨氧化过程,过高的 NO_3^- -N 含量会抑制氨氧化过程的进行^[32]. 不难看出,除 TN 对 ANR 不重要而对 PNR 重要以外,pH、 NH_4^+ -N、TP 与 ANR、PNR 也都有较强的相关性,相应的 F_{VIP} 介于 0.5 ~ 1 之间,表明它们对于 ANR、PNR 也都有较强的解释能力. 与溪流反硝化速率关系重要的指标为 NO_3^- -N, F_{VIP} 为 1.660,具有显著的相关性;其它各项指标的 F_{VIP} 全部介于 0.5 ~ 1 之间,证明对反硝化速率影响比较重要. 大量研究表明, NO_3^- -N 是反硝化作用的直接参与物质,反硝化反应需较高的 NO_3^- -N 浓度,且反硝化速率与 NO_3^- -N 浓度遵循一级动力学特征^[33].

表 4 硝化/反硝化与环境因子的 PLSR 回归分析

Table 4 PLSR analysis between Nitrification/denitrification rate and environment factors							
溪流名称		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
磨店小溪流	y_1	0.025	0.358	0.012	0.472	-0.026	-0.257
	F_{VIP}	0.981	1.538	0.908	1.290	0.089	0.693
	y_2	0.070	0.260	1.372	0.302	-0.541	-0.818
	F_{VIP}	0.686	1.200	0.783	1.695	0.657	0.891
	y_3	0.155	0.084	-0.032	0.890	0.252	-0.570
	F_{VIP}	0.874	0.834	0.712	1.660	0.870	0.912
陶冲小溪流	y_1	-0.370	0.041	-0.266	0.708	0.735	-0.798
	F_{VIP}	0.793	0.698	0.648	1.725	0.880	0.913
	y_2	-0.286	0.030	0.046	0.131	0.129	0.045
	F_{VIP}	1.205	1.078	0.892	1.855	0.700	1.003
	y_3	-0.354	-0.339	-0.144	1.264	-0.025	-0.217
	F_{VIP}	0.724	0.781	0.955	1.563	1.101	0.673
关镇河支渠	y_1	-0.138	0.345	0.878	0.024	0.794	-0.597
	F_{VIP}	0.585	0.785	1.790	0.401	1.054	0.941
	y_2	-0.033	0.066	-0.168	-0.048	-0.118	-0.115
	F_{VIP}	0.862	0.692	1.551	0.408	1.127	1.057
	y_3	0.225	-0.246	-0.701	0.183	-0.144	0.158
	F_{VIP}	1.023	1.085	1.391	0.757	0.946	0.935

陶冲小溪流的 ANR 仅与 NO_3^- -N 呈显著相关, F_{VIP} 达到了 1.725,而 PNR 不仅与 OM、 NO_3^- -N、TP 均呈显著正相关,还与 pH 呈显著负相关. 此外, ANR、PNR 与所有因子的相关性均在较重要以上,说明这些因子对 ANR、PNR 影响都颇为重要. 该溪流反硝化速率不仅与 NO_3^- -N 显著相关,还与 TN 呈显著负相关,说明沉积物氮素可能是该溪流反硝化作用的限制性因素. 而且,反硝化速率与其它各因子的关系也都维持在较为重要水平.

关镇河支渠 ANR 与 NH_4^+ -N、TN 具有显著相关性,PNR 与 NH_4^+ -N、TN、TP 也具有显著的相关关系. 尽管 ANR、PNR 与 pH、OM、TN、TP 也都表现出了较强的相关性,但 NO_3^- -N 对两者似乎都没有太大关系,这可能与关镇河支渠沉积物的氮素污染过

于严重有很大的关系. 就反硝化系数来看,相关性显著的因子是 pH、OM、 NH_4^+ -N,其它因子也全都处于较为重要水平,这也与磨店小溪流和陶冲小溪流存在较为显著的不同.

4 结论

(1)3 条溪流沟渠沉积物的 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TN 含量差异性较为显著,相应的沉积物氮素污染程度排序为: 关镇河支渠 > 陶冲小溪流 > 磨店小溪流.

(2)陶冲小溪流表层沉积物的 PNR、ANR 相对最高,其次是磨店小溪流,关镇河支渠相对最小. 而且,3 条溪流沟渠 PNR 和 ANR 几乎都表现出夏季最高,冬季最低,春、秋两季大体相当的特点.

(3)3条溪流反硝化速率大小排序为:关镇河支渠>陶冲小溪流>磨店小溪流。其中,关镇河支渠反硝化速率均值分别为磨店小溪流和陶冲小溪流的3.16、1.75倍。关镇河支渠反硝化活性最强,磨店小溪流最弱。而且,3条溪流夏季的反硝化速率和反硝化活性整体高于春季。

(4)3条溪流沟渠 ANR、PNR 和反硝化速率几乎都与沉积物的 pH、OM、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、TP 存在显著或较为显著关系,但不同溪流水体之间存在差异性。

参考文献:

- [1] Holmes R M, Jones Jr J B, Fisher S G, *et al.* Denitrification in a nitrogen-limited stream ecosystem[J]. *Biogeochemistry*, 1996, **33**(2): 125-146.
- [2] Smith R L, Böhlke J K, Repert D A, *et al.* Nitrification and denitrification in a midwestern stream containing high nitrate: in situ assessment using tracers in dome-shaped incubation chambers[J]. *Biogeochemistry*, 2009, **96**(1-3): 189-208.
- [3] Beaulieu J J, Tank J L, Hamilton S K, *et al.* Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(1): 214-219.
- [4] Harvey J W, Böhlke J K, Voytek M A, *et al.* Hyporheic zone denitrification: controls on effective reaction depth and contribution to whole-stream mass balance[J]. *Water Resources Research*, 2013, **49**(10): 6298-6316.
- [5] Tuttle A K, McMillan S K, Gardner A, *et al.* Channel complexity and nitrate concentrations drive denitrification rates in urban restored and unrestored streams [J]. *Ecological Engineering*, 2013, **73**: 770-777.
- [6] Rahimi M, Essaid H I, Wilson J T. The role of dynamic surface water-groundwater exchange on streambed denitrification in a first-order, low-relief agricultural watershed [J]. *Water Resources Research*, 2015, **51**(12): 9514-9538.
- [7] 牟晓杰,刘兴土,仝川,等. 人为干扰对闽江河口湿地土壤硝化-反硝化潜力的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(8): 1413-1419.
Mou X J, Liu X T, Tong C, *et al.* Effects of human disturbance on nitrification and denitrification potential in the Min River estuarine wetland[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(8): 1413-1419.
- [8] 汪旭明,任洪昌,李家兵,等. 河口区淡水和微咸水潮汐沼泽湿地沉积物反硝化作用[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 3917-3926.
Wang X M, Ren H C, Li J B, *et al.* Denitrification rates in the sediment of estuarine freshwater and brackish tidal marshes[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 3917-3926.
- [9] Peterson B J, Wollheim W M, Mulholland P J, *et al.* Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams [J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 86-90.
- [10] Alexander R B, Smith R A, Schwarz G E. Effect of stream channel size on the delivery of nitrogen to the Gulf of Mexico[J]. *Nature*, 2000, **403**(6771): 758-761.
- [11] Arango C P, Tank J L, Johnson L T, *et al.* Assimilatory uptake rather than nitrification and denitrification determines nitrogen removal patterns in streams of varying land use[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(6): 2558-2572.
- [12] Merseburger G, Martí E, Sabater F, *et al.* Point-source effects on N and P uptake in a forested and an agricultural Mediterranean streams[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(5): 957-967.
- [13] Armon S, Avni N, Gafny S. Nutrient uptake and macroinvertebrate community structure in a highly regulated Mediterranean stream receiving treated wastewater[J]. *Aquatic Sciences*, 2015, **77**(4): 623-637.
- [14] 李如忠,刘科峰,钱靖,等. 合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1718-1726.
Li R Z, Liu K F, Qian J, *et al.* Nitrogen and phosphate pollution characteristics and eutrophication evaluation for typical urban landscape waters in Hefei City [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1718-1726.
- [15] 奚姗姗,周春财,刘桂建,等. 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 542-547.
Xi S S, Zhou C C, Liu G J, *et al.* Spatial and temporal distributions of nitrogen and phosphate in the Chaohu Lake[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 542-547.
- [16] 李如忠,秦如彬,黄青飞,等. 不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3375-3383.
Li R Z, Qin R B, Huang Q F, *et al.* Fractions and release risk of phosphorus in surface sediments of three headwater streams with different styles of water supply[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3375-3383.
- [17] 王超,单保庆,赵钰. 濠阳河水系沉积物硝化速率分布及溶解氧的限制效应[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1735-1740.
Wang C, Shan B Q, Zhao Y. Spatial distribution of nitrification rate and the restriction effect of oxygen in the Fuyang River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1735-1740.
- [18] 王阳,章明奎. 杭州城区及其边缘地区湿地反硝化潜力评价[J]. *江西农业学报*, 2010, **22**(8): 159-161, 167.
Wang Y, Zhang M Q. Denitrification potential of wetlands in Hangzhou city and its edge areas[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, **22**(8): 159-161, 167.
- [19] 刘荣芳,张林海,林啸,等. 闽江口短叶茳芩湿地土壤反硝化潜力[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(11): 2865-2870.
Liu R F, Zhang L H, Lin X, *et al.* Denitrification potential of *Cyperus malaccensis* marsh soil in Minjiang River estuary of East China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(11): 2865-2870.
- [20] 李任伟. 沉积物污染和环境沉积学[J]. *地球科学进展*, 1998, **13**(4): 398-402.
Li R W. Contamination of sediments and environmental sedimentology[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, **13**(4): 398-402.
- [21] 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,等. 滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 471-480.
Meng Y Y, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Characteristics of nitrogen pollution and the potential mineralization in surface sediments of Dianchi Lake[J]. *Environmental Science*, 2015,

- 36(2): 471-480.
- [22] Vogeler I, Vachey A, Deurer M, *et al.* Impact of plants on the microbial activity in soils with high and low levels of copper[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008, **44**(1): 92-100.
- [23] Strauss E A, Mitchell N L, Lamberti G A. Factors regulating nitrification in aquatic sediments: effects of organic carbon, nitrogen availability, and pH[J]. *Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences*, 2002, **59**(3): 554-563.
- [24] Racchetti E, Bartoli M, Soana E, *et al.* Influence of hydrological connectivity of riverine wetlands on nitrogen removal via denitrification[J]. *Biogeochemistry*, 2011, **103**(1-3): 335-354.
- [25] 李佳霖, 白洁, 高会旺, 等. 长江口邻近海域夏季沉积物硝化细菌与硝化作用[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3203-3208.
- Li J L, Bai J, Gao H W, *et al.* Nitrifying bacteria and nitrification in sediment at the adjacent sea area of Yangtze River estuary in summer[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(11): 3203-3208.
- [26] Dedieu K, Rabouille C, Gilbert F, *et al.* Coupling of carbon, nitrogen and oxygen cycles in sediments from a Mediterranean lagoon: a seasonal perspective [J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 2007, **346**: 45-59.
- [27] Kemp M J, Dodds W K. Centimeter-scale patterns in dissolved oxygen and nitrification rates in a prairie stream[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2001, **20**(3): 345-357.
- [28] 王东启, 陈振楼, 许世远, 等. 长江口崇明东滩沉积物反硝化作用研究[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, **36**(6): 544-551.
- [29] Diemer L A, McDowell W H, Wymore A S, *et al.* Nutrient uptake along a fire gradient in boreal streams of Central Siberia [J]. *Freshwater Science*, 2015, **34**(4): 1443-1456.
- [30] 马明德, 马学娟, 谢应忠, 等. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析[J]. *生态学报*, 2014, **34**(3): 682-689.
- Ma M D, Ma X J, Xie Y Z, *et al.* Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of Ningxia and influencing factors: partial least-squares regression (PLS) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(3): 682-689.
- [31] 杨柳燕, 王楚楚, 孙旭, 等. 淡水湖泊微生物硝化反硝化过程与影响因素研究[J]. *水资源保护*, 2016, **32**(1): 12-22, 50.
- Yang L Y, Wang C C, Sun X, *et al.* Study on microbial nitrification and denitrification processes and influence factors in freshwater lakes [J]. *Water Resources Protection*, 2016, **32**(1): 12-22, 50.
- [32] 鲍林林, 陈永娟, 王晓燕. 北运河沉积物中氨氧化微生物的群落特征[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 179-189.
- Bao L L, Chen Y J, Wang X Y. Diversity and abundance of ammonia-oxidizing prokaryotes in surface sediments in Beiyun River[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 179-189.
- [33] 晨曦, 王晓东, 李佳霖, 等. 秋季黄河口附近海域沉积物反硝化速率及影响因素研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, **41**(S1): 409-412.
- Chen X, Wang X D, Li J L, *et al.* The denitrification rate and its influence factors in the surface sediment of Yellow River Estuary in autumn[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, **41**(S1): 409-412.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)