

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

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)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎晨,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表面污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第37卷(2016年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

河北平原潮土中微生物对氮降解特征

张灿灿^{1,2}, 庞会从^{1,2}, 高太忠^{1,2*}, 张静^{1,2}, 李晓玉^{1,2}, 付胜霞^{1,2}

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050018; 2. 河北省污染防治生物技术重点实验室, 石家庄 050018)

摘要: 了解土壤中微生物对氮素降解规律, 对于土壤氮污染修复具有重要现实意义. 从河北平原潮土中筛选出 8 种高效氨化细菌、硝化细菌、异养硝化好氧反硝化细菌, 对所筛菌种进行 16S rDNA 分析, 选出最适菌株通过固定化载体将菌种制成菌剂. 探讨了用加入所筛菌种及拮抗菌的菌液和地表水分别滴灌小白菜对土壤中的氮降解产生的影响, 并测定土样磷脂脂肪酸 (PLFA) 的值. 结果表明: 以硅藻土为载体硝化细菌的氨氮降解率达到 38%, 硝态氮合成率为 205%; 以硅藻土为载体的氨化细菌氨氮合成率为 1 711%, 异养硝化好氧反硝化细菌的硝态氮降解率达到 367%. 加所筛菌液滴灌对土壤总氮和氨氮的降解效果较好, 硝化作用也较强, 加菌后土壤中微生物量明显增加, 且更快到达峰值. 对不同土样不同时间磷脂脂肪酸数据分析发现, 在白菜生长过程中, 土壤中的微生物含量均产生了 1 次峰值, 且加入所筛菌的先到达峰值. 对于任丘和阜城土样来说, 加入所筛菌后, 土壤中微生物种类相应增多, 对土壤微生物环境有所改善, 微生物也比较活跃.

关键词: 潮土; 氨化细菌; 硝化细菌; 异养硝化好氧反硝化细菌; 氮的降解; PLFA 技术; 河北平原

中图分类号: X172; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4830-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201604043

Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain

ZHANG Can-can^{1,2}, PANG Hui-cong^{1,2}, GAO Tai-zhong^{1,2*}, ZHANG Jing^{1,2}, LI Xiao-yu^{1,2}, FU Sheng-xia^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Key Laboratory of Biotechnology for Pollution Control in Hebei Province, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Understanding the law of soil microbial degradation of nitrogen is of great practical significance for the remediation of soil nitrogen pollution. From fluvo-aquic soil of Hebei plain, 8 kinds of bacteria, including nitrification bacteria, ammonification bacteria, heterotrophic nitrification to aerobic denitrification bacteria were isolated and analyzed by 16S rDNA identification, and the most suitable strains were selected to prepare bacterial agents with optimized carrier materials. The effects of the screened strains of bacteria or antagonistic fungus to Chinese cabbage in the process of drip irrigation on nitrogen and PLFA (Phospholipid Fatty Acids) values in the soils were discussed. The results showed that by using diatomite as a carrier, the ammonia nitrogen degradation rate was 38% and the synthetic rate of nitrate was 205% with ammonibacteria, the synthetic rate of ammonia nitrogen was 1 711% with ammonibacteria, the degradation rate of nitrate nitrogen was 367% with heterotrophic nitrification to aerobic denitrification bacteria. In drip irrigation experiment, total nitrogen and ammonia nitrogen in soil were better degraded and nitrification was stronger in the soil, meanwhile, PLFA in the soil increased and content of microbes reached the peak in shorter time, the soil biological environment was better after irrigation with screened bacteria.

Key words: fluvo-aquic soil; ammonibacteria; nitrobacteria; heterotrophic nitrification to aerobic denitrification bacteria; degradation of nitrogen; PLFA technology; Hebei plain

随着农业中化肥的大量^[1]使用及人畜粪便、工业废水和城市污水的排放, 大量的氮经土壤包气带进入地下水造成了地下水的氮污染^[2~4]. 氮系化合物的主要存在形式有氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮, 简称“三氮”. 土壤微生物群落结构影响不同生态系统中的氮素转化^[5~9]. 80%~90% 土壤过程的发生都有微生物的参与^[10], 土壤微生物的性质常被用作土壤健康的灵敏性指标^[11~14]. 土壤微生物参与土壤氮元素的一系列迁移转化, 是土壤中氮循环的引擎^[15], 参与氮循环的微生物主要有氨化细菌、硝化细菌和异养硝化好氧反硝化细菌^[16]. 硝化作用包括 2 个步骤: 将氨转化为亚硝酸盐和将亚硝酸

盐转化为硝酸盐, 分别由亚硝化细菌和硝化细菌完成. 氨氧化细菌即亚硝化细菌, 是硝化过程中的限速反应^[17]. 已有研究还发现厌氧氨氧化菌可以在缺氧环境中, 将铵离子用亚硝酸根氧化为氮气^[18,19]. 反硝化是指硝酸盐氮和亚硝酸盐氮在反硝化菌作用下, 被还原成氮气的过程. 异养硝化好氧反硝化是一种新型生物脱氮技术^[20], 由同步硝化反

收稿日期: 2016-04-06; 修订日期: 2016-07-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373096); 河北省高校重点学科建设项目

作者简介: 张灿灿(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境工程微生物技术, E-mail: zhangcancan_ok@163.com

* 通讯联系人, E-mail: taizhonggao@hebest.edu.cn

硝化菌起作用. 近年来研究表明异养硝化好氧反硝化是最经济的脱氮手段^[21], 逐渐成为生物脱氮领域的研究热点^[22]. 在农田的常规耕种中, 目前对参与其中的微生物的多样性和微生物在土壤中的复杂反应的理解和研究十分有限^[23].

河北平原是我国重要的粮食产地和蔬菜基地, 潮土是华北平原最具代表性的农田土壤类型^[24]. 目前, 从微生物角度对河北平原氮污染问题的研究相对较少. 本文采集河北平原最具代表性的任丘、宁晋和阜城这 3 个地区的潮土土样, 对参与氮循环的 3 种细菌进行富集、筛选和分析, 利用固定化技术制成菌剂研究微生物对土壤中氮循环的影响, 从微生物方面揭示氮素在河北平原潮土中的降解过程, 以期对河北平原土壤和地下水氮污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

硝化细菌富集培养基(g): 葡萄糖 5.00, (NH₄)₂SO₄ 2.00, NaCl 2.00, FeSO₄·7H₂O 0.40, K₂HPO₄ 1.00, MgSO₄·7H₂O 0.50, 超纯水1 000 mL, pH 7.20; 分离培养基: 在富集培养基中加入 2% 琼脂.

氨化细菌富集培养基(g): 蛋白胨 5.00, NaCl 0.25, KCl 0.30, K₂HPO₄ 0.25, MgSO₄·7H₂O 0.50, FeSO₄·7H₂O 0.01, 超纯水1 000 mL, pH 7.20; 分离培养基(g): 蛋白胨 5.00, NaCl 0.25, FeSO₄·7H₂O 0.01, K₂HPO₄ 0.50, MgSO₄·7H₂O 0.50, 2% 琼脂, 超纯水1 000 mL, pH 7.20.

同步硝化反硝化菌富集培养基(g): 柠檬酸钠 3.70, (NH₄)₂SO₄ 2.0, CaCO₃ 5.00, K₂HPO₄ 1.00, FeSO₄·7H₂O 0.40, MgSO₄·7H₂O 0.50, NaCl 2.00, 超纯水1 000 mL; 分离培养基: 在富集培养基中加入 2% 琼脂.

以上培养基均在 121℃ 条件下灭菌 25 min.

实验所用的潮土土样均取自麦田, 分别位于河北平原任丘市麻家坞镇南畅支村(地理坐标 38°41'41"N/116°14'28"E)、宁晋县河渠村南(地理坐标 37°35'29"N/114°49'36"E)和阜城县霞口镇常庄村北(地理坐标 37°58'14"N/116°33'06"E). 取样分上下两层, 深度分别为 0~20 cm 和 20~40 cm, 取回后放于冰箱冷藏待用. 土样的基本性质如表 1 所示. 测三氮含量前, 土样需经风干、筛分和氯化钾溶液浸提处理, 测土壤细菌含量时, 需采用新鲜土样或冷藏土样.

表 1 河北平原潮土中氮的含量和微生物数量

Table 1 Nitrogen contents and microbial population in fluvo-aquic soil of Hebei Plain

项目	氨氮/g·kg ⁻¹	硝态氮/g·kg ⁻¹	亚硝态氮/mg·kg ⁻¹	细菌菌落数/CFU·g ⁻¹
任丘(上层)	0.02	0.12	0.31	2.5 × 10 ⁶
任丘(下层)	0.02	0.32	0.19	3.5 × 10 ⁶
宁晋(上层)	0.07	0.33	1.05	4.8 × 10 ⁶
宁晋(下层)	0.06	0.13	0.98	5.7 × 10 ⁶
阜城(上层)	0.10	0.11	1.41	2.7 × 10 ⁷
阜城(下层)	0.08	0.13	0.90	3.3 × 10 ⁶

1.2 实验方法

土壤中三氮的测定按照文献[25]进行.

称量 15 g 新鲜或冷藏的土样, 放入盛有 100 mL 灭菌的硝化细菌富集液体培养基中, 振荡培养 7 d, 取 50 mL 上清液转接到新鲜的 150 mL 富集培养基中, 连续取样转接 3 次, 得到硝化细菌富集培养液. 氨化细菌、异养硝化好氧反硝化细菌也按上述方法富集.

根据菌株的生理生化特征对土样中的 3 种菌进行分离筛选, 任丘(代号 R)土样中筛出 2 种硝化细菌, 记为 RX1 和 RX2; 4 种氨化细菌, 记为 RA1、RA2、RA3 和 RA4; 4 种同步硝化反硝化细菌, 记为 RT1、RT2、RT3 和 RT4. 宁晋(代号 N)土样中筛出 2 种硝化细菌, 记为 NX1 和 NX2; 6 种氨化细菌, 记

为 NA1、NA2、NA3、NA4、NA5 和 NA6; 3 种同步硝化反硝化细菌, 记为 NT1、NT2 和 NT3. 阜城(代号 F)土样中筛出 2 种硝化细菌, 记为 FX1 和 FX2; 7 种氨化细菌, 记为 FA1、FA2、FA3、FA4、FA5、FA6 和 FA7; 5 种同步硝化反硝化细菌, 记为 FT1、FT2、FT3、FT4 和 FT5.

将上述所筛细菌接种到相应富集培养基中, 分析比较氨氮、硝态氮、亚硝态氮降解或生成情况, 筛选出高效菌株 NX1、FX1、RX2、NA1、NA2、RT2、FT2 和 FT5, 并对这 8 株高效菌株进行 16S rDNA 测序分析.

土培实验采用滴灌的方式浇小白菜, 滴灌的液体分别为: 地表水(记为 0 号)、加入所筛菌种的地表水(记为 1 号)、加拮抗菌的地表水(记为 2 号).

加入菌液的浓度均为 $10^6 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$, 地表水与菌液的体积比为 100:1. 不同处理样均做 3 组平行实验.

实验周期为小白菜的生长周期, 约 50 d, 期间定期翻土护理, 保证光照, 避免强光和大雨. 实验期间, 小白菜长势良好. 每周取样 1 次, 取样分为上层和下层, 避免上下层相混. 将取好的土样风干过筛后分为两部分: 测磷脂脂肪酸的土样放于冰箱中冷冻, 测氨氮、硝态氮、亚硝态氮和总氮的土样置于冰箱中冷藏待测(2 d 内测完).

土壤 PLFA 的提取即预处理采用 Bligh-Dyer 提取液法. 将采集的土样晾干, 过 100 目筛后放在 -20°C 下冷冻保藏, 预处理时取 8 g 样品于 50 mL 离心管内, 用 Bligh-Dyer 提取液振荡提取脂类并静置过夜, 之后加氯仿和柠檬酸缓冲液静置过夜, 然后用氯仿、丙酮、无水甲醇洗柱, 即用硅胶柱层析法分离得到磷脂脂肪酸, 再将其经碱性甲酯化后加入内标(含正 19 烷脂肪酸甲酯的正己烷溶剂), 最后用气-质联用仪(Agilent 6890N GC-5975c MSD)分析各种脂肪酸的含量. 样品的上机测试委托北京众义惠达科贸有限公司完成.

2 结果与讨论

2.1 菌种的筛选

2.1.1 硝化细菌的筛选

对所筛的不同土样的不同硝化细菌在 24 h 和 48 h 的氨氮、硝态氮和亚硝态氮进行了测定, 降解及生成结果如图 1~3 所示.

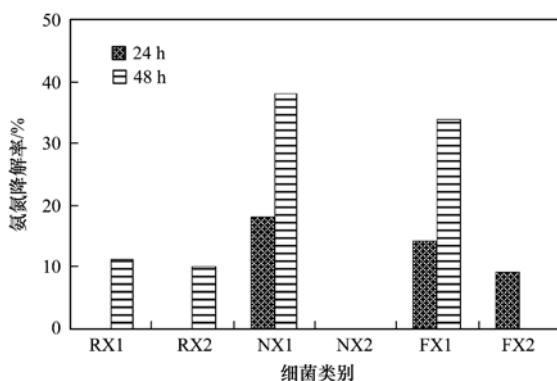


图 1 硝化细菌的氨氮降解率

Fig. 1 Decomposition rate of ammonia nitrogen by nitrifying bacteria

图 1 可知, 菌种 NX1、RX1 和 FX1 的氨氮降解率相对较高, 硝化细菌的氨氮降解能力在第 24 h 较低, 而在第 48 h 较高. 其中 NX1 在第 48 h 氨氮降解率达 38%.

如图 2 可知, 菌种 RX2 和 FX2 的硝态氮合成率

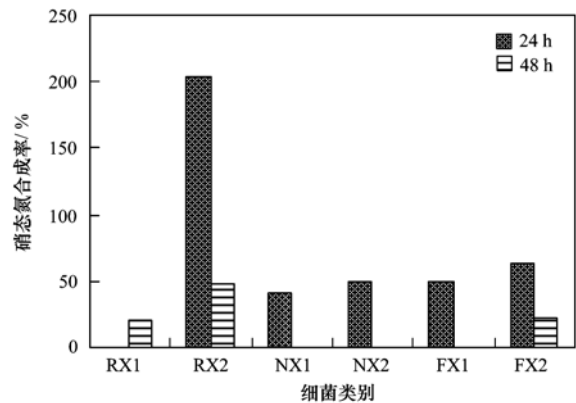


图 2 硝化细菌的硝态氮合成率

Fig. 2 Synthetic rate of nitrate nitrogen by nitrobacteria

相对较高, RX2 在第 24 h 硝态氮合成率为 205%. 硝化细菌的硝态氮合成能力在 24 h 达到最高.

如图 3 可知, 硝化菌种 FX1、RX2 和 NX1 的亚硝态氮合成率相对较高, 其中 FX1 在第 48 h 亚硝态氮合成率为 329%. 硝化细菌的亚硝态氮合成能力在第 24 h 较低, 在第 48 h 较高. 综上所述, 选择 NX1、FX1 和 RX2 进行进一步研究.

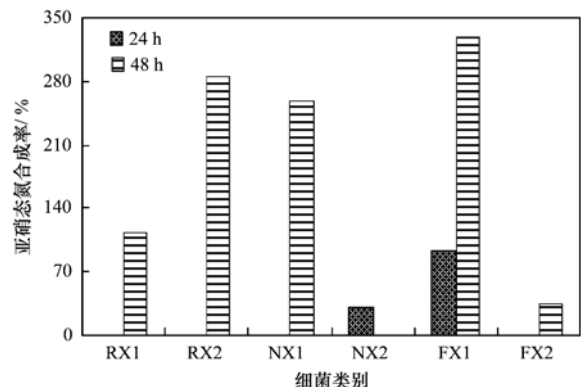


图 3 硝化细菌的亚硝态氮合成率

Fig. 3 Synthetic rate of nitrite-nitrogen by nitrobacteria

2.1.2 氨化细菌的筛选

对所筛的不同土样的不同氨化细菌在 24 h 和 48 h 的氨氮、硝态氮和亚硝态氮进行了测定, 降解及生成结果如图 4~6 所示.

如图 4, 氨化细菌的氨氮合成能力在第 48 h 高于第 24 h. RA2、NA1、NA2 和 FA7 的氨氮合成率相对较高, NA2 在第 48 h 氨氮合成率达 1711%.

如图 5, 氨化细菌的硝态氮降解能力在第 48 h 高于第 24 h, RA2、FA7 和 NA1 的硝态氮降解率相对较高, 其中 RA2 在第 48 h 硝态氮浓度降解率为 82%.

如图 6, 氨化细菌的亚硝态氮合成能力在第 48 h 高于第 24 h. RA3、RA4 和 RA2 的亚硝态氮合

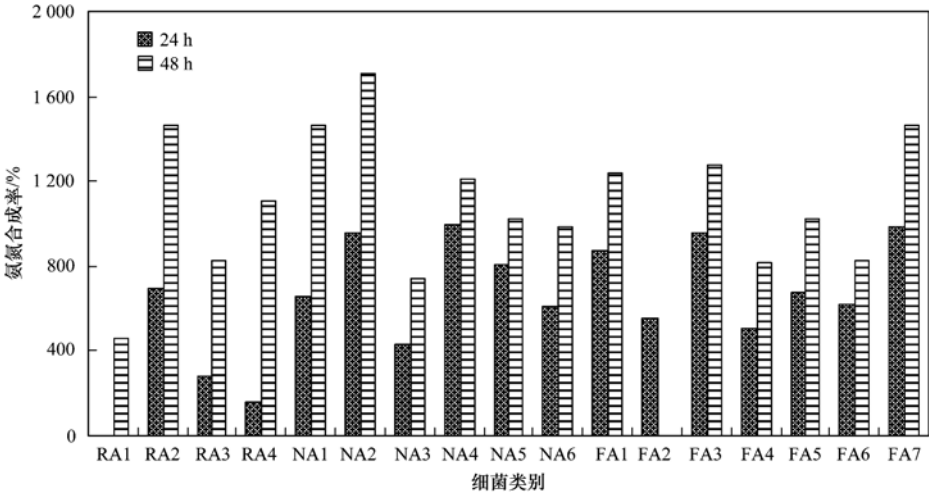


图4 氨化细菌的的氨氮合成率

Fig. 4 Synthetic rate of ammonia nitrogen by Ammonifying bacteria

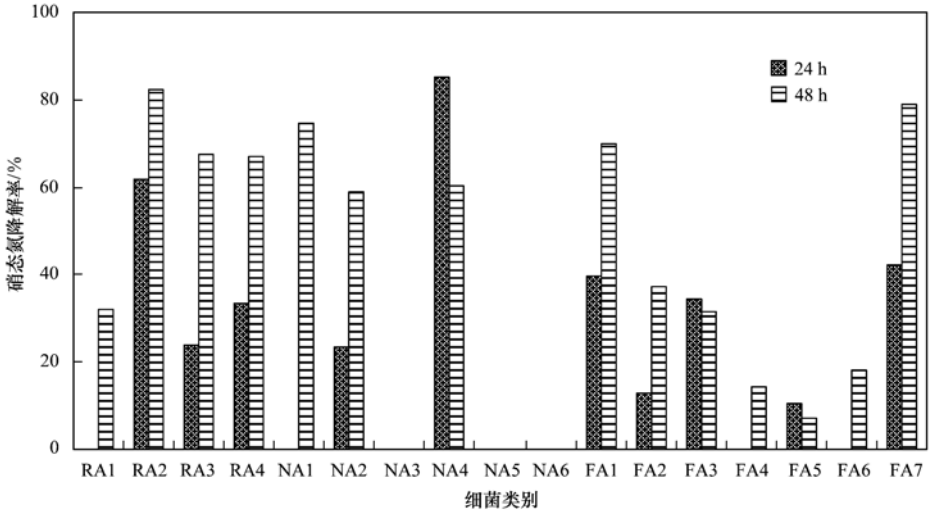


图5 氨化细菌的硝态氮降解率

Fig. 5 Decomposition rate of nitrate nitrogen by Ammonifying bacteria

成率相对较高,RA3 在第 48 h 亚硝态氮合成率为 4 867%. 综上所述,结合氨化细菌的氨氮合成率和对三氮的降解效果,选出 RA3、RA4 和 RA2 进行进一步的分析.

2.1.3 异养硝化好氧反硝化菌的筛选

对所筛的不同土样的不同异养硝化好氧反硝化菌不同时间的氨氮,硝态氮和亚硝态氮进行了测定,降解及生成结果如图 7~9 所示.

如图 7,异养硝化好氧反硝化的氨氮降解能力在第 24 h 较高,在第 48 h 较低. RT2、FT2、NT2 和 FT4 的氨氮降解率相对较高,FT2 在第 24 h 氨氮降解率可达 21%.

如图 8,异养硝化好氧反硝化的硝态氮降解能力在 24 h 和第 48 h 变化波动较大. 菌种 RT2、FT2、

FT5 和 NT2 的硝态氮降解率较高,其中 RT2 在第 48 h 硝态氮降解率可达 367%.

如图 9 可知,异养硝化好氧反硝化的亚硝态氮合成能力在第 48 h 高于第 24 h. 菌种 RT2、RT4 和 FT2 的亚硝态氮合成率相对较高,其中 RT2 在 48 h 亚硝态氮合成率为 176%.

综合图 1~9,通过对所筛菌株降解或合成率的进一步测定,综合培养液中氨氮、硝态氮和亚硝态氮的质量分数在不同时间的变化,在硝化细菌中选出 NX1、FX1 和 RX2,氨化细菌中选出 NA2、NA1,异养硝化好氧反硝化细菌中选出 RT2、FT2 和 FT5,筛出的 8 种菌株都属于革兰氏阳性菌,将 8 株菌试管斜面保存,送北京博迈德基因技术有限公司,提取 DNA 并用 3730 测序仪测序.

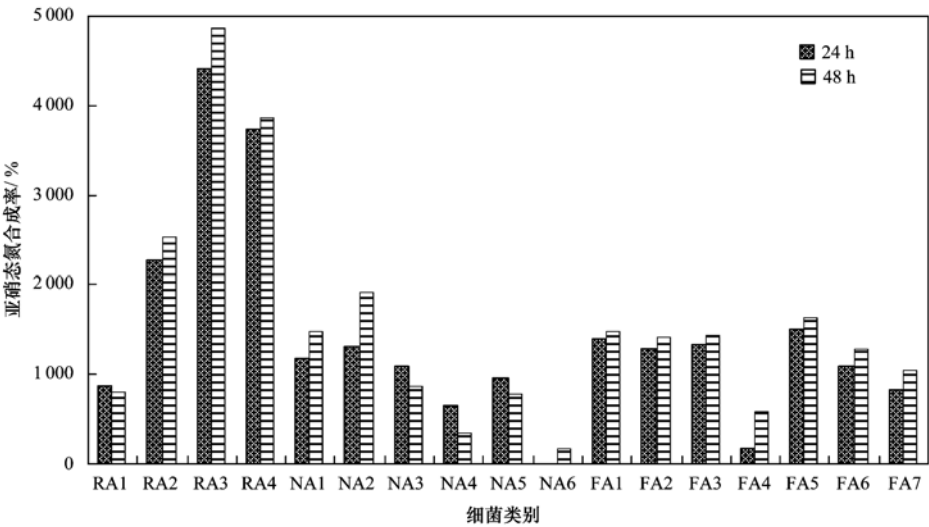


图 6 氨化细菌的亚硝态氮合成率
Fig. 6 Synthetic rate of nitrite-nitrogen by Ammonifying bacteria

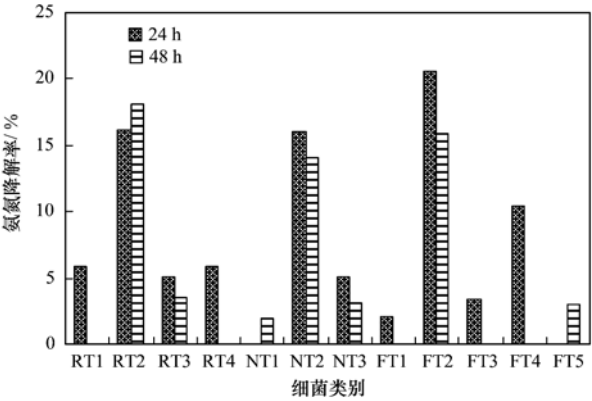


图 7 异养硝化好氧反硝化细菌的氨氮降解率
Fig. 7 Decomposition rate of ammonia nitrogen by Heterotrophic nitrification to aerobic denitrification bacteria

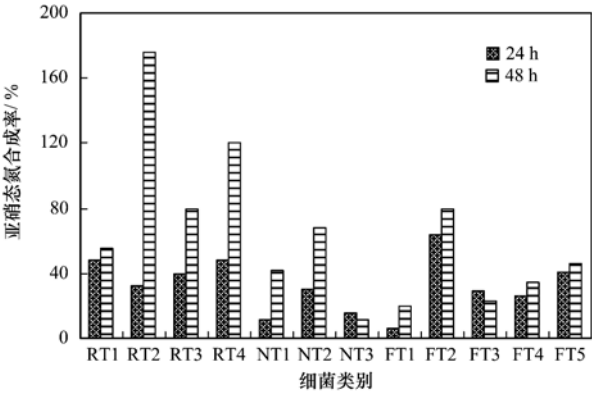


图 9 异养硝化好氧反硝化细菌的亚硝态氮合成率
Fig. 9 Synthetic rate of nitrite-nitrogen by Heterotrophic nitrification to aerobic denitrification bacteria

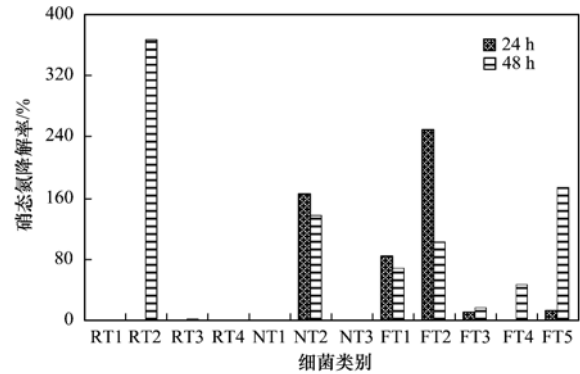


图 8 异养硝化好氧反硝化细菌的硝态氮降解率
Fig. 8 Decomposition rate of nitrate nitrogen by Heterotrophic nitrification to aerobic denitrification bacteria

将测得的基因序列与 NCBI 基因库比对, RX2 与甲基营养型芽孢杆菌域, 厚壁菌门, 芽孢杆菌纲, 芽孢杆菌目的芽孢杆菌科的杆菌属 (*Bacillus*) 相似

性为 100%, 同源性 99%。
NX1、FX1 与淀粉芽孢杆菌域: 厚壁菌门, 杆菌纲, 芽孢杆菌目的芽孢杆菌科的杆菌属 (*Bacillus*) 相似性为 99%, 同源性 99%。
NA1 与细菌域: 拟杆菌门, 黄杆菌纲, 黄杆菌目, 黄杆菌科的稳杆菌属 (*Empedobacter*) 相似性 99%, 同源性 100%。
NA2 与细菌域: 拟杆菌门, 黄杆菌纲, 黄杆菌目, 黄杆菌科的金黄杆菌属 (*Chryseobacterium*) 相似性 99%, 同源性 99%。
RT2 与细菌域: 变形菌门, 变形菌纲, 气单胞菌目, 气单胞菌科的卓贝尔氏菌属 (*Zobellella*) 相似性 99%, 同源性 99%, 且有研究表明该菌对氨氮降解效果比较显著。
FT2 与细菌域: 放线菌门, 放线菌纲, 微球菌目, 微球菌科的节杆菌属 (*Arthrobacter*) 相似性

99%, 同源性 99%.

FT5 与细菌域: 变形菌门, 变形菌纲, 根瘤菌目, 根瘤菌科的剑菌属 (*Ensifer*) 相似性 99%, 同源性 99%.

2.2 菌剂对土壤中氮质量浓度的影响

2.2.1 总氮浓度随时间的变化

分别测量采用不同滴灌方法时各土样上下层中的总氮质量浓度, 详见图 10.

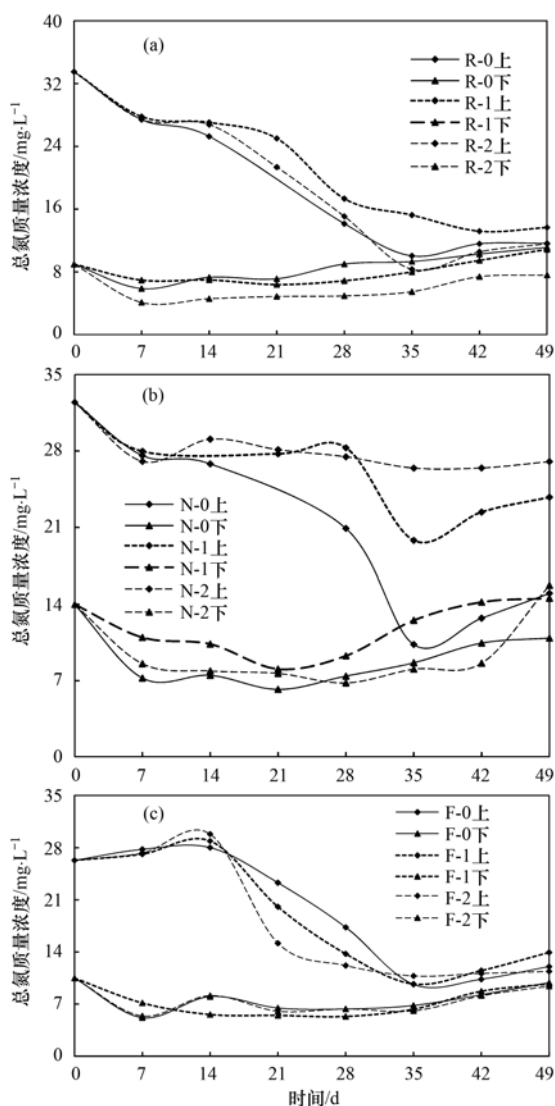


图 10 采用不同滴灌方法土壤总氮随时间的变化

Fig. 10 Changes of total nitrogen over time with different irrigation methods in Hebei plain

如图 10 所示, 任丘上层土壤加入所筛菌种滴灌的在实验周期内总氮浓度最高, 其次是加拮抗菌的, 最后是天然土壤的, 说明加菌滴灌使土壤生化作用增强, 总氮浓度增加. 在实验周期内, 总氮浓度由最初的 $33.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降为最后的 $13.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 下层土壤中总氮的增加主要是由于浇水淋滤、土壤生化

作用和白菜生长, 加菌的和加拮抗菌的比天然土壤总氮增加趋势相对缓慢.

宁晋加入拮抗菌的上层土壤在实验期内总氮质量浓度较高, 且非常稳定. 其次是加菌的, 最后是天然土壤的. 说明土样中加拮抗菌后植物吸收的总氮最低, 且总氮质量浓度一直维持在一个较高水平, 基本没有降解效果. 加菌后的上层土壤总氮浓度可由最初的 $32.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降为最后的 $23.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 下层土壤中, 加入所筛菌种滴灌的土壤总氮质量浓度最高, 天然的和加拮抗菌滴灌的土壤总氮增加趋势相对缓慢.

阜城不加菌滴灌的上层土壤总氮浓度相对较高且波动小, 其次是加菌的, 总氮浓度最低的为加拮抗菌的. 加菌后的上层土壤总氮质量浓度可由最初的 $26.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降为最后的 $13.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 下层土壤中总氮的增加主要是由于浇水淋滤, 土壤生化作用和白菜生长, 加菌滴灌的土壤总氮比另外两种变化趋势缓慢.

综合 3 个地区土样经不同滴灌方法处理后总氮的变化, 可知上层土壤中总氮在白菜生长期呈下降趋势, 下层土中总氮为缓慢上升的趋势. 主要是由于白菜生长吸收使上层土壤的总氮值呈下降趋势, 下层土样由于浇水淋滤和白菜根系的向下生长使得总氮质量浓度缓慢上升. 任丘土样加菌的总氮降解效果显著, 宁晋土样的较为明显, 而阜城土样不好判断, 综上所述可以初步断定加菌对土壤总氮降解效果较好, 筛出高效菌多的任丘更为明显.

2.2.2 氨氮浓度随时间的变化

本实验期内, 每周取样 1 次, 分别测量上下层土样中的氨氮浓度, 结果如图 11 所示.

如图 11, 实验期间 3 个区域的上下层土壤在不同滴灌方法下氨氮质量浓度变化趋势总体一致, 只是不同土壤氨氮值在变化过程中波峰波谷出现的时间不同.

任丘土样中加入所筛菌种的氨氮在整个过程中变化波动幅度相对较小, 质量浓度也较低, 整个周期的平均氨氮浓度为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 天然土壤中氨氮平均浓度为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 加拮抗菌的为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 宁晋土壤中氨氮值波动中的波峰波谷时间段与任丘不同, 加菌的氨氮在整个过程中变化波动幅度相对较小, 在整个周期中氨氮平均质量浓度为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 天然土壤氨氮平均质量浓度为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 加拮抗菌土样氨氮质量浓度为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 阜城土样在第 35 d 和第 42 d 的波峰处有

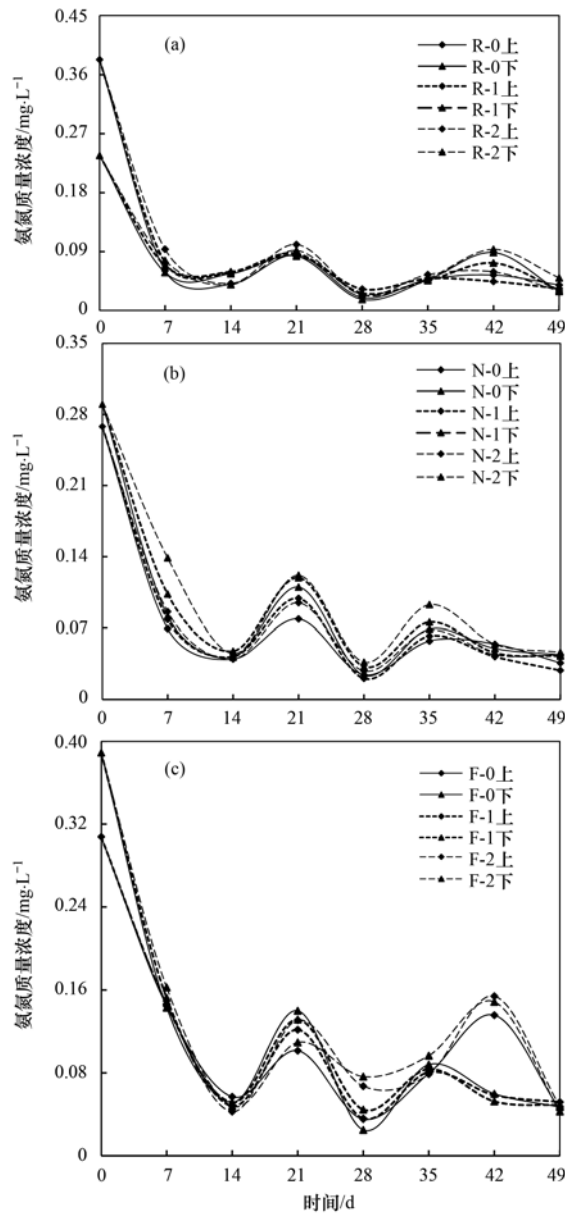


图 11 采用不同滴灌方法土壤中氨氮随时间的变化

Fig. 11 Changes of ammonia nitrogen over time with different irrigation methods in Hebei plain

所紊乱,在实验周期内加菌滴灌的土壤中的氨氮在整个过程中变化波动幅度小,质量浓度也较低,其整个周期的氨氮平均质量浓度为 $0.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,天然土壤平均质量浓度为 $0.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,加拮抗菌的土样为 $0.13\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

总之,在白菜生长期由于白菜生长吸收,土壤氨氮值在 14 d 以前呈显著下降趋势,之后有所波动,但波动范围不大. 在整个生长过程中,由于土壤中的生化作用,氨氮不断波动,加菌滴灌的土样中氨氮波动幅度相对较小,质量浓度也相对较低,可初步断定加菌滴灌对土壤氨氮的降解效果较好.

2.2.3 硝态氮浓度随时间的变化

实验期内,每周取样 1 次,分别测量各土样上下层中的硝态氮质量浓度,变化情况如图 12 所示.

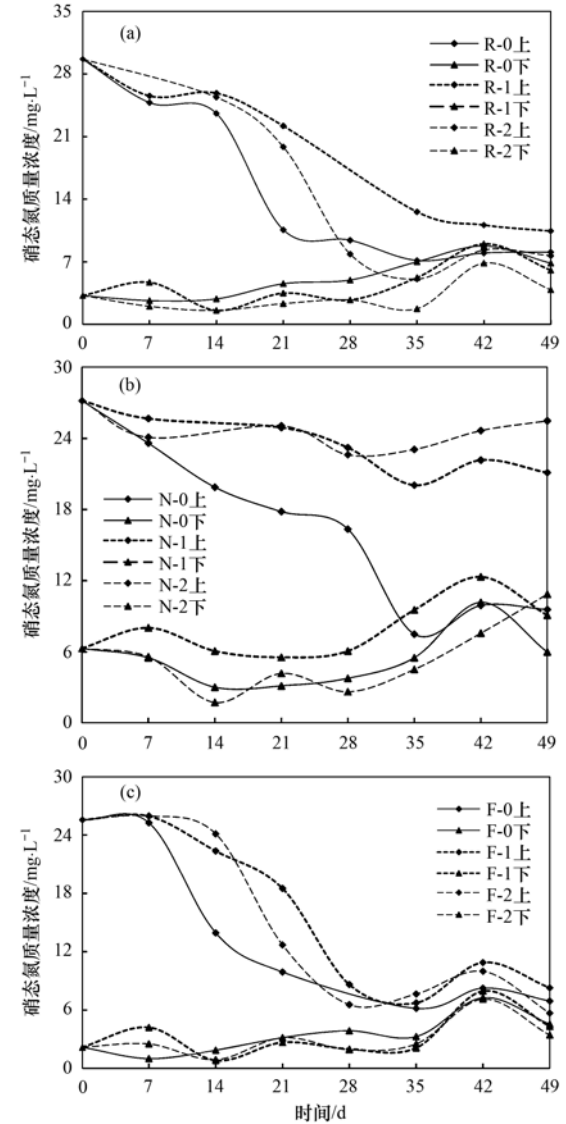


图 12 采用不同滴灌方法土壤中硝态氮随时间的变化

Fig. 12 Changes of nitrate nitrogen over time with different irrigation methods in Hebei plain

如图 12,对于任丘地区上层土壤,实验期内硝态氮整体呈下降趋势,加入所筛菌种的土样硝态氮质量浓度较高,说明土样中加菌后硝化作用较强. 从整个生长周期来看,加菌后土壤中的硝态氮质量浓度可由最初的 $29.66\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降为最低的 $10.43\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 下层土壤中硝态氮的增加主要是由于浇水淋滤、土壤生化作用和白菜生长,总体来看,下层加菌的和拮抗菌的土壤硝态氮的质量浓度比天然土壤低.

宁晋加入菌种和拮抗菌的上层土壤在实验期间

硝态氮质量浓度较高,土样中硝化作用较强,且硝态氮平均质量浓度相近,分别为 $23.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $24.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而天然土壤中平均质量浓度为 $16.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明加菌和拮抗菌土壤中的硝态氮质量浓度较背景值呈上升趋势,且加菌后土壤中的硝态氮质量浓度可由最初的 $27.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降为最低的 $20.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,之后又上升为 $21.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明土壤中的硝化作用仍在进行且较活跃。下层土壤中硝态氮的增加主要是由于浇水淋滤,土壤生化作用和白菜生长,下层还有反硝化作用来减少硝态氮的质量浓度,总体来看,加菌的土壤硝态氮的质量浓度相对较高。

通过对各土样硝态氮的变化情况进行分析,在实验过程中,上层土样虽然有硝化作用但由于白菜生长吸收,硝态氮值总体呈下降趋势,下层土样由于浇水淋滤,土壤生化作用和白菜根系的向下生长使得硝态氮质量浓度缓慢上升,通过对比不同土样不同处理结果下的硝态氮质量浓度变化,可初步断定加菌的硝化作用较好。

2.2.4 亚硝态氮浓度随时间的变化

实验期内,每周取样 1 次,分别测量各土样上下层中的亚硝态氮质量浓度,结果如图 13 所示。

如图 13,在实验过程中,各地区土样上下层土壤的亚硝态氮质量浓度总体变化趋势类似,由于亚硝态氮的不稳定性,波动相对其他氮化合物要大。对于任丘土样,综合上下层土样,加入所筛菌种的亚硝态氮的平均质量浓度最低,为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其次为加拮抗菌的,平均质量浓度为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,天然土壤的最高为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。宁晋土样在前 14 d,加入所筛菌种的上层土中亚硝态氮质量浓度非常高,说明在此段时间内硝化过程比较激烈。综合上下层变化情况,加入所筛菌种的亚硝态氮的平均质量浓度最高为 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其次为加拮抗菌的,平均质量浓度为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,天然土壤的最低为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。阜城土样加菌的波动幅度较小,加拮抗菌的变化幅度最大。整体看来,加入所筛菌种的亚硝态氮的平均质量浓度最高,为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其次是加拮抗菌的,平均质量浓度为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,天然土壤为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

通过对各土样亚硝态氮的变化情况进行分析,在整个生长过程中,由于土壤中的生化作用即硝化反应和反硝化反应一直在进行,且由于亚硝态氮的不稳定性,所有土样的亚硝态氮质量浓度一直处于波动较大的状态,且上下层没有太大区别。

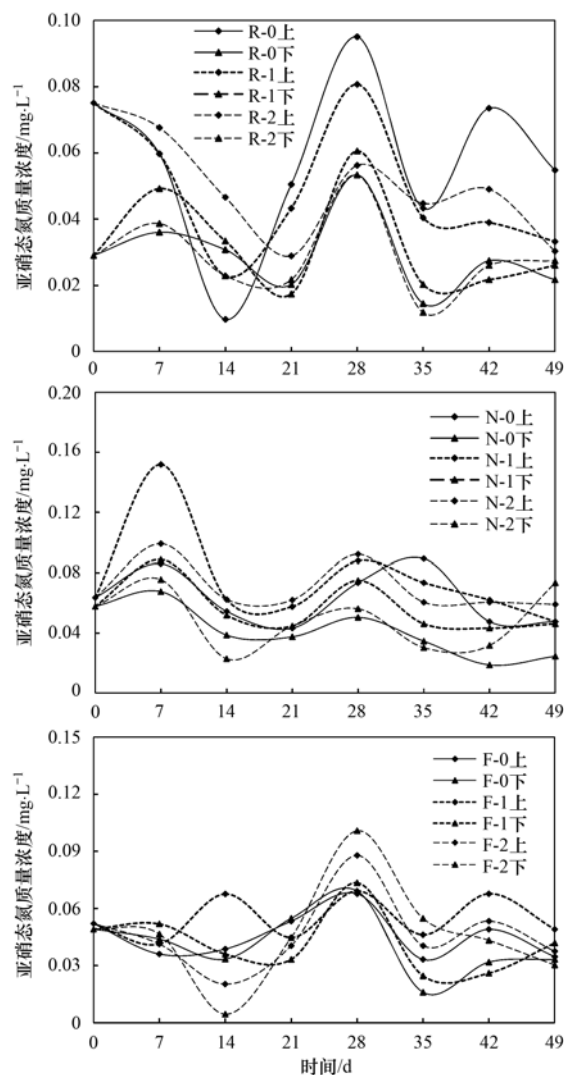


图 13 采用不同滴灌方法土壤中亚硝态氮随时间的变化

Fig. 13 Changes of Nitrite-N over time with different irrigation methods in Hebei plain

2.3 不同滴灌条件对土壤微生物总生物量的影响

PLFA 的组成可以表示土壤微生物群落的生物量和结构。从土壤中提取的磷脂类化合物的量可准确地表达为土壤微生物的生物量。

实验期内,每周取样 1 次,分别测量各土样上下层中的微生物的 PLFA 含量变化情况,并转化为细菌总含量,含量变化情况如图 14 所示。

如图 14 可见,对于 3 个地区采用不同滴灌方法的土壤,在白菜生长过程中,土壤中的微生物含量均产生了 1 次峰值。

任丘土样用所筛菌剂和拮抗菌滴灌都使土壤微生物含量增加且波动增大,且下层土壤的微生物含量变化幅度较大。加菌的最早到达 PLFA 峰值,并在白菜死后再次出现峰值,上层土样的 3 种滴灌方法峰值较接近,下层土壤加菌的峰值最高,为 14.20

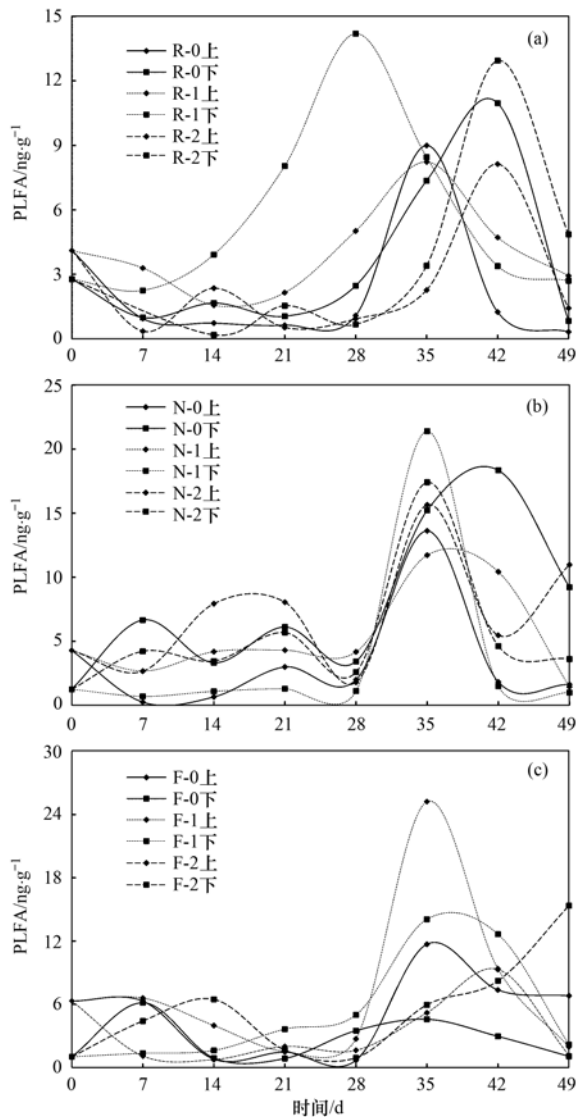


图 14 采用不同滴灌方法土壤中 PLFA 随时间的变化

Fig. 14 Changes of PLFA over time with different irrigation methods in Hebei plain

$\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次为加拮抗菌的 $12.49 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 最后是天然土壤的为 $10.96 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 可见加所筛菌后改善了土壤微生物环境, 增加了细菌含量。

对于宁晋上层土壤, 不同处理方法的土样同时到达峰值, 加拮抗菌滴灌的土壤微生物含量增加且波动增大, 其次为加菌的。上层土壤加拮抗菌的峰值最高, 为 $15.65 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 背景土样的为 $13.62 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 加菌的土样为 $11.72 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$; 下层加菌和加拮抗菌的先到达峰值且与上层到达时间一致, 土样微生物含量加菌的最高, 为 $21.40 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 背景土样为 $18.35 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 加拮抗菌的为 $17.41 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。可见加入菌种后改善了下层土壤微生物环境, 增加了细菌含量, 对上层土壤效果不明显。

阜城土样用所筛菌剂滴灌后微生物含量增加且

波动增大, 用所筛菌滴灌的土样和天然土壤先到达峰值。上层土壤加菌滴灌的 PLFA 最高, 为 $25.22 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次是天然土壤为 $11.70 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 最后是加拮抗菌的为 $9.31 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。下层土样的峰值有所变化, 加拮抗菌的最高, 为 $15.36 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其次为加菌的为 $14.06 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 最后是天然土壤的 $4.58 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。可见加所筛菌剂后改善了土壤微生物环境, 增加了土壤微生物含量。

通过对不同土样的实验和分析, 任丘和阜城的土样在加入所筛菌后, 土壤微生物量相应增加且幅度变大, 对于宁晋土样 PLFA 变化不是很明显。总体来说, 加所筛菌种后, 对土壤生物环境有所改善, 微生物也相应比较活跃。

2.4 不同滴灌条件对土壤有机质和 pH 值的影响

选取任丘土样测定不同滴灌条件下土壤上下层中有机质的含量, 每周取样 1 次, 结果见图 15。

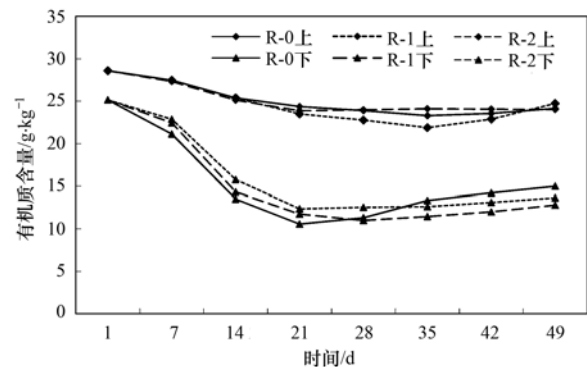


图 15 采用不同滴灌方法任丘土壤中有机质随时间的变化

Fig. 15 Changes of organic matter over time with different irrigation methods in Renqiu

从图 15 可以看出, 上层土壤中有机质含量高于下层土壤, 说明土壤肥力集中在上层; 在实验周期内, 加菌、加拮抗菌和地表水滴灌的土壤中有机质含量相差不大, 说明加菌滴灌对土壤有机质含量没有太大影响。实验期间每周测量土壤 pH 值 1 次, 土壤 pH 值在 $7.80 \sim 7.83$ 之间变化, 数值较稳定。

2.5 不同滴灌条件对土壤中微生物的影响

选取任丘土样, 测定不同滴灌条件下土壤上下层中微生物的含量, 每周取样 1 次, 结果见图 16。其中“甲烷”代表“甲烷营养菌 II”, “厌氧”代表“厌氧菌”, “好氧”代表“好氧菌”, “ G^+ ”代表“革兰氏阳性细菌”, “ G^- ”代表“革兰氏阴性细菌”, “T”代表“其他细菌”。图 16(a) 用地表水滴灌, 图 16(b) 加所筛菌滴灌, 图 16(c) 加拮抗菌滴灌。

图 16 可以看出, 任丘土壤革兰氏阳性菌最多, 革兰氏阴性菌含量较少。在土培实验中, 由于松

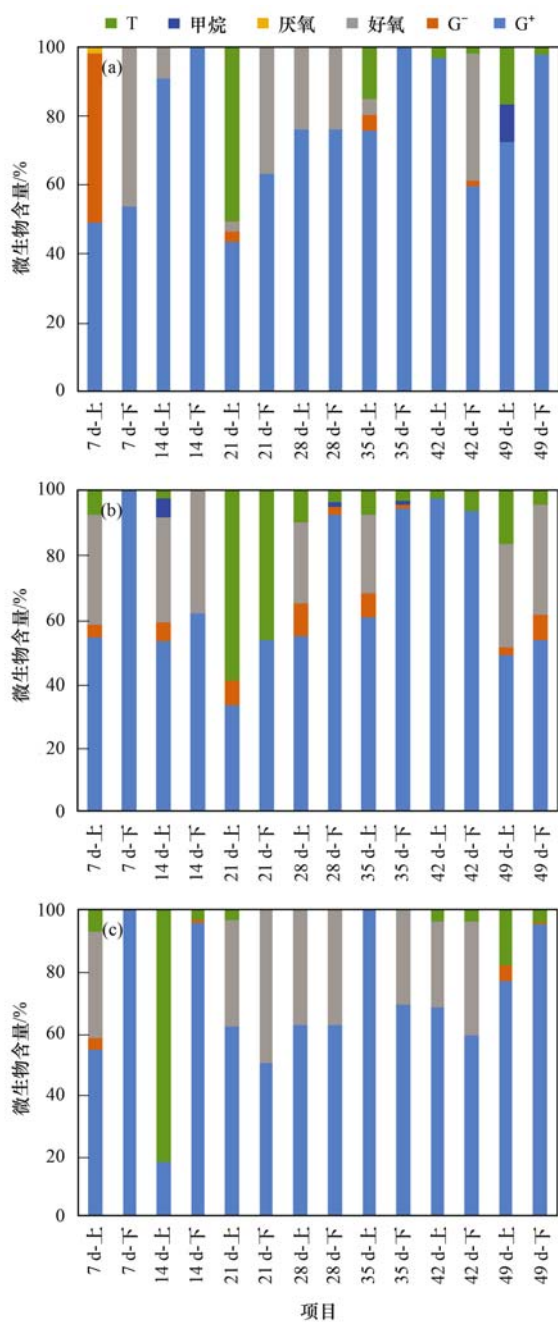


图 16 采用不同滴灌方法任丘土壤中微生物的百分比含量随时间的变化

Fig. 16 Change of soil microbial content with different irrigation methods in Renqiu

土使得土壤中氧含量较多,为好氧微生物的生长繁殖提供了便利条件,因此土壤中好氧菌数量远高于厌氧菌。纵观土壤上下层,上层土壤中的微生物种类较多,下层土壤中的微生物种类相对较少。

可见,土壤中微生物以革兰氏阳性菌为主,和用地表水滴灌、加拮抗菌滴灌的土壤相比,加菌滴灌的土壤中微生物种类相对较多。而土壤中微生物种群含量越多对于植物的生长越有利,因此加菌滴灌

有助于增加土壤微生物种群的多样性。

3 结论

(1)对所筛菌种氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮降解情况进行分析,选出了 8 种高效菌株,包括硝化细菌 NX1、RX2 和 FX1,氨化细菌 NA2、RA2 和 RA3,异养硝化好氧反硝化细菌 FT2 和 RT2。

(2)通过土培实验表明,加所筛菌滴灌对土壤中总氮降解效果较好。在白菜生长过程中,加所筛菌滴灌的土壤中微生物种类增多,微生物活跃,加菌滴灌对土壤有机质含量和土壤 pH 值影响很小,加入所筛菌种滴灌对土壤微生物环境有所改善。

参考文献:

- [1] 王敬,程谊,蔡祖聪,等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. 土壤学报, 2016, **53**(2): 292-304.
Wang J, Cheng Y, Cai Z C, *et al.* Effects of long-term fertilization on key processes of soil nitrogen cycling in agricultural soil: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(2): 292-304.
- [2] Rina K, Datta P S, Singh C K, *et al.* Determining the genetic origin of nitrate contamination in aquifers of Northern Gujarat, India[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(4): 1711-1719.
- [3] 刘博,肖长来,梁秀娟,等. 吉林市城区浅层地下水污染源识别及空间分布[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 457-464.
Liu B, Xiao C L, Liang X J, *et al.* Identification of shallow groundwater pollution factors and spatial distribution in the urban areas of Jilin City[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 457-464.
- [4] 李祥,马航,黄勇,等. 异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2646-2651.
Li X, Ma H, Huang Y, *et al.* Characteristics of a combined heterotrophic and sulfur autotrophic denitrification technology for removal of high nitrate in water[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2646-2651.
- [5] Leininger S, Urish T, Schlöter M, *et al.* Archaea predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soils[J]. *Nature*, 2006, **442**(7104): 806-809.
- [6] Teng Q H, Sun B, Fu X R, *et al.* Analysis of *nifH* gene diversity in red soil amended with manure in Jiangxi, South China[J]. *The Journal of Microbiology*, 2009, **47**(2): 135-141.
- [7] Francis C A, Roberts K J, Beman J M, *et al.* Ubiquity and diversity of ammonia-oxidizing archaea in water columns and sediments of the ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, **102**(41): 14683-14688.
- [8] Chu H Y, Fujii T, Morimoto S, *et al.* Community structure of ammonia-oxidizing bacteria under long-term application of mineral fertilizer and organic manure in a sandy loam soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(2): 485-491.
- [9] Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. The evolution and future of earth's nitrogen cycle[J]. *Science*, 2010, **330**(6001):

- 192-196.
- [10] Nannipieri P, Ascher J, Ceccherini M T, *et al.* Microbial diversity and soil functions [J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, **54**(4): 655-670.
- [11] Sharma S K, Ramesh A, Sharma M P, *et al.* Microbial community structure and diversity as indicators for evaluating soil quality[A]. In: Lichtfouse E (Eds.). *Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture* [M]. Netherlands: Springer, 2011. 317-358.
- [12] Romaniuk R, Giuffr  L, Costantini A, *et al.* Assessment of soil microbial diversity measurements as indicators of soil functioning in organic and conventional horticulture systems[J]. *Ecological Indicators*, 2011, **11**(5): 1345-1353.
- [13] Gonzalez-Qui ones V, Stockdale E A, Banning N C, *et al.* Soil microbial biomass-interpretation and consideration for soil monitoring[J]. *Soil Research*, 2011, **49**(4): 287-304.
- [14] 贺纪正, 张丽梅. 土壤氮素转化的关键微生物过程及机制[J]. *微生物学通报*, 2013, **40**(1): 98-108.
- He J Z, Zhang L M. Key processes and microbial mechanisms of soil nitrogen transformation[J]. *Microbiology China*, 2013, **40**(1): 98-108.
- [15] Falkowski P G, Fenchel T, Delong E F. The microbial engines that drive earth's biogeochemical cycles[J]. *Science*, 2008, **320**(5879): 1034-1039.
- [16] Hu H W, Chen D L, He J Z. Microbial regulation of terrestrial nitrous oxide formation: understanding the biological pathways for prediction of emission Rate [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2015, **39**(5): 729-749.
- [17] 赵志瑞, 马斌, 张树军, 等. 高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1448-1456.
- Zhao Z R, Ma B, Zhang S J, *et al.* Comparing microbial community of high ammonia wastewater and municipal sewage in a partial nitrification system[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1448-1456.
- [18] Hu B L, Rush D, van der Biezen E, *et al.* New anaerobic, ammonium-oxidizing community enriched from peat soil [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, **77**(3): 966-971.
- [19] Moore T A, Xing Y P, Lazenby B, *et al.* Prevalence of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in contaminated groundwater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(17): 7217-7225.
- [20] 乔森, 刘雪洁, 周集体. 异养硝化-好氧反硝化在生物脱氮方面的研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2014, **14**(2): 128-135.
- Qiao S, Liu X J, Zhou J T. Research progress of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification in biological denitrification [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, **14**(2): 128-135.
- [21] Robertson L A, Kuenen J G, Kleijntjens. Aerobic denitrification and heterotrophic nitrification by *Thiosphaera pantotropha* [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1985, **51**(4): 445-445.
- [22] 成钰, 李秋芬, 费丰涛, 等. 海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 SLWX₂ 的筛选及脱氮特性[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2681-2688.
- Cheng Y, Li Q F, Fei Y T, *et al.* Screening and nitrogen removing characteristics of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria SLWX₂ from sea water[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2681-2688.
- [23] Hartmann M, Frey B, Mayer J, *et al.* Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming[J]. *The ISME Journal*, 2015, **9**(5): 1177-1194.
- [24] 张瑜, 郭景恒. 华北平原潮土酸度特征与酸化敏感性的初步探讨[J]. *环境化学*, 2011, **30**(6): 1126-1130.
- Zhang Y, Guo J H. Preliminary study on acidity and acidification sensitivity of fluvo-aquic soils of North China Plain [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(6): 1126-1130.
- [25] HJ 634-2012, 土壤 氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的测定 氯化钾溶液提取-分光光度法[S].
- HJ 634- 2012, Soil-determination of ammonium, nitrite and nitrate by extraction with potassium chloride solution-spectrophotometric methods[S].

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-lin, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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