

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期

Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 ..... 陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)

面向二/三维城市形态指标的PM<sub>2.5</sub>浓度调控模拟 ..... 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)

减排背景下成都大气PM<sub>2.5</sub>碳质组分特征 ..... 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)

青岛秋冬季PM<sub>1</sub>中金属元素污染特征及健康风险评估 ..... 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)

港口地区大气PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)

天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 ..... 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)

北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素 ..... 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)

北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 ..... 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)

东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 ..... 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)

生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 ..... 何晶晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)

不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 ..... 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)

沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 ..... 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)

白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 ..... 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)

喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 ..... 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)

石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 ..... 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)

不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 ..... 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)

晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)

不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 ..... 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)

紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 ..... 李阳, 许玻琀, 邓琳, 罗伟(4597)

微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能 ..... 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)

废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 ..... 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)

生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 ..... 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)

有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响 ..... 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)

煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 ..... 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)

生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 ..... 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)

黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 ..... 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)

模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 ..... 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)

石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 ..... 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)

典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 ..... 龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)

作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 ..... 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)

不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 ..... 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)

总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 ..... 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培杰(4727)

IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 ..... 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)

黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 ..... 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)

南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 ..... 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)

兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析 ..... 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)

石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 ..... 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)

典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 ..... 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)

有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)

柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 ..... 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)

稻田落干过程甲基化效率变化与关键影响因素分析 ..... 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)

外源茉莉酸对水稻幼苗根系伸积及抗逆应答效应 ..... 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)

秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 ..... 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)

冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 ..... 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)

庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 ..... 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)

小型养殖塘水体中CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O浓度的时空变化特征及影响因素 ..... 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)

丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 ..... 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)

秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 ..... 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 ..... 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)

植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 ..... 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)

《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

# 模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响

翁晓虹<sup>1,2</sup>, 隋心<sup>1,2\*</sup>, 李梦莎<sup>3</sup>, 刘赢男<sup>3</sup>, 张荣涛<sup>3</sup>, 杨立宾<sup>3</sup>

(1. 黑龙江大学生命科学学院农业微生物技术教育部工程研究中心, 哈尔滨 150050; 2. 黑龙江大学生命科学学院黑龙江省寒地生态修复与资源利用重点实验室, 哈尔滨 150080; 3. 黑龙江省科学院自然与生态研究所, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 大气氮沉降会对湿地土壤微生物的结构和功能产生显著影响, 因此研究不同浓度氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响, 对于保护和利用湿地生态系统具有重要意义. 采用 Biolog-Eco 技术探究了连续 5 a 模拟氮沉降对小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响. 结果表明: ①长期的氮素施加会显著改变小叶章湿地土壤含水量(SMC)、pH、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ )、铵态氮( $\text{NH}_4^+$ )、溶解性有机碳(DOC)和总氮(TN)的含量( $P < 0.05$ ); ②土壤微生物的平均颜色变化率(AWCD)呈现的规律为: 对照(CK) > 高氮(HN) > 低氮(LN). 低氮处理显著降低了土壤微生物香农(Shannon)指数( $P < 0.05$ ), 高氮处理显著降低了土壤微生物皮卢(Pielou)指数( $P < 0.05$ ). ③不同氮浓度下土壤微生物碳源利用能力显著不同, 其中低氮处理显著抑制了土壤微生物对糖类、醇类、胺类和酸类的利用强度( $P < 0.05$ ); 高氮处理显著促进了微生物对酯类的利用, 但高氮使土壤微生物对糖类、胺类和酸类碳源产生抑制作用( $P < 0.05$ ). ④冗余分析显示,  $\text{NH}_4^+$ 、DOC 和 pH 是影响三江平原小叶章湿地土壤微生物碳代谢能力的主要环境因子. 长期氮沉降会导致土壤微生物功能多样性的降低, 有关碳源底物利用的微生物活性也明显降低, 并且微生物对单一碳源底物的利用能力也发生改变.

**关键词:** 小叶章湿地; 土壤微生物; 土壤理化; 碳源利用能力; Biolog-Eco 微平板技术

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4674-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111288

## Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in *Calamagrostis angustifolia* Wetland in Sanjiang Plain

WENG Xiao-hong<sup>1,2</sup>, SUI Xin<sup>1,2\*</sup>, LI Meng-sha<sup>3</sup>, LIU Ying-nan<sup>3</sup>, ZHANG Rong-tao<sup>3</sup>, YANG Li-bin<sup>3</sup>

(1. Engineering Research Center of Agricultural Microbiology Technology, Ministry of Education, School of Life Sciences, Heilongjiang University, Harbin 150050, China; 2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Ecological Restoration and Resource Utilization for Cold Region, School of Life Sciences, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 3. Institute of Nature and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Atmospheric nitrogen deposition has a crucial impact on the structure and function of soil microorganisms of wetland ecosystems. Therefore, carrying out a study on the effects of soil carbon metabolism capacity has a great significance for the protection and utilization of wetland ecosystems. In this study, the effects of simulated nitrogen deposition on the carbon metabolic capacity of soil microorganisms in *Calamagrostis angustifolia* wetland for five consecutive years was investigated using Biolog-Eco technology. The results showed: ① soil water content (SMC), pH, nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^-$ ), ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+$ ), dissolved organic carbon (DOC), and total nitrogen (TN) contents were significantly different ( $P < 0.05$ ) under different nitrogen deposition conditions. ② The average well color development (AWCD) values of soil microorganisms within different N depositions were in the order of CK (control) > HN (high nitrogen treatment) > LN (low nitrogen treatment). LN significantly reduced the Shannon diversity index of soil microorganisms, and HN significantly reduced the Pielou index of soil microorganisms ( $P < 0.05$ ). ③ LN significantly inhibited the intensity of the utilization of carbohydrates, alcohols, amines, and acids by soil microorganisms ( $P < 0.05$ ); HN significantly promoted the utilization of esters by microorganisms, but HN caused soil microorganisms to inhibit the carbon sources of carbohydrates, amines, and acids ( $P < 0.05$ ). ④ Redundancy analysis showed that  $\text{NH}_4^+$ , DOC, and pH were the main environmental factors affecting the functional diversity of soil microbial communities in *Calamagrostis angustifolia* wetland in the Sanjiang Plain. Long-term nitrogen deposition will lead to the reduction in soil microbial functional diversity; the microbial activity related to the utilization of carbon source substrates is also significantly reduced, and the ability of microorganisms to utilize a single carbon source substrate also changes.

**Key words:** *Calamagrostis angustifolia* wetland; soil microorganisms; soil physico-chemistry properties; carbon source utilization capacity; Biolog-Eco microplate technology

大气氮沉降(N deposition)是指大气中的氮元素以 $\text{NH}_x$ (包括 $\text{NH}_3$ 、 $\text{RNH}_2$ 和 $\text{NH}_4^+$ )和 $\text{NO}_x$ 的形式, 降落到陆地和水体的过程<sup>[1]</sup>. 随着全球经济的快速发展, 以及人类对氮肥和化石燃料需求量的不断升高<sup>[2,3]</sup>, 导致全球大气氮沉降量从原来的 $31.6 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 增加到了 $103 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ , 预计全球氮沉降总量在2050年可能会达到 $195 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 的水平<sup>[4]</sup>. 氮沉降的急剧增加给全球生态系统造成了严重的影响, 例如温室气体排放量的增加<sup>[5]</sup>、土壤酸化<sup>[6,7]</sup>和降低

植物多样性<sup>[8,9]</sup>, 引起了全世界科学家的广泛关注<sup>[10,11]</sup>.

湿地生态系统具有陆生生态系统和湖泊生态系

收稿日期: 2021-11-28; 修订日期: 2022-01-29

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020C088); 黑龙江大学杰出青年基金项目(JCL202006); 黑龙江省科学院双提雁阵特别计划项目(YZ202003); 黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA19C006-6)

作者简介: 翁晓虹(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微生物生态学, E-mail: xiaohongweng@126.com

\* 通信作者, E-mail: xinsui\_cool@126.com

统的共同特征,在控制温室气体排放及维持生物多样性等方面发挥着非常关键的作用<sup>[12~15]</sup>.土壤微生物是湿地生态系统的重要组成部分,在维持生态系统的稳定方面起着重要作用<sup>[16~19]</sup>.而过量的氮沉降会增加土壤氮的有效性和土壤酸化<sup>[20,21]</sup>,会对土壤微生物的群落结构和功能造成一定的改变,从而影响湿地生态系统的结构和功能<sup>[22,23]</sup>.目前虽然对于湿地生态系统开展大量研究,但是对于长期氮沉降条件下湿地土壤微生物功能的变化还显得十分缺乏.

Biolog-Eco 微平板技术是通过微生物对不同碳源的利用程度来研究土壤微生物功能多样性的一种简单和快速的方法,近年来被国内外科研工作者广泛使用<sup>[24,25]</sup>.目前国内外在氮沉降对土壤微生物结构和多样性的影响方面开展了大量研究,结果发现长期的氮沉降会对土壤微生物的结构组成产生影响,例如张彦东等<sup>[26]</sup>在对金沙江干热河谷退化草地土壤微生物研究中表明,高浓度的硝酸铵氮肥的施加显著提高了土壤微生物的生物量.Frey 等<sup>[27]</sup>在长期施氮对温带阔叶林和红松林的研究结果显示,氮的添加显著降低了微生物的生物量,即土壤真菌和细菌的生物量.此外,有研究发现氮添加也会改变微生物对底物的利用模式,例如 DeForest 等<sup>[28]</sup>在模拟大气氮沉降对密歇根州的阔叶林的研究结果表明,硝酸氮的添加改变了异养型微生物群落对底物的利用效率.Compton 等<sup>[29]</sup>在实验中发现,在喷洒硝酸铵溶液的松林样地中的土壤微生物对含氮底物的利用强度明显低于对照处理.而 Frey 等<sup>[27]</sup>在研究氮沉降对森林土壤微生物的响应中发现,微生物对底物的利用强度和硝酸铵量之间的联系不紧密,这种差异可能是由于实验时间、实验地点和施氮浓度等的不同所引起的.有研究发现氮沉降会使微生物群落进行自我调节以适应环境变化,如刘蔚秋等<sup>[30]</sup>研究中发现施加硝酸铵溶液后的土壤 pH 值下降会改变微生物群落结构.Aerts 等<sup>[31]</sup>的研究表明阔叶林和松林土壤 pH 值和土壤微生物的活性之间都呈现正相关关系.在以上模拟氮沉降的研究中,国内外学者利用 Biolog-Eco 微平板技术多集中于草地和森林生态系统中的土壤微生物功能多样性对氮添加的响应,但对于湿地生态系统下的氮沉降对土壤微生物碳源利用能力的影响以及环境因子与湿地土壤微生物群落功能之间关系的研究则鲜有报道.因此,加强湿地生态系统长期 N 输入对土壤微生物功能影响的研究,将有助于对 N 循环等生态系统关键过程的调控,以及对湿地生态系统功能动态变化的预测.

三江平原湿地是中国面积最大的淡水湿地集中

分布区,拥有着丰富的生物多样性,其植被类型以小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*) 群系为主<sup>[32,33]</sup>.三江平原湿地生态系统在保护区域生物多样性以及保持生态系统功能完整性等过程中处于不可替代的地位<sup>[33]</sup>.因此,本文利用 Biolog 微平板技术研究长期氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力变化的规律,同时探讨了土壤微生物碳源代谢多样性与环境因子之间的相关关系,将有助于对三江平原小叶章湿地生态系统功能的了解,对未来湿地生态系统的保护和利用提供基础理论支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

本实验地点设置在三江平原洪河国家级自然保护区 (47° 42' 18" ~ 47° 52' 07" N, 133° 34' 38" ~ 133° 46' 29" E), 总面积为  $2.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 其中湿地面积约为  $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图 1). 该保护区属于温带湿润-半湿润季风气候, 冬季寒冷且漫长, 而春秋季节时间短. 年均温度 (MAT) 为 1.9°C, 年均蒸发量为 1 166 mm, 年均降水量 (MAP) 为 585 mm, 降水多集中在 7 ~ 9 月<sup>[34]</sup>. 土壤类型有白浆土和沼泽土, 主要植被类型为草甸和沼泽, 优势植物有小叶章、狭叶甜茅、毛果苔草和漂筏苔草等.



图 1 三江平原洪河国家级自然保护区

Fig. 1 Honghe national nature reserve in the Sanjiang Plain

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 实验设计

样地设立于 2016 年 5 月, 设置了 3 个氮沉降处理: 对照 [CK:  $0 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ], 低氮 [LN:  $40 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ] 和高氮 [HN:  $80 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ],

每个处理设置 3 次重复,每个样地的面积为 10 m × 10 m. 以 NH<sub>4</sub>Cl 为氮源,每年 5 月将 NH<sub>4</sub>Cl 溶于水后进行均匀喷施,对照样方喷洒等量的水. 于 2021 年 10 月在每个样方内进行采样,用直径为 5 cm 的土钻通过五点采样法对 0 ~ 20 cm 土层土壤进行取样,清除取样土样中的植物凋落物等杂质后混合为 1 个土样,然后置于 4℃ 保温箱中低温保存运往实验室. 低温保存土壤样品中的一部分用来进行 Biolog-Eco 微平板实验,另一部分土壤样品自然风干后进行土壤理化性质的测定.

### 1.2.2 实验方法

采用 Biolog-Eco 微孔板培养法对湿地土壤微生物群落的碳代谢能力进行检测. 将一部分土样置于 25℃ 下进行活化处理 1 d,之后取活化后的 10 g 鲜土置于刻度 200 mL 的三角瓶内,随后向瓶中添加 90 mL 0.85% 无菌 NaCl 溶液,混合封口后放于摇床中振荡 0.5 h,转速为 200 r·min<sup>-1</sup>. 然后用移液枪吸取稀释至 10<sup>-3</sup> 的土壤悬浮液接种到微孔板中,每组实验 3 次重复,微孔板在 25℃ 下连续培养 168 h. 在培养过程中,每次间隔 24 h 需要记录在波长为 590 nm 下的吸光度值.

土壤含水率 (SMC) 采用烘干法测定<sup>[35]</sup>; 土壤 pH 检测的土水比为 1:2.5; 土壤全氮 (TN) 和总有机碳 (TOC) 采用总有机碳分析仪测定; 硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 和铵态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 分别采用元素分析仪进行检测; 溶解性有机碳 (DOC) 和土壤可溶性氮 (DTN) 含量的测定采用 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法<sup>[36, 37]</sup>; 可溶性有机氮 (DON) 含量为土壤可溶性氮 (DTN) 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的差值<sup>[38]</sup>.

### 1.2.3 数据分析

平均颜色变化率 (average well color development, AWCD) 的计算方法如下<sup>[39~41]</sup>:

$$AWCD = \sum (C_i - R) / 31$$

表 1 不同氮沉降条件下的三江平原小叶章湿地土壤主要理化性质<sup>1)</sup>

处理	ω[土壤含水率 (SMC)] /%	pH	ω[硝态氮 (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )] /mg·kg <sup>-1</sup>	ω[铵态氮 (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )] /mg·kg <sup>-1</sup>	ω[溶解性有机碳 (DOC)] /mg·kg <sup>-1</sup>	ω[可溶性有机氮 (DON)] /mg·kg <sup>-1</sup>	ω[土壤全氮 (TN)] /g·kg <sup>-1</sup>	ω[总有机碳 (TOC)] /g·kg <sup>-1</sup>
CK	42.51 ± 0.06b	4.41 ± 0.43a	23.83 ± 6.34b	21.15 ± 3.45a	3 897.88 ± 625.37b	299.74 ± 130.71b	5.7 ± 0.23b	53.4 ± 2.23a
LN	48.29 ± 0.01ab	4.19 ± 0.06ab	23.27 ± 3.49b	5.62 ± 0.63b	2 571.62 ± 294.54c	520.08 ± 166.01ab	6.8 ± 0.05ab	45.3 ± 0.42a
HN	57.65 ± 0.05a	4.02 ± 0.11b	40.60 ± 6.17a	4.72 ± 0.06b	5 004.81 ± 331.11a	719.68 ± 156.87a	11.8 ± 0.29a	68.6 ± 2.00a

1) 数值为均值 ± 标准差 (n=3), 不同小写字母表示不同处理之间差异显著 (P < 0.05)

## 2.2 三江平原小叶章湿地土壤微生物 α 多样性

为了进一步确定不同氮浓度对土壤微生物功能多样性的影响,选择培养了 144 h 的 AWCD 值用于 α 多样性分析. 表 2 结果表明,与对照相比,低氮处

式中, C<sub>i</sub> 为碳源孔在 590 nm 下的吸光度值; R 为对照孔的吸光度值; C<sub>i</sub> - R < 0 的碳源孔均在计算中记作 0<sup>[40]</sup>.

土壤多样性指数计算.

Shannon 指数<sup>[39]</sup>:  $H = P_i \ln P_i$

Simpson 指数<sup>[39]</sup>:  $D = 1 - \left( \sum P_i \right)^2$

Pielou 指数<sup>[40]</sup>:  $J = H / \ln S$

式中, P<sub>i</sub> 为第 i 碳源孔与对照孔的吸光度值之差 (n<sub>i</sub>) 与所有孔相对吸光度值总和的比率<sup>[36, 37]</sup>.

数据分析前处理使用 Excel 2010 软件. SPSS 25.0 软件用于进行单因素方差分析,检验水平设定为 0.05; 使用 Excel 2010 软件绘制带趋势线的散点图,运用 SigmaPlot 10.0 绘制柱状图; 土壤微生物 α 多样性、冗余分析 (RDA)、主成分分析 (PCA) 均用 R 语言完成,数据包采用 vegan 包.

## 2 结果与分析

### 2.1 三江平原小叶章湿地土壤理化性质的变化特征

不同施氮水平下小叶章湿地土壤主要理化性质见表 1. 土壤含水量 (SMC)、pH 值、硝态氮 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、铵态氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、溶解性有机碳 (DOC)、可溶性有机氮 (DON) 和土壤全氮 (TN) 的含量在不同氮沉降条件下有显著差异 (P < 0.05). 其中,土壤含水量、可溶性有机氮和土壤全氮的含量随着氮沉降浓度的增加而呈现显著上升的趋势,即:对照 (CK) < 低氮处理 (LN) < 高氮处理 (HN); 土壤 pH 值和铵态氮含量则随着氮沉降浓度的增加而呈现显著下降的趋势,即表现为:对照 (CK) > 低氮处理 (LN) > 高氮处理 (HN); 随着氮沉降浓度的增加,各处理土壤的硝态氮含量、溶解性有机碳和总有机碳含量呈现出先下降后升高的现象,但总有机碳 (TOC) 含量的变化不显著.

理 (LN) 均显著降低了土壤微生物 Shannon、Simpson 和 Pielou 指数; 高氮处理 (HN) 显著降低了土壤微生物的 Pielou 指数,但对 Shannon 指数和 Simpson 指数的影响不显著. 此外,在各处理的土壤中,

Shannon、Simpson 和 Pielou 指数均随着氮沉降浓度的增加呈现先下降后上升的趋势,其中低氮处理和低氮处理的土壤微生物的多样性指数均低于对照。

表 2 三江平原小叶章湿地土壤微生物群落多样性指数<sup>1)</sup>

Table 2 Diversity index of soil microbial community in *Calamagrostis angustifolia* wetland in Sanjiang Plain

处理	Shannon 指数	Simpson 指数	Pielou 指数
CK	3.09 ± 0.04a	0.95 ± 0.00a	0.94 ± 0.01a
LN	2.86 ± 0.02b	0.93 ± 0.00b	0.89 ± 0.01b
HN	3.02 ± 0.07a	0.94 ± 0.00a	0.91 ± 0.01b

1) 数值为均值 ± 标准差 (n = 3), 不同小写字母表示不同处理之间差异显著 (P < 0.05)

### 2.3 三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源代谢活性

从图 2 可以看出不同氮沉降浓度下的土壤微生物群落的 AWCD 值随着培养时间的延长而不断升高. 其中, 培养时间在 0 ~ 120 h 时的 AWCD 值快速增长, 说明在该培养阶段的微生物的代谢活性是最旺盛的, 144 h 后增长缓慢, 而后趋于平缓. 比较不同氮沉降条件下的微生物群落 AWCD 值发现, 对碳源的利用能力大小表现为: 对照 (CK) > 高氮 (HN) > 低氮 (LN), 由此可知, 低氮和高氮都会抑制微生物对碳源的代谢能力。

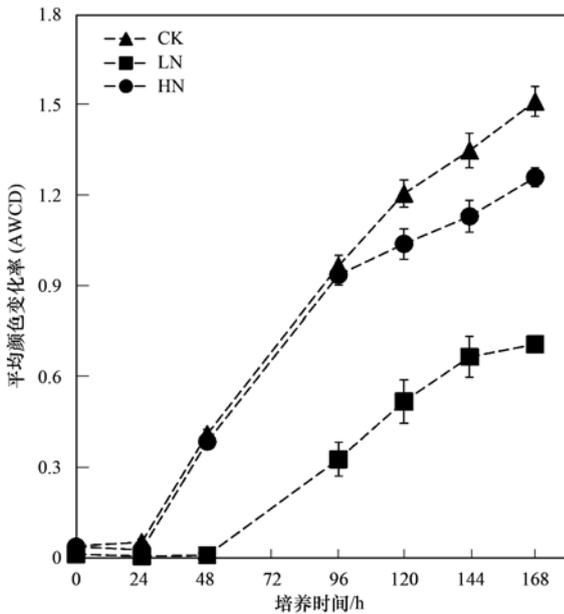
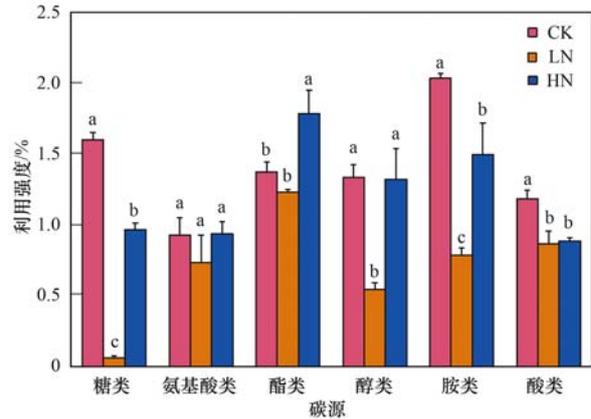


图 2 三江平原小叶章湿地土壤微生物群落 AWCD 值随培养时间变化

Fig. 2 Changes in AWCD value of soil microbial community with culture time in *Calamagrostis angustifolia* wetland of Sanjiang Plain

Biolog-ECO 板中含有 31 种碳源, 可分为六大类, 即 7 种糖类、6 种氨基酸类、4 种酯类、3 种醇类、3 种胺类和 8 种酸类碳源. 实验结果见图 3, 反映了三江平原湿地土壤微生物在不同浓度的氮添加

下对不同碳源的利用程度. 与对照相比, 施氮下的土壤微生物对碳源的利用活性表现出较大的差异. 其中, 低氮处理显著抑制了土壤微生物对糖类、醇类、胺类和酸类的利用强度 (P < 0.05); 高氮处理显著促进了微生物对酯类的利用, 但高氮使土壤微生物对糖类、胺类和酸类碳源产生抑制作用 (P < 0.05).



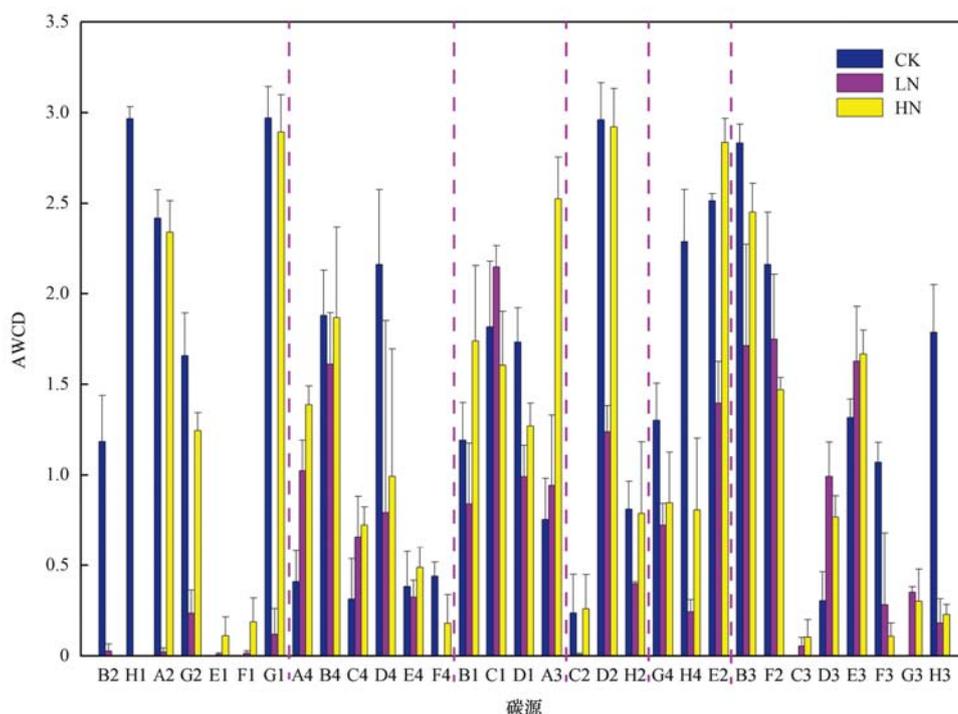
不同小写字母表示不同氮处理之间差异显著 (P < 0.05)

图 3 三江平原小叶章湿地土壤微生物群落对不同碳源的利用程度

Fig. 3 Utilization of different carbon sources by soil microbial communities in *Calamagrostis angustifolia* wetland in Sanjiang Plain

在低氮处理的土壤中 (图 4), AWCD > 2.0 的碳源为吐温 40, AWCD 值为 2.15. 高氮处理的土壤中有 6 种碳源的 AWCD > 2.0, 分别为  $\beta$ -甲基-D-葡萄糖苷、D-纤维二糖、D-半乳糖酸- $\gamma$ -内酯、D-甘露醇、N-乙酰-D-葡萄糖胺和 D-半乳糖醛酸. 其中 D-甘露醇的 AWCD 值最高, 为 2.92, 其次是 D-纤维二糖和 N-乙酰-D-葡萄糖胺, AWCD 值分别为 2.89 和 2.84.

将三江平原小叶章湿地土壤微生物群落代谢活性热图的结果划分为 5 个类群 (图 5). 在 I 类群中, 低氮 (LN) 和高氮 (HN) 处理土壤中的  $\alpha$ -D-乳糖 (H1) 和 D-苹果酸 (H3) 的 AWCD 值与对照之间的差异极其显著, AWCD 值均低于对照; 在 II 类群中, 高氮处理的 D-半乳糖酸- $\gamma$ -内酯 (A3) 和 L-精氨酸 (A4) 的 AWCD 值均显著高于对照. 低氮处理下的 L-精氨酸 (A4) 的 AWCD 值显著高于对照. 4-羟基苯甲酸 (D3) 的 AWCD 值在低氮和高氮处理下均高于对照; 在 III 类群中, 与对照相比, D-纤维二糖 (G1)、 $\beta$ -甲基-D-葡萄糖苷 (A2)、D-甘露醇 (D2) 和 N-乙酰-D-葡萄糖胺 (E2) 的 AWCD 值在低氮处理下显著降低了, 而在高氮处理下没有显著变化. 此外, 低氮处理中 D-半乳糖醛酸 AWCD 值低于对照; 在 IV 类群中,  $\gamma$ -氨基丁酸 (E3)、吐温 40 (C1)、D-葡



糖类: B2 表示 D-木糖; H1 表示  $\alpha$ -D-乳糖; A2 表示  $\beta$ -甲基-D-葡萄糖苷; G2 表示  $\alpha$ -D-葡萄糖-1-磷酸; E1 表示  $\alpha$ -环式糊精; F1 表示肝糖; G1 表示 D-纤维二糖. 氨基酸类: A4 表示 L-精氨酸; B4 表示 L-天门冬酰胺; C4 表示 L-苯基丙酰胺; D4 表示 L-丝氨酸; E4 表示 L-苏氨酸; F4 表示甘氨酸-L-谷氨酸. 酯类: B1 表示丙酮酸甲酯; C1 表示吐温 40; D1 表示吐温 80; A3 表示 D-半乳糖酸- $\gamma$ -内酯. 醇类: C2 表示 *t*-赤藓糖醇; D2 表示 D-甘露醇; H2 表示 D, L- $\alpha$ -磷酸甘油. 胺类: G4 表示苯乙胺; H4 表示腐胺; E2 表示 *N*-乙酰-D-葡萄糖胺. 酸类: B3 表示 D-半乳糖醛酸; F2 表示 D-葡萄糖胺酸; C3 表示 2-羟基苯甲酸; D3 表示 4-羟基苯甲酸; E3 表示  $\gamma$ -羟基丁酸; F3 表示衣康酸; G3 表示  $\alpha$ -丁酮酸; H3 表示 D-苹果酸; 下同

图 4 三江平原小叶章湿地土壤微生物群落碳生理特征代谢指纹图谱

Fig. 4 Carbon physiological spectrum and metabolic fingerprint of soil microbial community in *Calamagrostis angustifolia* wetland in Sanjiang Plain

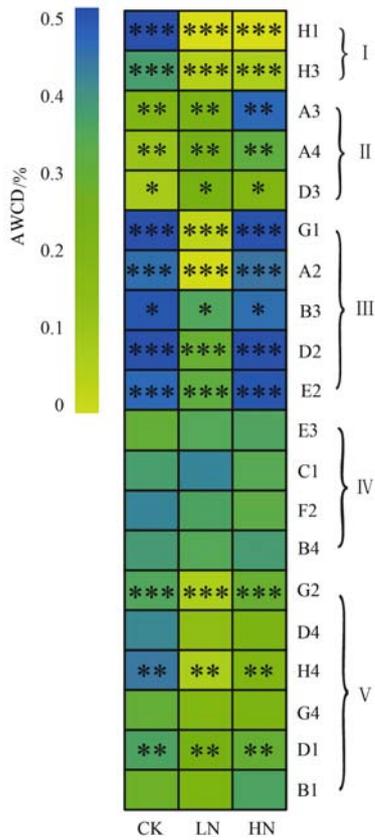
葡萄糖胺酸(F2)和 L-天门冬酰胺(B4)的 AWCD 值在各处理间没有显著差异;在 V 类群中,低氮和高氮处理土壤中的  $\alpha$ -D-葡萄糖-1-磷酸(G2)的 AWCD 值与对照之间的差异极其显著,AWCD 值均低于对照.与对照相比,低氮和高氮处理显著降低了腐胺(H4)和吐温 80(D1)的 AWCD 值.

#### 2.4 土壤微生物碳源利用活性与土壤理化性质之间的关系

31 种碳源主要成分的相关系数如表 3,载荷因子越大说明该碳源对主成分的作用程度越强.从中可知,构成第一主成分(PC1)的碳源有 17 种,包括 5 种糖类、2 种氨基酸类、1 种酯类、2 种醇类、2 种胺类和 4 种酸类,其中腐胺是与 PC1 最相关的碳源(载荷值为 0.951),其次是  $\alpha$ -D-乳糖(0.935)和 D-苹果酸(0.926),因此,腐胺、 $\alpha$ -D-乳糖和 D-苹果酸对 PC1 产生了主要的影响.此外,构成第二主成分(PC2)的碳源有 14 种,包括 2 种糖类、4 种氨基酸类、2 种酯类、1 种醇类、1 种胺类和 4 种酸类,其中 D-半乳糖酸- $\gamma$ -内酯是与 PC2 最相关的碳源(载荷值为 0.900),其次是肝糖(0.890)和  $\alpha$ -环式糊精(0.822).因此可以得出腐胺和 D-半乳糖酸- $\gamma$ -内酯

对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳代谢活性具有重要影响.综合与 PCA1 和 PCA2 具有较高相关性的碳源类型,对土壤微生物群落代谢特征起分异作用的主要碳源类型为酸类、糖类和氨基酸类,即不同氮沉降处理湿地的差异主要体现在对酸类、糖类和氨基酸类的利用上.

对不同氮浓度处理条件下培养了 144 h 的三江平原湿地土壤微生物群落的 AWCD 值进行冗余分析(RDA).前两个 RDA 轴分别解释了方差的 44.4% 和 26.05%(图 6),可看出氮沉降处理湿地土壤微生物群落在碳源利用上出现明显的空间分异,可见外源氮的添加对湿地土壤微生物碳源利用类型和能力产生了影响.高氮处理和低氮处理与对照的距离较远,因此可以得出低氮处理和高氮处理显著改变了土壤微生物对碳源的利用能力.另外,从 RDA 分析中可看出  $\text{NH}_4^+$ 、DOC 和 pH 是土壤微生物群落中影响最大的土壤环境因子.对照(CK)的土壤碳代谢能力分别与  $\text{NH}_4^+$ 、DOC 和 pH 呈正相关,而受 DON、SMC、TN 和  $\text{NO}_3^-$  的抑制;低氮(LN)和高氮(HN)条件下的土壤碳代谢能力均与 DON、SMC、TN 和  $\text{NO}_3^-$  呈正相关,受到  $\text{NH}_4^+$ 、DOC 和 pH



\* 表示  $P < 0.05$  水平; \*\* 表示  $P < 0.01$  水平;  
\*\*\* 表示  $P < 0.001$  水平

图 5 三江平原小叶章湿地土壤微生物群落代谢活性热图  
Fig. 5 Metabolic activity heat map of soil microbial community in *Calamagrostis angustifolia* wetland in Sanjiang Plain

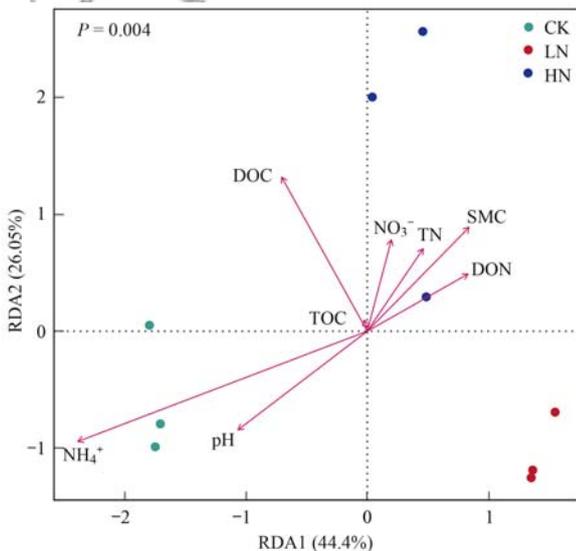


图 6 不同氮沉降条件下三江平原小叶章湿地土壤微生物群落功能和环境因子的冗余分析

Fig. 6 Redundancy analysis of soil microbial community function and environmental factors in *Calamagrostis angustifolia* wetland in Sanjiang Plain under different nitrogen deposition conditions

三江平原小叶章湿地土壤微生物功能多样性指数与土壤理化性质之间的关系如表 4. 环境因子 pH、 $\text{NH}_4^+$ 、DOC 和 TOC 均与 AWCD、Shannon 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数呈正相关; 而 DON、TN 和 SMC 均与 AWCD、Shannon 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数呈负相关;  $\text{NO}_3^-$  与 AWCD、Shannon 指数和 Simpson 指数呈正相关, 而与 Pielou 指数呈负相关. 此外, 相较于其他的环境因子,  $\text{NH}_4^+$  与 Pielou 指数呈现显著正相关, 而其它土壤微生物功能多样性指数与土壤理化因子并无显著相关性.

### 3 讨论

长期的氮输入会影响湿地土壤养分的有效性, 引起微生物对碳源利用能力的改变, 最终改变土壤微生物群落的结构和功能<sup>[42]</sup>. 因此开展长期氮沉降对土壤微生物群落碳代谢活性的研究, 对于了解湿地生态系统功能的变化有重要的意义. 在本研究实验中, 湿地土壤微生物群落的 AWCD 值随着培养时间的延长而呈现上升的趋势, 各个处理中的 AWCD 值的具体表现为: 对照 (CK) > 高氮 (HN) > 低氮 (LN) (图 2), 这表明长期施氮降低了土壤微生物的 AWCD 值, 即抑制了微生物群落的碳源代谢活性. 而隋心等<sup>[43]</sup>和郁培义等<sup>[44]</sup>的研究中发现 AWCD 值是随着氮浓度的增加而上升的, 即高氮 (HN) > 低氮 (LN) > 对照 (CK), 这表明在该研究区域中氮素的输入对土壤微生物的代谢活性起到了促进的效果, 从而提高了微生物群落的代谢活性. 而在本研究中, 施氮处理明显降低了土壤的 pH 值 (表 1), 即导致了土壤的酸化, 因此抑制了微生物的活性, 这与齐莎等<sup>[45]</sup>在内蒙古草原样地研究连续施氮 5 a 对土壤微生物的影响结果一致. 这说明土壤微生物 AWCD 值在不同季节和不同氮素形态和浓度条件下, 其规律并不一致, 可看出土壤微生物群落的碳源代谢活性受到多因素影响.

Shannon 多样性指数、Simpson 指数和 Pielou 指数常用来反映微生物物种丰富度和均匀度. 本研究发现低氮处理显著降低了土壤微生物  $\alpha$  功能多样性, 高氮显著降低了 Pielou 指数 (见表 2), 3 种处理呈现的规律为: 对照 (CK) > 高氮 (HN) > 低氮 (LN), 即施氮处理降低了土壤微生物  $\alpha$  功能多样性. 这与刁婵等<sup>[46]</sup>对亚热带森林土壤微生物碳源代谢多样性的研究结果一致. 其原因可能是由于氮添加改变了土壤微生物的微环境, 从而影响微生物对碳源的利用模式, 进而对微生物多样性指数产生一定影响.

的抑制.

不同氮处理下的微生物群落对碳源的利用程度

表 3 31 种碳源主要成分的相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficients of major components in 31 carbon sources

类别	Biolog-Eco 平板孔号	碳源	PC1	PC2
糖类 (carbohydrate)	B2	D-木糖 (D-xylose)	0.896	-0.279
	H1	$\alpha$ -D-乳糖 ( $\alpha$ -D-lactose)	<b>0.935</b>	-0.311
	A2	$\beta$ -甲基-D-葡萄糖苷 ( $\beta$ -methyl-D-glucoside)	0.773	0.562
	G2	$\alpha$ -D-葡萄糖-1-磷酸 ( $\alpha$ -D-glucose-1-phosphate)	0.885	0.397
	E1	$\alpha$ -环式糊精 ( $\alpha$ -cyclodextrin)	-0.162	<b>0.822</b>
	F1	肝糖 (glycogen)	-0.137	<b>0.890</b>
	G1	D-纤维二糖 (D-cellobiose)	0.77	0.527
氨基酸类 (amino acids)	A4	L-精氨酸 (L-arginine)	-0.704	0.538
	B4	L-天门冬酰胺 (L-asparagine)	0.251	0.462
	C4	L-苯基丙氨酸 (L-phenylalanine)	-0.600	0.383
	D4	L-丝氨酸 (L-serine)	0.627	-0.297
	E4	L-苏氨酸 (L-threonine)	0.116	0.624
	F4	甘氨酸-L-谷氨酸 (glycyl-L-glutamic acid)	0.900	0.021
酯类 (esters)	B1	丙酮酸甲酯 (pyruvic acid methyl ester)	0.137	0.741
	C1	吐温 40 (tween 40)	-0.329	-0.667
	D1	吐温 80 (tween 80)	0.909	0.04
	A3	D-半乳糖酸- $\gamma$ -内酯 (D-galactonic acid- $\gamma$ -lactone)	-0.257	<b>0.900</b>
醇类 (alcohols)	C2	<i>i</i> -赤藓糖醇 ( <i>i</i> -erythritol)	0.416	0.691
	D2	D-甘露醇 (D-mannitol)	0.754	0.571
	H2	D,L- $\alpha$ -磷酸甘油 (D,L- $\alpha$ -glycerol phosphate)	0.557	0.517
胺类 (amine)	G4	苯乙胺 (phenylethyl-amine)	0.746	0.081
	H4	腐胺 (putrescine)	<b>0.951</b>	0.025
	E2	<i>N</i> -乙酰-D-葡萄糖胺 ( <i>N</i> -acetyl-D-glucosamine)	0.57	0.692
酸类 (acids)	B3	D-半乳糖醛酸 (D-galacturonic acid)	-0.715	0.268
	F2	D-葡萄糖胺酸 (D-glucosaminic acid)	0.525	-0.512
	C3	2-羟基苯甲酸 (2-hydroxy benzoic acid)	-0.32	0.595
	D3	4-羟基苯甲酸 (4-hydroxy benzoic acid)	-0.851	0.113
	E3	$\gamma$ -羟基丁酸 ( $\gamma$ -hydroxybutyric acid)	-0.603	0.263
	F3	衣康酸 (itaconic acid)	0.761	-0.453
	G3	$\alpha$ -丁酮酸 ( $\alpha$ -ketobutyric acid)	-0.814	0.388
H3	D-苹果酸 (D-malic acid)	<b>0.926</b>	-0.254	

1) 黑体字表示分别与 PC1 和 PC2 有最高相关性的碳源

表 4 不同氮沉降条件下三江平原小叶章湿地土壤环境因子与土壤微生物功能多样性的相关性<sup>1)</sup>Table 4 Redundancy analysis of soil microbial community function and environmental factors in *Calamagrostis angustifolia* wetland in Sanjiang Plain under different nitrogen deposition conditions

	pH	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	DOC	DON	TN	TOC	SMC
AWCD	0.35	0.11	0.65	0.56	-0.38	-0.08	0.11	-0.23
Shannon 指数	0.28	0.06	0.57	0.52	-0.29	-0.13	0.04	-0.23
Simpson 指数	0.33	0.06	0.62	0.52	-0.3	-0.13	0.06	-0.24
Pielou 指数	0.39	-0.15	0.78*	0.32	-0.49	-0.26	0.04	-0.37

1) \* 表示 0.05 水平

不同,本研究中的低氮(LN)和高氮(HN)处理均抑制了土壤微生物对糖类、胺类、酸类碳源的利用活性,高氮处理促进了微生物对酯类碳源的利用(图3).说明外源氮的输入改变了土壤微生物对碳源的利用能力,可能是由于微生物群落为适应环境变化所作出的反应.而吴松芹等<sup>[47]</sup>在研究氮沉降对滨海湿地土壤微生物的影响结果中显示,低氮和高氮处理均抑制了微生物对酸类碳源的利用活性,高氮处理提高了微生物群落对胺类碳源的利用能力;王晶晶等<sup>[48]</sup>在探讨外源氮磷的输入对常绿阔叶林表层

土壤微生物的影响实验中表明,氮输入提高了土壤微生物对酚类和氨基酸类碳源的利用能力,与本研究结果存在差异的原因可能是由于不同样地土壤中微生物的种类和数量等不同所导致的.代谢指纹图谱(图4)和热图(图5)中结果进一步表明,低氮和高氮处理均显著降低了微生物群落对糖类中 $\alpha$ -D-乳糖(H1)、 $\alpha$ -D-葡萄糖-1-磷酸(G2)和胺类中腐胺(H4)的利用能力,高氮处理显著提高了土壤微生物对酯类中D-半乳糖酸- $\gamma$ -内酯(A3)的代谢活性.对应了碳源主要成分的相关系数出现的结果(表3),

即腐胺和  $\alpha$ -D-乳糖均与 PC1 最相关, D-半乳糖酸- $\gamma$ -内酯与 PC2 最相关, 更好地说明了腐胺、 $\alpha$ -D-乳糖和 D-半乳糖酸- $\gamma$ -内酯在氮沉降对小叶章湿地微生物碳代谢活性的影响中产生重要作用. 隋心等<sup>[43]</sup>对小叶章湿地中土壤微生物对模拟大气氮沉降的响应结果中显示, 与 PC1 最相关的碳源为 L-精氨酸和 D-半乳糖酸- $\gamma$ -内酯, 与 PC2 最相关的碳源为 L-天门冬酰胺. 与本研究的结论不一致, 出现这种差异可能是由于氮沉降会改变土壤微生物中的优势种群, 对不同的种群起到了不同的作用效果, 从而抑制或促进了它们的代谢活性<sup>[49]</sup>.

由冗余分析可看出, 施氮处理的湿地土壤微生物在不同碳源的利用上出现明显差异, 可见外源氮的添加改变了湿地土壤微生物群落对碳源的代谢能力(见图6), 出现这种现象可能是因为大量氮素的输入, 使土壤的 pH 值和土壤碳氮比等理化性质发生了变化. 另外, RDA 分析也显示  $\text{NH}_4^+$ 、DOC 和 pH 是土壤微生物群落功能中影响最大的土壤环境因子. Blagodatskaya 等<sup>[50]</sup>在研究中发现土壤 pH 值是使土壤微生物对碳源的摄入活性发生改变的重要因素. 王杰等<sup>[51]</sup>在研究贝加尔针茅草原土壤微生物中表明, 土壤 pH 值与氮浓度呈负相关关系.  $\text{NH}_4^+$  与微生物代谢活性和多样性指数相关性紧密(表4), 氮沉降以  $\text{NH}_4^+$  的形式输入土壤中,  $\text{NH}_4^+$  在氧化后释放出大量的  $\text{H}^+$ , 在改变土壤的碳氮比的同时, 也降低了土壤的 pH 值<sup>[52]</sup>. 除此之外, 从冗余分析中可得知 3 个处理间的湿地土壤微生物群落功能结构组成有显著的差异, 由此也可看出氮素的输入会对小叶章湿地土壤微生物多样性以及碳代谢能力产生重要影响.

综上, 模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物群落代谢特征具有明显的差异, 氮素的增加会改变环境的理化性质, 使微生物群落对碳源的利用模式发生变化, 从而影响土壤微生物的代谢活性. 但 Biolog-Eco 分析法只能从代谢特性方面来分析微生物功能多样性, 因此未来还需结合高通量测序技术、宏基因组技术和磷脂脂肪酸技术等多技术手段来探讨微生物群落功能多样性的变化规律.

#### 4 结论

在不同氮沉降条件下, 三江平原小叶章湿地土壤微生物碳代谢活性发生了显著改变, 施氮处理的土壤微生物 Shannon、Simpson 和 Pielou 多样性指数均低于对照; 从热图和冗余分析来看, 不同氮沉降处理的土壤微生物对碳源的利用差异显著;  $\text{NH}_4^+$ 、DOC 和 pH 是影响三江平原小叶章湿地土壤微生物

群落功能多样性的主要环境因子. 可以预见, 未来大气氮沉降量的持续增加, 势必会对三江平原小叶章湿地生态系统的功能造成严重影响.

致谢: 感谢洪河国家级自然保护区于广辉局长和朱宝光科长在野外实验工作中的帮助和支持, 同时也感谢东北林业大学刘明慧博士在实验和数据分折中给予的帮助和指导.

#### 参考文献:

- [1] Yu G R, Jia Y L, He N P, *et al.* Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade [J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(6): 424-429.
- [2] 付伟, 武慧, 赵爱花, 等. 陆地生态系统氮沉降的生态效应: 研究进展与展望 [J]. *植物生态学报*, 2020, **44**(5): 475-493.
- [3] Fu W, Wu H, Zhao A H, *et al.* Ecological impacts of nitrogen deposition on terrestrial ecosystems: research progresses and prospects [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, **44**(5): 475-493.
- [3] 王骏飞, 刘宁楷. 大气氮沉降机制及其生态影响研究进展 [J]. *污染防治技术*, 2018, **31**(6): 17-21, 39.
- [4] Wang J F, Liu N K. Research progress on mechanisms of atmospheric nitrogen deposition and its ecological impact [J]. *Pollution Control Technology*, 2018, **31**(6): 17-21, 39.
- [4] Galloway J N, Cowling E B, Seitzinger S P, *et al.* Reactive nitrogen: too much of a good thing? [J]. *Ambio*, 2002, **31**(2): 60-63.
- [5] Rousk J, Brookes P C, Bååth E. Fungal and bacterial growth responses to N fertilization and pH in the 150-year 'park grass' UK grassland experiment [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2011, **76**(1): 89-99.
- [6] Mao Q G, Lu X K, Zhou K J, *et al.* Effects of long-term nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in an N-rich tropical forest [J]. *Geoderma*, 2017, **285**: 57-63.
- [7] 闫钟清, 齐玉春, 李素俭, 等. 降水和氮沉降增加对草地土壤微生物与酶活性的影响研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2017, **44**(6): 1481-1490.
- [8] Yan Z Q, Qi Y C, Li S J, *et al.* Soil microorganisms and enzyme activity of grassland ecosystem affected by changes in precipitation pattern and increase in nitrogen deposition—a review [J]. *Microbiology China*, 2017, **44**(6): 1481-1490.
- [8] Lin B L, Kumon Y, Inoue K, *et al.* Increased nitrogen deposition contributes to plant biodiversity loss in Japan: insights from long-term historical monitoring data [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **290**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118033.
- [9] Midolo G, Alkemade R, Schipper A M, *et al.* Impacts of nitrogen addition on plant species richness and abundance: a global meta-analysis [J]. *Global ecology and Biogeography*, 2019, **28**(3): 398-413.
- [10] 芦光新, 陈秀蓉, 王军邦, 等. 气候变化对青藏高原高寒草地生态系统草丛-地境界面微生物的影响研究进展 [J]. *草地学报*, 2014, **22**(2): 234-242.
- [11] Lu G X, Chen X R, Wang J B, *et al.* Research progresses on the effects of global change on the microbes of plant-site interface in Alpine grassland ecosystem [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, **22**(2): 234-242.
- [11] 么中元, 张乃莉, 崔喜艳. 火烧和施氮对内蒙古半干旱草原土壤微生物群落碳源利用潜力的影响 [J]. *草地学报*, 2014, **22**(4): 713-721.

- Yao Z Y, Zhang N L, Cui X Y. Impacts of fire and N addition on microbial C utilization potential in a semi-arid grassland of Inner Mongolia[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, **22**(4): 713-721.
- [12] 张拓, 徐飞, 怀宝东, 等. 松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4273-4283.  
Zhang T, Xu F, Huai B D, *et al.* Effects of land use changes on soil bacterial community diversity in the riparian wetland along the downstream of Songhua River[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4273-4283.
- [13] 王娜, 高婕, 魏静, 等. 三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2375-2381.  
Wang N, Gao J, Wei J, *et al.* Effects of wetland reclamation on soil microbial community structure in the Sanjiang Plain [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2375-2381.
- [14] 徐飞, 张拓, 怀宝东, 等. 土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2531-2540.  
Xu F, Zhang T, Huai B D, *et al.* Effects of land use changes on soil fungal community structure and function in the riparian wetland along the downstream of the Songhua River [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2531-2540.
- [15] 隋心, 张荣涛, 许楠, 等. 三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3598-3605.  
Sui X, Zhang R T, Xu N, *et al.* Fungal community structure of different degeneration *Deyeuxia angustifolia* wetlands in Sanjiang Plain[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3598-3605.
- [16] 肖焯, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1842-1848.  
Xiao Y, Huang Z G, Wu H T, *et al.* Soil microorganism characteristics and soil nutrients of different wetlands in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1842-1848.
- [17] Huang Z Q, Xu Z H, Chen C R. Effect of mulching on labile soil organic matter pools, microbial community functional diversity and nitrogen transformations in two hardwood plantations of subtropical Australia[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, **40**(2): 229-239.
- [18] 田雅楠, 王红旗. Biolog 法在环境微生物功能多样性研究中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(3): 50-57.  
Tian Y N, Wang H Q. Application of Biolog to study of environmental microbial function diversity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(3): 50-57.
- [19] Lu X K, Mao Q G, Gilliam F S, *et al.* Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(13): 3790-3801.
- [20] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, **10**(2), doi: 10.1088/1748-9326/10/2/024019.
- [21] Demoling F, Nilsson L O, Bååth E. Bacterial and fungal response to nitrogen fertilization in three coniferous forest soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(2): 370-379.
- [22] Wang C, Liu D W, Bai E. Decreasing soil microbial diversity is associated with decreasing microbial biomass under nitrogen addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **120**: 126-133.
- [23] 翁志强, 许钰滢, 吕正阳, 等. 巨菌草根际土壤微生物群落代谢功能多样性分析[J]. *广东农业科学*, 2021, **48**(4): 62-68.  
Weng Z Q, Xu Y Y, Lyu Z Y, *et al.* Analysis on metabolic functional diversity of rhizosphere microbial communities of *Pennisetum giganteum* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2021, **48**(4): 62-68.
- [24] 王强, 戴九兰, 吴大千, 等. 微生物生态研究中基于 BIOLOG 方法的数据分析[J]. *生态学报*, 2010, **30**(3): 817-823.  
Wang Q, Dai J L, Wu D Q, *et al.* Statistical analysis of data from BIOLOG method in the study of microbial ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(3): 817-823.
- [25] 李胜华, 刘可星, 廖宗文. 特征碳源简化土壤微生物 Biolog 测定的方法及应用[J]. *中国农业科学*, 2010, **43**(3): 523-528.  
Li S H, Liu K X, Liao Z W. Method for simplification of characteristic carbon sources for Biolog analysis of soil microbial community and its application [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, **43**(3): 523-528.
- [26] 张彦东, 孙志虎, 沈有信. 施肥对金沙江干热河谷退化草地土壤微生物的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(2): 88-91.  
Zhang Y D, Sun Z H, Shen Y X. Effect of fertilization on soil microorganism of deteriorated grassland in dry-hot valley region of Jinsha River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, **19**(2): 88-91.
- [27] Frey S D, Knorr M, Parent J L, *et al.* Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **196**(1): 159-171.
- [28] DeForest J L, Zak D R, Pregitzer K S, *et al.* Atmospheric nitrate deposition, microbial community composition, and enzyme activity in northern hardwood forests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68**(1): 132-138.
- [29] Compton J E, Watrud L S, Porteous L A, *et al.* Response of soil microbial biomass and community composition to chronic nitrogen additions at Harvard forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **196**(1): 143-158.
- [30] 刘蔚秋, 刘滨扬, 王江, 等. 不同环境条件下土壤微生物对模拟大气氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2010, **30**(7): 1691-1698.  
Liu W Q, Liu B Y, Wang J, *et al.* Responses of soil microbial communities to moss cover and nitrogen addition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(7): 1691-1698.
- [31] Aerts R, De Caluwe H. Nitrogen deposition effects on carbon dioxide and methane emissions from temperate peatland soils[J]. *Oikos*, 1999, **84**(1): 44-54.
- [32] 施建敏, 马克明, 赵景柱, 等. 三江平原残存湿地斑块特征及其对物种多样性的影响[J]. *生态学报*, 2010, **30**(24): 6683-6690.  
Shi J M, Ma K M, Zhao J Z, *et al.* The patch characteristics of wetland remnants in the Sanjiang Plain and its influence on plant species richness [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(24): 6683-6690.
- [33] 万忠梅, 宋长春. 三江平原小叶章湿地土壤酶活性的季节动态[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(5): 1215-1220.  
Wan Z M, Song C C. Seasonal dynamics of soil enzyme activities under *Calamagrostis angustifolia* marsh in the Sanjiang Plain [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(5): 1215-1220.
- [34] 栾兆擎, 邓伟, 白军红, 等. 洪河国家级自然保护区湿地生境安全保护[J]. *水土保持研究*, 2003, **10**(3): 154-157.  
Luan Z Q, Deng W, Bai J H, *et al.* Protection of Honghe

- national nature reserve wetland habitat[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, **10**(3): 154-157.
- [35] He D M, Ruan H H. Long term effect of land reclamation from lake on chemical composition of soil organic matter and its mineralization[J]. PLoS One, 2014, **9**(6), doi: 10.1371/journal.pone.0099251.
- [36] Brookes P C, Landman A, Pruden G, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, **17**(6): 837-842.
- [37] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987, **19**(6): 703-707.
- [38] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, *et al.* Soluble organic nitrogen in agricultural soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, **30**(5-6): 374-387.
- [39] Jin Z, Ji F Y, Xu X, *et al.* Microbial and metabolic characterization of a denitrifying phosphorus-uptake/side stream phosphorus removal system for treating domestic sewage [J]. Biodegradation, 2014, **25**(6): 777-786.
- [40] Velasco A G V, Probanza A, Mañero F J G, *et al.* Effect of fire and retardant on soil microbial activity and functional diversity in a Mediterranean pasture[J]. Geoderma, 2009, **53**(1-2): 186-193.
- [41] Liao M, Xie X M, Peng Y, *et al.* Characteristics of soil microbial community functional and structure diversity with coverage of *Solidago Canadensis* L[J]. Journal of Central South University, 2013, **20**(3): 749-756.
- [42] Chakraborty A, Chakrabarti K, Chakraborty A, *et al.* Effect of long-term fertilizers and manure application on microbial biomass and microbial activity of a tropical agricultural soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, **47**(2): 227-233.
- [43] 隋心, 张荣涛, 刘赢男, 等. 模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物功能多样性的影响[J]. 草地学报, 2016, **24**(6): 1226-1233.
- Sui X, Zhang R T, Liu Y N, *et al.* Influence of simulation nitrogen deposition on soil microbial functional diversity of *Calamagrostis angustifolia* wetland in Sanjiang Plain[J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, **24**(6): 1226-1233.
- [44] 郁培义, 朱凡, 王志勇, 等. 氮添加对樟树林红壤微生物群落代谢功能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, **33**(3): 70-74.
- Yu P Y, Zhu F, Wang Z Y, *et al.* Effects of nitrogen addition on metabolic function of microbial community in red soil of *Cinnamomum camphora* forest [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, **33**(3): 70-74.
- [45] 齐莎, 赵小蓉, 郑海霞, 等. 内蒙古典型草原连续 5 年施用氮磷肥土壤生物多样性的变化[J]. 生态学报, 2010, **30**(20): 5518-5526.
- Qi S, Zhao X R, Zheng H X, *et al.* Changes of soil biodiversity in Inner Mongolia steppe after 5 years of N and P fertilizer applications[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(20): 5518-5526.
- [46] 刁婵, 鲁显楷, 田静, 等. 长期氮添加对亚热带森林土壤微生物碳源代谢多样性的影响及机制[J]. 生态学报, 2019, **39**(18): 6622-6630.
- Diao C, Lu X K, Tian J, *et al.* Effects of long-term nitrogen addition on the metabolic diversity of microbial carbon sources in subtropical forest soils [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(18): 6622-6630.
- [47] 吴松芹, 汪成忠, 李梦莎. 模拟氮沉降对滨海湿地土壤微生物功能多样性的影响[J]. 土壤, 2017, **49**(6): 1153-1158.
- Wu S Q, Wang C Z, Li M S. On soil functional diversity of native coastal wetland under simulated nitrogen deposition [J]. Soils, 2017, **49**(6): 1153-1158.
- [48] 王晶晶, 樊伟, 崔珺, 等. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤微生物群落特征的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(24): 8361-8373.
- Wang J J, Fan W, Cui J, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community characteristics in a subtropical evergreen broadleaved forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(24): 8361-8373.
- [49] 罗希茜, 郝晓晖, 陈涛, 等. 长期不同施肥对稻田土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(2): 740-748.
- Luo X Q, Hao X H, Cheng T, *et al.* Effects of long-term different fertilization on microbial community functional diversity in paddy soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, **29**(2): 740-748.
- [50] Blagodatskaya E V, Anderson T H. Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ratio and qCO<sub>2</sub> of microbial communities in forest soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, **30**(10-11): 1269-1274.
- [51] 王杰, 李刚, 修伟明, 等. 贝加尔针茅草原土壤微生物功能多样性对氮素和水分添加的响应[J]. 草业学报, 2014, **23**(4): 343-350.
- Wang J, Li G, Xiu W M, *et al.* Responses of soil microbial functional diversity to nitrogen and water input in *Stipa baicalensis* tepe, Inner Mongolia, Northern China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, **23**(4): 343-350.
- [52] Kumar U, Shahid M, Tripathi R, *et al.* Variation of functional diversity of soil microbial community in sub-humid tropical rice-rice cropping system under long-term organic and inorganic fertilization [J]. Ecological Indicators, 2017, **73**: 536-543.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018 .....	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM <sub>2.5</sub> Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form .....	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Chengdu Under the Background of Emission Reduction .....	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM <sub>1</sub> During Autumn and Winter in Qingdao .....	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area .....	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin .....	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing .....	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer .....	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer .....	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill .....	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years .....	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin .....	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake .....	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors .....	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City .....	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments .....	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region .....	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate .....	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation .....	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area .....	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation .....	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil .....	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine .....	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities .....	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River .....	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain .....	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City .....	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments .....	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials .....	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process .....	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project .....	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China .....	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau .....	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas .....	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou .....	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City .....	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil .....	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City .....	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass ( <i>Pennisetum purpureum</i> Schum) .....	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis .....	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings .....	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield .....	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China .....	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve .....	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond .....	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> Adsorption by Soil Around a Dressing Plant .....	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar .....	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau .....	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation .....	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)