

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郇建建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响

杨建强¹, 刁华杰^{2,3,4}, 胡姝娅^{3,5}, 陈晓鹏^{2,3,4}, 王常慧^{2,3,4*}

(1. 山西农业大学生命科学学院, 太谷 030801; 2. 山西农业大学草业学院, 太谷 030801; 3. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 4. 山西右玉黄土高原草地生态系统定位观测研究站, 右玉 037200; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 盐渍化草地土壤养分含量低, 自然条件差, 尤其是大量元素氮和磷的含量低于天然非盐渍化草地. 盐渍化草地中的土壤微生物由于长期受盐或碱的胁迫, 群落组成与结构也区别于非盐渍化天然草地. 盐渍化草地土壤微生物受养分限制叠加盐碱胁迫如何响应氮、磷添加的机制尚不清楚. 本研究在山西省右玉县境内的盐渍化草地进行, 2017 年建立了氮磷添加实验平台, 包括对照、氮添加、磷添加及氮和磷同时添加的 4 个处理, 于实验处理的第 3 年(2020 年)测定生长季 5~9 月氨氧化微生物(氨氧化细菌: AOB 和氨氧化古菌: AOA)、土壤真菌(fungi, F)和细菌(bacteria, B)的组成以及土壤微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN), 结合土壤盐基阳离子及 pH 值的变化, 探讨盐渍化草地土壤微生物特征对氮、磷添加的响应及其机制. 结果表明: ①2020 年 5~9 月, 采样时间显著影响土壤 AOA 和 AOB 的丰度、细菌真菌组成及微生物生物量; 土壤微生物的季节动态是由土壤含水量、生长季降水分配及植物因素共同调控的. ②与对照组相比, AOA/AOB 的比值在氮添加处理下显著降低 51%; 磷添加对土壤微生物特征(氨氧化微生物、细菌真菌组成和微生物生物量)无显著影响; 在氮和磷同时添加处理下, AOB 的丰度显著提高了 64.1%, AOA 的丰度无显著改变, 但 AOA/AOB 显著降低 59.6%. ③单独氮或磷添加对土壤 pH 值无显著影响, 但氮和磷同时添加显著降低了土壤 pH 值; 尽管氮、磷添加对土壤盐基阳离子无显著影响, 结构方程模型结果显示, 土壤盐基阳离子对土壤微生物(细菌和真菌组成)具有直接的调控作用. ④土壤含水量对土壤微生物的变异具有较高的解释度. 因此, 本研究表明 AOB 对养分添加的响应比较敏感, 短期氮和磷添加提高 AOB 的数量, 促进氮的周转.

关键词: 盐渍化草地; 氮、磷添加; 氨氧化微生物; 细菌; 真菌

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-6058-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105003

Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland

YANG Jian-qiang¹, DIAO Hua-jie^{2,3,4}, HU Shu-ya^{3,5}, CHEN Xiao-peng^{2,3,4}, WANG Chang-hui^{2,3,4*}

(1. College of Life Sciences, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 3. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 4. Youyu Loess Plateau Grassland Ecosystem Research Station, Youyu 037200, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil microbial composition and community structure in salinization grassland are substantially different from those of non-saline-alkaline natural grassland due to the lower soil nutrients, inferior natural conditions, and higher soil salinization stress. Nitrogen (N) and phosphorus (P) are main factors that limit the productivity in semi-arid grassland, and whether soil microorganisms are affected by the addition of N and P in nutrient limitation and salinization grassland is still unclear. This experiment was conducted in Youyu Loess Plateau Grassland Ecosystem Research Station, Shanxi Province. Four treatments were set in 2017, which included the control (CK), N addition (N), P addition (P), and N and P addition (NP). The ammonia-oxidizing microorganisms [i. e., ammonia-oxidizing bacteria (AOB) and ammonia-oxidizing archaea (AOA)], soil bacteria (B) and fungi (F) composition, and soil microbial biomass carbon and nitrogen (MBC and MBN, respectively), as well as soil pH and base cations, were measured during the growing season in 2020. Our results showed that: ① the sampling month had the main effect on soil ammonia-oxidizing microorganisms, soil bacterial and fungal composition, and microbial biomass, which were regulated by precipitation distribution, soil water content, and plant factors. ② Compared with that under the control, the ratio of AOA/AOB was significantly decreased by 51% under N addition, whereas P addition had no significant effect on soil microbial characteristics (ammonia-oxidizing microorganisms, bacterial and fungal composition, and microbial biomass). However, the NP treatment significantly increased AOB by 64.1% and decreased the ratio of AOA/AOB by 59.6%. ③ Single addition of N and P had no significant effect on soil pH, whereas the simultaneous addition of N and P significantly reduced soil pH. Though N and P additions had no significant effect on soil base cations, structural equation models (SEM) showed that soil base cations had a direct regulatory effect on soil microorganisms (bacterial and fungal composition). ④ Soil water content had the highest explanatory power for the variation in soil microorganisms based on the results of the SEM. In conclusion, our study shows that soil AOB is more sensitive to nutrient addition, and short-term nutrient addition could increase the abundance of AOB, thus promoting nutrient transformation.

Key words: saline-alkaline grassland; nitrogen and phosphorus addition; ammonia-oxidizing microorganisms; bacteria; fungi

草地占陆地生态系统的 40%, 在调节陆地生态系统碳循环方面发挥着重要的作用^[1]. 氮(N)和磷

收稿日期: 2021-05-01; 修订日期: 2021-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770526, 31870438); 国家重点研发计划项目(2017YFA0604802); 山西农业大学博士科研启动项目(2021BQ26)

作者简介: 杨建强(1973~), 男, 博士, 主要研究方向为微生物学, E-mail: robert_free@163.com

* 通信作者, E-mail: wangch@ibcas.ac.cn

(P)是草地主要的限制性养分,直接影响草地初级生产力^[2]. 大气氮沉降的增加一方面解除氮限制^[3,4],增加凋落物的质量和数量^[5],促进土壤微生物的生长和繁殖^[6],另一方面改变土壤氮的转化^[7,8],调控土壤养分有效性、草地生产力和物种多样性. 但外界氮输入的增加,会引起土壤养分不平衡,加速生态系统对磷的需求^[2],因此推测磷添加会改变土壤微生物特征对氮添加的响应.

土壤微生物是土壤养分循环的主要参与者^[9],调控着土壤养分的有效性和转化过程^[8]. 土壤有机氮只有经过矿化过程形成无机氮才能够被植物吸收和利用,而氨氧化古菌(AOA)和氨氧化细菌(AOB)是参与土壤氮转化的主要微生物^[10~12]. 已有大量非盐渍化草地的研究表明,氮添加对土壤 AOA 及 AOB 的丰度有显著影响,并且 AOA 及 AOB 对氮添加的响应趋势不同^[13,14]. 而在盐渍化草地,氮添加是如何影响土壤 AOA 和 AOB 的研究尚不清晰. 土壤微生物的生物量及土壤细菌和真菌组成受到养分的调控. 有研究表明氮添加降低了土壤微生物生物量碳(MBC),提高了土壤微生物生物量氮(MBN),改变了土壤细菌和真菌的组成,并且降低了真菌和细菌的比例^[6]. 而磷添加同样显著影响土壤细菌和真菌的数量和组成^[15]. 可见,磷添加会解除氮添加引起的磷限制,进一步改变氮添加对土壤微生物的影响. 然而,目前综合考虑氮、磷及其交互作用对土壤氨氧化微生物、土壤细菌和真菌组成及土壤微生物生物量影响的研究还不多见. 而已有研究也表明环境因素的差异是引起微生物群落对养分添加响应的主要驱动因素^[16]. 因此,笔者推测在生长季不同月份水热条件差异的背景下,土壤微生物特征对氮、磷添加的响应会呈现季节动态的差异.

我国北方农牧交错带草地生态系统对全球气候变化和人为干扰极为敏感. 土壤盐渍化是限制该地区草地生产力和牧草品质的主要因素. 较高的土壤含盐量影响植物根系对土壤水分和养分的吸收及利用,造成植物生理性缺水,影响草地生态系统生产力^[17]. 土壤盐分和 pH 值是影响土壤微生物特征的重要因素^[18,19],有研究表明较高的盐分会抑制土壤微生物的生长和繁殖^[20],并且土壤 pH 值调控着土壤微生物的组成及活性^[21]. 因此草地土壤盐渍化会通过影响土壤微生物特征进而影响其主导的养分转化过程^[22]. 本研究通过测定一个完整生长季 AOA、AOB 的丰度及比例,细菌和真菌组成及比例,土壤 MBC、MBN 及比例,并进一步结合土壤阳离子和 pH 值的变化,探讨盐渍化草地土壤微生物特征对氮、磷输入的响应,以期对盐渍化草地生态系统的科学管

理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验地概况

研究地点位于山西右玉黄土高原草地生态系统定位观测研究站(E112°19'39.6", N39°59'48.5",海拔1 348 m)的固定样地. 该地区年均降水量为 435 mm,年平均气温 4.6℃. 降水主要集中在 7~8 月,无霜期 100~120 d,年日照率为 30%. 土壤 pH 值为 9~10,土壤 ω (全氮)、 ω (全磷)、 ω (有机碳)、 ω (有机质)、 ω (速效钾)和 ω (速效磷)分别为: 0.80 g·kg⁻¹、0.39 g·kg⁻¹、5.43 g·kg⁻¹、9.36 g·kg⁻¹、131 mg·kg⁻¹和 3.39 mg·kg⁻¹. 群落优势种是赖草(*Leymus secalinus*)、碱茅(*Puccinellia distans*)和碱蒿(*Artemisia anethifolia*)等.

1.2 实验设计

本实验平台隶属于全球变化养分联网实验(NutNet)的一个网络实验点,建立于 2017 年 8 月,2018 年 5 月正式开始养分添加处理. 本实验采用完全随机区组设计,选择其中的 4 个处理,包括对照(CK)、氮添加(N)、磷添加(P)及氮和磷同时添加(NP),每个处理 6 个重复,共 24 个小区,小区面积 6 m×6 m,小区间隔为 2 m. 氮添加的形态为缓释尿素,磷添加的形态为过磷酸钙,氮和磷的添加量均为 10 g·(m²·a)⁻¹ 纯氮和纯磷. 于每年的生长季初期(5 月初)均匀地撒施到各个处理小区中.

1.3 样品采集与测定

本实验处理第 3 年(2020 年)的 5~9 月,每月中旬在每个小区随机用土钻(直径 3 cm)取 0~10 cm 表层土壤 5 钻,混合均匀,过筛 2 mm,分装成 3 份分别以冷冻(20 g)、冷藏(60 g)和风干土(50 g)贮存. 冷冻土保存于 -80℃ 冰箱,用于提取 DNA,定量 PCR 测定土壤 AOB 和 AOA 以及细菌(bacteria, B)和真菌(fungi, F)的丰度;冷藏土 4℃ 冰箱保存,用于测定土壤微生物生物量;风干土用于测定土壤盐基阳离子和土壤 pH 值等土壤养分指标. 土壤 MBC 和 MBN 通过氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定;0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 浸提熏蒸前后的土壤,浸提液用总有机碳分析仪(Elementar TOC, Elementar Co., Hanau, Germany)测定. 酸度计测定 0~10 cm 表层土壤 pH 值(水土比为 5:1). 土壤中的盐基阳离子通过乙酸铵浸提法测定;通过 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵浸提后的液体,用原子吸收光谱仪(AAS, Shimadzu, Japan)测定盐基的钾离子(K⁺)、钙离子(Ca²⁺)、钠离子(Na⁺)和镁离子(Mg²⁺),总和定义为总的可交换阳离子的量(soil total cations, STC). 重量法测定土壤含水量. 收获法

测定净地上生物量:齐地面剪去 1 m×0.2 m 样方所有活的植物, 65℃ 烘干 48 h 至恒重. 枯黄的叶片单独收集, 记为凋落物. 同时在 1 m×1 m 的固定样方中用网格法估算植物的盖度.

通过实时荧光定量 PCR 法测定土壤氨氧化细菌和氨氧化古菌的 *amoA* 基因拷贝数以及土壤细菌 (16S rDNA) 和真菌 (ITS) 的拷贝数. 取 0.5 g 土样, 用 DNA 提取试剂盒 (FastDNA spin kit for soil, MP Biomedicals, Cleveland, OH, USA), 根据操作步骤提取土壤总 DNA. 氨氧化古菌 *amoA* 基因通过引物 Arch-*amoA*F (STAATGGTCTGGCTTAGACG) 和 Arch-*amoA*R (GCGGCCATCCATCTGTATGT) 扩增. 氨氧化细菌 *amoA* 基因通过引物 *amoA*-1F (GGGGTTTCTACTGGTGGT) 和 *amoA*-2R (CCCCTCKGSAAAGCCTTCTTC) 扩增. 土壤真菌通过引物 ITS1F (CTTGGTCAATTTAGAGGAAGTAA) 和 ITS2R (GCTGC GTTCTTCATCGATGC) 扩增. 土壤细菌通过引物 Eub338 (ACTCCTACGGGAGGCA GCAG) 和 Eub806 (GGACTACHVGGGTWTCTAAT) 扩增. 反应体系 (20 μ L): 缓冲液和聚合酶预混液 10 μ L, 上、下游引物各 0.4 μ L, 模板 2 μ L, 无菌 ddH₂O 7.2 μ L. 反应条件: 95℃ 预变性 5 min; 95℃ 变性 30 s, 56℃ (细菌), 60℃ (AOA、AOB、真菌), 退火 30 s, 72℃ 延伸 40 s, 扩增 40 个循环; 72℃ 延伸 5 min. 通过质粒浓度

(ng· μ L⁻¹) 分别为 162.21 (细菌)、153 (真菌)、180 (AOA) 和 233 (AOB) 的标准品制作标准曲线用于计算所测功能基因 (AOA、AOB、细菌和真菌) 拷贝数.

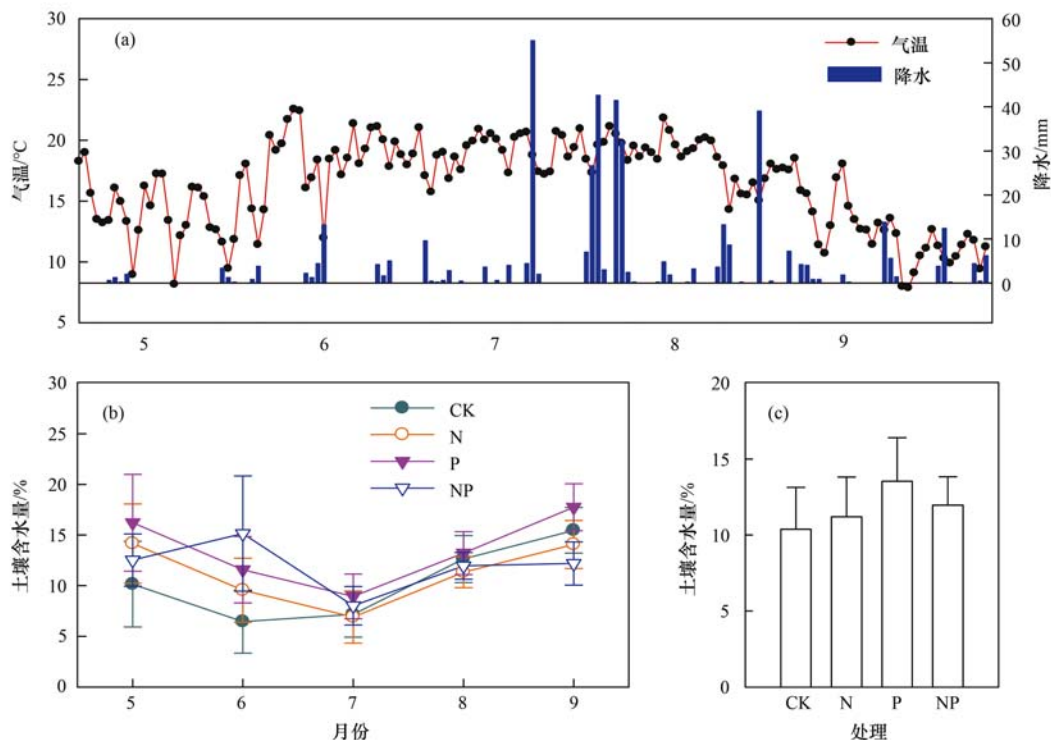
1.4 数据处理

通过重复测量方差分析, 探讨采样日期、氮添加、磷添加及其交互作用对微生物特征 (AOA、AOB、B、F、MBC 和 MBN) 的影响. 通过单因素方差分析并结合 Duncan 法进行多重比较探讨氮、磷及氮和磷同时添加对微生物特征的影响. 通过 Pearson 相关性分析土壤 AOA、AOB、B、F、MBC、MBN、SM、pH、土壤盐基阳离子和植物因素之间的相关性. 通过 SPSS version 25 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) 进行数据分析. 通过 Amos version 21.0 (Amos Development Corporation, Chicago, IL, USA) 做结构方程模型解释氮、磷添加对土壤微生物特征的直接和间接的影响. 利用 SigmaPlot 12.5 进行作图.

2 结果与分析

2.1 氮磷添加对环境因子、土壤盐基阳离子及 pH 的影响

2020 年生长季气温和降水量呈季节波动 [图 1 (a)], 气温在 7 月最高, 生长季 5~9 月日均气温为 16.4℃, 其中 7 月日均气温最高为 19.3℃. 降水量



CK: 对照, N: 氮添加, P: 磷添加, NP: 氮和磷共同添加, 下同

图 1 2020 年生长季气温、降水和土壤含水量的季节动态

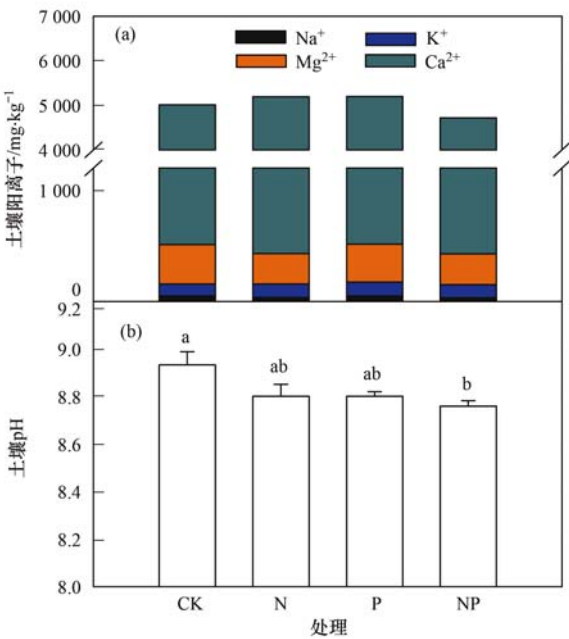
Fig. 1 Seasonal dynamics of atmospheric temperature, precipitation, and soil moisture in 2020

主要分布在 7~9 月, 3 次极端降水发生在 7 月中旬, 7 月底和 8 月中旬. 生长季 5~9 月降水量为 426 mm, 其中 7 月 (226 mm) 和 8 月 (93 mm) 的降水占生长季降水的 75%. 土壤含水量与生长季降水有关[图 1(b)]. 但是短期的氮、磷添加并没有显著影响土壤含水量[$P>0.05$, 图 1(c)].

土壤盐基阳离子(镁离子, 钾离子, 钠离子及钙离子)在各处理间差异不显著[$P>0.05$, 图 2(a)]. 氮、磷单独添加对土壤 pH 的影响显著, 而氮和磷同时添加显著降低了土壤 pH[$P<0.05$, 图 2(b)].

2.2 氮、磷添加对盐渍化草地土壤 AOA 和 AOB 丰度的影响

2020 年生长季采样时间极显著地影响土壤 AOA 和 AOB 的丰度($P<0.001$, 表 1). 5~9 月 AOA 丰度呈现先升高后降低的趋势, 8 月达到最大值[图 3(a)]; AOB 的变化趋势与土壤水分的变化趋势一致, 表现为先降低后升高, 最低值出现在 7 月和 8 月[图 3(c)]; AOA/AOB 的比值呈现出先升高后降低的趋势, 最高值出现在 8 月[图 3(e)]. 三因素方差分析结果表明, 氮添加显著影响 AOA/AOB 的比值($P<0.01$), 磷添加对 AOB 的影响处于边缘显著水平($0.05<P<0.1$), 氮添加和采样时间的交互作用显著影响 AOA/AOB 的比值($P<0.01$, 表



不同小写字母表示处理间差异显著, 下同
图 2 氮、磷添加对盐渍化草地土壤 pH 和盐基离子的影响

Fig. 2 Effects of N and P addition on soil pH and base cations

1), 各处理之间的显著差异仅出现在 8 月. 通过单因素方差和多重比较发现, 氮和磷同时添加显著提高 AOB 的量[$0.05<P<0.1$, 图 3(d)], 而单独氮添加及氮磷同时添加均显著降低了 AOA/AOB[$P<0.05$, 图 3(f)].

表 1 采样时间、氮、磷添加及其交互作用对土壤微生物特征的重复测量方差分析

Table 1 Results (F values) of repeated-measures ANOVA for the effects of sampling date, N addition, P addition, and their interactions on soil microbial characteristics

项目	氨氧化古菌 (AOA)	氨氧化细菌 (AOB)	AOA/AOB	细菌 (B)	真菌 (F)	B/F	微生物量碳 (MBC)	微生物量氮 (MBN)	MBC/MBN
时间(D)	6.85 ***	4.52 **	8.73 ***	6.30 ***	12.5 ***	19.5 ***	3.89 **	11.4 ***	14.0 ***
氮添加 (N)	0.01	2.40	17.1 **	0.29	0.29	0.06	0.27	0.01	0.28
磷添加 (P)	0.62	3.72	0.38	4.45 *	5.27 *	1.07	1.37	0.98	0.41
N × P	0.18	0.06	0.00	0.12	0.27	0.11	0.64	1.83	0.00
D × N	1.41	0.89	4.02 **	0.53	0.78	0.23	1.90	0.99	0.98
D × P	1.06	1.38	0.56	0.67	1.88	0.41	1.15	0.96	1.40
D × N × P	0.24	0.36	1.48	0.88	0.29	0.03	1.07	0.98	2.33

1) *、** 和 *** 分别表示相关显著性 ($P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$)

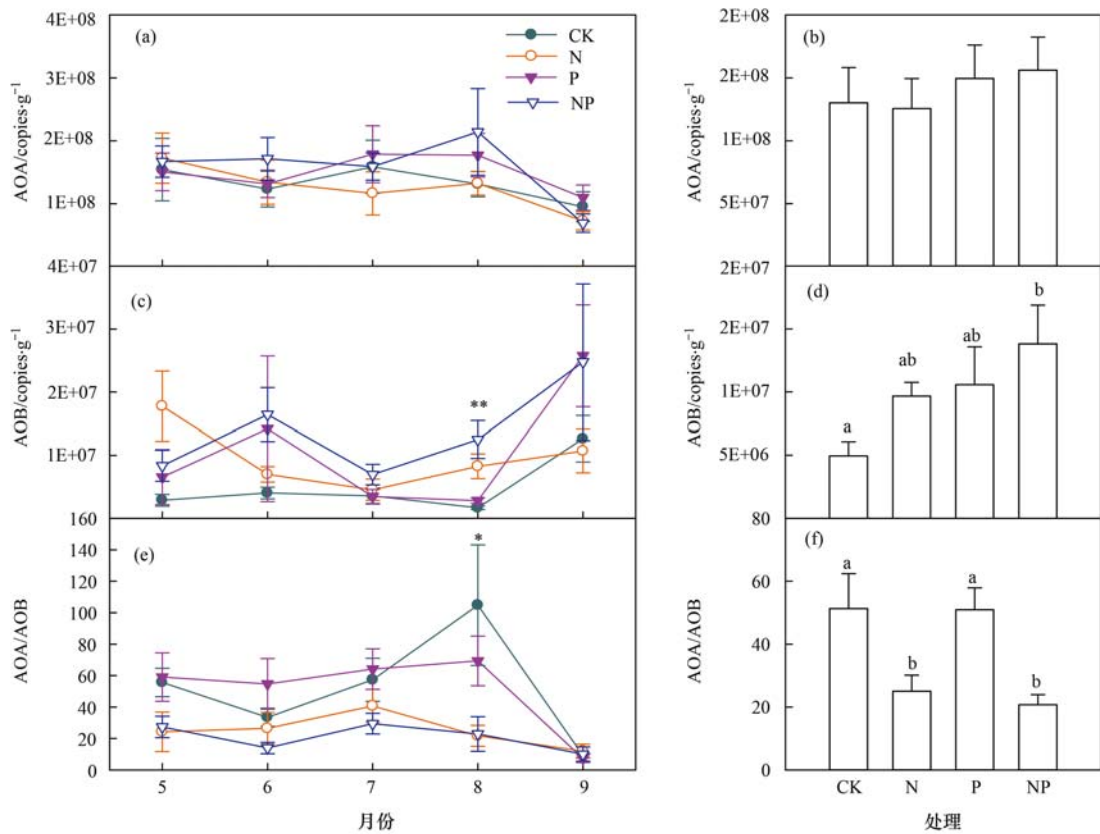
2.3 氮、磷添加对盐渍化草地土壤细菌和真菌组成的影响

采样时间显著影响土壤细菌和真菌的数量及细菌和真菌比值(B/F, $P<0.001$, 表 1). 在生长季的 5~9 月, 土壤细菌和真菌的数量均有增加的趋势, 其中土壤细菌的丰度在氮磷添加处理下的 8 月达到最大为 $8.4 \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ [图 4(a) 和 4(b)], 土壤真菌的丰度在 9 月达到最大值为 $4.6 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ [图 4(c) 和 4(d)]. 三因素方差分析结果表明, 氮添加的主效应对细菌、真菌的丰度及其比例的影响不显著($P>0.05$, 表 1), 而磷添加的主效应

对细菌和真菌的丰度具有显著影响($P<0.01$, 表 1). 单因素方差分析和多重比较发现不同处理之间对细菌、真菌的丰度及其比值均无显著影响($P>0.05$). 仅在生长最旺季的 8 月发现显著差异[$P<0.05$, 图 4(c) 和 4(e)].

2.4 氮、磷添加对盐渍化草地土壤 MBC 和 MBN 的影响

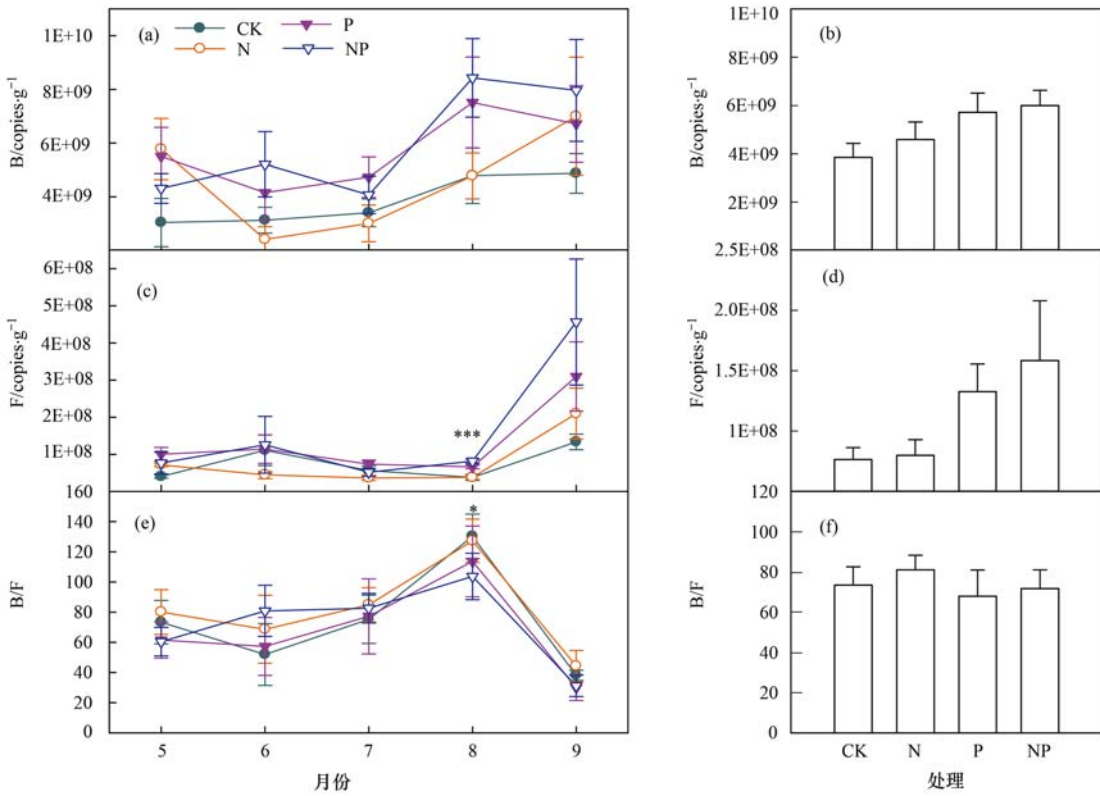
采样时间显著影响土壤 MBC、MBN 及其比值($P<0.01$, 表 1). 氮和磷同时添加处理下 8 月土壤的 MBC 显著高于对照($P<0.05$, 图 5). 三因素方差分析显示, 氮、磷添加及其交互作用对 MBC 和 MBN



* 和 ** 分别表示相关显著性 ($P < 0.05$ 和 $P < 0.01$)

图 3 盐渍化草地土壤氨氧化细菌和古菌的季节动态及其年均值

Fig. 3 Seasonal and inter-annual mean values of soil AOA and AOB in saline-alkaline grassland



* 和 *** 分别表示相关性显著性 ($P < 0.05$ 和 $P < 0.001$)

图 4 盐渍化草地土壤细菌和真菌丰度的季节动态及年际均值

Fig. 4 Seasonal and interannual mean abundance of the bacteria and fungi in saline-alkaline grassland

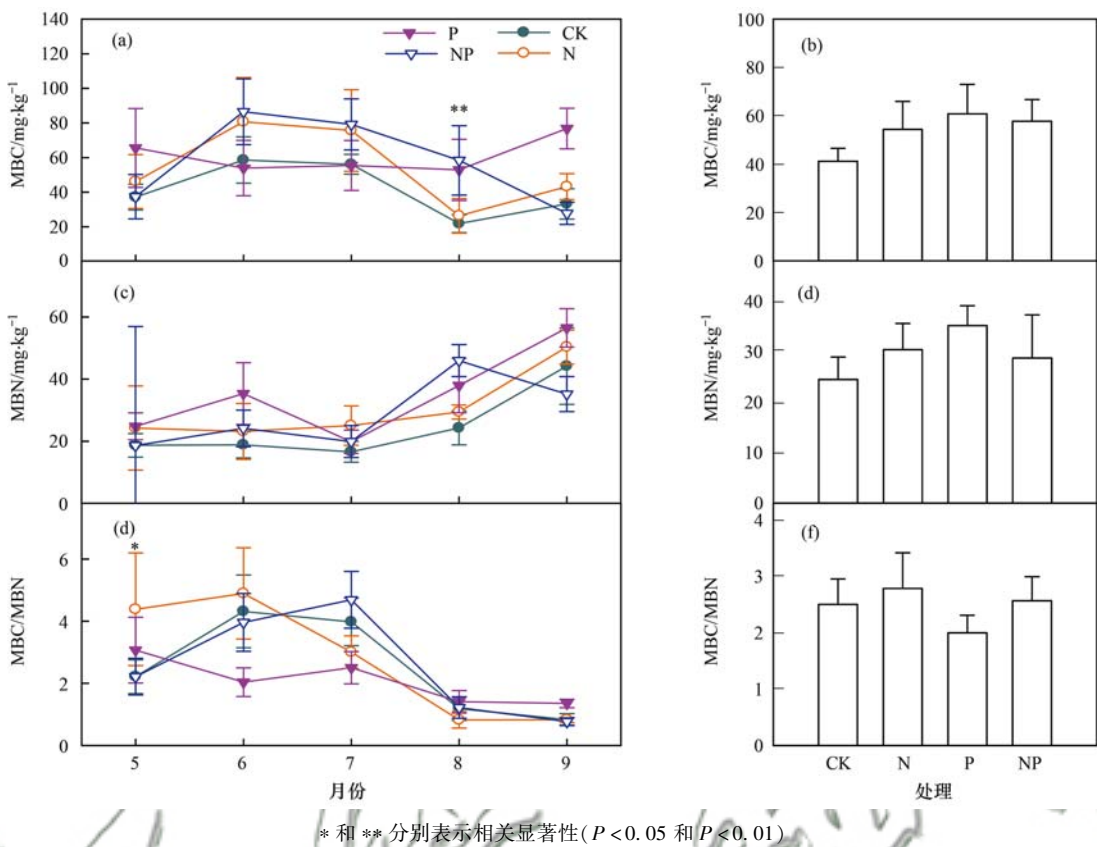


图 5 盐渍化草地土壤微生物量碳和微生物量氮的季节动态及年际均值

Fig. 5 Seasonal and interannual mean values of soil MBC and MBN in saline-alkaline grassland

无显著影响 ($P > 0.05$, 表 1).

2.5 土壤微生物特征与土壤环境因子的关系

土壤含水量与 AOA、细菌、B/F、MBC 和 MBN 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$, 表 2). 土壤钙离子和钠离子与 AOA、细菌、B/F 呈现显著的正相关关系 ($P < 0.05$, 表 2). 土壤 pH 与土壤微生物特征没有显著的相关性 ($P > 0.05$, 表 2). 地上初级生产力、凋

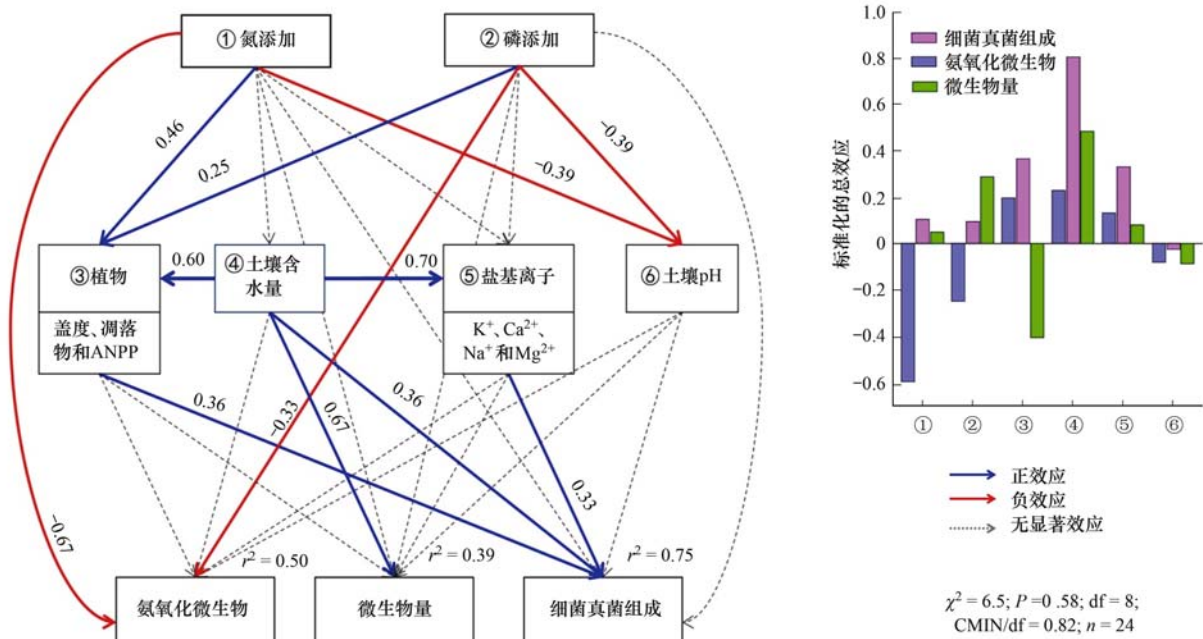
落物和盖度与土壤细菌的丰度正相关 ($P < 0.05$, 表 2). 从图 6 可知, 土壤氨氧化微生物、土壤微生物生物量和细菌真菌组成的变异被相关因子分别解释了 50%、39% 和 75%; 氮、磷添加直接影响土壤氨氧化微生物; 与土壤盐基阳离子相比, 土壤 pH 值对微生物的调控作用相对较小; 土壤含水量间接影响植物生长及土壤盐基阳离子调控土壤微生物.

表 2 土壤微生物特征与相关因子的皮尔逊相关性¹⁾

Table 2 Pearson correlation between soil microorganisms and related factors

	AOA	AOB	AOA/AOB	细菌 (B)	真菌 (F)	B/F	MBC	MBN	MBC/MBN	土壤含水量 (SM)	土壤 pH	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	凋落物	地上生物量
AOB	0.18																
AOA/AOB	0.22	-0.37															
细菌 (B)	0.76 **	0.38	0.13														
真菌 (F)	0.38	0.33	-0.09	0.33													
B/F	0.53 **	0.06	0.21	0.59 **	-0.37												
MBC	0.42 *	0.49 *	-0.10	0.65 **	0.27	0.25											
MBN	0.37	0.43 *	0.23	0.56 **	0.34	0.22	0.64 **										
MBC/MBN	-0.06	-0.03	-0.30	-0.08	-0.03	-0.02	0.30	-0.38									
土壤含水量 (SM)	0.58 **	0.05	0.36	0.75 **	0.14	0.68 **	0.42 *	0.47 *	-0.14								
土壤 pH	-0.23	-0.34	0.18	-0.19	-0.31	0.08	-0.08	-0.19	0.19	0.02							
Ca ²⁺	0.55 **	-0.02	0.18	0.45 *	-0.23	0.56 **	0.34	0.18	0.06	0.42 *	0.02						
K ⁺	-0.27	0.27	-0.01	-0.06	-0.07	-0.26	-0.12	0.08	-0.21	-0.28	-0.26	-0.01					
Mg ²⁺	-0.03	-0.25	0.49 *	0.28	-0.29	0.36	0.12	0.22	-0.11	0.51 *	0.50 *	0.19	-0.20				
Na ⁺	0.41 *	-0.17	0.34	0.46 *	-0.08	0.51 *	0.17	0.22	-0.11	0.75 **	0.26	0.51 *	-0.34	0.56 **			
凋落物	0.54 **	0.12	0.07	0.54 **	-0.16	0.75 **	0.19	0.13	-0.16	0.59 **	-0.20	0.45 *	-0.15	-0.03	0.30		
地上生物量	0.28	0.23	-0.31	0.42 *	0.08	0.22	0.06	-0.07	-0.04	0.10	-0.36	0.12	0.25	-0.03	-0.06	0.32	
盖度	0.30	0.04	0.00	0.60 **	0.23	0.30	0.35	0.26	-0.16	0.62 **	-0.12	0.08	-0.06	0.28	0.26	0.47 *	0.38

1) * 和 ** 分别表示相关性显著性 ($P < 0.05$ 和 $P < 0.01$)



植物、盐基离子、氨氧化微生物、微生物生物量和细菌真菌组成是分别通过主成分分析得到的第一轴因子得分；标准化的总效应为氨氧化微生物、微生物生物量和细菌真菌组成分别受各因子直接和间接影响的总和；蓝实线表示显著正效应，红实线表示显著负效应，灰色虚线表示路径不显著

图6 基于结构方程模型的氮、磷添加对氨氧化微生物、细菌真菌组成和微生物量的直接和间接的影响

Fig. 6 Structural equation model (SEM) of the effects of N and P addition on soil ammonia-oxidizing microorganisms, soil bacterial and fungal composition and soil microbial biomass

3 讨论

3.1 氮、磷添加对土壤微生物特征的影响

本研究表明氮、磷添加协同提高土壤 AOB 的丰度,对 AOA 丰度的影响不显著,使得 AOA/AOB 的比值显著降低.这表明 AOA 和 AOB 对养分的输入具有不同的响应,其中 AOB 对养分输入的响应较敏感. Ying 等^[13]的研究同样表明, AOA 和 AOB 对氮添加具有不同的响应趋势,其中 AOB 随着无机氮添加量的提高而增加,这和本研究的结果一致.氮和磷是草地生态系统植物和微生物的主要限制因素,但由于其转化、利用及周转路径不同,土壤微生物对氮、磷添加的响应不同^[23].本研究结果显示,土壤氨氧化微生物对氮和磷添加具有不同的影响,其中氨氧化微生物对氮添加的响应敏感,而对磷添加响应不敏感,这表明氨氧化细菌主要受氮的限制.然而氮和磷同时添加显著提高 AOB 的数量,引起 AOA/AOB 显著降低,表明氮添加会引起微生物对磷的限制^[2,24],因此在氮磷同时添加处理下具有相对较高的 AOB 丰度,预示着氮输入及氮磷共同输入会促进土壤氮的转化.

本研究表明氮、磷及氮和磷同时添加对土壤细菌和真菌组成无显著影响,这和 Widdig 等^[25]的研究结果一致.然而在本研究中,氮、磷及氮和磷

同时添加均有增加细菌和真菌丰度的趋势,这与 Luo 等^[15]的研究结果一致,主要由于养分输入诱导的植被生物量的提高,增加了微生物生长繁殖所需的底物进而提高细菌和真菌的丰度.本研究发现与氮添加相比,磷添加具有相对较高的细菌和真菌丰度,这可能与细菌和真菌中的不同功能群的不同响应有关^[15]. Luo 等^[15]的研究表明磷添加对丛枝菌根真菌 (AFM) 影响不显著,而氮添加显著提高 AFM 的数量. Ling 等^[26]的研究表明磷添加主要通过提高土壤磷的有效性来影响细菌群落,而氮添加主要通过改变土壤酸碱度来影响细菌的群落. Wang 等^[27]的研究表明,土壤细菌和真菌对磷添加的响应不显著,而在氮添加处理下显著降低.因此氮和磷对土壤细菌和真菌组成具有不同的影响.本研究发现,氮、磷添加对盐渍化草地土壤微生物生物量碳、氮无显著影响.以往的研究显示,养分的输入对土壤微生物生物量具有促进作用^[28]、抑制作用^[6,27,29]或者无显著影响^[25,30].这表明,在盐碱化草地,土壤微生物生物量对养分的输入不敏感.

3.2 盐渍化草地土壤微生物特征的响应机制

土壤含水量对微生物的生长和繁殖具有重要调控作用,本研究发现现在生长季 5~9 月, AOB 丰度与土壤含水量的动态变化趋势一致,均在 7 月的降水

之后开始升高,表明较高的降水促进了土壤 AOB 的大量繁殖. 另一方面, 8 月植物的生长和生物量达到峰值,从土壤中获得养分的需求增加,同时植物的根系也迅速生长,增加的根系分泌物为土壤中的细菌提供了大量的可利用养分,因此参与土壤氮转化过程的 AOB 丰度增加. 本研究发现 8 月土壤的 AOB、AOA/AOB,以及土壤细菌与真菌的比值在不同养分添加处理下具有显著的差异,并且结构方程模型结果也显示植物因素对土壤微生物特征变异的贡献度较高,因此植物也是参与调控土壤微生物特征的重要因素. 另外,本研究发现盐渍化草地细菌、真菌和微生物的生物量对养分添加的响应不敏感,这与较高的草地土壤盐基离子含量有关. 有研究表明土壤微生物生物量随着盐渍化程度的提高而显著降低^[20,31],土壤微生物活性也随着土壤盐分的提高而下降^[20,21,31,32]. 较高的盐渍化往往伴随着较高的 pH 值,影响了土壤微生物的群落和组成^[21,33,34]. 本研究发现氮、磷单独添加对土壤 pH 的影响均不显著,只有氮和磷同时添加时显著降低 pH 值,这是在氮和磷共同添加情况下 AOB 显著提高的重要原因. 另一方面,养分的添加会引起土壤酸化^[35,36],而土壤中酸缓冲能力与土壤 pH 值有关^[37]. 而在盐渍化草地,较高土壤阳离子含量具有较强的酸缓冲能力^[38],因此调控着土壤 pH 对养分输入的响应,使得盐渍化草地土壤 pH 值对氮、磷添加的响应不显著. 并且本研究结果也发现氮、磷添加后土壤盐基阳离子含量并没有发生显著改变,说明氮、磷添加未减轻土壤微生物的盐或碱胁迫,使得草地土壤中细菌、真菌和微生物的生物量未发生显著改变.

4 结论

半干旱草地生态系统植物生长状况和土壤含水量调控土壤微生物特征的季节动态变化. 盐渍化草地土壤微生物对短期养分(氮、磷)添加的响应不敏感. 土壤盐基阳离子对土壤微生物无显著影响,进一步表明盐渍化草地土壤微生物经过长期适应对盐碱胁迫已经产生了一定的抗性. 然而这是否是由于土壤微生物自身的耐盐渍化使得土壤微生物对养分添加不敏感,还需要继续进行深入地研究. 氮和磷同时添加显著提高了 AOB 的丰度,表明盐渍化草地短期养分(氮、磷)添加能促进氮的周转.

致谢:感谢山西右玉黄土高原草地生态系统定位观测研究站研究人员和宏宇牧业有限公司工作人员在项目执行过程中给予的支持和帮助.

参考文献:

[1] Van Sundert K, Khan M A S A, Bharath S, *et al.* Fertilized

graminoids intensify negative drought effects on grassland productivity[J]. *Global Change Biology*, 2021, **27**(11): 2441-2457.

[2] Li Y, Niu S L, Yu G R. Aggravated phosphorus limitation on biomass production under increasing nitrogen loading: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(2): 934-943.

[3] Gruber N, Galloway J N. An earth-system perspective of the global nitrogen cycle[J]. *Nature*, 2008, **451**(7176): 293-296.

[4] Kanakidou M, Myriokefalitakis S, Daskalakis N, *et al.* Past, present, and future atmospheric nitrogen deposition[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, **73**(5): 2039-2047.

[5] Yuan Z Y, Chen H Y H. Negative effects of fertilization on plant nutrient resorption[J]. *Ecology*, 2015, **96**(2): 373-380.

[6] Zhou Z H, Wang C K, Zheng M H, *et al.* Patterns and mechanisms of responses by soil microbial communities to nitrogen addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **115**: 433-441.

[7] Wang C H, Butterbach-Bahl K, He N P, *et al.* Nitrogen addition and mowing affect microbial nitrogen transformations in a C4 grassland in northern China[J]. *European Journal of Soil Science*, 2015, **66**(3): 485-495.

[8] Hao T X, Zhang Y Y, Zhang J B, *et al.* Chronic nitrogen addition differentially affects gross nitrogen transformations in alpine and temperate grassland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **149**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107962.

[9] Kuypers M M M, Marchant H K, Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, **16**(5): 263-276.

[10] Kowalchuk G A, Stephen J R. Ammonia-oxidizing bacteria: a model for molecular microbial ecology[J]. *Annual Review of Microbiology*, 2001, **55**(1): 485-529.

[11] 贺纪正, 张丽梅. 氨氧化微生物生态学与氮循环研究进展[J]. *生态学报*, 2009, **29**(1): 406-415.

He J Z, Zhang L M. Advances in ammonia-oxidizing microorganisms and global nitrogen cycle[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(1): 406-415.

[12] He J Z, Hu H W, Zhang L M. Current insights into the autotrophic thaumarchaeal ammonia oxidation in acidic soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **55**: 146-154.

[13] Ying J Y, Li X X, Wang N N, *et al.* Contrasting effects of nitrogen forms and soil pH on ammonia oxidizing microorganisms and their responses to long-term nitrogen fertilization in a typical steppe ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **107**: 10-18.

[14] Sun H J, Lu H Y, Chu L, *et al.* Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH₃ volatilization in a coastal saline soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 820-825.

[15] Luo R Y, Kuzyakov Y, Liu D Y, *et al.* Nutrient addition reduces carbon sequestration in a Tibetan grassland soil: disentangling microbial and physical controls[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **144**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107764.

[16] Cui H Y, Sun W, Delgado-Baquerizo M, *et al.* The effects of mowing and multi-level N fertilization on soil bacterial and fungal communities in a semiarid grassland are year-dependent[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **151**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.108040.

[17] Li L H, Pu L J, Han M F, *et al.* Soil salinization research in

- China: advances and prospects [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, **24**(5): 943-960.
- [18] Fierer N, Jackson R B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**(3): 626-631.
- [19] Rath K M, Fierer N, Murphy D V, *et al.* Linking bacterial community composition to soil salinity along environmental gradients[J]. *The ISME Journal*, 2009, **13**(3): 836-846.
- [20] Rath K M, Rous J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: a review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **81**: 108-123.
- [21] Yang C, Wang X Z, Miao F H, *et al.* Assessing the effect of soil salinization on soil microbial respiration and diversities under incubation conditions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, **155**, doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103671.
- [22] Cheng Y, Wang J, Mary B, *et al.* Soil pH has contrasting effects on gross and net nitrogen mineralizations in adjacent forest and grassland soils in central Alberta, Canada[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **57**: 848-857.
- [23] Mori T, Lu X K, Aoyagi R, *et al.* Reconsidering the phosphorus limitation of soil microbial activity in tropical forests [J]. *Functional Ecology*, 2018, **32**(5): 1145-1154.
- [24] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, *et al.* Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. *Ecological Applications*, 2010, **20**(1): 5-15.
- [25] Widdig M, Schleuss P M, Biederman L A, *et al.* Microbial carbon use efficiency in grassland soils subjected to nitrogen and phosphorus additions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **146**, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107815.
- [26] Ling N, Chen D M, Guo H, *et al.* Differential responses of soil bacterial communities to long-term N and P inputs in a semi-arid steppe[J]. *Geoderma*, 2017, **292**: 25-33.
- [27] Wang Q K, Zhang W D, Sun T, *et al.* N and P fertilization reduced soil autotrophic and heterotrophic respiration in a young *Cunninghamia lanceolata* forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **232**: 66-73.
- [28] Feng J G, Zhu B. A global meta-analysis of soil respiration and its components in response to phosphorus addition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **135**: 38-47.
- [29] Wei L, Su J S, Jing G H, *et al.* Nitrogen addition decreased soil respiration and its components in a long-term fenced grassland on the Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Environments*, 2018, **152**: 37-44.
- [30] Guo H, Ye C L, Zhang H, *et al.* Long-term nitrogen & phosphorus additions reduce soil microbial respiration but increase its temperature sensitivity in a Tibetan alpine meadow [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **113**: 26-34.
- [31] Yuan B C, Li Z Z, Liu H, *et al.* Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, **35**(2): 319-328.
- [32] Yang J S, Zhan C, Li Y Z, *et al.* Effect of salinity on soil respiration in relation to dissolved organic carbon and microbial characteristics of a wetland in the Liaohe River estuary, Northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 946-953.
- [33] Zhao S, Liu J J, Banerjee S, *et al.* Soil pH is equally important as salinity in shaping bacterial communities in saline soils under halophytic vegetation[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-22788-7.
- [34] Rousk J, Bååth E, Brookes P C, *et al.* Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil [J]. *The ISME Journal*, 2010, **4**(10): 1340-1351.
- [35] Lucas R W, Klaminder J, Futter M N, *et al.* A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: implications for plants, soils, and streams[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, **262**(2): 95-104.
- [36] Cai J P, Luo W T, Liu H Y, *et al.* Precipitation-mediated responses of soil acid buffering capacity to long-term nitrogen addition in a semi-arid grassland[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **170**: 312-318.
- [37] Bowman W D, Cleveland C C, Halada L, *et al.* Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(11): 767-770.
- [38] 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.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)