

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

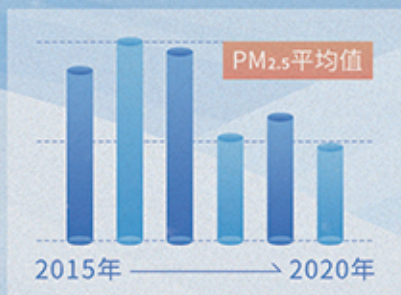
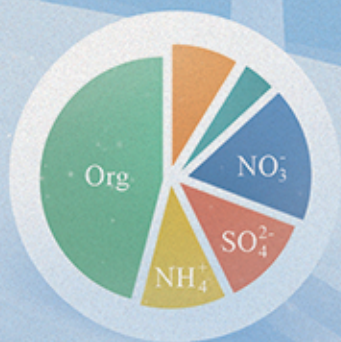
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响

冯军^{1,2}, 石超¹, Hafiz Athar Hussain^{1,3}, 刘永波⁴, 刘天朋², 李永洪², 刘俊峰², 王龙昌^{1*}

(1. 西南大学农学与生物科技学院, 南方山地农业教育部工程研究中心, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 四川省农业科学院水稻高粱研究所, 德阳 618000; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; 4. 泸定县农牧农村和科技局, 泸定 626100)

摘要: 为探讨沟垄集雨、秸秆覆盖和减量缓释肥集成技术对油菜土壤微生物群落结构的影响, 在大田定位试验条件下, 设置 3 种栽培方式 (秸秆覆盖、沟垄集雨、传统平作) 和 4 种施肥水平 (习惯施肥、缓释肥减量 20%、缓释肥减量 40%、不施肥), 比较分析 2016~2017 年 (多雨年份) 和 2017~2018 年 (季节性干旱年份) 这 2 种不同降水年型下油菜土壤微生物群落结构对集成技术的响应。结果表明, 不同降雨条件下, 秸秆覆盖 + 缓释肥减量 20% (J80) 与沟垄覆盖 + 缓释肥减量 20% (M80) 较习惯栽培 (PC) 更利于土壤微生物生长。在多雨年型和季节性干旱年型下, J80 与 M80 能平均分别提高微生物量碳 9.94% 和 10.32%; 提高土壤微生物量氮 2.38% 和 1.19%。多雨年型下, 土壤微生物磷酸脂脂肪酸 (PLFA) 总量较干旱年型降低 30.75%, 覆盖能有效提高土壤 PLFA 质量摩尔浓度。多雨年型下土壤细菌、真菌 PLFA 质量摩尔浓度较干旱年型平均减少 33.67% 和 53.21%; 而放线菌 PLFA 增加 13.04%。微生物群落对异常降水具有敏感响应。多雨气候会造成细菌/真菌升高; 干旱气候则会增加直链饱和脂肪酸/直链单不饱和脂肪酸及直链单不饱和脂肪酸/环丙烷脂肪酸。通过秸秆覆盖与缓释肥的集成技术, 能稳定异常降水下的土壤微环境, 缓解水分和养分胁迫, 为油菜稳产和可持续发展提供有效途径。

关键词: 降水; 油菜; 秸秆覆盖; 沟垄集雨; 缓释肥; 土壤微生物; 微生物磷酸脂脂肪酸 (PLFA)

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4322-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202111134

Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions

FENG Jun^{1,2}, SHI Chao¹, Hafiz Athar Hussain^{1,3}, LIU Yong-bo⁴, LIU Tian-peng², LI Yong-hong², LIU Jun-feng², WANG Long-chang^{1*}

(1. Engineering Research Center of South Upland Agriculture, Ministry of Education, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Rice and Sorghum Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Deyang 618000, China; 3. Key Laboratory of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. Luding Bureau of Agriculture, Animal Husbandry and Science & Technology, Luding 626100, China)

Abstract: In order to investigate the effects of furrow and ridge rainwater harvesting, straw mulching, and reduced and slow-release fertilizer on soil microbial community structure of rapeseed, a two-year field study was conducted in rainy (2016-2017) and drought (2017-2018) seasons, which included three cultivation patterns: ① conventional flat planting, ② straw mulching, and ③ ridge-furrow rainfall harvesting system and four fertilization patterns: ① conventional fertilization (100% of the amount), ② reduced slow-release fertilizer I (80% of the amount), ③ reduced slow-release fertilizer II (60% of the amount), and ④ no fertilizer. The results indicated that it was rainy in 2016-2017, with seasonal drought during the nutritional growth stage in 2017-2018. The two technologies (straw mulching + 80% slow-release fertilizer, J80 and ridge-furrow rainfall harvesting system + 80% slow-release fertilizer, M80) were beneficial to boost the soil microbial activity. J80 and M80 increased the microbial biomass carbon by 9.94% and 10.32% and microbial biomass nitrogen by 2.38% and 1.19%, respectively, compared with that of the local cultivation pattern under two different climate conditions. The total amount of microbial phospholipid fatty acid (PLFA) decreased by 30.75% in the rainy year compared with that in the drought year, and mulching technology could effectively increase the total amount of soil PLFA. The PLFA contents of soil bacteria and fungi in the rainy year were 33.67% and 53.21%, respectively, lower than those in the drought year. However, the PLFA content of actinomycetes increased by 13.04%. Microbial communities were sensitive to abnormal precipitation. The bacteria/fungi ratio increased in rainy weather. The drought climate heightened the ratio of straight chain saturated fatty acid/straight chain monounsaturated fatty acid and straight chain monounsaturated fatty acid/cyclopropane acid. In conclusion, adopting the optimal cultivation technologies can stabilize the soil microenvironment under abnormal precipitation, relieve water and nutrient stress, and provide an effective means for rapeseed sustainable development.

Key words: precipitate; rapeseed; straw mulching; ridge-furrow rainfall harvesting system; slow release fertilizer; soil microbial biomass; phospholipid fatty acid (PLFA)

2021 年 2 月, 第五届联合国环境大会发布的报告指出, 人类可持续发展亟需的是“同时解决气候、自然和污染三大危机”^[1,2]。全球气候骤变, 使我国西南地区油菜 (*Brassica napus* L.) 发展受到制约。季

收稿日期: 2021-11-13; 修订日期: 2021-12-25

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503127); 国家自然科学基金项目 (31271673, 31700364, 31871583)

作者简介: 冯军 (1982~), 女, 博士, 主要研究方向为土壤微生物, E-mail: 2565566364@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangle2003@163.com

节性干旱和涝害频发导致的降水异常,通过土壤水分和温度改变土壤微生物群落结构,进而影响土壤肥力,使作物生长受限^[3,4]. 微生物多样性作为表征土壤质量的敏感指标,对植物生长和土壤养分的平衡起着调节作用,同时还能反映农田和土壤环境变化,因此备受学者关注. 通过优化栽培措施改善土壤微环境成为提高作物抗逆性的有效途径^[5,6]. 有研究发现,秸秆覆盖能增加土壤耕层微生物碳氮,提高作物产量;地膜覆盖能够显著提高 0~30 cm 土层养分,微生物量碳,氮含量和物质间的转化速度;稻草覆盖能增加土壤细菌和放线菌等的数量,提高土壤酶活性,促进有机质分解,提高土壤肥力^[7~11]. 同时,新型肥料及施肥技术的应用,也有利于提高土壤微生物活性,增加肥料利用效率. 如缓释肥与菌剂配施能提高土壤微生物群落的 Shannon 多样性指数、Simpson 多样性指数和 McIntosh 均匀度;秸秆还田配施缓释肥有助于提高土壤养分有效性、作物产量及细菌真菌群落多样性,可以促进土壤碳氮循环;脲醛腐植酸缓释肥能增加土壤有机质,减缓土壤板结,改善土壤微生物环境等^[12~16].

目前,针对单一的节水或节肥技术对作物生长微环境的调控研究已较为深入^[17~19]. 不少学者提出通过集成策略应对当前全球生态环境变化^[20~22]. 但关于多因素融合的集成技术对油菜生长微环境的影响研究鲜见;将气象因子作为研究对象,针对大田异常气候下的土壤微环境对集成技术的响应更是少有报道. 本研究通过将覆盖与缓释肥技术集成,比较不同降水条件下,油菜土壤微生物碳氮及微生物群

落结构特征对集成技术的响应,以期为进一步深入机制研究和实现异常气候下西南旱地油菜可持续发展提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

于 2016~2018 年在重庆市云阳县宝坪镇(东经 108°54',北纬 30°55')实施大田定位试验. 试验地属典型丘陵山区立体气候. 年平均气温 18.7℃,年平均降雨量 900 mm,年日照 1 500 h 左右,无霜期 304 d. 供试土壤为旱地紫色壤黏土. 播前采用五点法测得 0~20 cm 土壤理化性状如下:2016~2017 年,土壤全效养分(N、P 和 K)分别为 0.90、0.34 和 21.70 g·kg⁻¹;速效养分(N、P 和 K)分别为 72.40、6.60 和 94.00 mg·kg⁻¹;pH 7.5. 2017~2018 年,土壤全效养分(N、P 和 K)分别为 0.83、0.34 和 23.50 g·kg⁻¹;速效养分(N、P 和 K)分别为 66.40、7.30 和 89.00 mg·kg⁻¹;pH 7.8.

1.2 试验设计

参试油菜为当地主推品种“三峡油 5 号”. 本试验采用二因素随机区组设计,将 3 种栽培措施与 4 种施肥水平组合构成 12 个处理,3 次重复,36 个小区. 栽培措施包括:秸秆覆盖(straw mulching, SM)、沟垄覆膜(ridge and furrow rainfall harvesting, RFRH)和传统平作(conventional planting, CP);施肥水平包括:习惯施肥,缓释肥减施 20%(减量施肥 I)、缓释肥减施 40%(减量施肥 II)和不施肥(CK). 不同处理的具体措施见表 1.

表 1 不同处理下油菜的水肥管理
Table 1 Planting patterns of rapeseed with different treatments

栽培模式	肥料类型	处理代码	施肥量 /kg·hm ⁻²		
			N	P	K
秸秆覆盖	常规肥	JC	225	63	72
	缓释肥	J80	180	50	58
	缓释肥	J60	135	38	43
	不施肥	CK1	0	0	0
沟垄覆膜(集雨)	常规肥	MC	225	63	72
	缓释肥	M80	180	50	58
	缓释肥	M60	135	38	43
	不施肥	CK2	0	0	0
传统平作	常规肥	PC	225	63	72
	缓释肥	P80	180	50	58
	缓释肥	P60	135	38	43
	不施肥	CK3	0	0	0

秸秆覆盖采用前茬晒干高粱秸秆(截成 20 cm)半量覆盖(3 750 kg·hm⁻²);沟垄集雨采用垄上覆膜(宽 60 cm、厚 0.008 mm)和沟内种植方式(图 1);常规肥采用尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含

P₂O₅ 12%)和氯化钾(含 K₂O 60%)配施,其中 50% 氮肥与全部磷钾肥作为基肥,50% 氮肥作为苔期表施追肥;油菜专用缓释肥(25-7-8,即含 N 25%、P₂O₅ 7% 和 K₂O 8%,缓释肥)由湖北恩施壮农业科

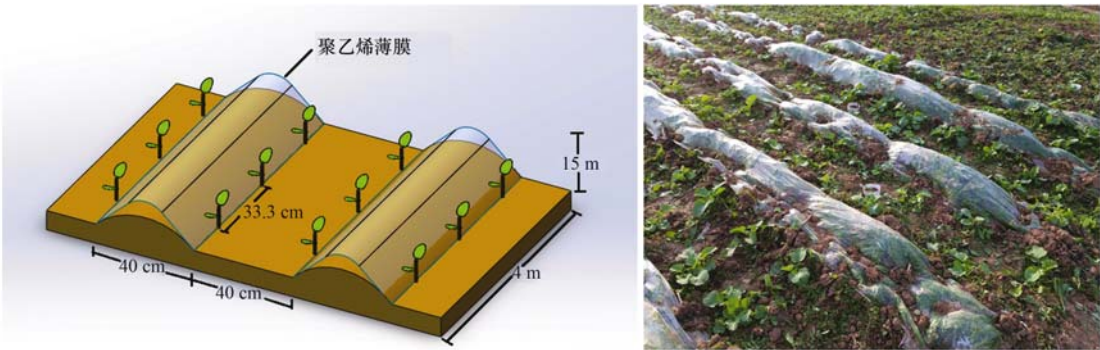


图1 沟垄集雨技术示意

Fig. 1 Sketch of the ridge-furrow rainfall harvesting technology

技有限公司提供,一次性基施. 每小区 16 m² (4 m × 4 m), 小区间开沟 30 cm 隔离. 播种和施肥采取点播穴施, 小区内行距 40 cm, 株距 33.3 cm, 一穴双株. 第 1 年于 2016 年 10 月 23 日播种, 2017 年 5 月 13 日收获; 第 2 年于 2017 年 10 月 20 日播种, 2018 年 5 月 10 日收获. 田间管理措施同常规.

1.3 试验区油菜生育期降水特征

本试验期油菜生长期的气象条件差异显著(表 2). 根据相关标准^[23], 以距平百分比评价降水. 2016~2017 年油菜生育期降水距平百分比高达

81.3%, 为异常偏多(≥80%); 而 2017~2018 生育期降水极为不均. 其中, 2017 年 11~12 月降水距平百分比为 -54.8%, 12 月高达 -83.9%, 为异常偏少(≤-80%), 而 2018 年 3 月, 降水距平百分比高达 140.8%. 且平均气温与标准差比值为 1.75, 为显著偏高(≥1.5). 总体而言, 2016~2017 年整个油菜生育期降水极丰沛, 苗期高温多雨; 2017~2018 年油菜生育期降水极不均, 营养生长阶段发生季节性干旱, 生殖生长期又值高温且降水显著偏多.

表 2 试验点油菜生育期月降水量分布

Table 2 Monthly total precipitation in rapeseed growth seasons at experiment site

气象因子	年份	10 月下旬	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月上旬	生育期总降水量
多年平均降水量/mm	1981~2010	23.4	42.3	14.3	10.7	20.4	34.3	93.5	50.7	300.3
试验期降水量/mm	2016~2017	47.1	94.1	21.5	21.2	38.3	62.1	164.5	80.9	550.9
	2017~2018	43.4	31.4	2.3	19.0	18.3	82.6	93.0	31.5	340.5

1.4 测定指标与方法

土壤微生物指标在油菜主要生育期(苗期、薹苔期、花期和成熟期)测定. 在试验田采用五点法取回土样混合过 2 mm 筛, 除去植物残渣, 置于 -80℃ 冰箱保存待测.

1.4.1 土壤微生物量碳氮和碱解氮测定

土壤微生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC) 采用氯仿蒸浸-重铬酸钾容量法-外加热法^[24], 称取新鲜土样 35 g, 在真空干燥器中用氯仿蒸气熏蒸 24 h 后, 反复抽真空除尽氯仿; 用 100 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液振荡浸提熏蒸样品 30 min, 同时浸提未熏蒸对照样品; 过滤, 用碳分析仪测定提取液中的有机碳含量.

土壤微生物量碳 (MBC, mg·kg⁻¹) 计算公式为:

MBC = EC/KEC (1)

式中, EC 为熏蒸与未熏蒸土壤提取液中有机碳的差值; KEC 为转换系数(0.38).

土壤微生物量氮 (microbial biomass nitrogen,

MBN) 取 20 mL 熏蒸后的土壤提取液于 250 mL 消化管中, 采用氯仿蒸浸-凯氏定氮法测定^[25]. 土壤微生物量氮 (MBN, mg·kg⁻¹) 计算公式为:

MBN = EN/KEN (2)

式中, EN 为熏蒸与未熏蒸土壤提取液中氮的差值; KEN 为转换系数(0.54).

土壤碱解氮采用碱扩散法, 将混合土样风干过 1 mm 筛后测定^[26].

1.4.2 土壤微生物多样性测定

土壤微生物多样性采用磷酸脂肪酸 (PLFA) 方法测定, 参照 Bligh-Dyer 修正方法^[27]. 土样采用氯仿-甲醇-柠檬酸作为缓冲溶液进行总脂类提取, 经硅胶柱层析分离及甲酯化得到的脂肪酸甲酯采用气相色谱仪 (美国 Agilent6850) 分析其成分. 以 C19:0 脂肪酸甲酯为内标, 采用峰面积和外标曲线法计算各组分的含量, 土壤微生物总量用微生物的 PLFA 含量之和表示, 单位为 nmol·g⁻¹. 其中细菌特征脂肪酸为 9:0、i10:0、12:0、14:0、i14:0、15:0、i15:0、

a15:0、16:0、i16:0、16:12OH 和 16:1 ω 5c 等; 真菌特征脂肪酸为 18:1 ω 9c、18:2 ω 6 和 18:3 ω 3 等; 放线菌特征脂肪酸为 10Me16:0、10Me17:0、10Me18:0 和 10Me19:0 等; 革兰氏阳性(G^+)细菌特征脂肪酸为 i15:0、a15:0、i16:0、i17:0 和 a17:0 等; 革兰氏阴性(G^-)细菌特征脂肪酸为 16:1 ω 5c、cy17:0 和 cy19:0 等; 直链单不饱和脂肪酸为 16:1 ω 5、16:1 ω 7c 和 16:1 ω 9c 等; 环丙烷脂肪酸为 cy17:0、cy19:0 和 cy19:0 ω 8c 等; 直链饱和脂肪酸为 9:0、10:0、11:0、12:0、13:0 和 14:0 等^[28].

1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2013 和 DPS 7.05 软件进行数据处理和方差分析, 采用 Duncan 新复极差法多重比较, Origin 9.0 绘图.

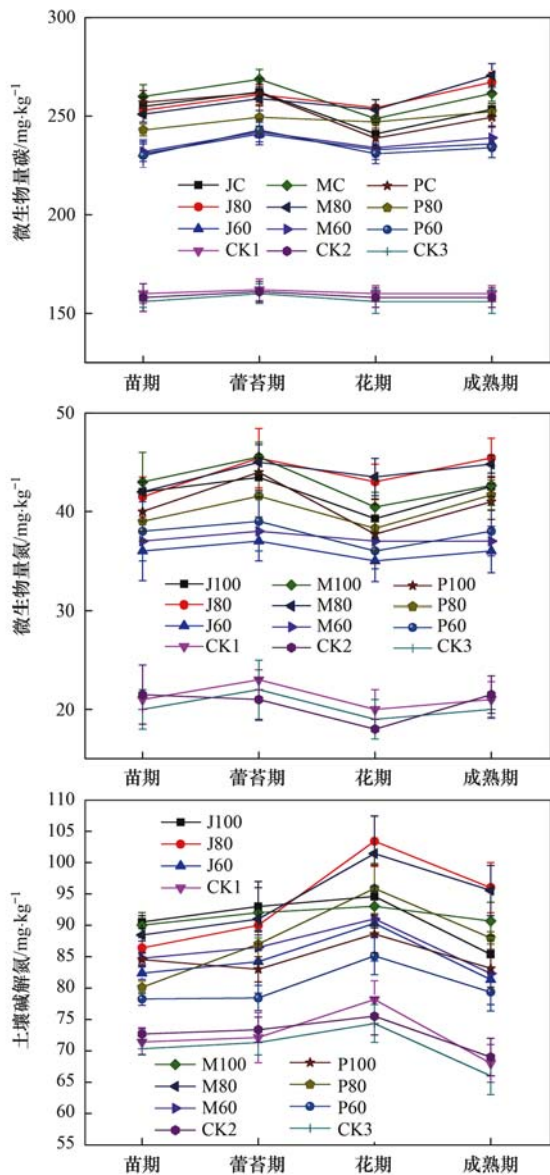


图2 2016~2017年不同处理土壤微生物量碳氮和碱解氮动态
Fig. 2 Dynamics of different treatments on soil microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, and available nitrogen from 2016 to 2017

2 结果与分析

2.1 覆盖与缓释肥减施对土壤微生物量碳氮及碱解氮的影响

由图2和图3可知, 施肥能显著影响土壤微生物量碳氮及土壤碱解氮($P < 0.05$), 同一施肥水平下, 栽培模式之间差异不显著. 2016~2017年, 土壤微生物量碳总体呈现从苗期到蕾苔期升高, 蕾苔期至花期降低, 成熟期又逐渐升高的趋势. 成熟期 J80 和 M80 土壤微生物量碳较 PC 分别增加 7.23% 和 8.03%. 微生物量氮变化趋势同微生物量碳. J80 和 M80 土壤微生物氮含量较 PC 分别增加 8.72% 和 6.31%. 不同处理土壤碱解氮在苗期差异不显著, 峰值出现在花期, 与追施氮肥有关. 减量 20% 的缓释

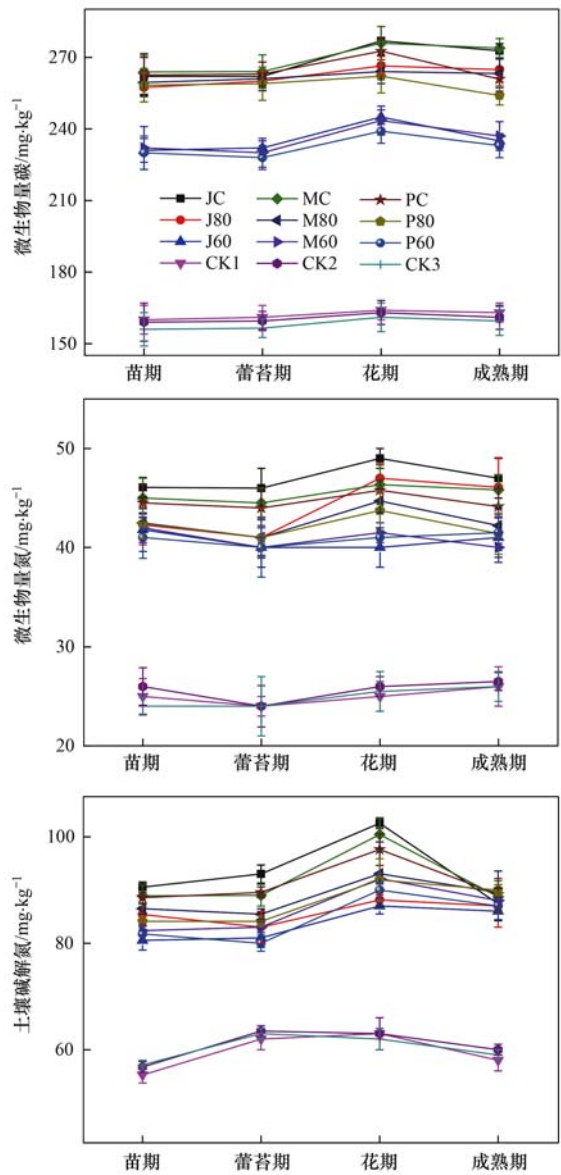


图3 2017~2018年不同处理土壤微生物量碳氮和碱解氮动态
Fig. 3 Dynamics of different treatments on soil microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, and available nitrogen from 2017 to 2018

肥处理优于其他处理。

2017~2018年,土壤微生物量碳苗期到蕾苔期无显著变化,花期逐渐升高至成熟期缓慢下降。除花期外,不同栽培模式间,缓释肥减量20%微生物量碳高于习惯施肥,但差异不显著。微生物量氮变化趋势与微生物量碳大致相同。不同的是,除成熟期秸秆覆盖处理外,习惯施肥与缓释肥减量20%处理的微生物量碳均差异显著($P < 0.05$)。土壤碱解氮变化趋势与微生物量氮一致,成熟期除CK外,各处理间差异不显著。2a土壤微生物量碳氮变化趋势不同可能是由于降水差异造成。降水通过对土壤微生物活性的调控进而影响土壤肥力。

2.2 覆盖与缓释肥减施对土壤微生物 PLFA 总量的影响

由图4可知,施肥能显著影响土壤微生物 PLFA 总量($P < 0.05$)。2a土壤微生物 PLFA 总量均表现为:习惯施肥 $\approx$ 减量施肥 I > 减量施肥 II > 不施肥,差异显著($P < 0.05$)。2016~2017年,微生物 PLFA 总量呈先增加后减少趋势,蕾苔期后,J80和M80的 PLFA 总量显著高于其它处理,至成熟期较PC分别增加20.51%和11.80%。2017~2018年,微生物 PLFA 总量从苗期至蕾苔期有减少趋势,花期后逐渐增高。2a变化趋势差异主要是由于降雨不同产生的。

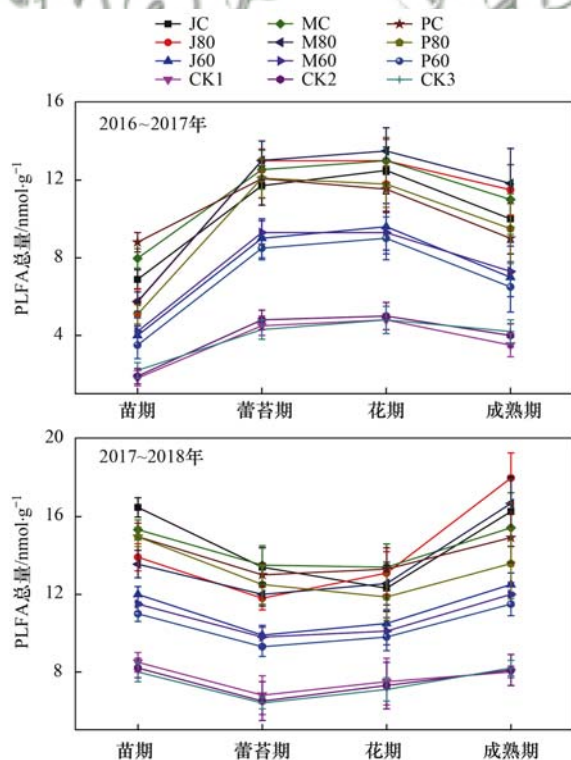


图4 不同处理对土壤微生物 PLFA 总量的影响

Fig. 4 Effects of different treatments
on soil total PLFA of microbial

2.3 覆盖与缓释肥减施对土壤微生物细菌、真菌和放线菌 PLFA 量影响

施肥能显著影响土壤微生物细菌、真菌和放线菌 PLFA 量($P < 0.05$)。2a同一栽培措施下,3种微生物 PLFA 量变化总体趋势为:习惯施肥 $\approx$ 减量施肥 I > 减量施肥 II > 不施肥,差异显著($P < 0.05$)。

由图5可知,2016~2017年,土壤细菌 PLFA 随生育期呈现先增加后减少趋势,峰值在花期,平均值为 $5.16 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。土壤真菌 PLFA 苗期后逐渐增加,峰值也在花期,平均值为 $0.41 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。土壤放线菌 PLFA 苗期极低,仅占其它各生育期平均总量的10.71%。苗期至蕾苔期迅速增加,至成熟期有下降趋势,峰值仍在花期,平均值为 $0.43 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

由图6可知,2017~2018年,土壤细菌 PLFA 随生育期呈现先减少后增加趋势,峰值出现在成熟期,平均值为 $6.86 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。土壤真菌 PLFA 变化趋势同细菌,峰值也在成熟期,平均值为 $1.08 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。土壤放线菌 PLFA 苗期、蕾苔期及花期均极低,仅占成熟期平均总量的10.14%。花期后迅速增加,峰值出现在成熟期,平均值 $0.69 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

总体而言,生育期不同降雨对土壤微生物 PLFA 量影响较大。3种菌类生育期变化趋势同 PLFA 总量,即多雨年型(2016~2017年)呈先增加后减少趋势,而季节性干旱年型(2017~2018年)呈先下降后增加趋势。

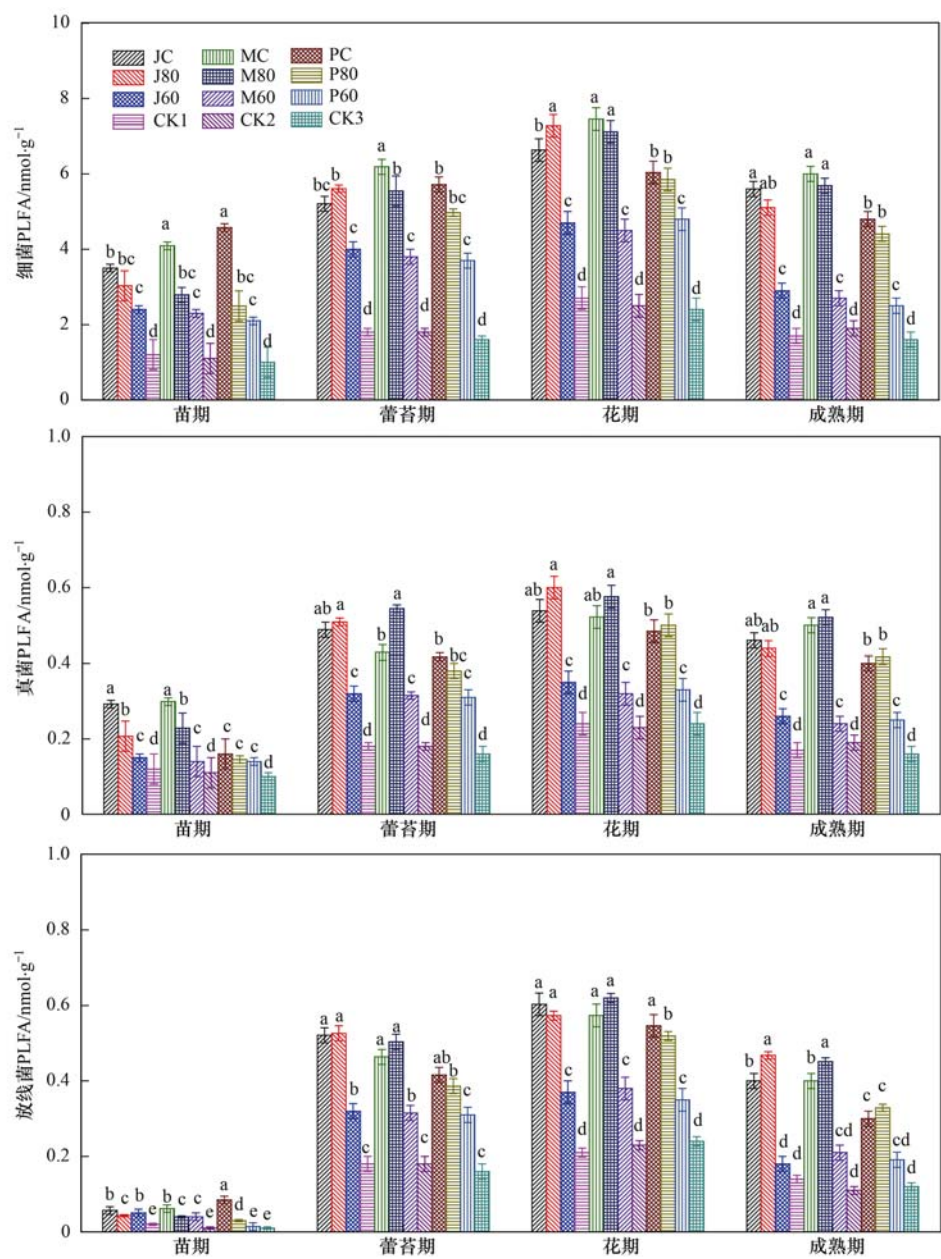
2.4 覆盖与缓释肥减施对油菜苗期与花期土壤微生物相对丰度的影响

由表3可知,2016~2017年苗期与花期,细菌/真菌、 G^+/G^- 和C/A变化不大,而A/B有升高趋势,花期较苗期A/B平均值增加了14.20%。说明多雨气候造成的土壤水分盈余虽未造成渍水危害,但养分流失的风险加大,这也是减量施肥 I 处理较习惯施肥细菌/真菌与 G^+/G^- 低,土壤微环境更稳定的原因。

2017~2018年同期,细菌/真菌、 G^+/G^- 与C/A变化也不大,而A/B有降低趋势,花期较苗期A/B平均值减少了14.97%。说明虽然生育前期季节性干旱不利于养分流通和微生物繁殖,但花期大量降雨补充了前期土壤水分亏缺,通过植物促进养分的吸收,减少了因水分缺乏而造成的土壤微环境养分胁迫风险。

3 讨论

随着全球极端气候频发,由异常降水引发的干旱和渍水等均能降低土壤微生物碳氮含量,对作物



不同小写字母表示在同一生育期下不同处理间的显著性差异 ($P < 0.05$), 下同

图5 2016 ~ 2017 年不同处理对土壤微生物 PLFA 细菌、真菌和放线菌的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on soil PLFA of bacteria, fungi, and actinomycetes from 2016 to 2017

正常生长造成胁迫^[29,30]. 同时为了减少环境污染, 从源头上遏制气候变化, 常采取一些有效的节水和节肥措施以应对农业环境问题. 如通过不同覆盖方式、以新型肥料替代传统化肥, 可以增强土壤微生物活性, 提高肥料利用效率^[31,32]. 有研究认为, 适宜的覆盖和施肥措施能有效提高土壤微生物量碳氮量, 改善土壤微环境, 从而有利于作物高产^[33~35]. 这与本研究的结果一致. 值得一提的是, 由于缺乏不同环境下的对比研究, 单一的水肥管理技术在应对多变的生态环境问题时, 显现出一定的局限性. 如旱地秸秆覆盖可能会因为低温多雨等环境因素造成作物减产, 不同缓释肥配方对环境因素有不同要求进而也可能造成作物产量降低等^[36,37]. 本研究通过异

常降水下, 覆盖 + 缓释肥的集成技术与单一的栽培或施肥措施对土壤微环境的干预作用的对比, 进一步验证了集成技术在应对不良气候方面的优势. 本研究表明, 覆盖 + 缓释肥的集成技术 (如 J80 和 M80) 较习惯栽培 (PC) 在多雨年型 (2016 ~ 2017 年) 和干旱年型 (2017 ~ 2018 年) 平均分别提高微生物量碳 9.94% 和 10.32%; 提高土壤微生物量氮 2.38% 和 1.19%. 而单一的缓释肥减施技术 (P80) 较习惯栽培在多雨与干旱年型对微生物量碳氮无显著影响; 单一的覆盖技术 (JC 和 MC) 较习惯栽培在多雨与干旱年型仅能平均分别提高微生物量碳 1.62% 和 1.27%, 提高土壤微生物量氮 1.07% 和 0.89%. 作为土壤养分重要指标的碱解氮与土壤微

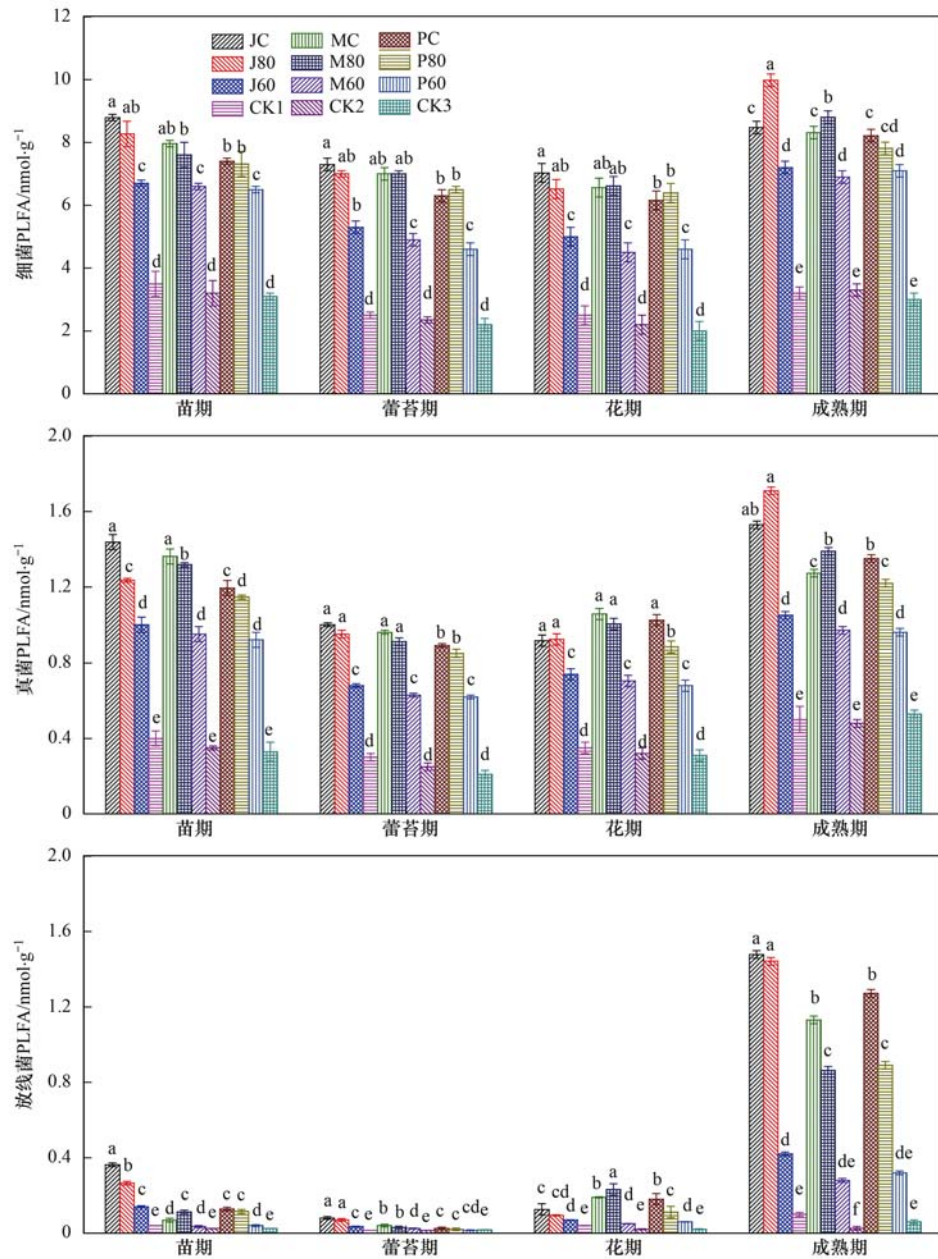


图6 2017~2018年不同处理对土壤微生物 PLFA 细菌、真菌和放线菌的影响

Fig. 6 Effects of different treatments on soil PLFA of bacteria, fungi, and actinomyces from 2017 to 2018

生物量碳氮息息相关.持续大量降水加快激活微生物活性,使土壤碱解氮加速释放,加大土壤速效养分淋溶风险;而干旱使土壤微生物碳氮比提高,则抑制了微生物活性,有机质分解速度和碱解氮释放变缓,亦不利于作物生长营养吸收^[38].由此可见,微生物量碳氮与土壤肥力的紧密关系显示出集成技术更利于在不良环境下维持土壤微生物结构和土壤养分的稳定性.同时还应注意,土壤微生物量氮相对碳,对降水量的减少更为敏感.随着降水量减少程度的加剧,土壤微生物量碳氮比会进一步加大,这也是本试验干旱年型下,20%缓释肥减量处理较习惯施肥差异更显著的原因^[39].

刘肖等^[40]的研究发现,与不覆盖的传统栽培方

式相比,秸秆覆盖能够通过显著提高表层微生物残体碳及其对土壤有机碳的贡献,进而有利于对整个耕层土壤有机碳的固持.张万锋等^[41]的研究认为,秸秆覆盖与氮减施可缓解氮素淋溶损失,能改善灌区农田生态环境和提高作物产量.刘岳飞等^[42]的研究认为,通过地膜覆盖使具有促生功能的细菌易于积聚,从而提高土壤肥力和保持土壤健康.本研究得出类似结果.降水差异是造成土壤微生物变化趋势不同的主要原因之一.多雨年型下,氮素释放速度加快,使土壤微生物在油菜生育前期开始活跃;随着普通氮素的加速淋溶和多雨造成的土壤透气性减弱,微生物活性逐渐降低,直至生育后期受氮素沉降积累等因素影响,使土壤微生物量略有上升趋势;

表 3 不同处理对土壤微生物各类群 PLFA 比值的影响¹⁾

Table 3 Effects of different treatments on PLFA ratio between soil microbial species

年份	处理	苗期				花期			
		细菌/真菌	G ⁺ /G ⁻	C/A	A/B	细菌/真菌	G ⁺ /G ⁻	C/A	A/B
2016 ~ 2017	JC	12.12	1.24	2.16	1.85	15.13	1.14	2.19	1.97
	J80	11.62	0.63	2.17	1.56	13.21	1.04	2.08	1.41
	J60	16.00	1.15	2.21	1.78	13.43	1.35	2.45	2.15
	CK1	17.30	1.23	2.23	1.92	14.25	1.41	2.67	2.47
	MC	13.69	1.09	1.93	1.57	13.54	1.23	2.23	1.69
	M80	12.20	0.41	1.21	1.41	12.53	1.09	2.04	1.24
	M60	16.43	1.01	2.03	1.69	14.06	1.23	2.37	2.23
	CK2	17.70	1.33	2.17	1.74	15.87	1.56	2.41	2.51
	PC	14.15	1.43	2.30	1.57	14.41	1.22	2.06	1.88
	P80	13.03	0.93	1.51	1.41	13.06	1.03	1.55	1.04
	P60	15.00	1.15	2.41	1.85	14.55	1.47	2.17	2.19
2017 ~ 2018	CK3	16.80	1.21	2.27	1.99	15.47	1.51	2.20	2.38
	JC	6.46	1.26	2.09	1.60	7.38	1.35	2.15	1.74
	J80	6.03	1.26	2.02	1.74	7.07	1.28	1.91	1.56
	J60	6.70	1.35	2.33	1.89	7.76	1.41	2.25	1.84
	CK1	8.75	1.47	2.54	2.01	7.14	1.45	2.35	1.92
	MC	6.57	1.26	2.14	1.27	6.05	1.14	2.46	1.53
	M80	5.01	0.92	2.10	1.77	6.05	1.12	1.82	1.16
	M60	6.95	1.38	2.45	1.97	6.38	1.37	2.48	1.77
	CK2	9.14	1.41	2.41	2.13	6.88	1.42	2.63	1.83
	PC	5.00	1.07	2.31	1.79	6.37	1.14	2.54	1.39
	P80	7.07	1.08	1.99	1.89	6.49	1.14	1.54	0.86
	P60	7.07	1.45	2.56	2.16	6.76	1.39	2.65	1.65
	CK3	9.39	1.38	2.61	2.23	6.85	1.41	2.76	1.89

1) G⁺ 为革兰氏阳性细菌, G⁻ 为革兰氏阴性细菌, A 为直链单不饱和脂肪酸, B 为环丙烷脂肪酸, C 为直链饱和脂肪酸

干旱年型下,生育前期受土壤水分限制,使微生物活性受到抑制,随着大量降雨对土壤水分的补充,激发了土壤微生物活性,使微生物量在生育后期逐渐升高. 同样,不同降水会影响土壤微生物结构. 多雨年型下,油菜生育期土壤 PLFA 质量摩尔浓度平均值约为 8.03 nmol·g⁻¹,较干旱年型降低 30.75%,这是由于持续大量降水,加快土壤物质循环和阳离子的淋溶,使土壤 pH 值降低. 土壤 pH 值在土壤微生物量和土壤碳周转方面有重要作用,较低的 pH 值能抑制微生物活性,降低土壤有机碳库分解,使土壤 PLFA 总量降低^[43,44]. 季节性干旱会因为土壤缺乏足够的水分,限制了物质交换从而不利于土壤微生物繁殖,而覆盖措施能有效缓解土壤缺水问题. 这也是在干旱年型同一施肥水平下,秸秆覆盖(SM)土壤微生物 PLFA 质量摩尔浓度显著高于沟垄覆膜和平作的原因. 同时,多雨年型下土壤细菌、真菌 PLFA 质量摩尔浓度较干旱年型平均减少 33.67% 和 53.21%,而放线菌 PLFA 质量摩尔浓度增加 13.04%,这可能与不同菌类对土壤水分的敏感性差异有关^[45].

土壤中的特殊微生物类群,可作为指示生物来表征土壤中各微生物群落的相对丰度、微生物量的变化以及土壤微生态系统的稳定性^[46]. 本研究 2 a

土壤微生物 PLFA 比较发现,油菜苗期多雨年型下,细菌/真菌是干旱年型下平均值的 1.28 倍. 多雨气候造成的土壤通气性降低,进一步减少了土壤细菌和真菌含量,可见连续性多雨气候对生育前期土壤微环境的影响远远高于短时间的季节性干旱. 而表征环境胁迫的 C/A 与养分胁迫的 A/B,干旱年型较多雨年型分别增加了 11.71% 和 10.65%,说明干旱环境不利于土壤养分流通及作物对养分的吸收. 花期多雨年型较干旱年型细菌/真菌平均值仍高出 1.11 倍,说明季节性的气候异常引起的土壤微环境变化具有延续效应. 一方面,生育期大量降雨造成的植株根系发育异常,难以得到缓解,同时养分的淋溶损失也无法补充,此过程难以逆转;另一方面,季节性干旱造成的土壤水分缺失和养分流通障碍会随着降雨后土壤水分得到补充而缓解,有一定的可逆性.

通过微生物多样性比值分析不难发现,多雨气候下秸秆覆盖的效果不及干旱年型,原因是多雨下的秸秆覆盖将进一步减少土壤通透性,不利于微生物繁殖;而干旱下秸秆覆盖的保水效果优于沟垄覆膜,更利于微生物生长. 这是由于地膜的增温效果在干旱条件下更容易使土壤矿化,不利于土壤微生物生长,这也是部分研究认为的秸秆覆盖优于地膜的原因^[47]. 同时,还应当注意,虽然缓释肥较传统化肥

具有一定优势,且在一定条件下减量后肥效不会显著降低,但并不意味着随意更改用量都能获得“减量增效”的结果.如本研究中缓释肥减量 40% 后,即使与覆盖技术集成,因无法为油菜生长提供充足的营养,所以整体上表现较差.再如,本研究中,在干旱年型下,缓释肥的优势并不如在多雨年型下表现明显,甚至在土壤水分亏缺时还有肥效释放障碍.因此有学者提到,中国油菜生产缺少具有应对复杂环境的集成技术体系,使分散的广大农户无以借鉴.所以,集成技术的研发并不是单一技术的简单相加,对于不同技术间的叠加效应、技术与环境间的耦合效益以及相关的调控机制,都需要在将来的研究中进一步探索.

4 结论

(1)不同降水条件下,覆盖与施肥措施均能影响油菜土壤微环境.多雨年型下,微生物 PLFA 质量摩尔浓度呈先增加后减少趋势;季节性干旱年型下,微生物 PLFA 总量呈先减少后增加趋势.施肥能显著增加土壤细菌、真菌和放线菌 PLFA.除放线菌外,季节性干旱年型下的土壤细菌和真菌质量摩尔浓度均高于多雨年型.

(2)表征养分胁迫的直链单不饱和脂肪酸/环丙烷脂肪酸(A/B)反映了多雨年型下的养分流失风险;表征土壤微环境稳定性的细菌/真菌与革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌(G^+/G^-)反映了缓释肥减量 20% 较习惯施肥更利于维持土壤养分稳定.同时,覆盖措施有利于缓解干旱年型下的土壤养分胁迫.

(3)西南旱地油菜生产采用覆盖+缓释肥减量 20% 的集成技术(J80 和 M80),能增加土壤微生物量碳氮,有利于维持土壤微生物结构的稳定性,并有效缓解异常气候对土壤微环境的不利影响.

参考文献:

- [1] Baste I A, Watson R T, Brauman K A, *et al.* Making Peace with Nature: a scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies[R]. Beijing: UNEP, 2021.
- [2] Vann M, Bodenmann P, Senn N, *et al.* Climate migration and inequities: a major global health issue[J]. *Revue Médicale Suisse*, 2021, **17**(724): 263-267.
- [3] Pachauri R K, Meyer L A. Climate change 2014: Synthesis report, environmental policy collection[M]. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [4] 许迪,李益农,龚时宏,等.气候变化对农业水管理的影响及应对策略研究[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(14): 79-89. Xu D, Li Y N, Gong S H, *et al.* Impacts of climate change on agricultural water management and its coping strategies[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(14): 79-89.
- [5] 王昆昆,刘秋霞,朱芸,等.稻草覆盖还田对直播冬油菜生长及养分积累的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, **25**(6): 1047-1055.
- [6] Wang K K, Liu Q X, Zhu Y, *et al.* Effects of straw mulching on growth and nutrients accumulation of direct-sown winter oilseed rape[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, **25**(6): 1047-1055.
- [7] 石将来,郝庆菊,冯迪,等.地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4790-4799.
- [8] Shi J L, Hao Q J, Feng D, *et al.* Effects of Plastic film mulching on methane and nitrous oxide emissions from a rice-rape seed crop rotation[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4790-4799.
- [9] 隋鑫,霍海南,鲍雪莲,等.覆盖作物的种植现状及其对下茬作物生长和土壤环境影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(8): 2666-2674.
- [10] Sui X, Huo H N, Bao X L, *et al.* Research advances on cover crop plantation and its effects on subsequent crop and soil environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(8): 2666-2674.
- [11] 陈姝彤,李大鹏,徐楚天,等.覆盖条件下底泥微环境对源磷释放的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2848-2855.
- [12] Chen S T, Li D P, Xu C T, *et al.* Effects of sediment microenvironment on sedimentary phosphorus release under capping[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2848-2855.
- [13] 熊维霞,江长胜,赵仲婧,等.地膜覆盖对菜地垄沟 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1559-1568.
- [14] Xiong W X, Jiang C S, Zhao Z J, *et al.* Effect of plastic film mulching on methane and nitrous oxide emissions from the ridges and furrows of a vegetable field[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1559-1568.
- [15] 张旭,陈书涛,陈桂发,等.模拟酸雨及秸秆添加对农田土壤微生物呼吸及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(4): 823-832.
- [16] Zhang X, Chen S T, Chen G F, *et al.* Effects of simulated acid rain and straw amendment on microbial respiration and enzyme activities of farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(4): 823-832.
- [17] Chen Q Y, Liu Z J, Zhou J B, *et al.* Long-term straw mulching with nitrogen fertilization increases nutrient and microbial determinants of soil quality in a maize-wheat rotation on China's Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **775**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145930.
- [18] Ding Y Q, Jin Y L, He K Z, *et al.* Low Nitrogen fertilization alter rhizosphere microorganism community and improve sweetpotato yield in a nitrogen-deficient rocky soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, **678**, doi: 10.3389/fmicb.2020.00678.
- [19] 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,等.长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2852-2860.
- [20] Ning Y F, Wei L, Wei X M, *et al.* Response of extracellular enzyme activities to substrate availability in paddy soil with long-term fertilizer management[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2852-2860.
- [21] 夏文建,柳开楼,张丽芳,等.长期施肥对红壤稻田土壤微生物量和酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2021, **58**(3): 628-637.
- [22] Xia W J, Liu K L, Zhang L F, *et al.* Effect of long-term fertilization on soil microbial biomass and enzyme activities in reddish paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, **58**(3): 628-637.

- [15] Bah H, Zhou M H, Ren X, *et al.* Effects of organic amendment applications on nitrogen and phosphorus losses from sloping cropland in the upper Yangtze River [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, **302**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107086.
- [16] 刘灵芝, 马诗涵, 李秀玲, 等. 长期施肥对土壤氨氧化微生物的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(5): 1459-1466.
Liu L Z, Ma S H, Li X L, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil ammonia-oxidizing microorganisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(5): 1459-1466.
- [17] 廖佳元, 宋海星, 赵东生, 等. 油菜不同生长期稻田土壤无机氮形态及氮肥利用率对控释氮肥施用的响应[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(1): 158-164.
Liao J Y, Song H X, Zhao D S, *et al.* Effects of controlled release nitrogen fertilizers on soil inorganic nitrogen forms nitrogen fertilization efficiency at different growth stages of rape [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(1): 158-164.
- [18] 冯军, 石超, 门胜男, 等. 不同降雨下旱地油菜节水节肥技术对土壤养分及酶活性的调控效应[J]. *草业学报*, 2020, **29**(4): 51-62.
Feng J, Shi C, Men S N, *et al.* Effects of water and fertilizer saving techniques on soil nutrient levels and enzyme activities under two different seasons with contrasting rainfall patterns[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, **29**(4): 51-62.
- [19] 李亚朋. 不同新型缓控释肥减氮施用对玉米增产增效作用研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [20] 俞书傲. 气候变化对农作物生产的影响——以浙江为例的实证研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [21] 孙蕊, 董心亮, 赵长龙, 等. 气候×基因型×水分管理对河北平原冬小麦产量和 WUE 的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2020, **28**(2): 200-210.
Sun R, Dong X L, Zhao C L, *et al.* Effect of climate, genotype, and water management on winter wheat yield and water use efficiency in Hebei plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, **28**(2): 200-210.
- [22] 汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 等. 农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, **37**(3): 340-352.
Wang Y, Yang D L, Wang L L, *et al.* Effects of farmland management measures on soil organic carbon turnover and microorganisms [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, **37**(3): 340-352.
- [23] 中国气象局国家气候中心. 全国气候影响评价: 2012[M]. 北京: 气象出版社, 2013.
- [24] 袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 等. 固碳微生物分子生态学研究[J]. *中国农业科学*, 2011, **44**(14): 2951-2958.
Yuan H Z, Qin H L, Liu S L, *et al.* Advances in research of molecular ecology of carbon fixation microorganism[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44**(14): 2951-2958.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] 李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 等. 三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2898-2907.
Li L J, Li C X, Chen C H, *et al.* Root activities of re-vegetated plant species regulate soil nutrients and bacterial diversity in the riparian zone of the three gorges reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2898-2907.
- [27] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method of total lipid extraction and purification [J]. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 1959, **37**(8): 911-917.
- [28] 李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 等. 缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 309-317.
Li N J, Zeng Q P, He B H, *et al.* Seasonal variations of soil microbial PLFAs and soil enzyme activity under the citrus plantation in Mt. Jinyun, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 309-317.
- [29] Zhou Z H, Wang C K, Luo Y Q. Meta-analysis of the impacts of global change factors on soil microbial diversity and functionality [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1), doi: 10.1038/s41467-020-16881-7.
- [30] 林婉奇, 薛立. 基于 BIOLOG 技术分析氮沉降和降水对土壤微生物功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(12): 4188-4197.
Lin W Q, Xue L. Analysis of effects of nitrogen deposition and precipitation on soil microbial function diversity based on BIOLOG technique[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(12): 4188-4197.
- [31] 杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 等. 解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4711-4718.
Yang Y H, Xue L X, Sun B, *et al.* *Bacillus amyloliquefaciens* biofertilizer mitigating soil ammonia volatilization [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4711-4718.
- [32] 刘子涵, 黄方园, 黎景来, 等. 覆盖模式对旱作农田土壤微生物多样性及群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2021, **41**(7): 2750-2760.
Liu Z H, Huang F Y, Li J L, *et al.* Effects of farmland mulching patterns on soil microbial diversity and community structure in Dryland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(7): 2750-2760.
- [33] 李万星, 李丹, 靳鲲鹏, 等. 晋东南旱作区玉米秸秆不同覆盖方式下土壤微生物多样性变化[J]. *北方农业学报*, 2019, **47**(4): 40-46.
Li W X, Li D, Jin K P, *et al.* Changes of soil microbial diversity based on different mulching methods of corn stalk in the dry farming area in Southeast Shanxi Province [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2019, **47**(4): 40-46.
- [34] 李光宇, 吴次芳. 土壤微生物研究在农田质量评价中的应用[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(3): 543-556.
Li G Y, Wu C F. Application of soil microbial studies to farmland quality evaluation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(3): 543-556.
- [35] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 等. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤 C、N、P 和 K 化学计量特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 394-402.
Du Y N, Li T Y, He B H, *et al.* Stoichiometric characteristics of purple sloping cropland under long-term fertilization and cultivation [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 394-402.
- [36] 李蓉蓉. 旱作农田土壤碳、氮对秸秆和地膜覆盖方式的响应[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- [37] 谷晓博, 李援农, 黄鹏, 等. 种植方式和施氮量对冬油菜产量与水氮利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(10): 113-123.
Gu X B, Li Y N, Huang P, *et al.* Effects of planting patterns and nitrogen application rates on yield, water and nitrogen use efficiencies of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(10): 113-123.
- [38] 王岩, 刁华杰, 董宽虎, 等. 降水变化与氮添加对晋北盐碱化草地土壤净氮矿化的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**

- (7): 2389-2396.
- Wang Y, Diao H J, Dong K H, *et al.* Effects of precipitation change and nitrogen addition on soil net N mineralization in a saline-alkaline grassland of Northern Shanxi Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(7): 2389-2396.
- [39] 罗玉坤. 降雨变化对内蒙古半干旱草地土壤活性氮库及净氮矿化的影响[D]. 太原: 山西农业大学, 2016.
- [40] 刘肖, 胡国庆, 何红波, 等. 连年秸秆覆盖对玉米产量及土壤微生物残体碳积累的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(12): 117-122.
- Liu X, Hu G Q, He H B, *et al.* Effects of long-term maize stovers mulching on maize yield and microbial necromass carbon accumulation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(12): 117-122.
- [41] 张万锋, 杨树青, 孙多强, 等. 秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 786-795.
- Zhang W F, Yang S Q, Sun D Q, *et al.* Effects of straw mulching and nitrogen reduction on the distribution of soil nitrogen and groundwater nitrogen pollution [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 786-795.
- [42] 刘岳飞, 吴人敏, 张传进, 等. 地膜对植椒土壤生物学特性和细菌多样性的影响[J]. *土壤学报*, 2019, **56**(4): 986-993.
- Liu Y F, Wu R M, Zhang C J, *et al.* Effects of film mulching on soil biological properties and bacterial diversity in pepper fields [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(4): 986-993.
- [43] Du Y, Han Y Y, Wang Y F, *et al.* Plant functional groups regulate soil respiration responses to nitrogen addition and mowing over a decade [J]. *Functional Ecology*, 2018, **32**(4): 1117-1127.
- [44] 刘春华, 吴东梅, 刘雨晖, 等. 氮沉降对米楮天然林土壤有机碳及微生物群落结构的影响[J]. *林业科学研究*, 2021, **34**(2): 42-49.
- Liu C H, Wu D M, Liu Y H, *et al.* Effects of nitrogen deposition on soil organic carbon and soil microbial communities in a natural *castanopsis carlesii* forest [J]. *Forest Research*, 2021, **34**(2): 42-49.
- [45] Wang J W, Zhang G Y, Yu C Q. A Meta-analysis of the effects of organic and inorganic fertilizers on the soil microbial community [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2020, **11**(3): 298-303.
- [46] 符鲜, 杨树青, 刘德平, 等. 不同盐渍化土壤中微生物对氮肥的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, **24**(3): 661-667.
- Fu X, Yang S Q, Liu D P, *et al.* Responses of soil microbes to N fertilizers in two saline soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, **24**(3): 661-667.
- [47] 张少宏, 付鑫, Ihsan M, 等. 秸秆和地膜覆盖对黄土高原旱作小麦田土壤团聚体氮组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, **34**(1): 236-241, 248.
- Zhang S H, Fu X, Ihsan M, *et al.* Effects of straw and plastic film mulching on nitrogen composition of soil aggregates in dryland wheat field on the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, **34**(1): 236-241, 248.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shay County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)