

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘昊霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 凌超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评估及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响

鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要: 为探究轮作休耕对丛枝菌根真菌 (AMF) 群落组成及土壤团聚体稳定性的影响, 以坡耕地红壤为研究对象, 采用 Illumina MiSeq 高通量测序和湿筛法分别测定 AMF 群落组成和团聚体, 研究了苕子轮作玉米 (V-C)、豌豆轮作玉米 (P-C)、冬闲-玉米 (F-C) 和周年休耕 (F-F) 这 4 个处理下 AMF 群落组成及其与土壤养分和团聚体稳定性之间的关系. 结果表明, F-F、V-C 和 P-C 处理的 >2 mm 团聚体含量、 $R_{0.25}$ 及 MWD 均显著高于 F-C ($P < 0.05$), <0.25 mm 团聚体含量均显著低于 F-C ($P < 0.05$); F-F 处理的 ACE、Chao1 和 Shannon 指数较 F-C 分别显著提高 29.56%、35.78% 和 45.55%; 球囊霉属 (*Glomus*) 为各处理 AMF 群落的优势属, 盾巨孢囊霉属 (*Scutellospora*) 在各处理间差异显著 ($P < 0.05$); PCoA 分析发现, PC1 和 PC2 分别累计解释了 AMF 群落组成差异的 29.99% 和 22.40%; 相关性分析表明, 盾巨孢囊霉属与碱解氮 (AN) 和有机质 (SOM) 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与速效钾 (AK) 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 球囊霉属与碱解氮呈显著正相关 ($P < 0.05$); RDA 分析表明, AMF 多样性 (Shannon 指数) 和盾巨孢囊霉属分别与 >2 mm 和 $2 \sim 1$ mm 团聚体含量显著正相关 ($P < 0.05$). 因此, 周年休耕和苕子轮作玉米有利于提高土壤团聚体稳定性和改变 AMF 群落组成, 研究结果为我国南方周年轮作系统提高土壤质量和推行合理轮作休耕模式提供理论依据和参考.

关键词: 轮作; 休耕; 绿肥; 土壤团聚体; 丛枝菌根真菌 (AMF); 多样性; 高通量测序

中图分类号: X144; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-5154-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202210035

Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability

LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, ZHAO Ji-xia, LI Yong-mei, WANG Zi-lin, FAN Mao-pan*

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: To investigate the effects of crop rotation and fallow on the community composition of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and the stability of soil aggregates, AMF community and aggregates were measured using Illumina MiSeq high-throughput sequencing and wet screening methods in red soil of sloping farmland. The AMF community and its relationship with soil factors and aggregate stability were studied under the four treatments of vetch rotation corn (V-C), pea rotation corn (P-C), winter fallow corn (F-C), and annual fallow (F-F). The results showed that the aggregate content of >2 mm, $R_{0.25}$, and MWD in the F-F, V-C, and P-C treatments were significantly higher than those in F-C ($P < 0.05$), and the aggregate content of <0.25 mm was significantly lower than that of F-C ($P < 0.05$). The ACE, Chao1, and Shannon indexes of the F-F treatment were 29.56%, 35.78%, and 45.55% higher than those of the F-C treatment, respectively. *Glomus* was the dominant genus of AMF communities under all treatments, whereas *Scutellospora* showed a significant difference among the treatments ($P < 0.05$). PCoA analysis showed that PC1 and PC2 together explained 29.99% and 22.40% of the difference in the AMF community composition, respectively. The correlation analysis showed that there was a significant negative correlation between *Scutellospora* and alkaline nitrogen (AN) and organic matter (SOM) ($P < 0.05$), a significant positive correlation between *Scutellospora* and available potassium (AK) ($P < 0.05$), and a significant positive correlation between *Glomus* and alkaline nitrogen ($P < 0.05$). RDA analysis showed that AMF diversity (Shannon index) and *Scutellospora* were significantly and positively correlated with aggregate content >2 mm and $2 \sim 1$ mm, respectively ($P < 0.05$). Therefore, annual fallow and vetch rotation corn were conducive to improving the stability of soil aggregates and changing the composition of the AMF community. The research results provide a theoretical basis and reference for the annual rotation system to improve soil quality and implement a reasonable crop rotation and fallow pattern in southern China.

Key words: crop rotation; fallow; green manure; soil aggregate; arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); diversity; high-throughput sequencing

土壤侵蚀是地球表层物质迁移过程之一, 在全球变化和人为活动日益增强的背景下, 严重的土壤侵蚀使耕地面积减少、土壤质量退化, 引起一系列环境问题^[1]. 据报道, 云南省坡耕地水土流失面积为 453.37 万 hm^2 , 占全省水土流失面积的 43.29%; 近年来, 由于特殊的降雨、地貌特征及不合理的耕作导致云南省坡耕地水土流失愈加严重^[2]. 因此, 对云南省滇中红壤区坡耕地进行抗蚀机制的研究将有助于改善这一状况.

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 其数量和大小影响土壤径流和蓄水渗透的强弱, 稳定性可反映土壤抗蚀和抗冲能力的大小^[3], 在维持土壤生态

功能和保持土壤肥力方面发挥着重要作用^[4]. 土壤团聚体的形成和稳定性受生物和非生物因素的影响^[5]. 在非生物因子中, 轮作休耕不仅有利于耕地休养生息、保持水土和农业可持续发展, 而且有利于土壤团聚体组成和稳定^[6, 7]. 如夏梓泰等^[8]研究发现, 与玉米单作相比, 长期休闲和绿肥轮作玉米可提高土壤大团聚体含量和稳定性; Tiemann 等^[9]研

收稿日期: 2022-10-06; 修订日期: 2022-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41661063); 云南省重大科技专项 (2019ZG00902-08)

作者简介: 鲁泽让 (1998 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤微生物与耕地持续利用, E-mail: 1781796294@qq.com

* 通信作者, E-mail: mpfan@126.com

究表明大豆-小麦-玉米覆盖作物轮作中的水稳性团聚体高于单作玉米。在生物因子中,丛枝菌根真菌(AMF)是一种能够与地球上约 80% 的植物根系建立共生关系的真菌,也是土壤微生物群落的关键组成部分和参与农业可持续发展的重要微生物群之一^[10, 11],对于改善土壤生物环境、减少土壤侵蚀和提高土壤质量至关重要^[12]。已有研究发现,覆盖作物或休耕的引入影响了后茬经济作物的 AMF 定殖,而 AMF 可以通过提高菌丝体对土壤养分的吸收来刺激作物的生长,该过程可促进 AMF 分泌 GRSP 等有机化合物,促进土壤团聚体的形成,从而保护土壤有机碳不被分解^[13, 14]。此外,也有研究表明 AMF 可以促进根系分泌物(胞外多糖和根系黏液)的产生,这些分泌物可以将土壤颗粒黏结在一起,从而有利于大团聚体的形成和稳定^[15]。Zhang 等^[16]研究发现,与岩溶土壤系统中没有 AMF 定殖的土壤相比,AMF 定殖显著增加了土壤大团聚体的含量(>2 mm)。Zhang 等^[17]研究表明,间作系统通过改变土壤养分和 AMF 的多样性,影响土壤团聚体的形成和稳定性。Wright 等^[18]对北美大平原地区的小麦休耕、小麦-玉米-小米和小麦-玉米-小米-休耕等进行试验后发现轮作显著提高了土壤中 AMF 数量。尽管最新研究表明轮作休耕可增加团聚体稳定性,AMF 有利于团聚体组成和稳定,但关于在轮作休耕条件下 AMF 群落对团聚体形成和稳定的影响研究鲜见报道。

因此,本试验以坡耕地红壤为研究对象,设置苕子轮作玉米(V-C)、豌豆轮作玉米(P-C)、冬闲-玉米(F-C)和周年休耕(F-F)这 4 个处理,分析土壤养分、AMF 群落和团聚体在不同处理下的变化,采用冗余分析进一步分析 AMF 对团聚体组成和稳定性的影响,以期在当地推行合理的轮作休耕模式及增强耕地持续利用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验田间试验于云南省昆明市盘龙区松华街道大摆村(25°02'29"N, 102°58'39"E)进行。试验地坡度为 10°,属亚热带高原季风气候,海拔为 2 234 m,年降水量为 900 ~ 1 000 mm,年平均气温 16℃。长期定位试验于 2018 年开始,本试验于 2020 年 10 月开始。其土壤基本理化性质为:pH 5.20, ω [有机质(SOM)]30.15 g·kg⁻¹, ω [碱解氮(AN)]115.3 mg·kg⁻¹, ω [速效磷(AP)]6.41 mg·kg⁻¹, ω [速效钾(AK)]92.36 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料与设计

本试验小区面积为 4 m × 5 m,设置苕子轮作玉

米(V-C)、豌豆轮作玉米(P-C)、冬闲-玉米(F-C)和周年休耕(F-F)这 4 个处理,每个处理 3 次重复,共 12 个小区,区组内小区随机排列。供试作物:玉米(“云瑞88”)、光叶紫花苕和白花矮茎豌豆。其中,V-C 和 P-C 于 2020 年 10 月种植苕子、豌豆,翌年 4 月份苕子和豌豆翻压后种植玉米;F-C 于 2020 年 10 月玉米收获后进行休闲,翌年 4 月种植玉米;休耕地则为休闲处理,休耕地生长的植物主要有马唐(*Digitaria sanguinalis*)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)、风轮菜(*Clinopodium chinense*)、圆叶锦葵(*Malva rotundifolia*)、菊叶香藜(*Chenopodium foetidum*)、秋鼠麴草(*Gnaphalium hypoleucum*)和飞蓬(*Erigeron acer*)等。

玉米采用宽窄行种植,宽和窄行行距分别为 80 cm 和 40 cm,株间距为 25 cm。以穴播的方式播种,每穴播两粒,间苗时每穴留 1 株,单个小区植株共计 9 行,每行 16 株;苕子和豌豆采用撒播方式种植,将种子均匀撒于已收获玉米的轮作处理小区中,播种深度为 2 ~ 3 cm。玉米进行单株精准施肥,施 N 315 kg·hm⁻², P₂O₅ 120 kg·hm⁻², K₂O 120 kg·hm⁻²,其中氮肥分两次(50% 做基肥,50% 做追肥),并在喇叭口期追肥,磷肥和钾肥全部做基肥施用;苕子和豌豆作为绿肥作物,不做施肥处理。玉米在播种、施肥和灌水后用薄膜覆盖,后期根据作物的长势,适时进行灌水、除草等作业。在轮作完豌豆及苕子后对其进行翻压处理,苕子翻压还田生物量鲜重为 10 300.13 kg·hm⁻²,干重为 2 631.20 kg·hm⁻²;豌豆还田量鲜重为 9 738.13 kg·hm⁻²,干重为 2 193.87 kg·hm⁻²,休耕地不进行耕作等田间管理。

1.3 样品采集

在 2021 年玉米成熟期用五点取样法采集 0 ~ 20 cm 土层的土样,并将土样按其自然裂缝掰开,拣去土样中的石块和植物根系等杂物,为避免运输过程中土样被挤压和扰动,将一部分土样装入塑料盒内,以保持土壤原状结构,并于试验条件下风干后用于土壤理化性质和团聚体的测定;另一部分土样装入 10 mL 无菌离心管中并装在冰盒内,迅速运回实验室并转移到 -80℃ 超低温冰箱中保存,用于提取土壤 DNA。

1.4 样品测定

1.4.1 土壤基本理化性质测定

土壤 pH 采用 1:2.5 (土:水)浸提,pH 计测定;土壤有机质测定采用重铬酸钾-外加热法;全氮测定采用凯氏定氮法;碱解氮采用碱解扩散法;全磷测定采用碱熔-钼锑抗比色法;速效磷测定采用碳酸氢钠浸提-光电比色法;速效钾测定采用乙酸铵

浸提-火焰光度法^[19]。

1.4.2 土壤团聚体测定及指标计算

采用 Elliott 团聚体湿筛法^[20]测定 > 2 mm、2 ~ 1 mm、1 ~ 0.25 mm 和 < 0.25 mm 这 4 个粒径的水稳性团聚体,团聚体稳定性指标计算公式如下^[21]。

> 0.25 mm 水稳性团聚体含量($R_{0.25}$):

$$R_{0.25} = M_{r>0.25} / M_T \quad (1)$$

式中, $M_{r>0.25}$ 为粒径 > 0.25 mm 水稳性团聚体质量(g); M_T 为水稳性团聚体总质量(g)。

平均重量直径(MWD):

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \omega_i \quad (2)$$

式中, x_i 为第 i 级水稳性团聚体平均直径(mm); ω_i 为第 i 级水稳性团聚体质量分数(%)。

1.4.3 土壤 DNA 提取、PCR 扩增及生物信息学分析

按照 E. Z. N. A. soil 试剂盒操作规范抽提土壤 DNA,用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的提取质量。PCR 采用 TransGen AP221-02; TransStart Fastpfu DNA Polymerase; 全部样本按照正式试验条件进行,每个样本 3 个重复,将同一样本的 PCR 产物混合后用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测,使用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒 (AXYGEN 公司) 切胶回收 PCR 产物,用 Tris_HCl 缓冲液进行洗脱,并用 2% 琼脂糖电泳检测;使用 NanoDrop 2000 测定 DNA 浓度和纯度。所有样品的 AMFDNA 采用巢式 PCR 扩增,第一对引物: AML1F 和 AML2R,第二对引物: AMV4-5NF 和 AMDGR。参照电泳初步定量结果,将 PCR 产物用 QuantiFluor™-ST 蓝色荧光定量系统 (Promega 公司) 进行检测定量,然后按照每个样本的测序量要求,进行相应比例的混合,测序在 MiSeq PE 300 平台进行 (上海美吉生物医药科技有限公司)。

利用 Flash 1.2.11 进行 pair-end 双端序列拼接,用 Uparse 11 进行 OTU 聚类,将所有样品基于序列数 41 499 进行抽平,以抽平后的 OTU 丰度表进行后续所有分析计算。使用 Uparse 11 在相似度为 97% 的水平上进行 OTU 聚类,为了得到每个 OTU 对应的物种分类信息,采用 RDP classifier 贝叶斯算法对 97% 相似水平的 OTU 代表序列进行分类学分析,置信度阈值为 0.7,使用 Mothur (version v. 1.30.2) 进行 α 多样性分析。

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据的整理。采用 SPSS 23.0 进行统计分析;利用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 评价不同处理间各个指标的差异显著性;用 Origin 2021 软件进行绘图;采用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析;使用 R 语言 (version 3.3.1) 进行 Spearman 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 轮作休耕模式下土壤团聚体组成及稳定性特征

不同轮作休耕处理对各粒级土壤团聚体含量及稳定性的影响各异 (表 1)。V-C 和 F-F 处理的 > 2 mm 团聚体含量较 F-C 显著提高了 29.71% 和 66.99%; V-C、P-C 和 F-F 的 $R_{0.25}$ 较 F-C 处理显著提高了 20.29%、16.80% 和 33.47%, MWD 较 F-C 处理显著增加了 23.38%、19.48% 和 44.16%,而 < 0.25 mm 团聚体含量较 F-C 处理显著降低了 32.89%、27.23% 和 35.06%。2 ~ 0.25 mm 团聚体含量在各处理之间无显著差异。另外,各处理的 $R_{0.25}$ 、MWD 由大到小的顺序为: F-F > V-C > P-C > F-C,其中 F-F 处理与其他处理间的差异性达显著水平 ($P < 0.05$)。

表 1 轮作休耕模式下团聚体组成与稳定性¹⁾

Table 1 Aggregate composition and stability under crop rotation and fallow pattern

处理	团聚体组成/%				$R_{0.25}$	MWD
	> 2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.25 mm	< 0.25 mm		
V-C	18.51 ± 0.55b	22.23 ± 5.43a	33.66 ± 2.17a	25.61 ± 3.16b	74.39 ± 3.16b	0.95 ± 0.06b
P-C	19.70 ± 0.81ab	18.48 ± 2.65a	34.05 ± 2.16a	27.77 ± 0.56b	72.23 ± 0.56b	0.92 ± 0.02b
F-C	14.27 ± 1.53c	15.56 ± 1.23a	32.02 ± 2.31a	38.16 ± 2.24a	61.84 ± 2.24c	0.77 ± 0.01c
F-F	23.83 ± 1.77a	15.44 ± 1.44a	35.95 ± 1.33a	24.78 ± 2.93b	82.54 ± 2.41a	1.11 ± 0.06a

1) V-C、P-C、F-C 和 F-F 分别表示苕子轮作玉米、豌豆轮作玉米、冬闲-玉米及周年休耕;数据为平均值 ± 标准差;同列不同小写字母表示相同团聚体在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 轮作休耕模式下土壤养分的变化特征

不同轮作休耕处理下的土壤养分变化各异 (表 2)。V-C 和 F-C 处理的 pH 显著高于 F-F 处理 ($P < 0.05$); P-C 和 F-F 处理下的 SOM 含量显著高于 F-C 处理 ($P < 0.05$); F-F、V-C 和 P-C 的 AN 含量较 F-C 显著提高了 22.52%、9.01% 和 11.51%; P-C

处理的 AP 含量较 F-C 处理的显著降低 27.79% ($P < 0.05$); F-F 处理下的 AK 含量较 F-C 显著降低 19.83% ($P < 0.05$)。

2.3 轮作休耕模式下 AMF 多样性的变化特征

本研究共获得 629 128 条原始序列,经过筛选后获得 497 988 条有效序列,占总序列数的 79.16%。

表 2 休耕轮作模式下土壤养分的变化特征¹⁾

Table 2 Characteristics of soil nutrient changes under crop rotation and fallow pattern					
处理	pH	$\omega(\text{SOM})/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AN})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AP})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AK})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
V-C	5.17 ± 0.32a	31.54 ± 2.25ab	103.72 ± 3.35b	16.34 ± 2.70ab	154.63 ± 5.65ab
P-C	4.91 ± 0.04ab	33.73 ± 1.24a	106.10 ± 2.09b	13.28 ± 0.85b	164.29 ± 24.20ab
F-C	5.30 ± 0.07a	26.12 ± 2.37b	95.15 ± 3.28c	18.39 ± 1.89a	178.71 ± 7.26a
F-F	4.76 ± 0.08b	37.22 ± 3.30a	116.58 ± 1.32a	15.14 ± 1.53ab	143.27 ± 5.17b

1) SOM 表示土壤有机质, AN 表示碱解氮, AP 表示速效磷, AK 表示速效钾; 同列不同小写字母表示同一因子在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

测序量达到40 000时, OTU 数基本处于饱和状态(图 1). 测序结果基本能够反映当前样本的多样性, 各组 AMF 的测序数据量基本合理, 但后续研究中需要增加测序深度. 本试验共获得 78 个 OTU 数目(图 2), 从门到种依次进行分类为 1 门、1 纲、5 目、7 科、11 属和 27 种. V-C、P-C、F-C 和 F-F 中所包含的 OTU 数分别为 55、56、56 和 70 个; 共有的 OTU 数为 36 个; 特有的 OTU 数分别为 1、4、1 和 8 个; F-C 与 F-F 共有的 OTU 数为 53. 由此可以看出, F-C

与 F-F 之间比较接近. 不同轮作休耕处理对 AMF 丰富度和多样性的影响不同(表 3). 其中, F-F 处理下的 Chao1 和 ACE 指数较 F-C 显著提高 35.78% 和 29.56%, V-C 和 P-C 处理的 Chao1、ACE 和 Shannon 指数较 F-C 有增高的趋势, F-F 处理下的 Shannon 指数较 F-C 处理显著提高 45.55%. 结果表明, F-F 处理的 AMF 群落的丰富度及多样性显著高于 F-C ($P < 0.05$).

表 3 轮作休耕模式对 AMF 丰富度和多样性的影响

Table 3 Effects of crop rotation and fallow pattern on soil AMF richness and diversity				
处理	丰富度		多样性	
	Chao1 指数	ACE 指数	Simpson 指数	Shannon 指数
V-C	42.00 ± 5.20ab	42.05 ± 4.26ab	0.21 ± 0.09ab	2.15 ± 0.35b
P-C	41.83 ± 8.31ab	42.00 ± 8.40ab	0.14 ± 0.02ab	2.43 ± 0.16ab
F-C	36.50 ± 4.69b	38.94 ± 6.09b	0.25 ± 0.10a	1.91 ± 0.37b
F-F	49.56 ± 1.95a	50.45 ± 1.41a	0.09 ± 0.01b	2.78 ± 0.07a

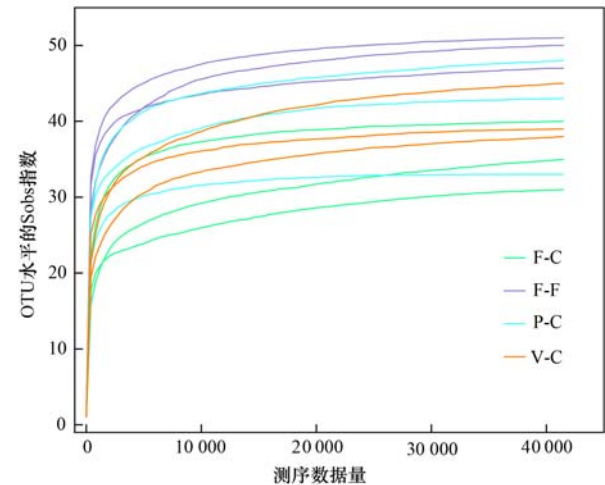


图 1 轮作休耕模式下 AMF 的稀释曲线
Fig. 1 Rarefaction curve of soil AMF under crop rotation and fallow pattern

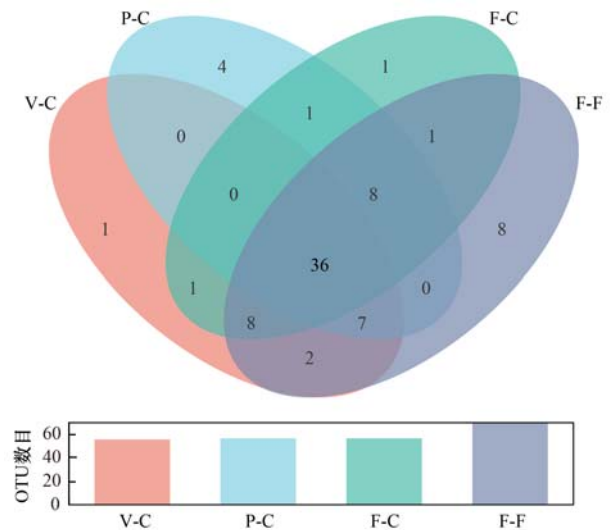
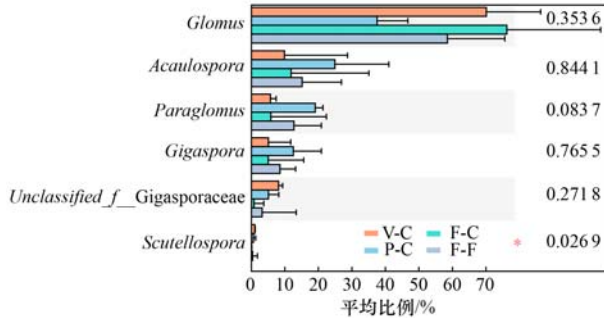


图 2 轮作休耕模式下 AMF OTU 分布的维恩图
Fig. 2 Venn diagram of OTUs distribution of soil AMF under crop rotation and fallow pattern

2.4 轮作休耕模式对 AMF 属水平上群落组成的影响 在属水平上对不同处理下的 AMF 群落组成进行分析得出(图 3), AMF 群落各属 OTU 数目占总 OTU 数目的比例大小顺序为球囊霉属(*Glomus*)、无梗囊霉属(*Acaulospora*)、类球囊霉属(*Paraglomus*)、巨孢囊霉属(*Gigaspora*)、大孢子科未分类属

(*Unclassified_f_Gigasporaceae*)、盾巨孢囊霉属(*Scutellospora*), 其中球囊霉属为优势属, 盾巨孢囊霉属在各处理间差异显著 ($P < 0.05$). 基于 Bray-Curtis 距离算法的主坐标分析(PCA)表明(图 4), PC1 和 PC2 轴分别解释了

29.99% 和 22.40% 的 AMF 群落组成差异,差异贡献值为 52.39%。ANOSIM 检验结果表明,4 种不同种植模式下的 AMF 群落完全分开,说明各处理之间差异显著 ($R = 0.6883$, $P = 0.001$)。



Glomus: 球囊霉属; *Unclassified_f_Gigasporaceae*: 大孢子科未分类属; *Acaulospora*: 无梗囊霉属; *Paraglomus*: 类球囊霉属; *Gigaspora*: 巨孢囊霉属; *Scutellospora*: 盾巨孢囊霉属; 右侧数值为 P 值, * 表示 $P < 0.05$

图 3 轮作休耕模式下 AMF 群落结构(属水平)分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of AMF community structure (genus level) under crop rotation and fallow pattern

2.5 轮作休耕模式下 AMF 多样性及属水平相对丰度与土壤养分间的关系

为分析影响轮作休耕下 AMF 多样性及群落组成产生差异的关键性因子,对其进行 RDA 和 Spearman 分析。RDA1 和 RDA2 分别解释了 69.89% 和 4.85% 的变异量,能够在累计变量 74.74% 上解释 AMF 多样性和丰富度指数的变化[图 5(a)]。其中 Chao1、ACE 和 Shannon 指数均与 AN 和 SOM 呈正相关,与 AP、pH 和 AK 呈负相关。AN 对 AMF 多样性和丰富度有显著影响 ($P < 0.05$),说明 AN 是轮作休耕模式下影响 AMF 丰富度和多样性的主要

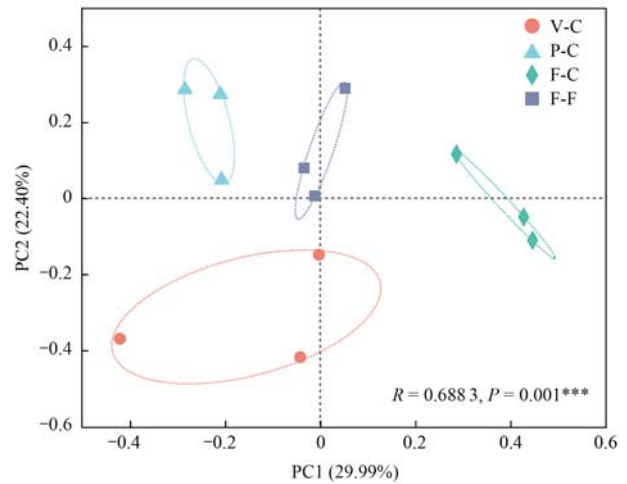


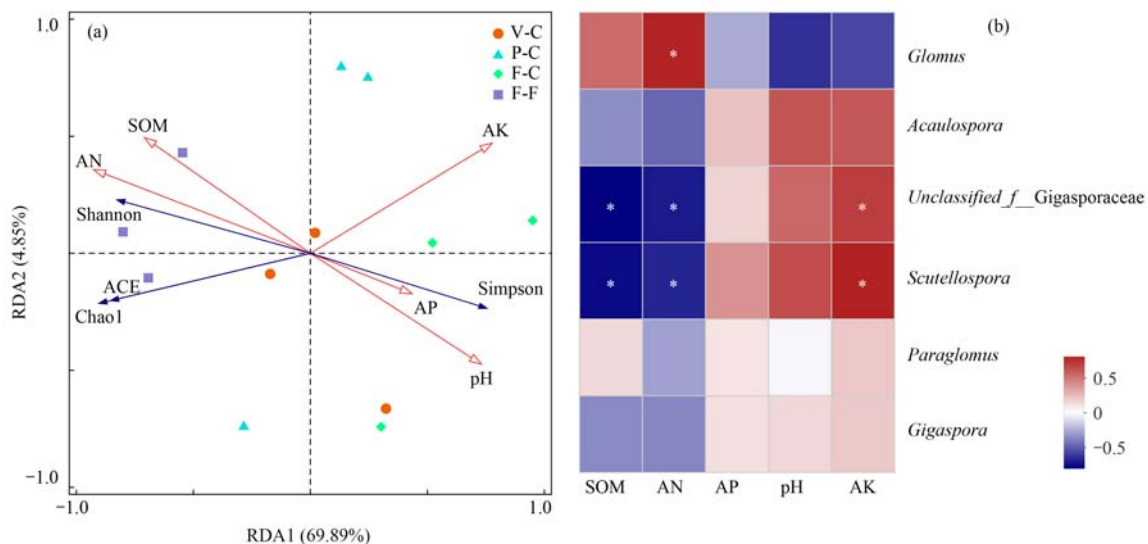
图 4 轮作休耕模式下基于 Bray-Curtis 距离 AMF 群落 PCoA 图

Fig. 4 PCoA plot based on Bray-Curtis similarities of AMF community under crop rotation and fallow pattern

因子。Spearman 相关性分析表明[图 5(b)],球囊霉属与 AN 呈显著正相关 ($P < 0.05$); 大孢子科未分类属 (*Unclassified_f_Gigasporaceae*) 和盾巨孢囊霉属 (*Scutellospora*) 均与 AN 和 SOM 呈显著负相关 ($P < 0.05$),与 AK 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

2.6 轮作休耕模式下 AMF 多样性及群落组成与土壤团聚体之间的关系

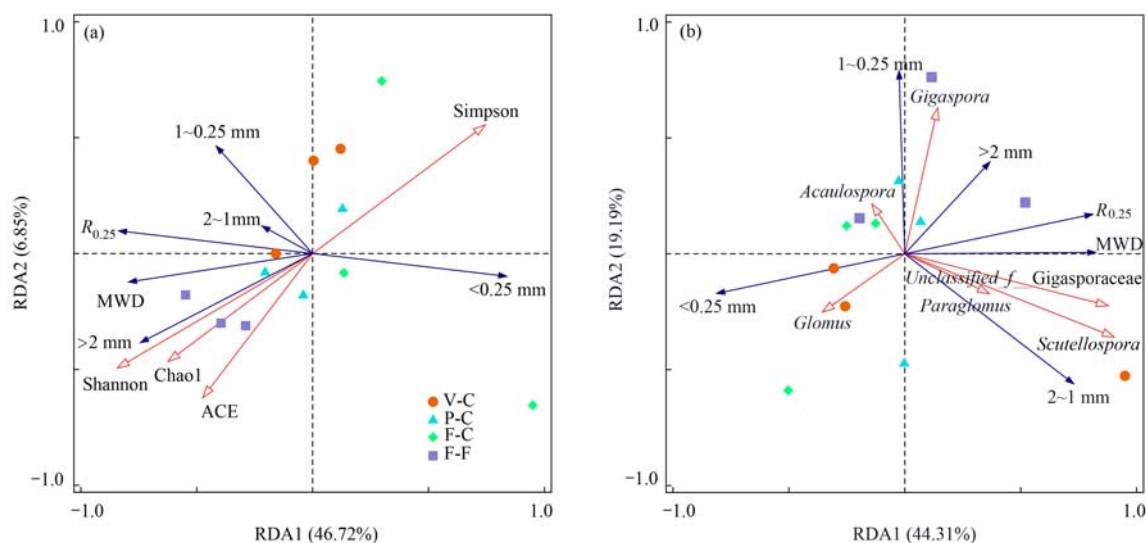
冗余分析表明[图 6(a)], > 2 mm 及 2 ~ 1 mm 团聚体含量、 $R_{0.25}$ 和 MWD 与 Shannon、ACE 和 Chao1 之间均呈正相关关系,其中 > 2 mm 团聚体含量与 Shannon 指数相关性显著 ($P < 0.05$)。 *Scutellospora*、*Unclassified_f_Gigasporaceae* 和 *Paraglomus* 与 > 2 mm 及 2 ~ 1 mm 团聚体含量、 $R_{0.25}$ 和 MWD 呈正相关,其中 *Scutellospora* 与 2 ~ 1 mm 团聚体含量相关性显著 ($P < 0.05$); *Gigaspora*



(a) 中红色箭头表示土壤养分,蓝色箭头表示 AMF 多样性及丰富度指数; (b) 中红色表示正相关,蓝色表示负相关; * 表示 $P < 0.05$

图 5 轮作休耕模式下 AMF 多样性指数及属水平的相对丰度与土壤养分的关系

Fig. 5 Relationship between AMF diversity, abundance of genus levels and soil nutrients under crop rotation and fallow pattern



红色箭头分别表示多样性指数和前6个属,蓝色箭头均表示团聚体粒径及稳定性;

$R_{0.25}$ 表示 >0.25 mm水稳性团聚体含量,MWD表示平均重量直径

图6 轮作休耕模式下AMF多样性及群落与土壤团聚体的关系

Fig. 6 Relationship between AMF diversity, communities, and soil aggregate under crop rotation and fallow pattern

与 >2 mm团聚体含量、 $R_{0.25}$ 和MWD正相关,而*Glomus*与大团聚体含量和稳定性负相关[图6(b)]. 综上,AMF多样性(Shannon指数)和*Scutellospora*是轮作休耕模式下促进土壤团聚体形成和稳定的主要影响因子。

3 讨论

3.1 轮作休耕模式对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土壤团聚体是土壤的重要结构单元,其组成和稳定性通常用作土壤肥力的重要指标^[7]. 当团聚体稳定性高时可以大幅提高土壤的水渗透性及抗侵蚀能力^[22]. 本研究结果发现,与冬闲-玉米(F-C)处理相比,周年休耕(F-F)、苕子轮作玉米(V-C)和豌豆轮作玉米(P-C)处理均能显著提高土壤大团聚体(>0.25 mm)含量和团聚体稳定性(MWD),这与夏梓泰等^[8]对轮作休耕模式下土壤团聚体进行研究所得到的结果相似. Seidel等^[23]在季节性休耕地种植绿肥,发现由于绿肥根系在土壤中持续活动及其被还田后的腐殖化作用,可改良土壤团粒结构、增加大团聚体数量并提高土壤团聚体稳定性,这与本研究的结果一致. 产生本研究结果的原因可能是F-C处理冬季地表覆盖度低,且耕作时加剧了对土壤的扰动,使土壤团粒结构被破坏,进而降低了土壤团聚体稳定性. 而F-F、V-C和P-C处理冬季地表覆盖度高且对其扰动较少,因此有利于减少土壤养分的流失和恢复土壤团聚体的稳定性^[24],这也与何宇等^[25]通过7种不同土地利用方式对土壤团聚体进

行研究所得到的结果相似. 因此,周年休耕及豆科绿肥轮作均能达到使土地休养生息、恢复地力和保持水土的效果.

3.2 轮作休耕模式对土壤养分的影响

已有研究表明,合理的绿肥轮作和休耕可以增加土壤的通透性、保水保肥、提高酸碱缓冲能力和养分含量,从而提高作物产量^[26,27]. 本研究结果也表明,F-F、V-C和P-C较F-C处理能够显著提高SOM和AN的含量. 其原因在于F-F处理中枯枝落叶腐解及轮作小区中绿肥被翻压后经过腐解能增加土壤中有机质和氮素的含量,从而改善土壤环境^[28]. 本研究中土壤pH大小表现为:F-C $>$ V-C $>$ P-C $>$ F-F,这与韩梅等^[29]和钟菊新等^[30]通过不同绿肥配施化肥对pH进行研究得到的结果相似. 这是由于F-F处理的枯枝落叶及轮作处理的绿肥经过腐解产生有机酸所致. 本研究还得出,绿肥处理的AP和AK含量低于F-C,这与钟菊新等^[30]研究的结果一致. 可能原因是绿肥增加的土壤碳氮养分激发了微生物生长活性,使微生物对磷的需求增加,从而导致AP优先被土壤微生物所固持^[31]. 又由于F-F处理的植物及绿肥轮作处理的苕子和豌豆生长需要大量钾素^[32],致使土壤AK含量降低. 赵秋等^[33]通过对天津地区不同绿肥培肥土壤效果进行研究后发现,冬季绿肥处理较冬闲能够显著增加AP和AK含量,这与本研究结果相悖,其原因可能是气候条件和土壤类型等不同. 目前研究报道的结果不尽相同,但总体上豆科绿肥与玉米轮作能够改善土壤理化性质,提高作物产量,对于坡耕地生态环境保护和粮食

增产具有重要意义,是一种值得推广的种植模式。

3.3 轮作休耕模式对 AMF 多样性及群落组成的影响

AMF 作为农田生态系统中的一种重要的土壤微生物,有助于土壤健康和农业可持续发展,其多样性及群落结构的变化受耕作措施等多种因素的影响^[11,34]。在本研究中,不同处理对 AMF 群落丰富度和多样性指数均产生了不同程度的影响,这可能与绿肥的种类、休耕年限、气候条件和土壤类型等因素有关。其中 F-F 处理提高了 AMF 群落丰富度和多样性,其原因可能是减少对土壤的扰动可以避免 AMF 菌丝网络遭到破坏,从而有利于 AMF 生长和繁殖,进而提高 AMF 群落丰富度和多样性^[35]。Sale 等^[36]将常规耕作与免耕系统进行比较,也发现土壤频繁耕作会对 AMF 丰富度产生不利影响,其原因是耕作稀释了 AMF 繁殖体。因此休耕可以使土地修养生息、保持质量和恢复地力,从而有利于菌根的生长和繁殖。

本研究利用高通量测序,共发现 AMF 群落 1 门、1 纲、5 目、7 科、11 属和 27 种,基于属水平的物种丰度排在前 6 位的 AMF 属有球囊霉属、无梗囊霉属、类球囊霉属、巨孢囊霉属、大孢子科未分类属和盾巨孢囊霉属,其中球囊霉属为优势属。已有学者对农田、森林、草地、湿地及不同免耕和有机肥施条件下的 AMF 多样性及群落结构进行研究,发现球囊霉属为优势属^[37],这与本研究的结果一致。这可能是由于球囊霉属具有较高的产孢率和特定的繁殖方式,对农业管理活动扰动的忍耐能力较强,且能够适应不同的环境^[38,39]。Higo 等^[40]通过对意大利黑麦草等覆盖作物或休耕地与玉米进行轮作,表明冬季覆盖作物可影响后茬作物的 AMF 群落组成。本研究中苕子和豌豆作为冬季覆盖绿肥也能改变后茬玉米土壤 AMF 群落组成,这与 Higo 等^[40]研究的结果一致。

3.4 轮作休耕模式下 AMF 多样性及属水平相对丰度与土壤养分间的关系

AMF 群落结构受到植物种类、覆盖作物、农艺措施和养分等多种因素的影响^[41],其中养分主要包括气候条件和土壤理化性质^[42]。本研究得出,球囊霉属与 AN 显著正相关,这与 Zhang 等^[43]研究玉米/大豆间作系统中 AMF 群落组成与养分的相关关系结果一致,可能是因为土壤高氮含量会促进 AMF 孢子的形成^[44]; AN 与 AMF 多样性显著正相关,这与 Xiang 等^[45]研究不同土地利用对农牧交错带 AMF 群落的影响结果相似,但与 Jansa 等^[46]研究的结果相反,说明氮含量对 AMF 群落的影响存在一定的阈值^[47]。此外,本研究中 AK 与 AMF 大孢子科未分类

属和盾巨孢囊霉属存在显著正相关关系,这与大多数学者研究认为 AK 与 AMF 群落结构无相关关系的结果不一致。但也有研究表明,AK 对 AMF 群落结构有显著影响^[44],这与本研究结果一致。Hammer 等^[48]研究发现 K 的有效性能够有选择地刺激 AMF 生长,因为它补偿了钠诱导的离子失衡。综上,在试验条件下 AN 是 AMF 多样性的主要影响因子,AN、SOM 和 AK 是 AMF 群落结构的主要影响因子。目前,关于土壤养分对土壤 AMF 群落的影响研究结果不尽相同^[49],因此不同轮作休耕模式下 AMF 结构特征对土壤养分的影响有待深入研究。

3.5 轮作休耕模式下 AMF 多样性及群落与土壤团聚体之间的关系

AMF 对于土壤生态系统功能至关重要,在土壤团聚体形成、稳定以及植物和土壤系统之间的联系中发挥着关键作用^[50]。已有研究表明,AMF 通过分泌多糖、酚酸及 GRSP 与土壤颗粒和微团聚体 ($<0.25\text{ mm}$) 结合,从而促进土壤大团聚体的形成和稳定^[51]。本研究结果表明, $>2\text{ mm}$ 团聚体含量与 Shannon 指数呈显著正相关关系 ($P < 0.05$),这与 Qin 等^[52]研究得出的大团聚体 ($0.25 \sim 2\text{ mm}$) 所占质量分数与土壤 AM 真菌生物量呈正相关的结果相似。*Scutellospora* 与 $2 \sim 1\text{ mm}$ 团聚体含量、 $>2\text{ mm}$ 团聚体含量、 $R_{0.25}$ 及 MWD 均呈正相关关系,其中与 $2 \sim 1\text{ mm}$ 团聚体含量的相关性达显著水平 ($P < 0.05$)。Hart 等^[53]研究表明,Gigasporaceae 科真菌较非 Gigasporaceae 科真菌能够产生更长的菌丝和更密集的菌丝簇,其土壤黏结效果较好。本研究中的 *Scutellospora* 是 Gigasporaceae 科的一个属,这与前人得出的结果相吻合。但与 Lu 等^[54]研究得出的隔球囊霉属和球囊霉属与大团聚体所占质量分数呈正相关的结果不一致,可能是所研究的土壤性质和气候条件等的差异所致。Wilson 等^[50]研究表明土壤团聚体形成与 AMF 的群落和丰度密切相关,这与本研究的结果一致,周年休耕和冬绿肥覆盖有利于后茬作物 AMF 定殖^[55],从而促进团聚体的形成和稳定。Lehmann 等^[56]研究表明腐生真菌降解有机物质(植物叶子或根),并为土壤团聚体的形成提供必要的原材料。Cao 等^[57]研究也发现,AMF 可以通过促进土壤腐生真菌的生长,间接促进有机物质分解和总体胞外酶丰度提高,这可能是 AMF 促进土壤团聚体形成的一种途径。在本研究中,周年休耕和绿肥轮作小区地表覆盖度高且枯枝落叶繁多,这可能促进了腐生真菌的生长和繁殖,加之对 AMF 菌丝网络破坏较少,最终通过 AMF 和腐生真菌相互作用促进了土壤团聚体的形成与稳定。

4 结论

(1) 周年休耕和绿肥轮作玉米处理均能够显著提高土壤大团聚体含量及团聚体稳定性, 且周年休耕处理的效果最佳, 苕子轮作玉米处理次之。

(2) 周年休耕处理的 AMF 多样性和丰富度显著高于冬闲-玉米处理; 球囊霉属为各处理的 AMF 优势属, 盾巨孢囊霉属在各处理之间差异显著。

(3) 周年休耕和绿肥轮作玉米能够显著提高 SOM 和 AN 含量。其中 SOM、AN 及 AK 对 AMF 群落组成有显著影响, AN 是轮作休耕模式下 AMF 丰富度和多样性的主要影响因子, 与球囊霉属存在显著正相关关系; AMF 群落对轮作休耕模式的响应受土壤养分、绿肥种类及休耕年限等因素的综合影响。

(4) AMF 多样性 (Shannon 指数) 和盾巨孢囊霉属分别与 >2 mm 和 $2 \sim 1$ mm 团聚体含量显著正相关, AMF 多样性 (Shannon 指数) 和盾巨孢囊霉属对轮作休耕模式下土壤团聚体形成和稳定具有重要作用。

参考文献:

- [1] 李硕, 刘磊. AnnAGNPS 模型在渭水河流域产水、产沙的模拟评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 49-57.
- Li S, Liu L. Evaluation of AnnAGNPS model for simulation water and sediment yield in the lianshui river watershed [J]. Environmental Science, 2010, **31**(1): 49-57.
- [2] 赵桂茹, 程易, 杨友琼, 等. 玉米 || 马铃薯接种 AMF 对坡耕地水土及氮素流失的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, **37**(3): 523-529.
- Zhao G R, Cheng Y, Yang Y Q, *et al.* Effects of maize intercropping potato inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on soil erosion and nitrogen losses in slope farmland[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2022, **37**(3): 523-529.
- [3] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels [J]. CATENA, 2002, **47**(2): 133-149.
- [4] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3816-3824.
- Luo X H, Wang Z F, Lu C, *et al.* Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3816-3824.
- [5] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, **60**(3): 627-643.
- Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, **60**(3): 627-643.
- [6] 李丽, 张安录. 轮作休耕及其补偿的法律意蕴、法理证成及入法进路[J]. 中国土地科学, 2021, **35**(11): 27-35.
- Li L, Zhang A L. Legal implication, legal evidence and legalization path of crop rotation and fallow with compensation [J]. China Land Science, 2021, **35**(11): 27-35.
- [7] Tian X L, Wang C B, Bao X G, *et al.* Crop diversity facilitates soil aggregation in relation to soil microbial community composition driven by intercropping [J]. Plant and Soil, 2019, **436**(1-2): 173-192.
- [8] 夏梓泰, 程伟威, 李永梅, 等. 轮作休耕模式对土壤团聚体及有机碳含量的影响[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(3): 31-37.
- Xia Z T, Cheng W W, Li Y M, *et al.* Effects of crop rotation and fallow patterns on soil aggregates and organic carbon content [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, **29**(3): 31-37.
- [9] Tiemann L K, Grandy A S, Atkinson E E, *et al.* Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem [J]. Ecology Letters, 2015, **18**(8): 761-771.
- [10] Marinho F, Oehl F, Da Silva I R D, *et al.* High diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in natural and anthropized sites of a Brazilian tropical dry forest (Caatinga) [J]. Fungal Ecology, 2019, **40**: 82-91.
- [11] Bender S F, Wagg C, Van Der Heijden M G A. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2016, **31**(6): 440-452.
- [12] Mardhiah U, Caruso T, Gurnell A, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungal hyphae reduce soil erosion by surface water flow in a greenhouse experiment [J]. Applied Soil Ecology, 2016, **99**: 137-140.
- [13] Xiao L, Zhang Y, Li P, *et al.* Effects of freeze-thaw cycles on aggregate-associated organic carbon and glomalin-related soil protein in natural-succession grassland and Chinese pine forest on the Loess Plateau [J]. Geoderma, 2019, **334**: 1-8.
- [14] Higo M, Tatewaki Y, Gunji K, *et al.* Cover cropping can be a stronger determinant than host crop identity for arbuscular mycorrhizal fungal communities colonizing maize and soybean [J]. PeerJ, 2019, **7**, doi: 10.7717/peerj.6403.
- [15] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure [J]. New Phytologist, 2006, **171**(1): 41-53.
- [16] Zhang Z F, Mallik A, Zhang J C, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on inoculated seedling growth and rhizosphere soil aggregates [J]. Soil and Tillage Research, 2019, **194**, doi: 10.1016/j.still.2019.104340.
- [17] Zhang S, Meng L B, Hou J, *et al.* Maize/soybean intercropping improves stability of soil aggregates driven by arbuscular mycorrhizal fungi in a black soil of northeast China [J]. Plant and Soil, 2022, doi: 10.1007/s11104-022-05616-w.
- [18] Wright S F, Anderson R L. Aggregate stability and glomalin in alternative crop rotations for the central Great Plains [J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, **31**(3-4): 249-253.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [20] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, **50**(3): 627-633.
- [21] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 [J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5481-5490.
- Deng H, Gao M, Long Y, *et al.* Effects of biochar and straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5481-5490.
- [22] 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 等. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 [J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2416-2424.

- Wang X, Zhong Z K, Zhang X Y, *et al.* Relationship between the composition of soil aggregates and the distribution of organic carbon under long-term abandoned restoration[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2416-2424.
- [23] Seidel E P, Caetano J H S, Karpinski A S, *et al.* Residual dry matter, weeds and soil aggregates after winter cover crop[J]. *Journal of Experimental Agriculture International*, 2019, **32**(2), doi: 10.9734/jeai/2019/v32i230100.
- [24] 夏梓泰, 赵吉霞, 李永梅, 等. 周年轮作休耕模式对土壤球囊霉素和团聚体稳定性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41**(1): 99-106.
- Xia Z T, Zhao J X, Li Y M, *et al.* Effect of annual rotation and fallow pattern on the soil glomalin and aggregate stability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(1): 99-106.
- [25] 何宇, 盛茂银, 王轲, 等. 土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3752-3762.
- He Y, Sheng M Y, Wang K, *et al.* Effects of land use change on constitution, stability, and C, N, P stoichiometric characteristics of soil aggregates in Southwest China karst[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3752-3762.
- [26] 王天乐, 王晓娟, 刘恩科, 等. 甘蓝、菜豆和玉米不同轮作组合对淡褐土细菌群落和作物产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41**(2): 375-386.
- Wang T L, Wang X J, Liu E K, *et al.* Effects of different crop rotation combinations of cabbage, kidney bean, and maize on bacterial community and crop yield in light brown soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(2): 375-386.
- [27] Zhang C Z, Xue W F, Xue J R, *et al.* Leveraging functional traits of cover crops to coordinate crop productivity and soil health[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2022, **59**(10): 2627-2641.
- [28] 刘佳, 张杰, 秦文婧, 等. 红壤旱地毛叶苕子不同翻压量下腐解及养分释放特征[J]. *草业学报*, 2016, **25**(10): 66-76.
- Liu J, Zhang J, Qin W J, *et al.* Decomposition and nutrient release characteristics of different *Vicia villosa* green manure applications in red soil uplands of South China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, **25**(10): 66-76.
- [29] 韩梅, 刘蕊, 李正鹏, 等. 种植绿肥对作物产量和细菌群落稳定性的影响[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(11): 5382-5390.
- Han M, Liu R, Li Z P, *et al.* Green manuring increased crop yields and the stability of bacterial community[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(11): 5382-5390.
- [30] 钟菊新, 唐红琴, 李忠义, 等. 绿肥配施化肥对岩溶区水稻土壤细菌群落结构的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, **27**(10): 1746-1756.
- Zhong J X, Tang H Q, Li Z Y, *et al.* Effects of combining green manure with chemical fertilizer on the bacterial community structure in karst paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, **27**(10): 1746-1756.
- [31] Pistocchi C, Mészáros é, Tamburini F, *et al.* Biological processes dominate phosphorus dynamics under low phosphorus availability in organic horizons of temperate forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **126**: 64-75.
- [32] Gao S J, Cao W D, Gao J S, *et al.* Effects of long-term application of different green manures on ferric iron reduction in a red paddy soil in Southern China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, **16**(4): 959-966.
- [33] 赵秋, 张新建, 宁晓光, 等. 天津地区不同冬绿肥培肥土壤的效果[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, **28**(7): 1228-1237.
- Zhao Q, Zhang X J, Ning X G, *et al.* Effects of different winter green manure on soil fertility in Tianjin[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, **28**(7): 1228-1237.
- [34] Fall A F, Nakabonge G, Ssekandi J, *et al.* Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on soil fertility: contribution in the improvement of physical, chemical, and biological properties of the soil[J]. *Frontiers in Fungal Biology*, 2022, **3**, doi: 10.3389/ffunb.2022.723892.
- [35] Amalia A V, Dewi N R, Heriyanti A P, *et al.* A review on arbuscular mycorrhizal fungal communities in response to disturbance[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, **1968**(1), doi: 10.1088/1742-6596/1968/1/012001.
- [36] Săle V, Aguilera P, Laczko E, *et al.* Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **84**: 38-52.
- [37] 刘文娟, 马琨, 王兵兵, 等. 冬小麦免耕覆盖与有机肥施用对土壤丛枝菌根真菌群落多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2022, **41**(6): 1101-1108.
- Liu W J, Ma K, Wang B B, *et al.* Effects of no-tillage, mulching, and organic fertilizer application on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(6): 1101-1108.
- [38] 马琨, 宋丽丽, 王明国, 等. 玉米秸秆还田对土壤丛枝菌根真菌群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(8): 2746-2756.
- Ma K, Song L L, Wang M G, *et al.* Effects of maize straw returning on arbuscular mycorrhizal fungal community structure in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(8): 2746-2756.
- [39] Xue J F, Pu C, Liu S L, *et al.* Effects of tillage systems on soil organic carbon and total nitrogen in a double paddy cropping system in Southern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, **153**: 161-168.
- [40] Higo M, Takahashi Y, Gunji K, *et al.* How are arbuscular mycorrhizal associations related to maize growth performance during short-term cover crop rotation? [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, **98**(4): 1388-1396.
- [41] Zeng H L, Yu L L, Liu P, *et al.* Nitrogen fertilization has a stronger influence than cropping pattern on AMF community in maize/soybean strip intercropping systems[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, **167**, doi: 10.1016/j.apsoil.2021.104034.
- [42] Xiang D, Veresoglou S D, Rillig M C, *et al.* Relative importance of individual climatic drivers shaping arbuscular mycorrhizal fungal communities[J]. *Microbial Ecology*, 2016, **72**(2): 418-427.
- [43] Zhang R Z, Mu Y, Li X R, *et al.* Response of the arbuscular mycorrhizal fungi diversity and community in maize and soybean rhizosphere soil and roots to intercropping systems with different nitrogen application rates[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, **740**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139810.
- [44] Qin H, Lu K P, Strong P J, *et al.* Long-term fertilizer application effects on the soil, root arbuscular mycorrhizal fungi and community composition in rotation agriculture[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **89**: 35-43.
- [45] Xiang D, Verbruggen E, Hu Y J, *et al.* Land use influences arbuscular mycorrhizal fungal communities in the farming-pastoral ecotone of northern China[J]. *New Phytologist*, 2014, **204**(4): 968-978.
- [46] Jansa J, Oberholzer H R, Egli S. Environmental determinants of the arbuscular mycorrhizal fungal infectivity of Swiss agricultural

- soils[J]. European Journal of Soil Biology, 2009, **45**(5-6): 400-408.
- [47] 杨蕊毓, 邓锦璋, 田丽平, 等. 不同生境下川麦冬根围土壤丛枝菌根真菌多样性[J]. 西北植物学报, 2022, **42**(1): 145-153.
- Yang R Y, Deng Q Z, Tian L P, *et al.* Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of *Ophiopogon japonicus* in different habitats[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, **42**(1): 145-153.
- [48] Hammer E C, Nasr H, Wallander H. Effects of different organic materials and mineral nutrients on arbuscular mycorrhizal fungal growth in a Mediterranean saline dryland[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(11): 2332-2337.
- [49] 南镇武, 刘柱, 代红翠, 等. 不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4977-4987.
- Nan Z W, Liu Z, Dai H C, *et al.* Characteristics of bacterial community structure in fluvo-aquic soil under different rotation fallow[J]. Environmental Science, 2021, **42**(10): 4977-4987.
- [50] Wilson G W T, Rice C W, Rillig M C, *et al.* Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments[J]. Ecology Letters, 2009, **12**(5): 452-461.
- [51] Gao Y Z, Zong J, Que H, *et al.* Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi increases glomalin-related soil protein content and PAH removal in soils planted with *Medicago sativa* L. [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, **115**: 148-151.
- [52] Qin H, Niu L M, Wu Q F, *et al.* Bamboo forest expansion increases soil organic carbon through its effect on soil arbuscular mycorrhizal fungal community and abundance [J]. Plant and Soil, 2017, **420**(1-2): 407-421.
- [53] Hart M M, Reader R J. Taxonomic basis for variation in the colonization strategy of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. New Phytologist, 2002, **153**(2): 335-344.
- [54] Lu X L, Lu X N, Liao Y C. Effect of tillage treatment on the diversity of soil arbuscular mycorrhizal fungal and soil aggregate-associated carbon content[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, **9**, doi: 10.3389/fmicb.2018.02986.
- [55] Morimoto S, Uchida T, Matsunami H, *et al.* Effect of winter wheat cover cropping with no-till cultivation on the community structure of arbuscular mycorrhizal fungi colonizing the subsequent soybean[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2018, **64**(5): 545-553.
- [56] Lehmann A, Rillig M C. Understanding mechanisms of soil biota involvement in soil aggregation: A way forward with saprobic fungi? [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **88**: 298-302.
- [57] Cao T T, Fang Y, Chen Y R, *et al.* Synergy of saprotrophs with mycorrhiza for litter decomposition and hotspot formation depends on nutrient availability in the rhizosphere[J]. Geoderma, 2022, **410**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115662.



CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qi, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)