

DOI: 10.11766/trxb201909110290

李婷, 张丽, 刘大会, 张乃明, 宁东卫, 岳献荣, 夏运生. 菌根与间作对紫色土-水界面氮流失的削减效应[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 191–201.

LI Ting, ZHANG Li, LIU Dahui, ZHANG Naiming, NING Dongwei, YUE Xianrong, XIA Yunsheng. Effects of Native AMF and Intercropping Reducing Nitrogen Loss from Soil-Water Interface in Purple Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 191–201.

菌根与间作对紫色土-水界面氮流失的削减效应*

李婷^{1, 2}, 张丽^{2, 3}, 刘大会⁴, 张乃明^{1, 2}, 宁东卫⁵, 岳献荣²,
夏运生^{1, 2†}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201; 3. 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201; 4. 湖北中医药大学药学院, 武汉 430065; 5. 云南农业大学水利学院, 昆明 650201)

摘要: 揭示土著丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 与间作对紫色土-水界面各形态氮流失的削减效应, 可为保护水环境、减缓紫色土坡耕地氮流失带来的农业面源污染提供理论依据。通过自然降雨条件下的径流模拟试验, 设置不同种植模式 (单作玉米、玉米/大豆间作、单作大豆) 和不同菌根处理 (抑菌、未抑菌), 在雨季不同时间采集 7 次径流和侧渗水样, 分析比较各不同处理下径流及侧渗各氮形态变化迁移特征。研究表明, 侧渗即壤中流为紫色土-水界面氮素流失的主要途径, 硝态氮为紫色土-水界面氮素流失的主要形态。随取样时间后延, 径流总氮、硝态氮浓度均呈现出波浪式上升的趋势, 而铵态氮浓度整体表现出先上升再下降的趋势; 侧渗总氮浓度趋势则呈现先下降后上升再下降的趋势, 硝态氮浓度整体表现出下降后趋于平缓的趋势, 铵态氮浓度则表现出先上升后下降并趋于平缓的趋势。所有复合处理中, 未抑菌一间作处理的径流、侧渗及总流失量中总氮、铵态氮浓度均最低, 且其径流、总流失量中硝态氮浓度也明显低于其他处理。在未抑菌处理下, 与单作玉米、单作大豆处理相比, 间作处理使径流和侧渗总氮浓度分别下降约 13.4%、20.3% 和 56.5%、48.7%, 总流失量中总氮浓度分别下降约 50.1% 和 43.5%; 使径流和总流失量中的硝态氮浓度分别降低约 10.0%、16.7% 和 51.3%、42.9%; 并使径流和总流失量中铵态氮浓度分别显著降低约 10.5%、26.0% 和 21.7%、30.2%, 侧渗铵态氮浓度也相应降低约 29.6% 和 33.7%。可见土著菌根真菌与玉米/大豆间作体系对协同削减紫色土-水界面氮素的流失表现出了较大的潜力。

关键词: 土著菌根真菌; 间作; 紫色土; 土-水界面; 氮形态

中图分类号: S157.4 **文献标志码:** A

Effects of Native AMF and Intercropping Reducing Nitrogen Loss from Soil-Water Interface in Purple Soil

LI Ting^{1, 2}, ZHANG Li^{2, 3}, LIU Dahui⁴, ZHANG Naiming^{1, 2}, NING Dongwei⁵, YUE Xianrong², XIA Yunsheng^{1, 2†}

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Engineering Laboratory of Soil Fertility and Pollution Remediation, Kunming 650201, China; 3. Plant Protection Institute, Yunnan Agricultural University, Kunming

* 国家自然科学基金项目 (41561057)、院士专家工作站项目 (2015IC022) 和云南农业大学土壤资源利用与保护省创新团队项目 (2015HC018) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41561057), the Academician Expert Workstation Project (No. 2015IC022), and the Yunnan Agricultural University Soil Resources Utilization and Protection Provincial Innovation Team Project

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yshengxia@163.com

作者简介: 李婷 (1994—), 女, 四川达州人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染控制研究。E-mail: li2017210224@163.com

收稿日期: 2019-09-11; 收到修改稿日期: 2019-12-17; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-03-09

650201, China; 4. College of Pharmacy, Hubei University of Chinese Medicine, Wuhan 430065, China; 5. College of Water Resources, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: 【 Objective 】 In order to explore the reduction effects of native arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and intercropping reducing on the N loss from of nitrogen forms in purple soil-water interface in purple soil, a field experiment of runoff simulation under natural rainfalls was carried out in a field of purple soil, in an attempt so that to provide a theoretical basis for protecting the water environment and mitigating slowing the agricultural non-point source pollution caused by the nitrogen loss of from purple soil slope farmlands. 【 Method 】 The experiment was designed to have different planting patterns or mode [monocropping of maize (MM), maize/soybean intercropping (MSI), and monocropping of soybean (MS)] and different mycorrhizal treatments [inhibited (MI) and non-inhibited (NM)]. Samples of runoff and lateral infiltration were collected seven times during the rainy season for analysis of forms of Nitrogen (N) and their concentrations therein, and further for comparison between the treatments in effect on changes in form and translocation of Nitrogen. 【 Result 】 Results show that lateral infiltration or subsoil flow was the main path of N loss from soil-water interface in the purple soil, and nitrate N was the main form of N lost with the subsoil flow. With sampling going on, the concentrations of total N and nitrate N in runoff fluctuated along a rising trend, while the concentration of ammonium N rose firstly and then declined. The concentration of total N concentration in lateral infiltration exhibited a trend of descending firstly, and then ascending and descending again, while the concentration of nitrate N did a gentle descending trend, but the concentration of ammonium N did a gentle trend of increasing first and then decreasing. Among all the composite treatments, Treatment NM+MSI was the lowest in concentration of total N and ammonium N in runoff and lateral infiltration and hence in total N loss, and significantly lower than all the other treatments. Treatment NM+MSI was 13.4% and 20.3%, respectively, lower than Treatment NM and Treatment MI in concentration of total N in runoff, 56.5% and 48.7%, respectively, lower in concentration of total N in lateral infiltration, 50.1% and 43.5%, respectively, lower in total N loss, 10.0% and 16.7%, respectively, lower in concentration of nitrate N in runoff, 51.3% and 42.9%, respectively, lower in concentration of nitrate N in total N loss with runoff, 10.5% and 26.0%, respectively, lower in concentration of ammonium N in runoff, 21.7% and 30.2%, respectively, lower in concentration of ammonium N in lateral infiltration, and 29.6% and 33.7%, respectively, lower in concentration of ammonium N in total N loss with lateral infiltration. 【 Conclusion 】 All the findings indicate that native AMF and maize/soybean intercropping has a certain potential to reduce nitrogen loss from the purple soil via soil-water interface.

Key words: Native arbuscular mycorrhizal fungi; Intercropping; Purple soil; Soil-water interface; Nitrogen form

氮素是植物生长过程中需求量最大的营养元素之一,是陆地生态系统初级生产力的主要限制因子^[1]。但我国集约农业区化肥氮的普遍不合理大量施用^[2],致使施用于田地的肥料超过 50%进入环境中^[3],从而在降雨条件下随径流及淋溶作用流失,形成土-水界面的氮污染流。土-水界面氮污染流的形成实质是流失的氮素在土-水界面扩散的过程,是一种特殊的农业面源污染表现形式。研究表明^[4],除氮气外,化肥氮施用量的近 19.1%会影响环境质量,成为地表水体富营养化、地下水硝酸盐化等环境问题的主要来源,加剧农业面源污染。据 2010 年《我国第一次全国污染源普查公报》显示,种植业是农业源水体污染物排放中总氮的主要来源,其贡献率达 59.1%,其中经地表径流流失总氮量达 32.01 万吨,地下淋溶流失量达 20.74 万吨。这使得研究

氮素在土-水界面的迁移规律及影响因素尤为迫切,对保护土壤及水环境、减缓农业非点源污染也具有十分重要的意义。

广泛分布于自然生态系统的丛枝菌根真菌 (Arbuscular mycorrhizal fungus, AMF),是与植物关系极为密切的土壤微生物之一,能够通过植物根系与陆地上约 92%的植物建立共生关系^[5]。在自然生态系统及农业生态系统中,菌根共生体的作用已被普遍证实^[1-5],在菌根共生体中,AMF 可以促进作物对土壤中矿质养分如氮、磷等的吸收,进而促进作物生长,提高作物产量^[6]。AMF 还能够通过根系分泌物及根外菌丝促进土壤团聚体的形成,改善土壤质量,稳定土壤结构,增加土壤的抗蚀性等^[7-8],从而减少因水土流失带来的养分流失。间作是我国传统的农业耕作方式,合理的间作模式对农业生产所带来的优势已被

广泛承认^[9]。间作可以提高作物对营养元素的吸收利用率,减少土壤氮、磷等养分的残留,促进作物生长^[10],还可维持土壤肥力,减轻水土流失对坡地土壤的冲刷^[11]。由此可见,AMF与间作对减少土壤养分流失均表现出一定的积极作用。

关于菌根与间作协同对减缓农业非点源污染的影响,课题组前期研究表明^[12],菌根真菌与间作体系协同能在一定程度上减少因坡耕地红壤径流流失带来的土壤磷流失,而研究两者协同作用对紫色土-水界面不同形态氮流失的削减效应以及削减潜力,尚缺乏相关研究报道。基于此,本文结合AMF共生理论与间作系统,研究土著AMF对紫色土间作系统上径流及侧渗氮形态变化,分析其在削减坡耕地紫色土-水界面氮素流失方面的协同作用,可为控制西南地区紫色土坡耕地氮流失带来的农业面源污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自滇池流域宝象水库坡地附近,其基本化学性质为:pH7.5,有机质 $24.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $1.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $45.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $5.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

供试植物玉米为水果玉米“好滋味”,大豆为“滇豆4号”。挑选籽粒饱满且大小匀称的种子,用10% H_2O_2 浸泡消毒10 min,用蒸馏水冲洗多次,冲净

后均匀置于放有湿润定量滤纸的培养皿中,于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温培养箱中催芽2 d后播种。

供试抑菌剂为苯菌灵,一种AMF专性抑制剂,可以抑制菌根共生体的生成,使植物的菌根侵染率降低。

1.2 试验设计

试验于2017年5月至9月在云南农业大学科研基地内完成,在自然降雨条件下模拟地表径流氮素迁移试验,模拟坡度为 8° ,共采集7次径流及侧渗水样。昆明6月下旬以阴雨天气为主,下旬平均降雨量为 101.2 mm ,7月中旬降雨天气明显,下旬强降雨天气频发,月均降雨量为 294.9 mm ,8月中下旬降水偏多,多有阵雨,月均降雨量为 153.2 mm ,9月上中旬降雨偏多,中旬以多云有阵雨天气为主,月平均降雨量为 140.8 mm 。模拟试验设置两个因素,分别为种植模式与菌根处理,其中种植模式包括单作玉米(MM)、玉米/大豆间作(MSI)、单作大豆(MS),菌根处理包括抑菌(MI)、未抑菌(NM),共6处理,每处理重复3次。

试验装置(专利号:ZL201420184013.4)为铁皮制作的长方体(见图1),规格长 \times 宽 \times 高= $90\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 0\text{ cm}$,装等量 $0\sim 25\text{ cm}$ 耕层原状土壤,下装碎石,出水孔内侧与土壤接触界面用60目尼龙网封住,且在尼龙网与土壤接触面之间填入一层小石子,以防止土块随渗流水涌入造成渗流管堵塞,起到过滤作用。

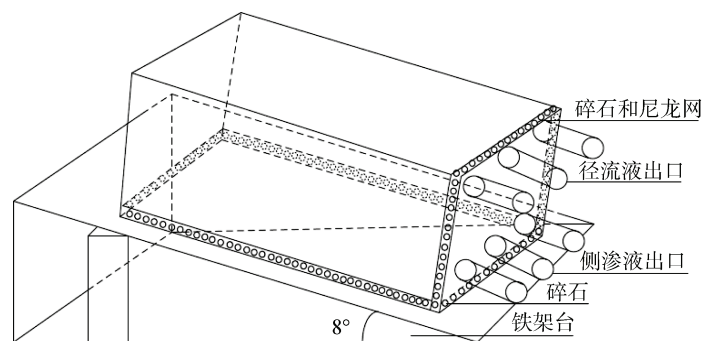


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of the test device

试验采用带状种植,间作处理种植玉米1列,大豆2列,玉米和大豆均为6行,列间距为 7.5 cm ,行间距为 17 cm 。单作玉米和单作大豆分别种植2列和4列,均为6行。单作玉米列间距为 10 cm ,单作大豆列间距为 6 cm ,单作处理行间距与间作处

理相同。于2017年5月20日开始播种,玉米和豆每穴分别为3颗和5颗,长势稳定后依据生长势分别间苗至1株和2株,9月1日收获作物。

供试植物播种前不施用基肥,至植株生长中期分别以 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 K_2SO_4 溶液的形式向土

壤中进行追肥 (N 60 mg·kg⁻¹, P 30 mg·kg⁻¹, K 90 mg·kg⁻¹), 以避免植株在生长期受养分缺失的胁迫。抑菌处理将 5 g 体积分数为 50% 的苯菌灵溶于 4 L 蒸馏水中, 未抑菌处理以 4 L 蒸馏水相应浇灌作为对照, 每 15 天处理一次。

1.3 样品采集与分析测定

试验水样的采集密度为抑菌处理达到一定时间, 在降雨条件下产生有效径流后采集一次水样。采集水样时提前查看天气状况, 若有降雨天气, 则将矿泉水瓶提前固定于径流及侧渗出水口, 若当日降雨产生有效径流及侧渗不足 200 mL, 则舍弃该次水样, 重新采集试验水样。每次采集水样约 500 mL, 采样后立即加入 2 mL 浓硫酸进行酸化处理, 带回实验室放冰箱冷藏保存, 于 7 d 内完成水样总氮、硝态氮、铵态氮测定。其中总氮测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, 硝态氮测定采用紫外分光光度法, 铵态氮测定采用纳氏试剂比色法^[13]。植株根系氮吸收效率 (mg·μg⁻¹) 依据单位根系生物量 (mg) 所对应的植株养分吸收量 (μg) 来计算。

1.4 数据分析

试验数据使用 Excel 2007 统计软件对平均值和标准偏差进行分析, 使用 SPSS 19.0 统计软件对菌根处理和种植模式间进行 Duncan 分析比较, 检验菌根处理与种植模式间的差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结 果

2.1 径流与侧渗各形态氮浓度动态变化

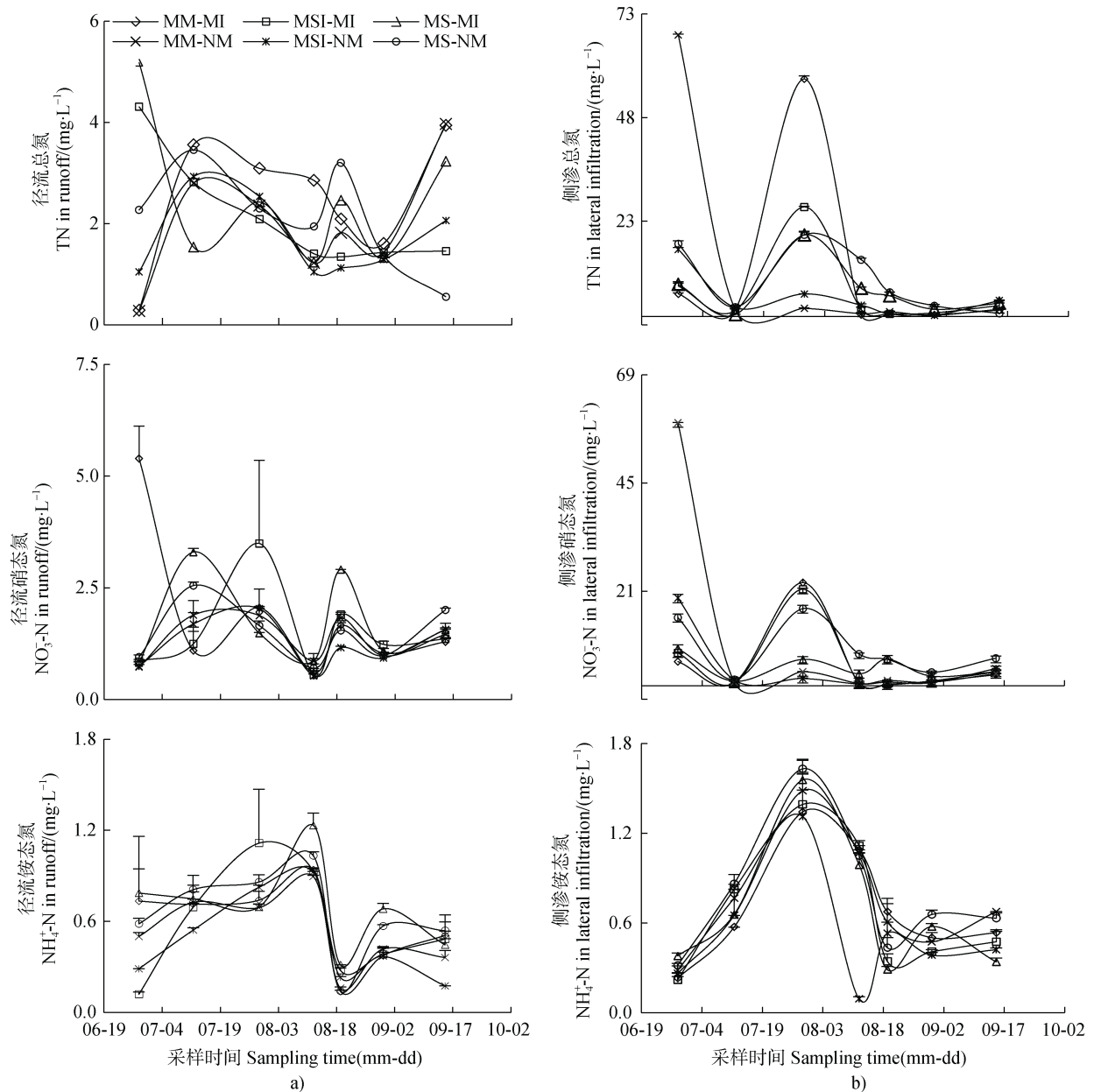
由图 2a 可知, 6 月 28 日采集的径流总氮、铵态氮浓度在所有处理间差异较为明显, 除单作玉米—抑菌处理的硝态氮浓度达到峰值外, 其在各处理间无明显差异。随后的采样时间内径流各形态氮浓度总体增加。8 月 12 日采集的径流总氮、硝态氮浓度较前 2 次采样时间明显下降, 而铵态氮浓度总体达到最大值, 随后总体达到最小值。随后的采样时间中径流总氮、硝态氮浓度总体表现出先下降后上升趋势, 而铵态氮浓度整体呈现出先上升后下降趋势。在 7 次取样时间内, 径流总氮、硝态氮浓度总体呈现出波浪式上升的趋势, 而铵态氮浓度则整体表现出先上升再下降的趋势。

据图 2b 可得, 6 月 28 日采集的侧渗总氮浓度在未抑菌各处理下为最大值; 硝态氮浓度除单作玉

米—抑菌及间作—抑菌处理外, 整体为最大值; 铵态氮浓度在各处理间差异较小。7 月 12 日采集的侧渗总氮、硝态氮浓度在所有处理间无明显差异。7 月 29 日采集的侧渗总氮浓度在抑菌各处理下达到峰值; 硝态氮、铵态氮浓度出现明显增加趋势, 且铵态氮浓度整体达到最大值。随后的采样时间内, 侧渗各形态氮浓度均表现出明显下降并趋于平缓的趋势, 在各处理下的差异较小。在 7 次取样时间内, 侧渗总氮浓度趋势总体呈现出先下降再上升后下降的趋势, 并趋于平缓; 硝态氮浓度整体表现出下降并趋于平缓的趋势; 铵态氮浓度则整体表现出先上升再下降后趋于平缓的趋势。

2.2 菌根真菌与间作对径流与侧渗各形态氮浓度的影响

由图 3a 可见, 在抑菌处理下, 间作处理的径流总氮浓度较单作玉米与单作大豆处理显著降低 18.2%、17.2%; 在未抑菌处理下, 间作处理的径流总氮浓度较单作大豆处理显著降低 20.3%, 较单作玉米处理降低 13.4%。与抑菌—单作玉米、抑菌—单作大豆相比, 未抑菌—间作处理的径流总氮浓度降低约 33.8%、30.9%。所有复合处理中, 间作—未抑菌处理的径流总氮浓度最低, 说明这一复合处理对径流总氮浓度有一定的削减潜力。无论何种种植模式, 未抑菌处理的径流硝态氮浓度明显低于抑菌处理。在抑菌处理下, 间作处理的径流硝态氮浓度较单作玉米处理显著降低约 19.0%, 较单作大豆处理明显降低约 11.5%; 在未抑菌处理下, 相比单作玉米与单作大豆处理, 间作处理的径流硝态氮浓度分别降低约 10.0%、16.7%。在所有复合处理中, 间作—未抑菌处理的径流硝态氮浓度最低, 与单作玉米—抑菌、单作大豆—抑菌相比, 径流硝态氮浓度显著降低 34.0%、28.0%。由此可知, 菌根真菌对径流硝态氮浓度具有一定的削减作用。无论抑菌与否, 间作处理的径流铵态氮浓度明显低于单作处理。在抑菌处理下, 间作处理的径流铵态氮浓度较单作大豆显著降低约 18.3%, 较单作玉米处理降低约 2.4%; 在未抑菌处理下, 间作处理的径流铵态氮浓度较单作玉米处理降低约 10.5%, 较单作大豆处理显著降低约 26.0%。在所有复合处理中, 间作—未抑菌处理的径流铵态氮浓度最低, 相比单作玉米—抑菌与单作大豆—抑菌处理的径流铵态氮浓度降低约 18.3%、31.6%, 说明玉米/大豆间作种植模式对径流铵态氮也有一定的削减作用。



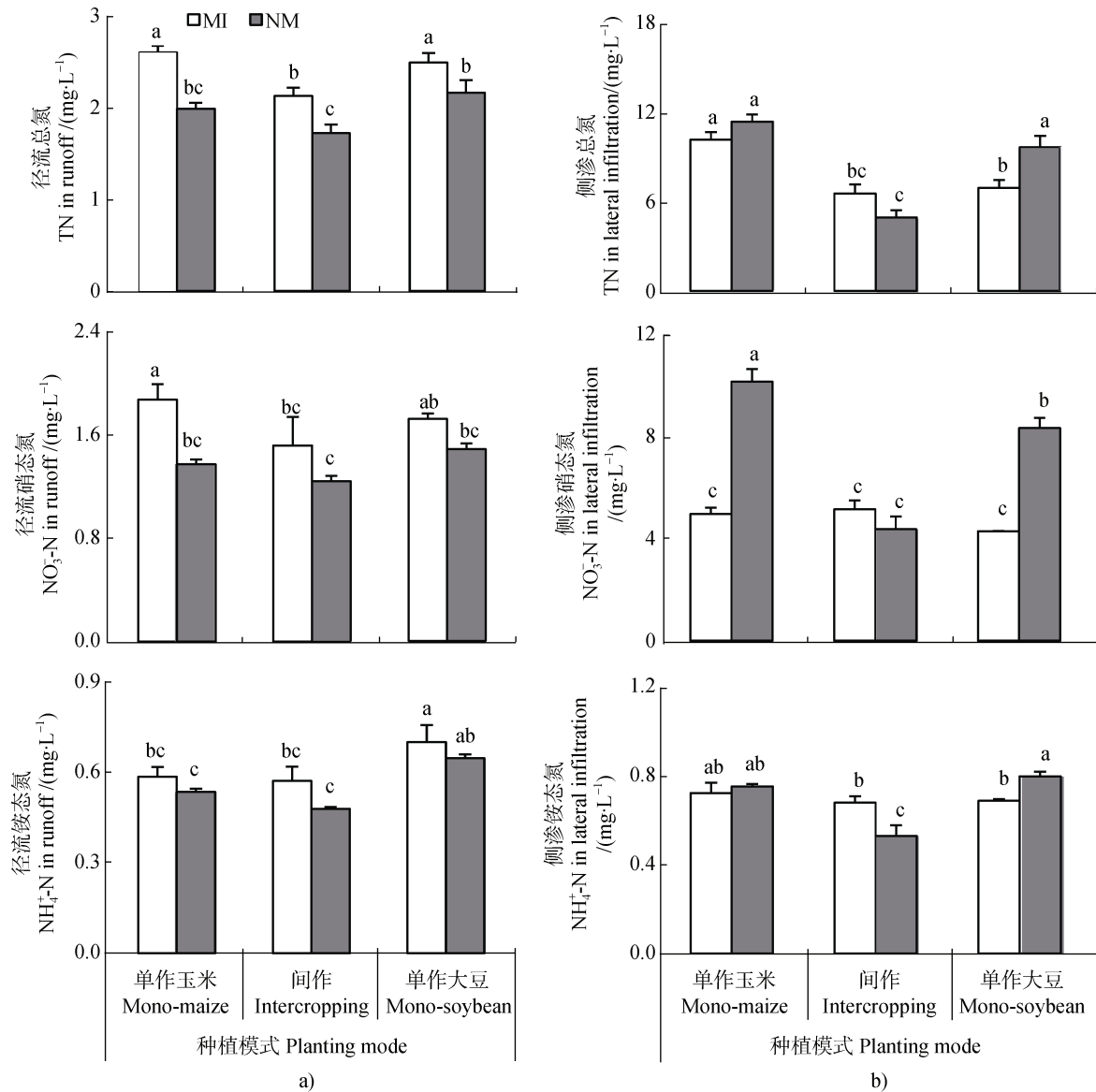
注：MM、MSI、MS 分别代表单作玉米、玉米/大豆间作、单作大豆处理，MI、NM 分别代表抑菌、未抑菌处理。下同。Note: MM, MSI and MS stands for monocropping of maize, maize/soybean intercropping and monocropping of soybean respectively, MI and NM stands for mycorrhizal inhibition and none mycorrhizal inhibition, respectively. The same below.

图 2 径流 (a) 与侧渗 (b) 总氮、硝态氮和铵态氮浓度随时间变化趋势

Fig. 2 Temporal variation of total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in runoff (a) and lateral infiltration (b) in concentration

据图 3b 可知, 间作—未抑菌处理下的侧渗总氮浓度较其他复合处理显著最低。在抑菌处理下, 间作处理的侧渗总氮浓度较单作玉米处理显著降低约 35.6%, 较单作大豆处理降低约 5.5%; 在未抑菌处理下, 间作处理的侧渗总氮浓度较单作玉米和单作大豆处理显著降低约 56.5%、48.7%。与单作玉米—抑菌、单作大豆—抑菌处理相比, 间作—未抑

菌处理的侧渗总氮浓度显著降低约 51.3%、28.6%, 表明间作—未抑菌这一复合处理对侧渗总氮浓度有一定的削减潜力。对于侧渗硝态氮浓度, 在抑菌处理下, 较单作玉米与单作大豆处理, 间作处理增加了侧渗硝态氮浓度; 在未抑菌处理下, 间作处理的侧渗硝态氮浓度较单作玉米和单作大豆处理分别显著降低约 57.0%、47.6%。相比单作玉米—抑菌处理,



注: 图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Note: Different letters represent significant difference ($P < 0.05$). The same below.

图3 菌根处理和种植模式下径流 (a) 与侧渗 (b) 总氮、硝态氮和铵态氮浓度

Fig. 3 Concentrations of total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in runoff (a) and lateral infiltration (b) relative to treatment

间作—未抑菌处理的侧渗硝态氮浓度降低约 12.1%。在所有复合处理中, 间作—未抑菌处理的侧渗铵态氮浓度显著最低。在抑菌处理下, 相比单作玉米与单作大豆处理, 间作处理下的侧渗铵态氮浓度降低约 6.1%、1.3%; 在未抑菌处理下, 较单作玉米与单作大豆处理, 间作处理显著降低侧渗铵态氮浓度, 降幅分别约为 29.6%、33.7%。与单作玉米—抑菌、单作大豆—抑菌处理相比, 间作—未抑菌处理的侧渗铵态氮浓度显著降低约 26.8%、23.1%, 说明玉米/大豆间作这一种植模式对削减侧渗铵态氮浓度具

有一定的作用。

2.3 菌根真菌与间作对根系氮吸收效率及氮流失的影响

由表 1 可知, 无论种植模式如何, 未抑菌处理的根系氮吸收效率均高于抑菌处理, 且未抑菌处理均能不同程度减少径流各形态氮流失量, 与间作处理协同降低了侧渗各形态氮流失量。表明土著菌根真菌能够促进植株根系对氮的吸收利用, 对径流各形态氮素流失能够发挥一定的削减作用, 与间作协同能够减少侧渗各形态氮素流失。

表 1 菌根真菌对根系氮吸收效率及氮削减量的影响

Table 1 Effect of native AMF on N uptake efficiency of roots and different forms of nitrogen in runoff and lateral infiltration

菌根处理比较 Comparison of mycorrhizal treatment	种植模式 Planting mode	根系吸收效率差 Difference in N uptake efficiency of roots / ($\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$)	径流削减量			侧渗削减量		
			Reduction in runoff / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			Reduction in leakage / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		
			总氮 TN	硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$	总氮 TN	硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$
	MM	-0.41	0.61	0.50	0.05	-1.20	-5.16	-0.03
MI-NM	MI	-1.47	0.41	0.28	0.09	1.59	0.78	0.15
	SI	-1.85						
	MS	-0.34	0.33	0.23	0.05	-2.70	-4.03	-0.11

注：表中效率差或削减量为相同种植模式下，抑菌处理的根系氮吸收效率及径流（侧渗）平均流失量与未抑菌处理的根系氮吸收效率及径流（侧渗）平均流失量的差值。Note: The difference or decrement in efficiency was obtained by subtracting root N uptake efficiency and mean N loss with runoff (lateral infiltration) in NM treatment from their respective ones in MI treatment under the same planting mode.

由表 2 可知，在抑菌处理下，间作处理的根系氮吸收效率均高于单作玉米与单作大豆处理，且间作处理均能减少径流、侧渗总氮流失量；在未抑菌处理下，单作玉米与单作大豆处理的根系氮吸收效率均低于间作处理，同时，间作处理均能不同程度

减少径流、侧渗各形态氮流失量。无论是否抑菌，间作处理的根系氮吸收效率均高于单作处理，且间作处理均能削减径流及侧渗总氮流失量。表明，间作能在一定程度上促进植株对氮素的吸收，减少土壤氮素残留，削减氮素流失。

表 2 间作对根系氮吸收效率及氮削减量的影响

Table 2 Effect of intercropping on N uptake efficiency of roots and different forms of nitrogen in runoff and lateral infiltration

菌根处理 Mycorrhizal treatment	种植模式比较 Comparison of planting mode	根系吸收效率差 Difference in N uptake efficiency of roots / ($\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$)	径流削减量			侧渗削减量		
			Reduction in runoff / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)			Reduction in leakage / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)		
			总氮 TN	硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$	总氮 TN	硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$
MI	MM-MSI	-2.51	0.47	0.36	0.01	3.60	-0.54	0.04
	MS-MSI	-10.94	0.36	0.20	0.13	0.38	-0.86	0.01
NM	MM-MSI	-3.57	0.27	0.14	0.06	6.39	5.76	0.22
	MS-MSI	-12.45	0.44	0.25	0.17	4.67	3.95	0.27

注：表中效率差或削减量为相同菌根处理下，单作玉米（单作大豆）处理的根系氮吸收效率及径流（侧渗）平均流失量与间作处理的根系氮吸收效率及径流（侧渗）平均流失量的差值。Note: The difference or decrement in efficiency in the table was obtained by subtracting root N uptake efficiency and mean N loss with runoff (lateral infiltration) under intercropping from their respective ones under monocropping of maize or of soybean, both under the same mycorrhizal treatment.

由表 3 可知，径流和侧渗各形态氮流失的主要形态为硝态氮，侧渗是各形态氮流失的主要途径，通过侧渗流失的总氮、硝态氮含量均占总的流失量的 70%以上，铵态氮含量占总的流失量的 50%左右。无论是否抑菌，玉米/大豆间作处理均能不同程度减少各形态氮流失量。在抑菌处理下，较单作玉米处理，间作处理显著减少总流失量中总氮流失量，降

幅约达 32.0%，且明显减少总流失量中硝态氮和铵态氮流失量；在未抑菌处理下，相比单作玉米和单作大豆处理，间作处理显著减少总流失量中各形态氮含量，其中总流失量中总氮、硝态氮、铵态氮流失量较单作玉米显著减少约 50.1%、51.3%、21.7%，较单作大豆显著降低了约 43.5%、42.9%、30.2%。无论何种种植模式，无论是否抑菌，间作—未抑菌

表 3 菌根真菌与间作对径流、侧渗氮总流失量及分配比例的影响

Table 3 Total N loss and its distribution ratio in runoff and lateral infiltration relative to treatment

菌根处理 Mycorrhizal treatment	种植模式 Planting mode	总流失量 Total loss / (mg·L ⁻¹)			侧渗流失量/总流失量 Loss in lateral infiltration/Total loss /%		
		总氮 TN	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	总氮 Total N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N
	MM	12.70a	6.83c	1.31ab	79.6	72.5	55.1
MI	MSI	8.63b	6.65c	1.25b	75.4	77.1	54.2
	MS	9.38b	5.99c	1.39ab	73.5	71.3	49.5
NM	MM	13.29a	11.49a	1.28b	85.1	88.0	58.3
	MSI	6.64c	5.59c	1.01c	74.1	77.9	52.4
	MS	11.75a	9.79b	1.44a	81.6	84.8	55.1

处理的各形态氮总流失量最小。这说明侧渗即壤中流为紫色土氮素流失的主要途径,硝态氮为紫色土氮素流失的主要形态,间作系统与土著 AMF 协同具有削减紫色土氮素流失的潜力。

3 讨论

氮是许多生态系统中的关键限制营养元素,植物主要通过无机形式获取土壤中的氮,其中 NH₄⁺和 NO₃⁻是土壤中最易被植物吸收和利用的两类基础无机氮源,而土壤中的氮大多以有机形式存在,植物吸收有机形式氮依赖于微生物将其分解成无机形式^[14]。菌根真菌在植物获取土壤养分中起着关键作用,是农业和生态系统中最重要土壤微生物,能够促进土壤中营养元素的吸收和流动^[15],可为宿主植物吸收和转运大量的无机氮^[16]。研究表明,AMF 可以加快土壤中植物难以利用的有机氮的矿化并直接从有机物质中获取氮,增加植物可利用的氮素^[14],同时还可促进植物对土壤中氮素的吸收,增强植物对氮素的吸收利用效率,减少土壤氮残留。本研究中,无论种植模式如何,未抑菌处理的根系氮吸收效率均高于抑菌处理。汪新月等^[17]研究发现,接种 AMF 显著提高了玉米和大豆氮吸收量,减少了玉米和大豆根际土壤的碱解氮残留。此外,AMF 可以改良土壤结构,其侵染植物后生成的菌丝网络及菌丝分泌物可以促进土壤水稳性团聚体的形成和稳定,增强土壤的抗蚀性,减少水土流失^[18-19],从而减少因水土流失带来的氮素养分流失。说明 AMF

可通过增强植株对氮素的吸收,减少土壤中氮素残留的同时,稳定土壤结构,阻控水土流失,进而削减土壤中的氮素流失。本试验中,无论何种种植模式,抑菌处理的径流总氮、硝态氮、铵态氮浓度均明显高于未抑菌处理;且间作处理下,未抑菌处理的侧渗总氮、硝态氮、铵态氮浓度均明显低于抑菌处理。张淑娟^[20]研究发现,接种 AMF 提高了水稻对氮磷的吸收量及其分配至稻穗的比例,且能够降低稻田退水的氮磷浓度的平均值,以及溶解态氮磷浓度和颗粒态氮磷浓度,可减少水稻季农田氮磷流失。此外,6月28日以及7月29日采集的侧渗水样各形态氮浓度均明显高于其他采样时间,这可能是因为该采样期间玉米和大豆植株尚处于生长前期,而玉米和大豆生长前期对土壤中的氮、磷、钾等养分吸收较少,土壤中留有多余未被利用氮素,且昆明6月下旬降雨量较大,7月下旬多强降雨天气。降雨强度越大,紫色土坡面产沙量和侵蚀率越大,水土流失越严重^[21],从而使土壤中未被利用的氮素在降雨条件下大量流失。在整个采样时间内,单作玉米和单作大豆处理下,未抑菌处理的侧渗总氮、硝态氮、铵态氮浓度高于抑菌处理,这可能是因为 AMF 对土壤中无机态氮发挥了较强的活化作用^[14],加之整个取样时间处于雨季,降雨量大,降雨频繁,且紫色土本身易被侵蚀,增强了土壤的淋溶作用,加剧了土壤养分的流失。

间作在我国传统农业发展的过程中具有重要作用,对于维护农业的可持续性发展具有重要意义。豆科/禾本科间作是一种典型、常见的间作种植模

式,能够使禾本科作物获得更多氮养分同时使豆科作物的结瘤固氮作用充分发挥,实现两者氮素利用的生态位分离^[22],促进其生长,提高植株对氮素的吸收利用率,降低土壤氮残留^[23-24]。本研究中,间作处理的植株根系氮吸收效率均高于单作处理。此外,间作还可以通过提高植株根系密度及根型分布,改善土壤水稳性团聚体结构,提高土壤有机质含量^[11],增强土壤的固土能力,从而有效保持水土,降低因水土流失带来的氮素流失风险。另有研究报道^[25],玉米与花椒间作,对径流流失量和泥沙流失量的控制均有较好的效果,对控制径流中氮素流失的也有较好的效果。说明间作可能通过提高植株氮素吸收利用率,降低土壤氮素残留的同时,增强土壤抗蚀能力,保持水土,减少水土流失,从而削减土壤氮素流失。本试验表明,无论抑菌与否,间作处理的径流及侧渗总氮浓度较单作玉米与单作大豆处理均有不同程度降低。已有研究^[26]证实,玉米/大豆间作均能在一定程度上降低径流及侧渗总氮、总磷浓度,对土壤中氮磷养分的流失具有一定的控制作用,这与本研究一致。此外,整体取样时间内,抑菌处理下,间作处理的侧渗硝态氮浓度大于单作玉米与单作大豆,这可能是间作条件下,玉米对土壤中氮素始终处于竞争优势地位^[27],缓解了大豆固氮的“氮阻遏”作用^[22],使大豆植株发挥了较强的固氮作用,使土壤中氮含量增加,在降雨条件下随水土流失。

目前,在利用菌根技术与间作系统相结合探讨两者协同作用对植株生长及养分吸收、生态环境修复等方面的影响方面,已引起相关研究人员的关注,但关于土著菌根菌与间作模式的协同作用对削减地表径流及侧渗氮的影响却少有研究。本研究结果表明,对于径流,在所有处理中,间作—未抑菌处理的径流各形态氮含量最低;对于侧渗,除单作大豆—抑菌处理的侧渗硝态氮浓度外,间作—未抑菌处理均不同程度上降低了侧渗各形态氮浓度;对于流失总量,间作—未抑菌处理的各形态氮总流失量最低;间作—未抑菌处理的玉米及大豆根系氮吸收效率均高于其他处理。表明土著菌根真菌协同豆科/禾本科间作模式可能通过增强植株对土壤中氮的吸收利用率,减少土壤中氮素残留,同时稳定土壤结构,提高土壤的抗蚀能力,阻控水土流失,从而削减径流及侧渗氮流失。此外,也有研究显示,壤中流是紫色土氮素流失的主要途径^[28-29],硝态氮是其流失

的主要形态^[30],这与本研究一致。这可能是由于紫色土本身土层浅薄且质地疏松,易于使土壤养分淋失,而降雨条件下壤中流在相同降雨时间内产流小于径流,对流失的氮含量稀释作用小^[31],从而使土壤养分大量通过壤中流流失^[29],而硝态氮由于易溶于水 and 流动性强,更易于流失。可见,土著菌根真菌与合理的间作系统相结合可有望减少因坡耕地紫色土 N 流失而造成水体富营养化,对减缓农业非点源污染有一定的潜力。

4 结 论

坡耕地氮迁移模拟研究发现,侧渗即壤中流为紫色土氮素流失的主要途径,硝态氮为紫色土氮素流失的主要形态。无论何种种植模式,土著菌根真菌处理的径流各形态氮含量均低于抑菌处理。且间作处理下,土著菌根真菌处理的侧渗各形态氮含量亦低于抑菌处理。无论抑菌与否,间作处理的径流、侧渗总氮浓度低于单作处理。所有复合处理中,间作-土著菌根真菌处理的径流、侧渗总氮浓度最低;且间作-土著菌根真菌处理的各形态氮总流失量最小。可见土著菌根真菌与间作种植模式协同对削减紫色土-水界面各形态氮素流失显示出了较大潜力。

参考文献 (References)

- [1] Chen B D, Yu M, Hao Z P, et al. Research progress in arbuscular mycorrhizal technology[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 1035—1046. [陈保冬, 于萌, 郝志鹏, 等. 丛枝菌根真菌应用技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 1035—1046.]
- [2] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041—3046.
- [3] Zhang F S, Chen X P, Vitousek P. Chinese agriculture: An experiment for the world[J]. *Nature*, 2013, 497(7447): 33—35.
- [4] Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2): 259—273. [朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259—273.]
- [5] Asmelash F, Bekele T, Birhane E. The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in the restoration of degraded lands[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 1095. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01095>.

- [6] Elhindi K M, El-Din A S, Elgorban A M. The impact of arbuscular mycorrhizal fungi in mitigating salt-induced adverse effects in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2017, 24 (1): 170—179.
- [7] Feng G, Zhang Y F, Li X L. Effect of external hyphae of arbuscular mycorrhizal plant on water-stable aggregates in sandy soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15 (4): 99—102. [冯固, 张玉凤, 李晓林. 丛枝菌根真菌的外生菌丝对土壤水稳性团聚体形成的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15 (4): 99—102.]
- [8] Salvioli A, Bonfante P. Systems biology and “omics” tools: A cooperation for next-generation mycorrhizal studies[J]. Plant Science, 2013, 203/204: 107—114.
- [9] Wang Z G, Jin X, Bao X G, et al. Intercropping enhances productivity and maintains the most soil fertility properties relative to sole cropping[J]. PLoS One, 2014, 9 (12): e113984. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113984>.
- [10] Liu X R, Bao X G, Wang Z G, et al. Effects of continuous intercropping on crop productivity and chemical properties of soil fertility in orthic antrosols[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 (4): 951—962. [柳欣茹, 包兴国, 王志刚, 等. 灌漠土上连续间作对作物生产力和土壤化学肥力的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53 (4): 951—962.]
- [11] Ma Z P, Fan M P, Chen X Q, et al. Study on root system and red soil anti-erodibility of slope farmland under intercropping of maize and soybean[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30 (4): 68—73. [马志鹏, 范茂攀, 陈小强, 等. 间作模式下作物根系与坡耕地红壤抗蚀性的关系[J]. 水土保持学报, 2016, 30 (4): 68—73.]
- [12] Zhang L, Jia G J, Xia Y S, et al. Effects of mycorrhiza and intercropping on phosphorus transference on sloped red soil land in Dianchi watershed[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28 (5): 760—766. [张丽, 贾广军, 夏运生, 等. 菌根和间作对滇池流域红壤磷素迁移的影响[J]. 环境科学研究, 2015, 28 (5): 760—766.]
- [13] State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and analysis methods for water and waste water. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 254—285. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 254—285.]
- [14] Hodge A, Campbell C D, Fitter A H. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material[J]. Nature, 2001, 413 (6853): 297—299.
- [15] He X H, Critchley C, Bledsoe C. Nitrogen transfer within and between plants through common mycorrhizal networks(CMNs) [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2003, 22 (6): 531—567.
- [16] Hodge A, Fitter A H. Substantial nitrogen acquisition by arbuscular mycorrhizal fungi from organic material has implications for N cycling[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107 (31): 13754—13759.
- [17] Wang X Y, Shi J, Yue X R, et al. Effects of AMF inoculation on maize and soybean interspecific competition of N uptake on red soil under intercropping condition[J]. Mycosystema, 2017, 36 (7): 972—982. [汪新月, 史静, 岳献荣, 等. 接种 AMF 与间作对红壤上玉米和大豆间氮素竞争的影响[J]. 菌物学报, 2017, 36 (7): 972—982.]
- [18] Peng S L, Guo T, Liu G C. The effects of arbuscular mycorrhizal hyphal networks on soil aggregations of purple soil in southwest China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 411—417.
- [19] Ye J S, Li T, Hu Y J, et al. Influences of AM fungi on plant growth and water-stable soil aggregates under drought stresses[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (4): 1080—1090. [叶佳舒, 李涛, 胡亚军, 等. 干旱条件下 AM 真菌对植物生长和土壤水稳性团聚体的影响[J]. 生态学报, 2013, 33 (4): 1080—1090.]
- [20] Zhang S J. Study on reduction in nitrogen and phosphorus in arbuscular mycorrhiza-paddy field ecosystem[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. [张淑娟. 丛枝菌根—稻田生态系统对氮磷的削减功能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.]
- [21] Sun L L, Zha X, Huang S Y, et al. Effects of different rainfall intensity on the slope erosion process in purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32 (5): 18—23. [孙丽丽, 查轩, 黄少燕, 等. 不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (5): 18—23.]
- [22] Li L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: Current knowledge and perspectives[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24 (4): 403—415. [李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24 (4): 403—415.]
- [23] Zhang D, Long H Y, Jin J, et al. Effects of growth interaction effect of Leguminous and Gramineous pasture intercropping and absorption of nutrient and phosphorus on pasture expression[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27 (10): 15—22. [张德, 龙会英, 金杰, 等. 豆科与禾本科牧草间作的生长互作效应及对氮、磷养分吸收的影响[J]. 草业学报, 2018, 27 (10): 15—22.]
- [24] Li C J, Li Y Y, Yu C B, et al. Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in northwest China[J]. Plant and Soil, 2011, 342 (1/2): 221—231.

- [25] Ding Z L, Zu Y Q, Chen J J, et al. Characteristics of surface runoff, sediment, N and P losses from two agro-forest plantation patterns in Dianchi Basin[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9 (11): 5301—5307. [丁志磊, 祖艳群, 陈建军, 等. 滇池流域 2 种坡耕地农林复合系统的地表径流、泥沙输出及径流 N、P 流失的特征[J]. 环境工程学报, 2015, 9 (11): 5301—5307.]
- [26] Zhong X, Zhang L, Zhang N M, et al. Soil N and P loss in slope farmland of Dianchi watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32 (3): 42—47. [钟雄, 张丽, 张乃明, 等. 滇池流域坡耕地土壤氮磷流失效应[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (3): 42—47.]
- [27] Zhao Q X, Shi J, Xia Y S, et al. Effect of AMF inoculation on N uptake of interspecific competition between maize and soybean growing on the purple soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50 (14): 2696—2705. [赵乾旭, 史静, 夏运生, 等. AMF 与隔根对紫色土上玉米||大豆种间氮竞争的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50 (14): 2696—2705.]
- [28] Zhou M H, Zhu B, Wang T, et al. Phosphorus losses and effects of fertilization on sloping cropland of purple soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (11): 1374—1381. [周明华, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. 水利学报, 2010, 41 (11): 1374—1381.]
- [29] Lin C W, Luo C Y, Pang L Y, et al. Effect of different fertilization methods and rain intensities on soil nutrient loss from a purple soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44 (9): 1847—1854. [林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同雨强和施肥方式对紫色土养分损失的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44 (9): 1847—1854.]
- [30] Chen W L, Gao Y, Lin Y M, et al. Nitrogen leaching and associated environmental health effect in sloping cropland of purple soil[J]. Environmental Science, 2014, 35 (6): 2129—2138. [陈维梁, 高扬, 林勇明, 等. 紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应[J]. 环境科学, 2014, 35 (6): 2129—2138.]
- [31] Xie M X, Zhang Z Y, Zhang P C, et al. Law of nitrate transfer and loss in purple sloping farmland and its numerical simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34 (19): 147—154. [谢梅香, 张展羽, 张平仓, 等. 紫色土坡耕地硝态氮的迁移流失规律及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (19): 147—154.]

(责任编辑：卢 萍)