

土著 AMF 与玉米/大豆间作对红壤径流氮形态变化的响应

李婷^{1,2}, 张丽^{1,2}, 李朝丽¹, 张乃明^{1,2}, 岳献荣¹, 刀博福¹, 夏运生^{1,2}

(1.云南农业大学,昆明 650201;2.云南省土壤培肥与污染修复工程实验室,昆明 650201)

摘要: 为了研究土著丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)与间作模式对坡耕地红壤径流氮形态变化的响应,通过自然降雨条件下的径流小区模拟试验,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(喷施苯菌灵)、未抑菌)进行研究。根据2017年6—9月采集的6次径流水样,分析比较菌根与间作复合处理下径流氮形态变化迁移特征。结果表明:在6次取样时间内,地表径流总氮浓度呈先上升后下降的趋势,硝态氮浓度呈先上升后下降再上升的趋势,而铵态氮浓度则表现出整体下降的趋势,并趋于平缓。所有复合处理中,间作—未抑菌处理的径流总氮浓度最低,较单作玉米—抑菌与单作大豆—抑菌处理显著降低35.0%和42.1%。无论何种种植模式,未抑菌处理的径流硝态氮浓度均明显低于抑菌处理,其中间作—未抑菌处理的径流硝态氮浓度较抑菌处理下的单作玉米与单作大豆处理显著降低,降幅分别为26.2%和33.9%。无论是否抑菌,间作处理的径流铵态氮浓度均低于单作玉米与单作大豆处理,间作—未抑菌处理下其浓度最低,较单作玉米—抑菌与单作大豆—抑菌处理明显降低34.8%和28.2%。由此可见,土著 AMF 与玉米/大豆间作对径流氮流失具有一定的协同削减潜力。

关键词: 土著丛枝菌根真菌; 间作; 红壤; 氮形态

中图分类号: S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0021-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.004

Response of Native Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Maize/Soybean Intercropping to Nitrogen Forms Changes in Runoff on Red Soil

LI Ting^{1,2}, ZHANG Li^{1,2}, LI Zhaoli¹, ZHANG Naiming^{1,2},

YUE Xianrong¹, DAO Bofu¹, XIA Yunsheng^{1,2}

(1.Yunnan Agricultural University, Kunming 650201; 2.Yunnan Engineering Laboratory of Soil Fertility and Pollution Remediation, Kunming 650201)

Abstract: In order to study the response of native arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and intercropping patterns to nitrogen (N) forms changes in runoff on red soil, different planting patterns (mono-maize, maize/soybean intercropping, mono-soybean) and different mycorrhizal treatments (mycorrhizal inhibition, none mycorrhizal inhibition) were designed by simulating runoff experiment under natural rainfall. The migration characteristics of N of different forms in runoff under the combined treatments of mycorrhizal and intercropping were analyzed using the six runoff water samples collected from June to September in 2017. The results showed that during the sampling times, the total N concentrations in runoff increased firstly and then decreased, while the concentrations of nitrate N showed a trend of increasing firstly, then decreasing and increasing again, and the ammonium N concentrations decreased firstly and leveled off then. Under all combined treatments, the total N concentrations in runoff was the lowest under the intercropping-uninhibited treatment, which was about 35.0% and 42.1% lower than those of mono-maize and mono-soybean under mycorrhizal inhibition treatments respectively. Regardless of the planting modes, the concentrations of nitrate N in runoff under the uninhibited treatment was lower than that of the inhibited treatments, which were significantly lower than those of mono-maize and mono-soybean under mycorrhizal inhibition treatments, the reduction rate were 26.2% and 33.9% respectively. Regardless of whether the mycorrhizal inhibition was applied or not, the concentrations of ammonium N in runoff with intercropping treatment were

收稿日期:2019-02-18

资助项目:国家自然科学基金项目(41561057);院士专家工作站项目(2015IC022);云南农业大学土壤资源利用与保护省创新团队开放基金项目(2015HC018)

第一作者:李婷(1994—),女,在读硕士研究生,主要从事农业面源污染控制研究。E-mail:li2017210224@163.com

通信作者:夏运生(1975—),男,教授,硕士生导师,主要从事农业面源污染控制及菌根生理生态研究。E-mail:yshengxia@163.com

lower than those of mono treatments, which was the lowest under intercropping-uninhibited treatment. Compared with mono-corn and mono-soybean under mycorrhizal inhibition treatments, the reductions were 34.8% and 28.2% respectively. These results indicated that native AMF and intercropping treatments had a certain synergistic reduction potential for runoff nitrogen loss on red soil.

Keywords: native arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); intercropping; red soil; nitrogen forms

氮(N)素作为陆地生态系统生产力的重要限制因子,是植物需求量最大的营养元素^[1],土壤中氮含量高低可在一定程度上成为限制作物生长和产量高低的重要因素。为保证作物产量,氮肥得以大量施用,我国氮肥年消费量 2010 年已达 3 200 万 t,占世界化肥年总消费量的 19.6%。但我国氮肥当季利用率低,仅约为 35%,远低于国际平均水平^[2],每年约有 1 000 万 t 氮素以淋溶或径流等形式损失进入受纳水体^[3-4],成为水体富营养化的主要来源^[5],进而加剧了农业面源污染。据 2010 年《第一次全国污染源普查公报》^[6]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 t。有研究^[7]指出,地表径流对暖季(5—10 月)总氮负荷贡献率约为 32%~69%。因此,研究地表径流氮流失规律对保护水环境、减缓农业面源污染具有重要意义。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza fungi, AMF)是自然界普遍存在的一种菌根真菌,是与植物关系极为紧密的一种土壤微生物^[8],能与绝大部分陆生维管植物根系形成互惠共生体^[9]。有研究^[10]表明,AMF 能够提高宿主植物对氮、磷等营养元素的吸收,其贡献率分别为 25%,80%^[11]。此外,AMF 还可影响土壤团聚体的形成与稳定,改善土壤结构^[12]。作为我国农业的传统耕种模式,间作可实现作物地上部光、热等资源以及地下部水分、养分等资源的充分高效利用。而禾本科与豆科间作优势已得到大量研究^[13-16],该种植模式可改善豆科植物的结瘤,促进豆科作物进一步固氮,同时使禾本科作物吸收更多的氮^[13-14],提高间作作物氮的吸收利用效率^[15],降低土壤氮残留^[16];且间作条件下,植株覆盖更广,植株根系更为发达^[17],土壤抗剪能力增强,可减缓坡地水土流失^[18]。

张丽等^[19]选取玉米/大豆间作的红壤径流区研究了菌根和间作对滇池流域红壤磷素迁移的影响,发现菌根真菌协同玉米/大豆间作体系能在一定程度上减少坡耕地红壤磷的径流流失,对滇池流域农业非点源污染具有一定削减潜力。但是有关菌根与间作的协同作用对红壤径流氮形态变化的响应研究尚缺乏报道。基于此,本文结合菌根技术与间作系统,研究了土著 AMF 对红壤间作系统上径流氮形态变化,分析其在削减坡耕地红壤氮素流失方面的协同作用,可为控制南方坡耕地氮流

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晋宁县坡地红壤,pH 为 6.22,有机质含量为 23.30 g/kg,有效磷含量为 5.76 mg/kg,总磷含量为 1.0 g/kg,碱解氮含量为 34.70 mg/kg,总氮含量为 1.12 g/kg。

供试植物玉米品种为“农大 108”,大豆为本地大豆。挑选籽粒饱满且大小匀称的种子,用 10% H₂O₂ 浸泡消毒 10 min,用蒸馏水冲洗多次,洗净后均匀置于放有湿润定量滤纸的培养皿中,于 25 °C 恒温培养箱中催芽 2 天后播种。

供试抑菌剂为苯菌灵,一种菌根真菌专性抑制剂,可以抑制菌根共生体的生成,降低植物的菌根感染率。

1.2 试验设计

试验于 2017 年 6—9 月在云南省农科院药用植物研究所实验室室外进行,在自然降雨条件下模拟地表径流氮素迁移的小区试验(图 1),模拟设定坡度为 15°,2017 年 6—9 月共采集 6 次径流水样。昆明 7 月中旬降雨天气明显,下旬强降雨天气频发,月平均降水量为 294.9 mm,8 月中下旬降水偏多,多有阵雨,月平均降水量为 153.2 mm,9 月上中旬降雨偏多,中旬以多云有阵雨天气为主,月平均降水量为 140.8 mm。径流模拟试验设置 2 个因素,分别为种植模式(单作玉米、玉米/大豆间作、单作大豆)(图 2)与菌根处理(抑菌、未抑菌),共 6 个处理,每个处理重复 3 次。

试验装置为铁皮制作的长方体,规格长×宽×高为 90 cm×30 cm×30 cm,装等量 0—25 cm 耕层原状土壤,下装碎石,出水孔内侧与土壤接触界面用尼龙网封住,且在尼龙网与土壤接触面之间填入 1 层小石子,以防止土块随渗流水涌入渗流管内造成堵塞,起到过滤作用,用矿泉水瓶收集径流水溶液。

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。玉米和大豆每穴分别为 3,5 颗,长势稳定后依据生长势分别间苗至 1,2 株。

供试植物播种前不施用基肥,为避免作物生长期间受养分缺失的胁迫,于植株生长中期分别以溶液的形式向土壤中进行追肥(N 60 mg/kg,P 30 mg/kg,K 90 mg/kg),分别以 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 K_2SO_4 的形式加入。抑菌处理时将 5 g 体积分数为 50% 的苯菌灵溶于 4 L 的水中,未抑菌处理以 4 L 自来水浇灌作为对照,每 15 天处理 1 次。

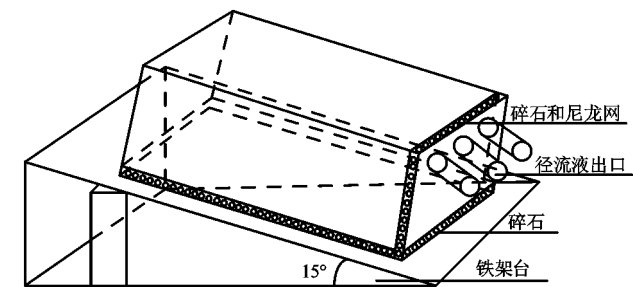


图 1 径流试验模拟装置示意

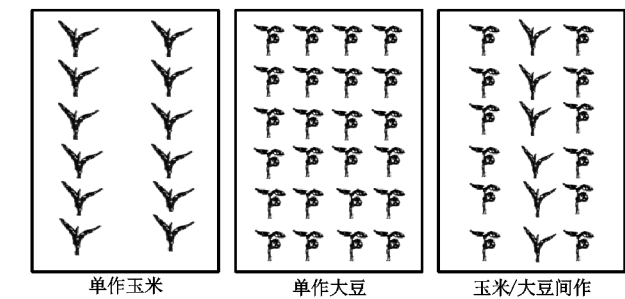


图 2 模拟试验植株布设示意

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后采集 1 次,采集水样时提前查看当日天气预报,若有降雨,将收集水样的矿泉水瓶提前固定于径流出水口,若当日产生有效径流不足 200 mL,则不作为径流水样,重新采集。每次采集水样 500 mL,采样后加入 2 mL 浓 H_2SO_4 进行酸化处理后立即带回实验室,放冰箱冷藏保存,于 7 天内完成测定。试验采集水样主要测定总氮(碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法)、硝态氮(紫外分光光度法)及铵态氮(靛酚蓝比色法)3 个指标^[20]。

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 结果与分析

2.1 地表径流各形态氮随采样时间的动态变化趋势

由图 3 可知,7 月 12 日采集的地表径流铵态氮浓度为最大值,随后采集的径流铵态氮浓度随时间推移总体呈下降趋势。7 月 29 日采集的径流总氮、硝态氮浓度较 7 月 12 日明显增加,且除单作玉米—抑菌、单作大豆—未抑菌处理硝态氮浓度外,整体达到最大值。8 月 12 日径流总氮、硝态氮浓度在所有处

理间均明显下降,随后采集的径流总氮、硝态氮浓度整体略有上升。8 月 19 日单作玉米—抑菌处理的径流硝态氮浓度达到最大值。在 8 月 30 日采集的径流水样中,单作玉米—抑菌处理的总氮浓度较 8 月 19 日明显增加;单作大豆—未抑菌处理的硝态氮浓度达到最大值。在 6 次取样时间内,地表径流总氮浓度总体呈现出先上升后下降的趋势,硝态氮浓度总体呈先上升后下降再上升的趋势,而铵态氮浓度则表现出整体下降的趋势,并趋于平缓。

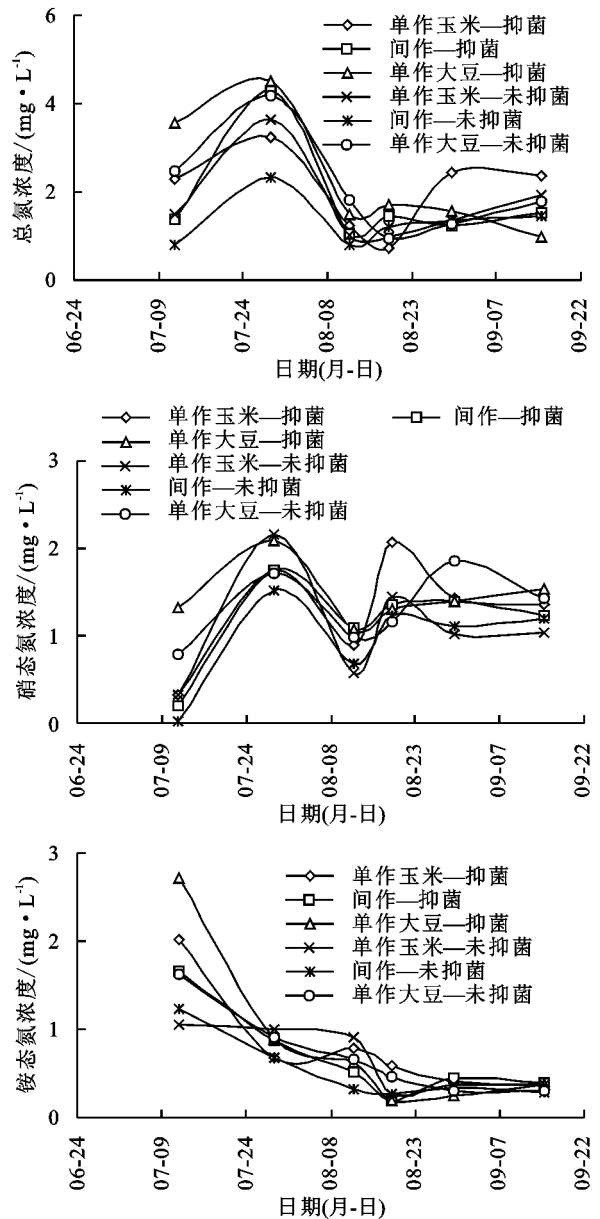


图 3 径流总氮、硝态氮和铵态氮浓度随时间变化

2.2 菌根与间作对地表径流各形态氮平均浓度的影响

由图 4 可知,无论抑菌与否,无论何种种植模式,间作—未抑菌处理的径流总氮浓度显著低于其他处理。在抑菌处理下,间作处理的总氮浓度显著低于单作大豆,且较单作玉米降低 5.9%;在未抑菌处理下,间作处理的总氮浓度显著低于单作玉米与单作大豆处理,降幅分别为 23.5%,35.8%。与抑菌—单作玉

米相比,间作—未抑菌处理的径流总氮浓度降低了 35.0%;与抑菌—单作大豆相比,未抑菌—间作处理的径流总氮浓度降低了 42.1%。所有复合处理中,间作—未抑菌处理的径流总氮浓度最低,说明这一组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,间作—未抑菌处理的径流硝态氮浓度明显低于其他处理。在抑菌处理下,间作处理的硝态氮浓度显著低于单作大豆处理,且相比单作玉米处理,间作处理的径流硝态氮浓度降低 9.8%;在未抑菌处理下,间作处理的径流硝态氮浓度较单作大豆处理显著降低 27.4%,较单作玉米处理明显降低 12.1%。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,较单作玉米—抑菌与单作大豆—抑菌处理的径流硝态氮浓度显著降低,降幅分别为 26.2%和 33.9%。由此可见,菌根真菌对径流硝态氮浓度具有一定的削减作用。

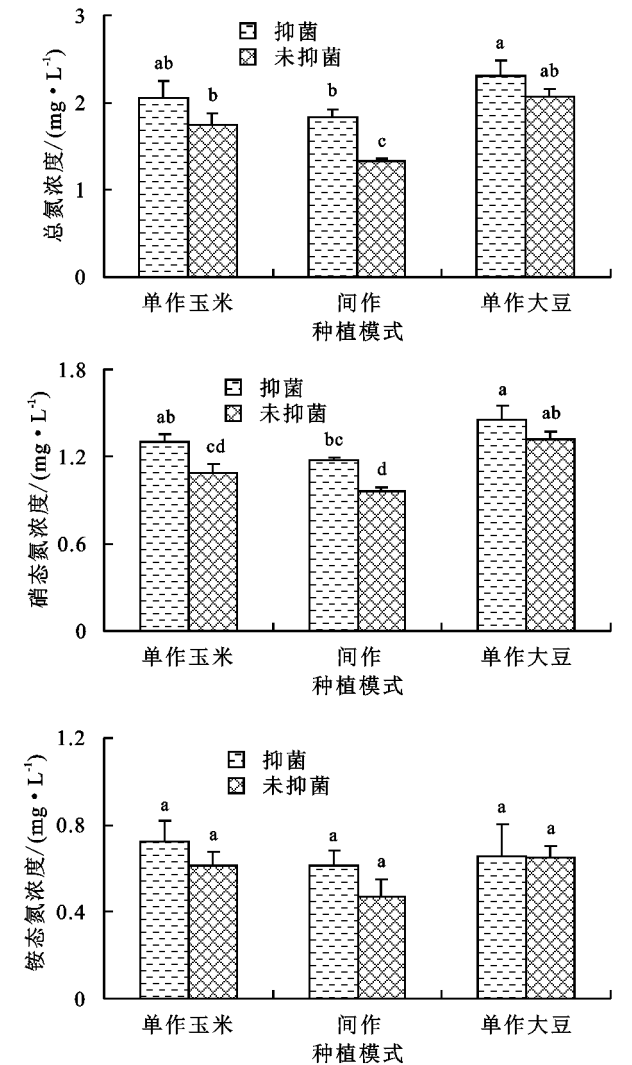


图 4 菌根处理和种植模式下径流总氮、硝态氮和铵态氮浓度

无论是否抑菌,对于径流铵态氮浓度,间作—未抑菌处理下其浓度明显最低。在抑菌处理下,间作处理的径流铵态氮浓度低于单作玉米与单作大豆处理,降幅分

别为 15.3%和 6.7%;在未抑菌处理下,间作处理的径流铵态氮浓度最低,较单作玉米与单作大豆处理明显降低 23.3%和 27.6%。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,较单作玉米—抑菌与单作大豆—抑菌处理的径流铵态氮浓度分别降低 34.8%, 28.2%。无论是否抑菌,单作玉米与单作大豆处理的径流铵态氮浓度高于间作处理。可见,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。

2.3 不同采样时间菌根与间作对地表径流各形态氮浓度的影响

由表 1 可知,就整个采样时间而言,硝态氮为径流氮流失的主要形态。7 月 29 日,径流总氮、硝态氮在各处理下的总流失量达到最大值,而铵态氮在 7 月 12 日达到最大值。径流总氮、铵态氮在各处理下的总流失量在 8 月 19 日最小,而硝态氮在 7 月 12 日总流失量最小。

7 月 12 日采集的径流水样中,在抑菌处理下,间作处理的径流硝态氮、铵态氮浓度较单作大豆处理显著降低,降幅分别为 84.7%, 39.2%。在未抑菌处理下,间作处理较单作玉米、单作大豆处理明显降低径流总氮与硝态氮浓度,总氮浓度降幅分别为 44.9%和 66.8%,硝态氮浓度分别降低 94.7%和 97.8%。除单作玉米处理的径流硝态氮浓度外,无论何种种植模式,抑菌处理的径流总氮、硝态氮、铵态氮浓度高于未抑菌处理。无论抑菌与否,间作处理的径流总氮、硝态氮低于单作玉米与单作大豆处理,但没有达到显著程度。

7 月 29 日采集的径流水样中,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 43.9%;较单作玉米处理的径流铵态氮浓度显著降低 32.7%。在间作处理下,抑菌处理的径流总氮浓度显著高于未抑菌处理,未抑菌处理的径流总氮浓度显著降低 45.5%。相比单作玉米和单作大豆,无论是否抑菌,间作—未抑菌处理的径流总氮、硝态氮和铵态氮浓度最低。

8 月 12 日采集的径流水样中,在抑菌处理下,间作处理的径流总氮、铵态氮浓度低于单作玉米与单作大豆处理,但未达显著程度。在未抑菌处理下,间作处理的径流总氮浓度低于单作玉米与单作大豆,降幅分别为 20.7%, 55.9%;铵态氮浓度显著低于单作玉米处理,降幅为 64.2%。在间作处理下,除单作大豆处理外,未抑菌处理的径流各形态氮浓度低于抑菌处理。

8 月 19 日采集的径流水样中,在抑菌处理下,单作玉米处理的径流总氮和铵态氮浓度显著低于单作大豆,降幅分别为 57.9%, 65.9%,硝态氮浓度较单作大豆处理显著增加 36.7%;与单作玉米相比,间作处理显著降低了径流硝态氮、铵态氮浓度,降幅分别为 34.0%, 67.1%。在未抑菌处理下,间作处理的径流硝态氮、铵态氮浓度低于单作玉米,但没有达到显著

程度。在间作处理下,抑菌处理的径流总氮、硝态氮浓度均高于未抑菌处理。

8 月 30 日采集的径流水样中,在抑菌处理下,间作处理的径流总氮、硝态氮浓度低于单作玉米、单作大豆处理。在未抑菌处理下,间作处理下的径流硝态氮浓度显著低于单作大豆;单作大豆处理的径流铵态氮浓度较单作玉米显著降低 21.0%。在单作玉米与单作大豆处理下,未抑菌处理的径流总氮浓度低于抑菌处理。

9 月 15 日采集的径流水样中,在抑菌处理下,间作处理的径流总氮浓度较单作玉米处理显著降低,降幅为 35.3%;硝态氮浓度较单作大豆显著降低 19.2%。在未抑菌处理下,间作处理的径流总氮、铵态氮浓度低于单作玉米与单作大豆处理。除单作大豆外,无论何种种植模式,未抑菌处理的径流各形态氮浓度低于抑菌处理,其中抑菌—单作玉米处理的确态氮浓度显著低于未抑菌—单作玉米处理,降幅达 23.9%。

表 1 菌根处理和种植模式下地表径流中各形态氮的质量浓度

采样 时间	菌根 处理	种植 模式	总氮/ (mg · L ⁻¹)	硝态氮/ (mg · L ⁻¹)	铵态氮/ (mg · L ⁻¹)
7 月 12 日	抑菌	单作玉米	2.279±0.697ab	0.319±0.205b	2.013±0.482ab
		玉米/大豆间作	1.376±0.084b	0.201±0.013b	1.652±0.193bc
		单作大豆	3.561±0.965a	1.328±0.483a	2.718±0.150a
	未抑菌	单作玉米	1.486±0.253ab	0.321±0.113b	1.054±0.106c
		玉米/大豆间作	0.818±0.034b	0.017±0.007b	1.240±0.252bc
		单作大豆	2.463±0.282ab	0.779±0.141ab	1.627±0.187bc
7 月 29 日	抑菌	单作玉米	3.251±0.240ab	1.748±0.220a	0.682±0.102b
		玉米/大豆间作	4.298±0.181a	1.752±0.269a	0.873±0.080ab
		单作大豆	4.514±0.865a	2.093±0.161a	0.893±0.030ab
	未抑菌	单作玉米	3.651±0.403ab	2.162±0.343a	0.997±0.165a
		玉米/大豆间作	2.344±0.058b	1.527±0.032a	0.671±0.032b
		单作大豆	4.179±0.555a	1.713±0.205a	0.912±0.023ab
8 月 12 日	抑菌	单作玉米	1.225±0.253a	0.895±0.319a	0.790±0.085ab
		玉米/大豆间作	1.072±0.010a	1.088±0.047a	0.515±0.097bc
		单作大豆	1.476±0.264a	1.068±0.118a	0.619±0.231abc
	未抑菌	单作玉米	1.018±0.106a	0.572±0.130a	0.907±0.080a
		玉米/大豆间作	0.807±0.257a	0.682±0.089a	0.325±0.052c
		单作大豆	1.829±0.623a	0.983±0.296a	0.664±0.097abc
8 月 19 日	抑菌	单作玉米	0.720±0.083b	2.067±0.038a	0.583±0.260a
		玉米/大豆间作	1.453±0.243ab	1.365±0.190b	0.192±0.009b
		单作大豆	1.712±0.499a	1.309±0.217b	0.199±0.050b
	未抑菌	单作玉米	0.992±0.042ab	1.442±0.282b	0.277±0.024ab
		玉米/大豆间作	1.193±0.022ab	1.225±0.083b	0.272±0.075ab
		单作大豆	0.939±0.108ab	1.161 ±0.015b	0.465±0.001ab
8 月 30 日	抑菌	单作玉米	2.447±1.014a	1.420±0.023ab	0.412±0.026ab
		玉米/大豆间作	1.235±0.051a	1.392±0.149ab	0.450 ±0.019a
		单作大豆	1.559±0.142a	1.393±0.163ab	0.254±0.007e
	未抑菌	单作玉米	1.361±0.119a	1.020±0.027b	0.376±0.009bc
		玉米/大豆间作	1.362±0.163a	1.105±0.048b	0.344±0.009cd
		单作大豆	1.256±0.029a	1.859±0.474a	0.297±0.017de
9 月 15 日	抑菌	单作玉米	2.378±0.244a	1.349±0.016abc	0.359±0.060a
		玉米/大豆间作	1.538±0.145bc	1.234±0.119bcd	0.387±0.003a
		单作大豆	0.973±0.073c	1.528±0.056a	0.376±0.016a
	未抑菌	单作玉米	1.944 ±0.310ab	1.027±0.070d	0.301±0.001a
		玉米/大豆间作	1.465±0.048bc	1.196±0.044cd	0.278±0.079a
		单作大豆	1.782±0.289ab	1.431±0.065ab	0.301±0.001a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示相同采样时间内不同处理间差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 AMF 对红壤径流氮形态变化的影响

在自然环境中,土壤中的氮营养元素可分为无机氮和有机氮,其中 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 是最易被植物吸收

和利用的 2 类基础无机氮源。AMF 能与自然生态系统中超过 80% 的陆生植物形成互利共生体,共生体的形成可协助宿主植物吸收土壤中的氮、磷等矿质养分^[1]。有研究^[21]表明,菌根网络可以促进植物之间

的氮转移,并加快土壤中植物难以利用有机氮的矿化,从而增加植物可利用的氮素^[22]。金海如等^[23]研究发现,AMF 的根外菌丝可以吸收同化不同的无机氮和有机氮,相比植物根系,AMF 在氮素吸收上有更强的能力,表明植物可以依赖 AMF 从更大范围吸收更多的氮,从而减少土壤中的氮残留。此外,AMF 侵染植物后形成的菌丝网络及产生的根系分泌物能够促进土壤团聚体的形成和稳定^[24],进而改善土壤结构,减轻土壤侵蚀和水土流失^[25]。这表明 AMF 可通过促进植物吸收更多的氮素,降低土壤中氮残留的同时,改善土壤结构,增强土壤的抗蚀能力,阻控土壤流失,从而削减土壤中的氮流失。本研究中,无论何种种植模式,未抑菌处理下的径流总氮、硝态氮和铵态氮浓度较抑菌处理均有所减少。张雪^[26]研究发现,接种 AM 真菌处理的水稻的氮、磷含量始终高于空白处理,接菌处理最终能够降低稻田水体中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 TN 含量,菌根能够成为面源污染源头减量的重要保证,这与本研究相一致。7 月 12 日采集的径流水样总氮、硝态氮、铵态氮浓度均较高,7 月 29 日采集的径流水样总氮、硝态氮总流失量达到最大值。这可能是因为在这 2 次采样期间,玉米和大豆均处于苗期,而玉米和大豆苗期对养分吸收较少^[27-28],土壤中留有多余尚未被利用的氮肥,加之 7 月中下旬昆明降雨量大,而降雨条件下地表径流中氮素流失量总体表现与降雨量、地表径流量显著相关^[29],且 AMF 在高产作物生长前期活性低^[7],从而使土壤中未被利用的氮素在降雨条件下随地表径流大量流失。

3.2 间作对红壤径流氮形态变化的影响

间作是极具潜力的可持续农业系统,对于单一栽培,往往无法充分利用可利用的空间和资源(土壤资源和光照),但间作条件下,2 个间作作物可以在占据不同生态位的地方更有效地利用空间和资源。有研究^[30]表明,玉米马铃薯间作可提高氮吸收 1.0%~13.2%,在一定的氮水平下,还可提高氮、钾的利用率。玉米大豆间作条件下,玉米处于氮竞争优势地位^[31],可在一定程度上缓解大豆固氮的“氮阻遏作用”,增强大豆固氮作用^[32],促进对氮的高效利用,降低土壤氮残留^[16]。此外,间作条件下,植株根系生物量、水稳性团聚体均优于单作^[33],可有效减少土壤被雨水击溅和冲刷而造成的水土流失,增强土壤抗蚀性^[18],减少水土流失。这说明间作可以在提高植株对土壤中氮素吸收利用率的同时,可减轻水土流失,从而降低土壤养分流失。叶优良等^[34]研究表明,小麦玉米间作条件下,根系之间的相互作用减少了土壤中硝态氮的淋失。本研究中,无论是否抑菌,间作处理下的径流各形态氮含量均不同程度低于单作玉米

与单作大豆处理。钟雄等^[35]研究表明,间作种植模式,对于土壤中氮、磷养分的流失具有一定的削减作用,本研究结果与其具有一致性。

3.3 AMF 与间作对红壤径流氮形态变化的协同影响

目前,AMF 与间作的协同作用已受到研究者的广泛关注,赵乾旭等^[36]研究了接种土著 AMF 与施用不同形态氮对间作大豆生长及氮利用的影响,发现接种土著 AMF 进一步增强了间作降低土壤硝态氮、铵态氮含量的能力。汪新月等^[37]利用 AMF 和间作,研究了两者对玉米和大豆种间氮竞争的影响,发现 AMF 和间作协同作用能够增强玉米较大豆的养分竞争能力和氮竞争比率。但是将菌根技术与间作系统结合,研究两者协同作用对削减坡耕地氮流失的影响以及对减缓农业非点源污染的作用少见报道。本研究发现,在所有处理中,间作—未抑菌处理的径流各形态氮含量最低,与单作玉米—抑菌处理相比,间作—未抑菌处理下径流总氮、硝态氮、铵态氮浓度分别降低 35.0%,26.2%,34.8%;与单作大豆—抑菌处理相比,间作—未抑菌处理下径流总氮、硝态氮、铵态氮浓度分别降低 42.1%,33.9%,28.2%。这可能是 AMF 与间作系统协同强化了植株对土壤氮养分的吸收利用,减少了土壤氮残留,同时 AMF 菌丝和根系分泌物以及间作对土壤结构的改善,阻控水土流失,进而减少了径流氮素流失。可见,AM 真菌与合理的间作系统相结合有望减少因坡耕地红壤氮流失造成的水体富营养化,对减缓农业非点源污染有一定的潜力。

4 结论

(1)无论何种种植模式,土著菌根菌处理下的径流各形态氮含量均不同程度降低,说明菌根真菌对径流各形态氮素流失具有一定的削减作用。

(2)无论是否抑菌,间作种植模式较单作均不同程度地降低了径流总氮、硝态氮、铵态氮浓度,表明间作种植对径流各形态氮素也具有一定的削减作用。

(3)所有复合处理中,间作—土著菌根菌处理的径流总氮、硝态氮与铵态氮浓度均为最低,可见菌根真菌与间作对径流各形态氮素的流失表现出了协同削减潜力。

参考文献:

- [1] 陈永亮,陈保冬,刘蕾,等.丛枝菌根真菌在土壤氮素循环中的作用[J].生态学报,2014,34(17):4807-4815.
- [2] 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.
- [3] 凌德,李婷,王火焰,等.施用方式和氮肥种类对水稻土中氮素迁移的影响效应[J].土壤,2015,47(3):478-482.
- [4] Valkama E, Salo T, Esala M, et al. Nitrogen balances and yields of spring cereals as affected by nitrogen fertilization

- in northern conditions: A meta-analysis [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 1-13.
- [5] Murphy T, Dougall C, Burger P, et al. Runoff water quality from dryland cropping on Vertisols in central Queensland, Australia [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 180: 21-28.
- [6] 国家统计局. 第一次全国污染源普查公报 [EB/OL]. (2018-12-30) [2010-02-11]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tigb/quigb/qgquigb/201002/I20100211_30641.html.
- [7] Janke B D, Finlay J C, Hobbie S E, et al. Contrasting influences of stormflow and baseflow pathways on nitrogen and phosphorus export from an urban watershed [J]. *Biogeochemistry*, 2014, 121(1): 209-228.
- [8] 冯固, 张福锁, 李晓林, 等. 丛枝菌根真菌在农业生产中的作用与调控 [J]. *土壤学报*, 2010, 47(5): 995-1004.
- [9] 王浩, 方燕, 刘润进, 等. 丛枝菌根中养分转运、代谢、利用与调控研究的最新进展 [J]. *植物生理学报*, 2018, 54(11): 1645-1658.
- [10] Heijden M G A V D. Mycorrhizal fungi reduce nutrient loss from model grassland ecosystems [J]. *Ecology*, 2010, 91(4): 1163-1171.
- [11] Marschner H, Dell B. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis [J]. *Plant and Soil*, 1994, 159(1): 89-102.
- [12] 彭思利, 申鸿, 袁俊吉, 等. 丛枝菌根真菌对中性紫色土土壤团聚体特征的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 31(2): 498-505.
- [13] 赵平, 郑毅, 汤利, 等. 小麦蚕豆间作施氮对小麦氮素吸收、累积的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 742-747.
- [14] 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.
- [15] Li Y, Ran W, Zhang R, et al. Facilitated legume nodulation, phosphate uptake and nitrogen transfer by arbuscular inoculation in an upland rice and mung bean intercropping system [J]. *Plant and Soil*, 2009, 315(1/2): 285-296.
- [16] 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.
- [17] 苏本营, 陈圣宾, 李永庚, 等. 间套作种植提升农田生态系统服务功能 [J]. *生态学报*, 2013, 33(14): 4505-4514.
- [18] 陈小强, 范茂攀, 王自林, 等. 不同种植模式对作物根系固土拉力特性的影响 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 144-148, 156.
- [19] 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.
- [20] 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 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 254-285.
- [21] Montesinos N A, Miguel V, José I Q, et al. Soil fungi promote nitrogen transfer among plants involved in long-lasting facilitative interactions [J]. *Perspectives in Plant Ecology Evolution & Systematics*, 2016, 18: 45-51.
- [22] 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.
- [23] 金海如, 张萍华, 蒋冬花. 同位素示踪研究丛枝菌根真菌吸收不同氮素并向寄主植物运输的机理 [J]. *土壤学报*, 2011, 48(4): 888-892.
- [24] 彭思利, 申鸿, 张宇亭, 等. 不同丛枝菌根真菌侵染对土壤结构的影响 [J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 863-870.
- [25] 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定性团聚体的影响 [J]. *生态学报*, 2013, 33(4): 1080-1090.
- [26] 张雪. 菌根技术在控制稻田氮磷流失中的应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [27] 侯云鹏, 杨晓丹, 杨建, 等. 不同施肥模式下玉米氮、磷、钾吸收利用特性研究 [J]. *玉米科学*, 2017, 25(5): 128-135.
- [28] 梁慧珍, 董薇, 许兰杰, 等. 不同氮磷钾处理大豆苗期主根长和侧根数的 QTL 定位分析 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(18): 3450-3460.
- [29] 冯小杰, 郑子成, 李廷轩. 紫色土区坡耕地玉米季地表径流及其氮素流失特征 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 43-48, 54.
- [30] 马心灵, 朱启林, 耿川雄, 等. 不同氮水平下作物养分吸收与利用对玉米马铃薯间作产量优势的贡献 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1265-1273.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 叶优良, 李隆, 索东让. 小麦/玉米和蚕豆/玉米间作对土壤硝态氮累积和氮素利用效率的影响 [J]. *生态环境*, 2008, 17(1): 377-383.
- [35] 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.
- [36] 赵乾旭, 史静, 张仕颖, 等. 土著丛枝菌根真菌 (AMF) 与不同形态氮对紫色土间作大豆生长及氮利用的影响 [J]. *菌物学报*, 2017, 36(7): 983-995.
- [37] 汪新月, 史静, 岳献荣, 等. 接种 AMF 与间作对红壤上玉米和大豆种间氮素竞争的影响 [J]. *菌物学报*, 2017, 36(7): 972-982.