

氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分及土壤微生物量的影响

赵 莉

(淄博职业学院 制药与生物工程系, 山东 淄博 255314)

摘 要:采用人工氮添加研究了紫花苜蓿根区土壤养分及微生物量对不同氮添加水平[CK;低氮 LN,10 g/(m²·a);中氮 MN,20 g/(m²·a);高氮 HN,30 g/(m²·a)]的响应。结果表明:氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分及微生物量的影响表现为正的增加效应,对根区土壤全氮含量无明显影响($P>0.05$);土壤养分及微生物量随氮素的添加呈先增加后降低趋势,均表现为 MN>HN>LN>CK,以中水平的氮添加对紫花苜蓿根区土壤微生物量增加效应最为明显;除了土壤全氮以外,不同水平的氮添加处理下土壤养分和微生物量均与 CK 达到差异显著水平($P<0.05$);紫花苜蓿根区土壤微生物量对氮添加的敏感性高于土壤养分,其中土壤活性有机碳是不同水平氮添加处理后紫花苜蓿根区土壤养分变化的敏感指标。Pearson 相关性分析表明,土壤微生物量和土壤养分与土壤含水量之间具有较强的正相关,二者与土壤 pH 有较强的负相关,表明了氮添加处理下紫花苜蓿根区土壤理化因子、养分和微生物量等地下生态系统各指标之间的统一性及相互作用和影响。

关键词:氮添加;紫花苜蓿;根区;土壤养分;土壤微生物量

中图分类号:S812.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)06-0035-06

Effects of Nitrogen Addition on the Soil Nutrient and Microbial Biomass in Root Zone of *Medicagosativa*

ZHAO Li

(Department of Pharmaceutical and Biological Engineering, Zibo Vocational Institute, Zibo, Shandong 255314, China)

Abstract: By using a manual nitrogen addition method, the responses of the soil nutrient and microbial biomass in root zone of *Medicagosativa* to different nitrogen addition levels such as CK, LN [10 g/(m²·a)], MN [20 g/(m²·a)], HN [30 g/(m²·a)] were examined. The results indicated that the nitrogen addition stimulated the soil nutrient and microbial biomass in root zone, but no significant effect of nitrogen addition on soil total nitrogen in the root zone was observed($P>0.05$). The soil nutrient and microbial biomass in root of *Medicagosativa* first increased and then decreased with nitrogen additions which showed the order of MN>HN>LN>CK. In all treatments, the soil nutrient and microbial biomass in root zone of *Medicagosativa* except the soil total nitrogen were significant higher than CK ($P<0.05$). The sensibility to nitrogen addition of soil microbial biomass in the root zone of *Medicagosativa* was higher than that of soil nutrient, and soil active organic carbon was the sensitive indicator to change of soil nutrient in the root zone of *Medicagosativa* of all treatments. Pearson correlation analysis showed that soil microbial biomass and nutrient had a significant positive correlation with soil moisture and negative correlation with soil pH which illustrated the uniformity of underground ecosystem such as soil physical and chemical factors, nutrient and microbial biomass or other various indicators.

Key words: nitrogen addition; *Medicagosativa*; root zone; soil nutrient; soil microbial biomass

氮素是植物所需的基本元素之一,在植物的生长过程有着重要作用^[1-3]。植物—土壤系统是一个相互作用、相互影响的有机整体,一方面,植物的生长以土

壤作为基础支撑通过根系吸取养分,另一方面,植物生长及其覆盖也在不断改变着土壤理化性状及微生物环境^[4-5],植物根系分泌有机物质不断地进行呼吸,

影响土壤理化性质及养分分布特征等^[6-7]。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)属多年生优质牧草,产量高、品质好、抗逆性强、适应性强、营养丰富、生态适应性广、较好的固氮能力和保持水土功能等^[8-10],有利于调节气候和改善农业生态环境,在生长发育过程中依靠土壤中的养分远远不够,其中施氮是调节和控制紫花苜蓿营养物质平衡的一项重要措施^[11-12]。由于紫花苜蓿是各部分协调的生命系统,氮添加会改变植物生长过程中各产物的分配与转运以及根系的分泌等生理生态活动等,这些变化将对植物根区土壤生态环境产生一定的影响^[8-10,13-14]。近年来,国内外学者对紫花苜蓿的研究多集中于施肥水平对其产量的影响,尚未涉及氮添加条件下紫花苜蓿根区土壤养分的响应情况。鉴于此,本试验研究和探讨了不同程度的氮素添加对紫花苜蓿根区土壤养分的影响,旨在了解氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分的影响,确定紫花苜蓿生长所需最佳氮素添加,从而为紫花苜蓿合理建设、高效生产以及可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验场地位于山东农业大学校内农场,冬季少严寒,年均气温 10~15℃,最冷月(1月)平均气温-6.0℃左右,最热月(8月)平均气温 28.6℃左右,年降雨量 800~1 200 mm,无霜期 200~250 d,适合紫花苜蓿生长。

1.2 试验材料及样地设置

供试材料为紫花苜蓿,根据紫花苜蓿基本生理特性和同类氮添加试验及当地氮沉降量设置 3 个氮添加水平:低氮添加[LN, 10 g/(m²·a)]、中氮添加[MN, 20 g/(m²·a)]和高氮添加[HN, 30 g/(m²·a)],以无氮添加为对照(CK),试验地原为菜地,试验前测定土壤养分及理化性质各指标,土壤 pH 值为 8.2,含水量为 9.23%,容重为 1.47 g/cm³,电导率为 69 μs/cm,有机碳含量为 14.28 g/kg,活性有机碳含量为 1.34 g/kg,全氮含量为 2.16 g/kg,碱解氮含量为 36.51 mg/kg,全磷含量为 2.07 g/kg,有效磷含量为 53.84 mg/kg,微生物量碳为 57.81 mg/kg,微生物量氮为 11.35 mg/kg,微生物量磷为 8.27 mg/kg。

随机区组设计(包括对照)12 个小区,每个小区 3 m×4 m=12 m²,各小区间保留 10 m 宽缓冲带,2013 年 4 月 1 日开始整地,4 月中旬进行穴播,株距 35 cm,行距 45 cm,每穴 3~5 粒,待种子发芽后(5 月下旬)进行首次施氮,添加氮素为 NH₄NO₃,采用 NH₄NO₃ 混合 20 L 自来水均匀喷洒,对照组没有氮添加

仅施加 20 L 自来水。于 8 月采用相同方法再次等量施加氮素,11 月中旬采集紫花苜蓿根区土壤,每个小区重复 3 次,每次取样分为 2 份,一份用塑封袋盛装用于测定土壤含水量、理化性质及养分各指标,另一份迅速于 4℃ 保温箱保存测定土壤微生物量,并在取样点附近取相应的环刀土测定土壤容重。

1.3 测定方法

新鲜土样采用烘干法测定土壤含水量以后自然风干(20 d)去除有机碎片后过 2 mm 筛,pH 采用电极电位法测定(1:5.0 土水比);电导率 EC 采样 P4 多功能测定仪(Multiline P4 Universal Meter,WTM 公司,Germany)测定;然后研磨过 0.5 mm 筛用于土壤养分测定;有机碳采用重铬酸钾氧化—外加热法测定;全磷采用 NaOH 碱溶—钼锑抗比色法测定(日产 UV-1601 分光光度计);有效磷采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定;全氮采用半微量凯氏定氮法测定(意大利产 DK6,UDK140 分析仪);碱解氮采用 NaOH—H₃BO₃ 法测定^[15];4℃ 保存的新鲜土样中采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法测定土壤微生物量碳、氮、磷,将浸提液解冻,过滤后直接在 Multi N/C3000(德国)上测定,其中氯仿熏蒸杀死的微生物体中的碳、氮被浸提出来的比例分别为 0.38,0.45^[16]。

统计分析:Excel 2003 和 SPSS 18.0 进行数据分析和方差分析,LSD 进行多重比较(显著水平设置 $P < 0.05$)和单因素方差分析(One-way ANOVA),Pearson 相关系数检验土壤养分及微生物量与土壤理化性质之间的关系,Origin 7.5 作图。

2 结果与分析

2.1 氮添加对紫花苜蓿根区土壤理化性质的影响

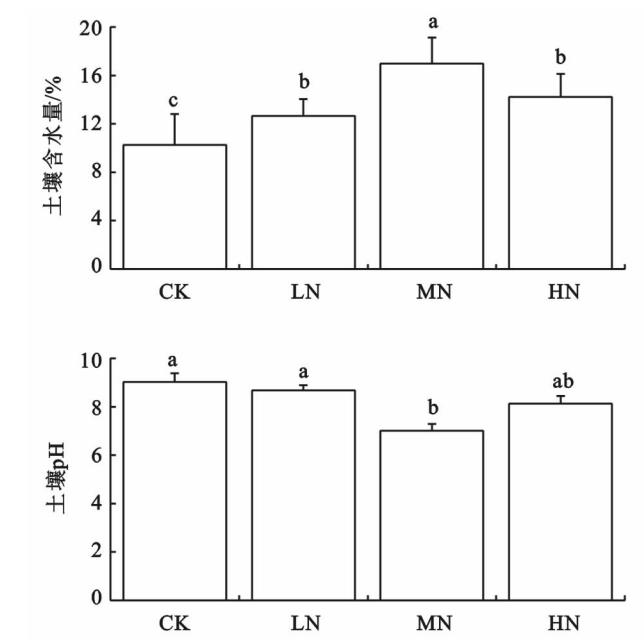
土壤容重是土壤紧实度和土壤结构的评价指标,由图 1 可知,随氮素的添加紫花苜蓿根区土壤容重呈降低趋势,说明氮添加减小了土壤容重,使得土壤紧实度增加,土壤结构变差,这与紫花苜蓿根系在土壤中的空间分布有关。

土壤含水量受大气降水、地表蒸发、植物吸收蒸腾及土壤特性等影响,土壤含水量氮素的添加呈先增加后降低趋势,并且各水平的氮添加均与对照达到显著差异水平($P < 0.05$),中度氮添加水平达到最大,表现为 MN>HN>LN>CK,说明了氮添加在一定程度上增加了紫花苜蓿根区土壤入渗和持水能力,从而增加了土壤含水量。

土壤 pH 值受氮添加的影响则不显著,整体来看,土壤 pH 值随氮素的添加呈先降低后增加趋势,

并且均小于对照,中度氮添加水平最小,与对照达到显著差异水平($P<0.05$),但低水平和高水平的氮添加与对照均为达到显著差异水平($P>0.05$),说明了氮添加一定程度上降低了紫花苜蓿根区土壤 pH,从而促进了根区养分的吸收和利用。

不同水平的氮添加显著影响了紫花苜蓿根区土



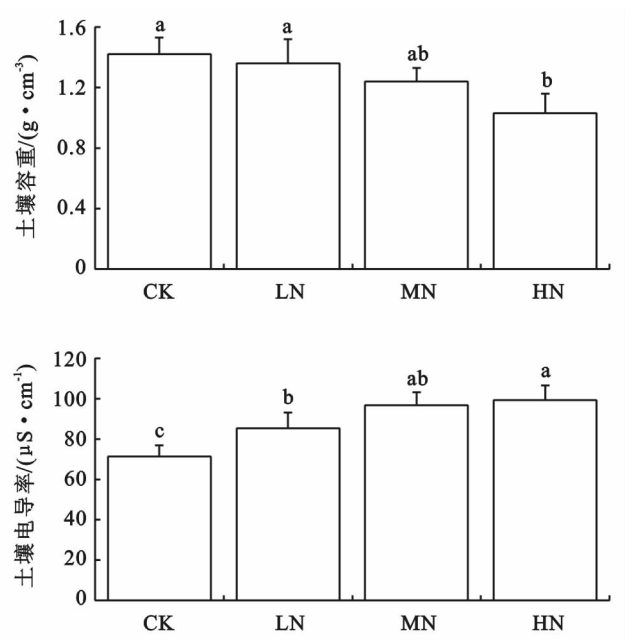
注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

图 1 氮添加对紫花苜蓿根区土壤理化性质的影响

2.2 氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分含量的影响

由图 2 可知,氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分具有较大影响,随氮素含量的增加土壤各养分平均含量呈先上升后下降趋势,总体表现为 $MN>HN>LN>CK$,除了土壤全氮以外,不同水平的氮添加处理下土壤养分指标均与 CK 达到差异显著水平($P<0.05$),说明氮添加能够增加紫花苜蓿根区土壤养分含量,但对土壤全氮含量没有显著的增加效应,对土壤其他养分具有显著增加效应,以中度水平的氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分含量增加效应最为明显。综合比较可知,氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分表现为迅速增加的过程,与对照相比,不同水平氮添加(LN, MN, HN)处理下土壤有机碳分别增加了 27.45%, 53.80%, 41.18%;活性有机碳分别增加了 33.57%, 88.73%, 66.20%;全氮分别增加了 19.26%, 16.06%, 2.75%;碱解氮分别增加了 34.6%, 58.3%, 51.7%;全磷分别增加了 54.73%, 64.21%, 32.63%;有效磷分别增加了 33.48%, 50.54%, 47.30%;其中土壤活性有机碳的增加幅度高于土壤其他养分指标,说明氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分含量具有明显影响,这可能是由于氮添加后紫花苜蓿根区需要吸收较多的土壤养分以供生长繁殖,从而导

壤电导率,土壤电导率随氮素的添加呈逐渐增加趋势,增加的幅度逐渐减弱,并且各水平的氮添加均与对照达到显著差异水平($P<0.05$),在高氮添加水平达到最大值,说明了氮添加在一定程度上增加了紫花苜蓿根区土壤可溶性离子数目,进而增加了根区土壤电导率。



致紫花苜蓿根区土壤养分明显增加,然而对土壤活性有机碳的增加效应高于土壤其他养分指标,说明了土壤活性有机碳是不同水平氮添加处理后紫花苜蓿根区土壤养分变化的敏感指标。此外,通过不同水平氮添加处理后紫花苜蓿根区土壤各养分的均值及标准误差计算可得,氮添加处理下土壤有效养分变异系数较高,说明氮添加对土壤有效养分的空间变异影响较大。

2.3 氮添加对紫花苜蓿根区土壤微生物量的影响

由图 3 可知,氮添加对紫花苜蓿根区土壤微生物量的影响与土壤养分保持一致,也即随氮素含量的增加土壤微生物量呈先上升后下降趋势,总体表现为 $MN>HN>LN>CK$,并且不同水平的氮添加处理下土壤微生物量均与 CK 达到差异显著水平($P<0.05$),说明氮添加能够增加紫花苜蓿根区土壤微生物量,对土壤微生物量具有显著增加效应,以中度水平的氮添加对紫花苜蓿根区土壤微生物量增加效应最为明显。与对照相比,不同水平氮添加(LN, MN, HN)土壤微生物量碳分别增加了 62.80%, 79.99%, 62.85%;微生物量氮分别增加了 69.23%, 90.59%, 75.21%;微生物量磷分别增加了 86.96%, 98.91%, 79.35%。

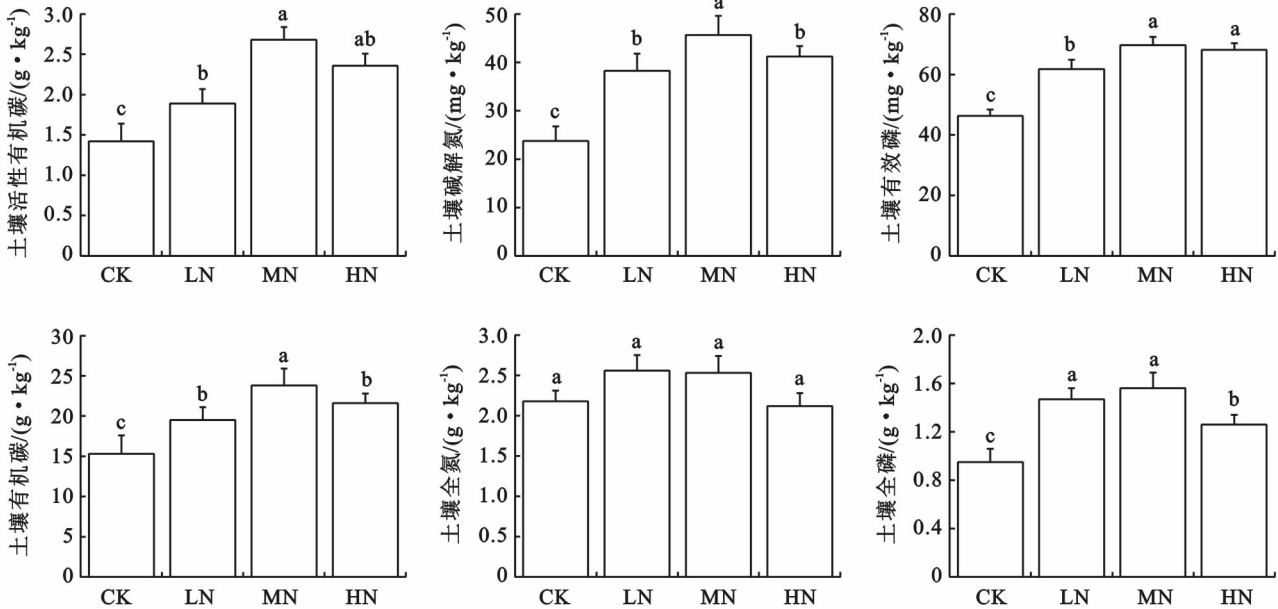


图 2 氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分的影响

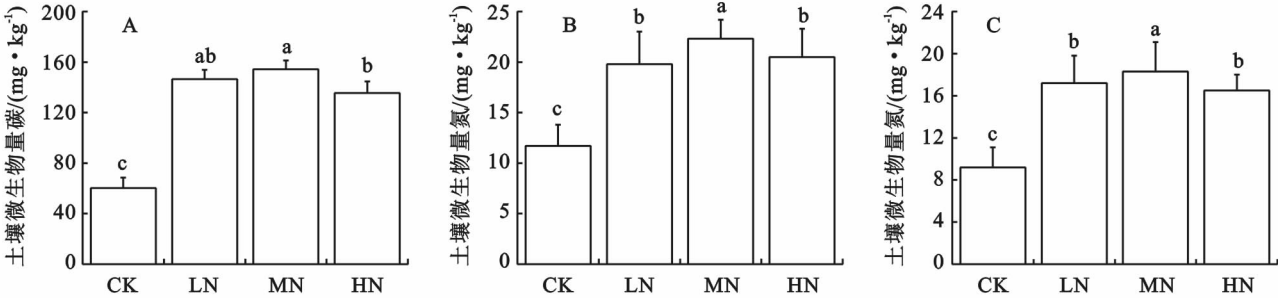


图 3 氮添加对紫花苜蓿根区土壤微生物量的影响

2.4 紫花苜蓿根区土壤理化性质与土壤养分的相关关

紫花苜蓿根区土壤理化性质与土壤养分和土壤微生物量的 Pearson 相关关系如表 1 所示,由表 1 的结果可知:土壤含水量与有机碳、活性有机碳、全氮、全磷、有效磷、微生物量碳和微生物量磷呈极显著正相关($P<0.01$),与碱解氮和微生物量氮呈显著正相关($P<0.05$);土壤容重有机碳、活性有机碳、有效

磷、和微生物量碳呈极显著负相关($P<0.01$),与全氮和微生物量氮呈显著负相关($P<0.05$);土壤 pH 与活性有机碳和微生物量碳呈极显著负相关($P<0.01$),与有机碳、全氮、有效磷、微生物量氮呈显著负相关($P<0.05$);土壤电导率与活性有机碳呈极显著正相关($P<0.01$),与有机碳、全氮、有效磷、微生物量碳和微生物量磷呈显著正相关($P<0.05$)。

表 1 紫花苜蓿根区土壤理化性质与土壤养分的相关关系

指标	有机碳	活性有机碳	全氮	全磷	有效磷	碱解氮	微生物量碳	微生物量氮	微生物量磷
含水量	0.937**	0.992**	0.853**	0.889**	0.915**	0.716*	0.913**	0.523*	0.756**
容重	-0.782**	-0.853**	-0.527*	-0.217	-0.652**	-0.235	-0.745**	-0.556*	-0.317
pH	-0.470*	-0.787**	-0.497*	-0.206	-0.551*	0.125	-0.775**	-0.472*	-0.239
电导率	0.623*	0.789**	0.492*	0.376	0.453*	0.235	0.661*	0.387*	0.257

* * 相关性在 0.01 水平上显著(双尾),* 相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。

3 讨论与结论

氮添加对紫花苜蓿根区土壤理化性质、土壤养分和土壤微生物量均具有一定的影响(图 1,2,3),由此表明紫花苜蓿根区微环境对于氮添加较为敏感。图 1 的结果表明氮素促进了紫花苜蓿根系的大量生长和

繁殖,增加了根区土壤的孔隙,从而导致根区土壤容重的降低^[17-19];并且紫花苜蓿通过降低根区 pH,增加根区土壤养分的溶解而提高土壤养分和有效养分含量^[10,20-23];结合表 1 的结果来看,氮素添加增加紫花苜蓿根区土壤养分和微生物量主要是由于增加了根区土壤含水量和降低了根区土壤 pH 的共同作用结果。

综合图2和3可知,氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分及微生物量的影响表现为正效应,不同水平的氮添加均能显著提高紫花苜蓿根区土壤养分和微生物量,随氮素的添加土壤养分和微生物量均呈先增加后降低趋势,表现为 $MN > HN > LN > CK$,对紫花苜蓿根区土壤全氮含量的影响不显著($P > 0.05$),但土壤全氮含量均高于对照,说明氮添加有利于紫花苜蓿根区土壤氮素的积累。从整体上来看,氮添加对紫花苜蓿根区土壤全氮影响也表现为正效应,主要是由于紫花苜蓿具有固氮作用,有利于提高土壤氮素含量,随着生长的发育其根部形成大量的根瘤菌,固氮功能增强,将空气中的氮素固定到土壤中,同时根系产生一些有机分泌物和部分腐烂根系,增加土壤中的养分^[21,24-25]。通过进一步的分析可知,氮添加对紫花苜蓿根区土壤微生物量的增加幅度明显高于土壤养分,也即土壤微生物量对于氮添加的敏感性高于土壤养分,说明紫花苜蓿根区土壤系统内部因子处于动态变化和平衡中,而不同水平的氮添加影响紫花苜蓿根区微生态环境^[18,25]。由表1的结果可知,土壤微生物量和土壤养分与土壤含水量之间具有较强的正相关,二者与土壤pH有较强的负相关,表明了氮添加处理下紫花苜蓿根区土壤理化因子、养分和微生物量等地下生态系统各指标之间的统一性及相互作用和影响。

氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分影响的过程较为复杂,受施氮量、频率、方式、时间、土壤特性以及环境因子等综合影响^[18,22-24],本研究区保证了相同的土壤基质和环境条件,结果表明中水平的氮添加 $[20 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ 对紫花苜蓿根区土壤养分各指标的增加效应达到最大,pH也达到最低,促进了根区土壤养分的吸收和利用,而高水平的氮添加则导致紫花苜蓿根区土壤养分的微弱减小,降低了土壤容重和土壤养分。氮添加处理下紫花苜蓿在生长繁殖过程中,势必会加大对土壤中有效养分的吸收利用^[21,24-26]。因此氮素添加越多,紫花苜蓿对土壤有效养分的吸收越剧烈,但这种吸收作用在一定的氮素控制范围内,高水平的氮添加 $[30 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ 可能会引起紫花苜蓿营养单一而生长受阻,超出了紫花苜蓿根区吸收养分的阈限,导致土壤养分及理化性状开始退化,造成其产量和品质的降低,也有可能造成试验区土壤氮素饱和,引起土壤酸化等多种负面效应^[10,18,21,27]。综合来看,中水平氮添加 $[20 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ 对紫花苜蓿根区土壤养分影响最大,而土壤活性有机碳增加幅度最大,是氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分表现最为敏感的指标。本研究添加氮素后,紫花苜蓿根区土壤养分、理化性质及微生物量均显著优于对照,表明了氮添加

有利于紫花苜蓿根区土壤系统营养物质的循环和腐殖质的形成等,促进土壤有效养分的增加。

紫花苜蓿在生长过程中需要大量营养元素和水,虽然其根系发达,耐干旱,保水固土效果显著,但多年种植会引起土壤深层干燥化,最终导致紫花苜蓿的严重衰退,有报道称多年种植紫花苜蓿会导致土壤干燥化和不可持续利用^[19,22-23,27],结合本试验的研究结果,我们未来应在氮添加的基础上长期研究紫花苜蓿种植年限及种植密度对其根区土壤养分的影响。综上所述,氮添加对紫花苜蓿根区土壤生态学性质会造成一定影响,但关于其内在作用机制还不清楚,因此,关于此方面我们还需深入展开研究,重点研究氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分、水分的需求动态、光合作用产物、根系分泌物的分配等方面的影响。

参考文献:

- [1] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, et al. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 315-322.
- [2] Holtgrieve G W, Schindler D E, Hobbs W O, et al. A coherent signature of anthropogenic nitrogen deposition to remote watersheds of the northern hemisphere[J]. *Science*, 2011, 334(6062): 1545-1548.
- [3] Maskell L C, Smart S M, Bullock J M, et al. Nitrogen deposition causes widespread loss of species richness in British habitats[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 671-679.
- [4] Kammann C I, Linsel S, Gößling J W, et al. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil-plant relations[J]. *Plant and Soil*, 2011, 345(1/2): 195-210.
- [5] Chalk P M, Magalhães A M T, Inácio C T. Towards an understanding of the dynamics of compost N in the soil-plant-atmosphere system using ^{15}N tracer[J]. *Plant and Soil*, 2013, 362(1/2): 373-388.
- [6] Lu Y, Zhou Y, Nakai S, et al. Stimulation of nitrogen removal in the rhizosphere of aquatic duckweed by root exudate components[J]. *Planta*, 2014, 239(3): 591-603.
- [7] Nardi P, Akutsu M, Pariasca-Tanaka J, et al. Effect of methyl 3-(4-hydroxyphenyl) propionate, a *Sorghum* root exudate, on N dynamic, potential nitrification activity and abundance of ammonia-oxidizing bacteria and archaea[J]. *Plant and Soil*, 2013, 367(1/2): 627-637.
- [8] Aranjuelo I, Molero G, Erice G, et al. Plant physiology and proteomics reveals the leaf response to drought in alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(1): 111-123.

- [9] Gallego-Giraldo L, Jikumaru Y, Kamiya Y, et al. Selective lignin downregulation leads to constitutive defense response expression in alfalfa(*Medicago sativa* L.)[J]. *New Phytologist*, 2011, 190(3): 627-639.
- [10] 王丹, 何峰, 谢开云, 等. 施氮对紫花苜蓿生长及土壤氮含量的影响[J]. *草业科学*, 2013, 30(10): 1569-1574.
- [11] Antolín M C, Fiasconaro M L, Sánchez-Díaz M. Relationship between photosynthetic capacity, nitrogen assimilation and nodule metabolism in alfalfa(*Medicago sativa*) grown with sewage sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 182(1): 210-216.
- [12] Ping C, Zhenrong S, Haifeng C, et al. Effects of different fertilization on output and plant height of Alfalfa [J]. *Crops*, 2013(1): 91-94.
- [13] 梁飞, 田长彦, 张慧. 施氮和刈割对盐角草生长及盐分累积的影响[J]. *草业学报*, 2012, 21(2): 99-105.
- [14] 邹亚丽, 马效国, 沈禹颖, 等. 苜蓿后茬冬小麦对氮素的响应及土壤氮素动态研究[J]. *草业学报*, 2005, 14(4): 82-88.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen; a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837-842.
- [17] 王金凤, 康绍忠, 张富仓, 等. 控制性根系分区交替灌溉对玉米根区土壤微生物及作物生长的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(10): 2056-2062.
- [18] 赵志红. 半干旱黄土区集雨措施和养分添加对苜蓿草地和封育植被生产力及土壤生态化学计量特征的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [19] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 75-89.
- [20] 韩德梁, 王彦荣. 紫花苜蓿对于干旱胁迫适应性的研究进展[J]. *草业学报*, 2005, 14(6): 7-13.
- [21] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红, 等. 准噶尔盆地西北缘新垦绿洲土地利用对土壤养分变化的影响[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 94-100.
- [22] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土高原沟壑区草地土壤深层干燥化与氮素消耗[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(2): 201-206.
- [23] 王志强, 刘宝元, 路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究[J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1944-1950.
- [24] 马春晖, 夏艳军, 韩军, 等. 不同青贮添加剂对紫花苜蓿青贮品质的影响[J]. *草业学报*, 2010, 19(1): 128-133.
- [25] 郭正刚, 刘慧霞, 王彦荣. 刈割对紫花苜蓿根系生长影响的初步分析[J]. *西北植物学报*, 2004, 24(2): 215-220.
- [26] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review[J]. *Plant and Soil*, 2001, 237(2): 173-195.
- [27] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 宁南旱区紫花苜蓿土壤干层水分特征及时空动态[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(4): 663-673.