

施氮对高寒垂穗披碱草草地根际、非根际土壤肥力的影响

高浩诚, 牧仁, 焦婷, 陈鑫, 马淑敏, 张霞

(甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室,

中一美草地畜牧业可持续发展研究中心, 农业农村部饲草种质创新与新品种选育重点实验室, 兰州 730070)

摘要: 为探究不同氮素添加水平对高寒生态条件下垂穗披碱草土壤理化性质及速效养分的影响, 选取天祝高山草原试验站 2 龄垂穗披碱草人工草地开展氮素添加试验。采用单因子试验设计, 参照中国氮沉降分布格局确定试验地氮素添加剂量, 设置对照 N0(不施氮)、N1(12 kg/hm²)、N2(24 kg/hm²)、N3(48 kg/hm²)和 N4(96 kg/hm²)5 个氮素添加水平, 每个处理 4 次重复。于 2021 年 7 月初和 8 月初 2 次施肥, 9 月份采集各处理根际、非根际土壤样品进行测定。结果表明: 施氮水平对根际土壤碱解氮含量以及非根际土壤容重产生极显著影响($p < 0.01$), 对根际土壤有机质及速效磷含量产生显著影响($p < 0.05$)。根际土中, 随施氮水平上升, 土壤含水量呈上升趋势; 土壤 pH 缓慢下降, N4 处理最低; N3 处理下, 根际土壤碱解氮、速效磷及速效钾较对照组分别显著提高 8.92%, 44.38%, 16.00% ($p < 0.05$); 土壤有机质含量显著高于对照组 ($p < 0.05$); 非根际土中, 随施氮水平上升, 土壤碱解氮及速效磷含量先上升后下降, N3 处理达峰值 ($p < 0.05$); 土壤 pH 呈先上升后下降趋势; 土壤有机质含量则在 N4 水平处达峰值 ($p < 0.05$)。同一施氮水平下, 除 N3 水平外, 根际土壤含水量、速效磷及速效钾含量低于非根际土; 根际土 pH、有机质含量及土壤碱解氮含量均高于非根际土。灰色关联度综合分析表明, N3 与 N4 处理分别对根际与非根际土壤理化性质及速效养分影响最大。

关键词: 氮素添加; 土壤理化性质; 碱解氮; 速效磷; 速效钾

中图分类号: S543.9; S812.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0276-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.06.035

Effects of Nitrogen Application on Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil Fertility of Alpine Elymus Nuttans Grassland

GAO Haocheng, MU Ren, JIAO Ting, CHEN Xin, MA Shumin, ZHANG Xia

(College of Prataculture, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Prataculture Ecosystem, Ministry of Education, Sino American Research Center for Sustainable Development of Grassland Animal Husbandry, Key Laboratory of Forage Gerplasm Innovation and Variety Breeding of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Lanzhou 730070)

Abstract: In order to investigate the effects of different nitrogen addition levels on soil physicochemical properties and available nutrients of drooping panicle calcareous grassland under alpine ecological condition, the experiment of nitrogen addition was carried out in the 2nd age panicle calcareous artificial grassland at Tianzhu Alpine Grassland Experimental station. A single factor experimental design was used to determine the nitrogen addition dose in the experiment site according to the nitrogen deposition distribution pattern in China, and five nitrogen addition levels of control N0 (no nitrogen), N1 (12 kg/hm²), N2 (24 kg/hm²), N3 (48 kg/hm²) and N4 (96 kg/hm²) were set, with four times per treatment. Fertilization was performed twice in early July and early August 2021, and rhizosphere and non-rhizosphere soil samples of each treatment were collected for determination in September. The results showed that the nitrogen application level had significant effects on the content of alkali-hydrolyzed nitrogen in rhizosphere soil and the soil bulk density in non-rhizosphere soil ($p < 0.01$), and had significant effects on the content of organic matter and available phosphorus in rhizosphere soil ($p < 0.05$). In rhizosphere soil, soil water content increased with the increase of nitrogen application level. Soil pH value decreased slowly and reached the lowest value under N4

收稿日期: 2023-05-08

资助项目: 新疆重点产业创新发展支撑计划项目(2022DB017)

第一作者: 高浩诚(2000—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事草地生态研究。E-mail: 1219612060@qq.com

通信作者: 焦婷(1976—), 女, 博士, 副教授, 主要从事草地生态与反刍动物营养研究。E-mail: jiaot@gsau.edu.cn

treatment. Under N3 treatment, alkali-hydrolytic nitrogen, available phosphorus and available potassium in rhizosphere soil were significantly increased by 8.92%, 44.38% and 16.00% compared with control group ($p < 0.05$). Soil organic matter content was also significantly higher than that in control group ($p < 0.05$). In non-rhizosphere soil, with the increase of nitrogen application level, soil alkali-hydrolytic nitrogen and available phosphorus contents increased first and then decreased, and the peak value was reached under N3 treatment ($p < 0.05$). Soil pH value increased first and then decreased. The content of soil organic matter reached the peak value at the level of N4 ($p < 0.05$). Under the same nitrogen application level, the contents of water content, available phosphorus and available potassium in rhizosphere soil were lower than those in non-rhizosphere soil except N3 level. pH, organic matter content and alkali-hydrolyzed nitrogen content of rhizosphere soil were higher than those of non-rhizosphere soil. The comprehensive analysis of grey correlation degree showed that N3 treatment and N4 treatments had the greatest effects on physicochemical properties and available nutrients of rhizosphere and non-rhizosphere soil, respectively.

Keywords: nitrogen addition; physical and chemical properties of soil; alkali hydrolyzed nitrogen; available phosphorus; available potassium

我国草地资源非常丰富,天然草地约 400×10^8 hm^2 ,承担着涵养水源以及保护生物多样性等重要作用,维护着生态系统的平衡^[1],且在我国农业、畜牧业、旅游业、制造业及餐饮业等多方面创造着巨大的经济价值。随着人们对草地资源的过度利用,我国草地快速退化,约 90% 的天然草地处在不同程度的退化进程之中,随之而来的是草地资源快速减少。由于高寒草地生态系统对于外界干扰极其敏感,同时自身阻抗及恢复能力较差,全国的高寒草地生境状况逐步恶化,祁连山区尤为明显。祁连山高寒草地超载率达 69.1%,退化率 46.9%。根据李海云^[2]对祁连山高寒草地退化中“植物—土壤—微生物”的研究表明,土壤理化性质直接影响草地生态系统的演替过程,同时也在草地生态系统退化过程中受到不同程度的影响。土壤中氮素、磷素等营养元素的含量是衡量土壤是否退化以及退化程度的重要指标,土壤中的速效养分含量也随着高寒草地的退化程度不同而发生不同的变化。

对于正在退化或退化程度较高的土壤进行施氮处理可有效减缓其退化速度。胡冬雪^[3]研究表明,土壤中的有机质与碱解氮含量均随草地施氮而增加,土壤 pH、土壤容重及土壤含水量等指标无显著变化;武建双等^[4]对高寒草地人工垂穗披碱草种群对施氮处理的响应的研究表明,高寒草地土壤 pH 均不随施氮处理变化而发生变化。土壤氮素含量随施氮量增加而增加。施用氮肥可为土壤有效供给氮素,并且能提高土壤中速效氮含量;李盼盼^[5]研究表明,土壤有机质含量随施氮量增加而增加,呈现正相关关系,而速效磷含量却与施氮量呈负相关,土壤全氮含量无显著变化,但大量添加氮素也不利于改善草地退化问题;宗宁等^[6]研究表明,高水平的氮肥与磷肥配施反

而造成轻度退化草地群落物种的丰富度和均匀度的显著降低,加剧土壤退化程度。因此,探索一个合适的施氮水平,使其既能改善土壤退化问题,又保证草地生态系统稳定,是一个亟待解决的问题。

根际是指受植物根系活动的影响后,与原土体在理化特性以及生物学特性上有显著差异的特殊土壤区域,是植物、土壤、微生物及环境因子进行相互作用的场所,是各类养分、水分、有益和有害物质及生物作用于根系或进入根系参与物质循环的重要区域,其自身具备特殊的微生态系统。根际微域环境对土壤养分能否被植物有效利用以及其被植物根系利用效率有直接影响,并与植物的抗逆能力强弱、根系病害的预防与抵抗以及农林业持续发展等方面密切相关^[7]。根际土对植株生长的影响明显强于其他土体,根际土中的养分含量普遍大于非根际,根际土与土体其他部分所含养分含量也有显著差异。与非根际土相比,根际土养分含量以及微生物数量均高于前者,各种物质循环和能量转化较非根际土而言更为迅速,土壤微生物活性更强^[8]。同时,曹永昌等^[9]研究表明,植物根际附近多数大多数酶的酶活性多要高于非根际土中酶活性。通过对根际土、非根际土理化性质、土壤养分含量及土壤酶活性等的对比,可建立一个更直观与准确的土壤质量评价体系。因此,根际、非根际土在不同施氮水平下,土壤速效养分含量变化的状况可能存在非常显著的差异。

垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb)是禾本科多年生丛生草本植物,因其植株生长茂盛、粗蛋白含量高的特性被广泛用于高寒退化草场的改良以及人工草地的建设,是修复高寒退化草地和建植人工草地的首选草种。本试验通过不同水平的外源氮素人

工添加处理,探讨在不同氮素添加水平下高寒草根际、非根际土壤理化性质及速效养分的变化,以期高寒草地种植垂穗披碱草合理施加氮肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省武威市天祝藏族自治县甘肃农业大学天祝高山草原生态系统试验站 2 龄垂穗披碱草人工草地(36°30′—37°35′ N, 102°17′—103°40′ E)。海拔 2 960 m,气候寒冷,年均气温 0℃,年均降水量 400 mm,年蒸发量 1 398 mm,生长期 130 天。试验地土壤为山地黑钙土,有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为 12%, 0.77%, 0.11%, 2.14%, 水解氮、速效钾含量分别为 496, 330 mg/g。

1.2 试验设计

采用单因子设计,通过参照中国氮沉降分布格局^[10],确定甘肃地区干湿沉降率为 8.16 kg/(hm²·a),从而确定试验氮素添加量,即将氮添加设置对照 N0(不施氮)、N1(12 kg/hm²)、N2(24 kg/hm²)、N3(48 kg/hm²)和 N4(96 kg/hm²),等同于甘肃地区自然氮沉降量 1, 5, 3, 6, 12 倍。即尿素施加量分别为 0, 52.17, 104.35, 208.70, 417.40 g。以 N0 作为对照,2020 年 5 月开始种植垂穗披碱草,播种量为 22.5 kg/hm²。将试验地(29 m×19 m)划分为 20 个面积为 4 m×5 m 的小区,为防止不同试验处理间互相干扰,在每个小区之间设立宽度为 1 m 的保护行。试验采取完全随机区组设计,设 5 个施肥水平,每个水平 4 次重复。经计算不同施氮水平所需的氮添加后,称取出每个试验组所需尿素,将其充分溶解于 2 L 的水中。在无风的天气下,将不同处理所需尿素溶液利用喷壶在各试验小区之间进行均匀喷洒,同时在 CK 小区喷洒施等量的水,以便统一草地植物生长环境标准。在 2021 年 7 月初和 8 月初进行施肥,分别为全年施肥量的 50%,此期间不定期清除杂草且不浇水。

1.3 取样方法

在垂穗披碱草建植后,分别采集根际土和非根际土。每个试验小区随机选取 3 个采样点,每个采样点以 20 cm 样段为基准把垂穗披碱草植株及根系挖出,去掉浮土,采用抖落法收集根际土,装入保鲜袋,用冰袋低温保存根际土样本,带回实验室进行测定。每个试验小区中随机选取 5 个点,每个点分别采集 0—10, 10—20, 20—30 cm 土层土样,将每层 5 个点的土样混合均匀,去除土层中根系及杂质,用四分法取 150 g 左右称重,采集的土壤立即进行保鲜处理,带

回实验室,保存方法同根际土。施肥第 2 年,2021 年蜡熟期(8 月中旬)对土壤根际土与非根际土采用以上相同方法进行采样、保鲜处理。带回实验室测定后与垂穗披碱草建植初期的根际土、非根际土速效养分进行对比分析。

1.4 指标测定

参考鲍士旦^[11]对土壤理化性质及速效养分含量进行测定,土壤 pH 采用玻璃电极法进行测定;土壤含水量采用恒温烘干法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;土壤速效氮含量采用 NaOH 碱解扩散法测定;土壤速效磷含量采用碳酸氢钠浸提钼蓝比色法测定;土壤速效钾含量采用醋酸铵—火焰光度计法测定。

1.5 数据统计及分析

采用 Excel 2016 软件进行数据处理和图表制作,用 SPSS 27.0 软件进行单因素(one-way ANOVA)、最小显著差异法(LSD 法)方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),图表中数据用平均值±标准误表示。采用双因素方差分析(two-way ANOVA)施氮水平对垂穗披碱草草地根际与非根际土速效养分的影响。

用灰色关联度法对各处理进行综合分析,根据关联度分析原则,关联度值越大,综合评价越好。假设参考数列为 x_0 ,比较数列为 $x_i, i=1, 2, 3, \dots, n$,且 $x_0=\{x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(n)\}, x_i=\{x_i(1), x_i(2), x_i(3), \dots, x_i(n)\}$,则称 $\zeta_i(k)$ 为 x_0 与 x_i 在第 k 点的关联系数,计算公式为:

$$\xi_k = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}$$

式中: $x_0(k) - x_i(k)$ 表示在 k 点 x_0 数列和 x_i 数列的绝对差值,记作 $\Delta_i(k)$,其中 $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为二级最小差; $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为二级最大差; ρ 为分辨系数,取值范围为 0~1,一般取 $\rho=0.5$ 。

将关联系数 ξ_k 代入公式: $r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{(k)}$,算出关联度值。

2 结果与分析

2.1 施氮水平对根际、非根际土壤理化性质的影响

由表 1 方差分析可知,施氮水平对根际土壤碱解氮含量产生极显著影响($p<0.01$);对土壤有机质及速效磷含量产生显著影响($p<0.05$);施氮水平对非根际土容重产生极显著影响($p<0.01$)。施氮水平对于根际土与非根际土中含水量、pH 及速效钾含量以及非根际土有机质、碱解氮、速效磷含量均未产生显著影响。

表 1 施氮水平对根际土、非根际土理化性质与速效养分影响的方差分析

因素	土壤类型	含水量	pH	有机质	容重	碱解氮	速效磷	速效钾
施氮水平	根际土	1.656	2.941	4.728 *		8.592 **	4.674 *	1.891
	非根际土	2.745	1.914	2.583	7.440 **	3.029	0.591	0.691

注: **、* 分别表示 $p<0.01$, $p<0.05$ 。下同。

2.2 不同施氮水平对根际、非根际土中含水量及 pH 的影响

由表 2 可知,随着施氮量增加,N1 处理下根际土含水量较未施氮处理显著降低 10.00% ($p<0.05$);各处理间非根际土含水量无明显变化;根际土 pH 缓慢下降,N4 处理下达最低值,非根际土 pH 整体呈先上升后下降趋势。相同施氮水平下,非根际土含水量均大于根际含水量;土壤 pH 表现为非根际土小于根际土。

表 2 不同施氮水平对根际土、非根际土含水量及 pH 的影响

施氮水平	土壤含水量/%		土壤 pH	
	根际土	非根际土	根际土	非根际土
N0	0.20±0a	0.23±0b	7.98±0.02a	7.96±0.02ab
N1	0.18±0b	0.23±0ab	7.99±0.02a	7.96±0.02ab
N2	0.19±0ab	0.22±0b	7.97±0.02a	7.98±0.02a
N3	0.19±0.01ab	0.23±0.01b	7.96±0.03a	7.91±0.03b
N4	0.20±0.01ab	0.24±0a	7.80±0.09b	7.96±0.01ab

注:表中数据均为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一土壤类型下不同施氮水平之间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.3 不同施氮水平对根际、非根际土有机质及非根际土容重的影响

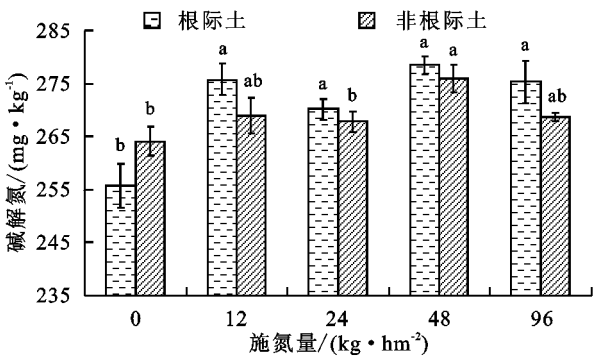
由表 3 可知,随施氮水平增加,N3 处理下根际土有机质较未施氮处理提高 15.18% ($p<0.05$),总体呈上升趋势;非根际土有机质含量则在 N4 水平处达到最大,显著高于未施氮处理($p<0.05$);N4 处理下土壤容重达到峰值($p<0.05$)。在相同施氮水平下,土壤有机质表现为根际土大于非根际土。

表 3 不同施氮水平对根际土、非根际土有机质及非根际土容重的影响

施氮水平	土壤有机质/(mg·kg ⁻¹)		土壤容重/(g·cm ⁻³)
	根际土	非根际土	非根际土
N0	117.59±2.59b	104.72±1.03b	1.10±0.01b
N1	124.32±1.36b	107.83±1.30ab	1.08±0.01b
N2	126.60±8.21b	108.06±1.15ab	1.12±0.00b
N3	144.54±3.60a	108.22±0.81ab	1.09±0.01b
N4	126.10±4.14b	109.57±1.21a	1.15±0.01a

2.4 不同施氮水平对根际、非根际土速效养分影响

2.4.1 不同施氮水平对根际、非根际土碱解氮的影响 由图 1 可知,随施氮量增加,N3 处理下根际土和非根际土碱解氮含量均最高,显著大于未施氮处理($p<0.05$);除对照组外,同一施氮水平下,根际土碱解氮含量均有大于非根际土趋势。



注:图柱上方不同小写字母代表在同一施氮水平下不同土层之间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 不同施氮水平对根际土、非根际土碱解氮含量的影响

2.4.2 不同施氮水平对草地根际、非根际土中速效磷的影响

由图 2 可知,随施氮水平增加,N3 处理下根际土、非根际土速效磷含量同时达最大值,分别较未施氮处理提高 44.38%和 8.43% ($p<0.05$)。除 N3 处理外,同一施氮水平下,土壤速效磷表现为根际土小于非根际土。

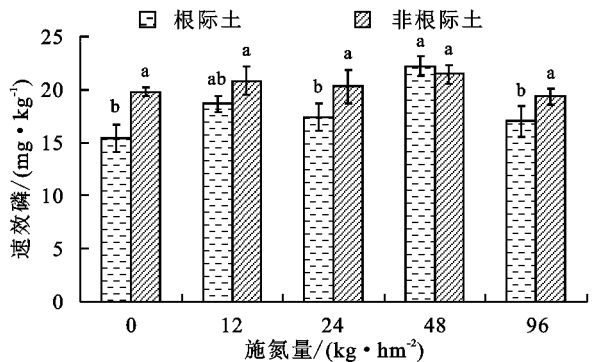


图 2 不同施氮水平对草地根际、非根际土速效磷的影响

2.4.3 不同施氮水平对草地根际、非根际土速效钾的影响

由图 3 可知,随着施氮水平提升,非根际土速效钾含量在各处理间差异不显著;N3 处理下根际土速效钾含量显著高于其他处理($p<0.05$),且除 N3 水平外,土壤速效钾含量均表现为根际土小于非根际土。

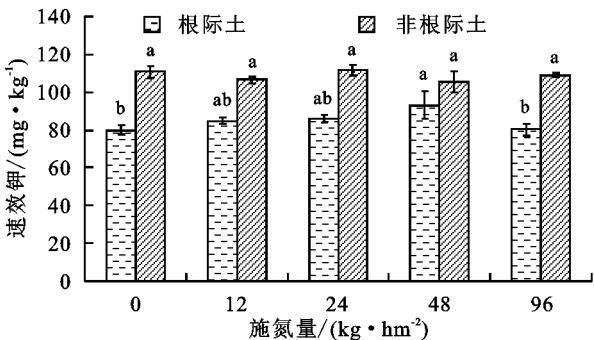


图 3 不同施氮水平对草地根际、非根际土速效钾的影响

2.5 不同施氮水平对于根际、非根际土理化性质与速效养分灰色关联度综合分析

为进一步探究不同施氮水平对垂穗披碱草地根际土、非根际土的影响,采用灰色关联度综合分析法,对不同施氮水平下根际、非根际土理化特性以及速效养分

进行综合分析。由表 4 可知,根际土关联度排序为 N3>N1>N2>N4>N0,即 N3 处理对于垂穗披碱草地根际土理化性质及速效养分影响效果最佳;非根际土关联度排序为 N4>N3>N2>N0>N1,即 N4 处理对于垂穗披碱草地非根际土理化性质及速效养分影响效果最佳。

表 4 不同施氮水平对于根际、非根际土理化性质与速效养分灰色关联度综合分析

土壤类型	因素	含水量	pH	有机质	容重	碱解氮	速效磷	速效钾	关联度	排名
根际土	N0	1.00	0.99	0.45		0.65	0.33	0.52	0.66	5
	N1	0.65	1.00	0.52		0.94	0.49	0.63	0.70	2
	N2	0.72	0.99	0.55		0.84	0.42	0.66	0.70	3
	N3	0.84	0.97	1.00		1.00	1.00	1.00	0.97	1
	N4	0.85	0.87	0.55		0.93	0.40	0.53	0.69	4
非根际土	N0	0.45	0.96	0.53	0.49	0.53	0.39	0.83	0.60	4
	N1	0.53	0.95	0.76	0.05	0.66	0.63	0.52	0.58	5
	N2	0.40	1.00	0.78	0.60	0.63	0.47	1.00	0.70	3
	N3	0.43	0.84	0.80	0.48	1.00	1.00	0.46	0.72	2
	N4	1.00	0.96	1.00	1.00	0.65	0.33	0.67	0.80	1

3 讨论

3.1 不同施氮水平对根际、非根际土理化性质影响

权国玲等^[12]研究表明,施肥对土壤容重、总孔度及含水量无显著影响,原因可能是土壤结构及理化性质相对稳定,仅进行短期施肥处理无法改变土壤理化性质。本研究中,随着施氮水平的上升,根际土含水量呈先下降后上升趋势,非根际土含水量呈略微上升趋势。试验结果与权国玲等^[12]研究有略微不符,推断其原因可能为试验中氮肥添加是以尿素水溶液形式进行喷施,垂穗披碱草在吸收氮素时对土壤中水分起到一定的聚集作用,所以 N1 处理下根际土水分被连带吸收进入植物体内,而高氮处理下,垂穗披碱草根际需要吸收的尿素溶液随浓度升高而减少,因此,根际土含水量呈现逐渐回升现象。而非根际土受到垂穗披碱草根系对土壤水分吸收的作用较小,因此,含水量无明显变化。而在相同施氮水平下,非根际土含水量均低于根际土含水量,此现象也与垂穗披碱草根系对土壤中水分的主动吸收有关,根系在吸收水分时,在一定程度上将水分聚集到根系附近的土壤中,造成根际土含水量高于非根际土含水量。土壤容重的大小同时受到土壤质地、结构、有机质含量以及各种因素的共同影响,能够粗略地反映土壤质地以及持水透气状况,是衡量及判断土壤结构的重要指标之一。本试验中,非根际土容重无明显变化,但在 N4 水平下达到最大。张雪丽^[13]研究认为,外源氮素添加引起土壤发生化学侵蚀,导致土壤结构发生改变,进而使土壤容重受到影响,出现容重增加或降低的现

象。同时外源氮素的不断输入造成土壤腐殖质持续分解和流失,导致土壤紧实度提高,造成土壤容重增加的现象^[14]。本试验中,N4 水平下土壤容重显著增加,其余施氮处理均无明显变化。由于 N1、N2 及 N3 施氮水平在短期不足以改变土壤容重,而在 N4 水平下,外源氮添加已经引起土壤结构改变,同时使得土壤腐殖质开始分解流失,与土壤有机质在 N3 水平下达到最高,而 N4 水平处开始下降的现象相符。所以非根际土容重在 N4 水平下达到最大,与前文权国玲等^[12]、张雪丽^[13]研究相符。

土壤有机质含量是评价土壤肥力的核心指标之一,土壤有机质含量越高,对土壤结构的促成作用越明显,对土壤自身所具备的吸收能力提升越强,对土体的缓冲性造成更积极影响,能为植物提供更多所需的营养成分。武运涛等^[15]研究认为,土壤有机质根据其密度或粒径大小被分为颗粒态有机质(POM)和矿质结合态有机质(MAOM),随着氮添加量的增加,POM 的氮含量随施氮量增加而显著增加;同时黄晶等^[16]研究表明,适度施加氮肥能提高土壤有机质含量。本试验中,随施氮水平上升,根际土有机质在 N3 处理下达到最大,非根际土有机质含量也随施氮水平提升而逐渐上升,在 N4 水平处达到最大。相同施氮水平下,土壤有机质均表现为根际土大于非根际土。其原因推测为垂穗披碱草根系对于土壤中养分的吸收以及根系分泌物导致根际土中微生物含量高于非根际土。同时土壤微生物可通过利用植物残体的方式对土壤碳库进行补充^[17],而土壤中的垂穗披碱草

根系残体或是土壤中本身具有的植物残体经过各种微生物分解后提升土壤有机质含量^[18]。

土壤 pH 可直观反映土壤酸碱性,对于衡量土壤是否适合作物栽培起到重要参考意义,并且土壤 pH 及容重与土壤有机质呈现显著的负相关关系^[19]。即使土壤对于 pH 的改变具有一定的缓冲能力,但是长期外源氮素添加仍导致土壤 pH 下降^[20]。根据刘贺永等^[21]对模拟氮沉降对草地土壤 pH 和电导率的影响研究表明,土壤 pH 具有随氮添加量增加而下降的趋势,而土壤电导率与氮素添加水平呈现负相关关系。本研究中,随施氮水平上升,根际土 pH 缓慢下降,并且在 N4 水平处达到最低。而周细红等^[22]研究表明,尿素对土壤 pH 影响大致可分为 2 个阶段,第 1 阶段中施用尿素可使土壤 pH 增高,其原因在于尿素在水解过程中消耗土壤中的氢。但出现最大值后,随即进入第 2 阶段,土壤 pH 开始随施氮水平上升而降低。其原因在于土壤中尿素水解产生的 NH_4^+ 可以通过土壤微生物转化为亚硝酸或硝酸盐,并产生 H^+ ,导致土壤 pH 下降。本研究中,非根际土 pH 在 N2 水平处达到最大随后下降,整体呈先上升后下降趋势,此结果与周细红等^[22]研究结论相似。同时,土壤有机质含量对提升土壤缓冲性能,减少土壤 pH 波动具有重要作用。而本试验中土壤 pH 表现为非根际土小于根际土,仅在 N4 水平处比根际土 pH 高出 2.01%。原因推测为非根际土的尿素未被植物吸收已被水解转化,产生 H^+ ,降低土壤 pH,而根际土中的尿素被根系吸收一部分,所以产生的 H^+ 少,根际土 pH 下降相对较缓。

3.2 不同施氮水平对根际、非根际土速效养分的影响

碱解氮由无机态氮和结构简单且能被直接吸收利用的有机态氮组成,可供作物直接吸收快速利用,故又称为速效氮。通过对草地进行外源氮添加可显著增加土壤速效氮含量。本试验中,随着施氮水平提升,根际土碱解氮含量逐渐上升,在 N3 水平下达到最大;非根际土碱解氮含量先上升后下降,在 N3 水平下达到最大,总体呈上升趋势,与晏和飘^[23]研究结果一致。在同一施氮水平下,根际土碱解氮含量在未施氮处理下低于非根际土含量,在 N1、N2、N3 及 N4 下根际碱解氮含量均高于非根际土碱解氮含量。此现象原因为,在未施氮处理下,植物根系对附近土壤中碱解氮的吸收。在外源氮素添加之后,植物根系对于碱解氮的主动吸收使得部分尿素聚集在根系附近,导致土壤中碱解氮含量提升,高于非根际土碱解氮含量。速效磷是当季作物从土壤中主要吸收的磷元素来源,在一定程度上可反映土壤对作物的磷素供应水

平。夏昊^[24]在黔西南州烤烟氮素调控技术研究发现,速效磷含量随着施氮水平提升先增高后降低;同时宋春燕等^[25]研究表明,由于氮素对磷的吸收有一定的协同作用,作物氮素的吸收促进对速效磷和速效钾的利用,所以速效磷含量随氮施用量增多而下降。本试验中,随着施氮水平提升,根际土速效磷含量逐渐上升,在 N3 水平下达到最大后下降,总体呈略微上升趋势。N3 水平下根际土速效磷含量显著高于未施氮处理、N2 及 N4 水平。非根际土速效磷含量呈先上升后下降趋势,在 N3 水平下达到最大,与以上研究结果一致。在同一施氮水平下,除 N3 水平外,根际土速效磷含量均低于非根际土含量。此现象是因为垂穗披碱草根系对于速效磷的吸收导致根系附近土壤中速效磷含量低于距离根系稍远的非根际土速效磷含量,与前文结论相符。而在 N3 水平下,根际土速效磷含量高于非根际土含量,与前文结论不符,推测原因为试验条件与试验地基况不一致,导致试验结果有差异。施加 N3 水平尿素的试验地速效磷含量可能较为充足,经施加氮肥后,根际土速效磷含量与非根际土速效磷含量得以同时提升。随着施氮水平提升,根际土速效钾含量略微上升,在 N3 水平下达到最大后迅速下降,总体无明显变化;非根际土中速效钾含量无明显变化;在同一施氮水平下,根际土速效钾含量低于非根际土速效钾含量。此现象原因为垂穗披碱草根系对于土壤中氮素的吸收促进对速效磷和速效钾的利用,导致根系附近的速效钾含量始终低于远离根系的非根际土,与宋春燕等^[25]研究结论一致。

结合不同氮素添加水平对高寒生态条件下垂穗披碱草人工草地土壤理化性质及速效养分影响进行综合分析讨论。同时,对于不同施氮水平下根际、非根际不同速效养分的不同响应状况,应从土壤综合性质及土壤速效养分之间的相互作用来综合分析。试验采用灰色关联度分析法对氮素添加水平、土壤理化性质及速效养分含量进行综合分析发现,48 kg/hm² 处理对于垂穗披碱草草地根际土壤理化性质影响效果最佳,96 kg/hm² 处理对于垂穗披碱草草地非根际土壤理化性质影响效果最佳。

4 结论

(1)施氮可改善垂穗披碱草草地土壤理化性质和提高土壤速效养分含量。

(2)施氮水平对根际土碱解氮含量以及非根际土容重产生极显著影响,对根际土有机质、速效磷含量产生显著影响。

(3) 48 kg/hm² 处理对于根际土壤理化性质以及速效养分的影响优于其他氮素水平, 96 kg/hm² 处理对于非根际土壤理化性质以及速效养分的影响优于其他氮素水平。

参考文献:

- [1] 倪璐. 近 30 年中国草地物候变化及其对气候因子的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [2] 李海云. 祁连山高寒草地退化过程中“植被—土壤—微生物”互作关系[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [3] 胡冬雪. 氮素调控对羊草生产性能、品质及土壤理化性质的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2017.
- [4] 武建双, 沈振西, 张宪洲, 等. 藏北高原人工垂穗披碱草种群生物量分配对施氮处理的响应[J]. 草业学报, 2009, 18(6): 113-121.
- [5] 李盼盼. 施氮对白羊草群落特征及土壤侵蚀过程的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [6] 宗宁, 石培礼, 牛犇, 等. 氮磷配施对藏北退化高寒草甸群落结构和生产力的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3458-3468.
- [7] 殷立新. 红心杉根际土壤与非根际土壤养分差异研究[J]. 湖南林业科技, 2014, 41(1): 54-59.
- [8] 梅杰, 周国英. 不同林龄马尾松林根际与非根际土壤微生物、酶活性及养分特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(4): 46-49.
- [9] 曹永昌, 杨瑞, 刘帅, 等. 秦岭典型林分夏秋两季根际与非根际土壤微生物群落结构[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1667-1676.
- [10] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D22): e375.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [12] 权国玲, 谢开云, 全宗永, 等. 复合微生物肥料对羊草草原土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(2): 27-36.
- [13] 张雪丽. 模拟氮沉降对桂花林土壤理化性质和酶活性的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- [14] 王强. 模拟大气氮沉降对闽北森林土壤理化性质及森林碳动态的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2006.
- [15] 武运涛, 杨森, 王欣, 等. 草地土壤有机质不同组分氮库对长期氮添加的响应[J]. 植物生态学报, 2021, 45(7): 790-798.
- [16] 黄晶, 高菊生, 张杨珠, 等. 长期不同施肥下水稻产量及土壤有机质和氮素养分的变化特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1889-1894.
- [17] 徐英德. 玉米残体碳向土壤有机碳转化的微生物介导过程解析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [18] 孙羽, 李晓燕, 陈杰, 等. 不同恢复措施对退化高寒草甸土壤团聚体稳定性及其有机碳分布的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(3): 60-67.
- [19] 李冬初, 黄晶, 马常宝, 等. 中国农耕区土壤有机质含量及其与酸碱度和容重关系[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 252-258.
- [20] 陈林, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 不同施氮水平下土壤的生化性质对干湿交替的响应[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 675-683.
- [21] 刘贺永, 何鹏, 蔡江平, 等. 模拟氮沉降对内蒙古典型草地土壤 pH 和电导率的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 85-91.
- [22] 周细红, 曾清如, 蒋朝辉, 等. 尿素施用对土壤 pH 值和模拟温室箱内 NH₃ 和 NO₂ 浓度的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 374-376.
- [23] 晏和飘. 基于 Meta 分析的氮添加对不同放牧强度草地植被和土壤特征的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [24] 夏昊. 黔西南州烤烟氮素调控技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
- [25] 宋春燕, 赵婷婷, 杨景凯, 等. 优化氮肥施用量对崂山区茶园土壤养分的影响[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(增刊 2): 120-122, 246.