

低氮胁迫下不同苦荞品种开花前土壤养分含量特征

陈伟, 崔亚茹, 孙从建, 杨洋

(山西师范大学 地理科学学院, 山西 临汾 041000)

摘要:为了揭示耐低氮苦荞品种在胁迫环境下的优势,以耐低氮的迪庆苦荞(DQ)和不耐低氮的黑丰1号(HF)为材料,采用盆栽试验研究了开花前低氮胁迫下不同苦荞品种种植后造成的土壤养分含量差异。结果表明:低氮处理下两品种差异显著, HF 土壤的含水量、pH 值以及全氮含量分别比 DQ 高 33.78%, 1.43%, 50%, 而 DQ 土壤的 NO_3^- -N 含量、氨氧化酶活性显著高于 HF 49.2%, 97%。因此,迪庆苦荞可能通过吸收较多的水分、养分来适应低氮胁迫,并且通过提高氨氧化酶活性,加速硝化作用转化出更多的有效态氮供植物吸收利用。所以,对于未来贫瘠土壤上苦荞的种植应考量其耐瘠性的差异,选育耐瘠性强的品种来增加效益。

关键词:低氮胁迫; 苦荞品种; 养分含量

中图分类号:S158.3; S517

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0151-06

Characteristics of Soil Nutrient Contents in the Fields of Different Cultivated Varieties of *Fagopyrum tataricum* Before Flowering Under Low Nitrogen Stress

CHEN Wei, CUI Yaru, SUN Congjian, YANG Yang

(College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China)

Abstract: In order to reveal the advantages of low-nitrogen-resistant varieties of *Fagopyrum tataricum* under stress conditions, pot experiments were conducted to study the differences in soil nutrient contents of two varieties of *Fagopyrum tataricum* (DQ, low N resistance and HF, low N sensitive) under low N stress before flowering. The results showed that the two varieties were significantly different under low nitrogen treatment. The soil moisture, pH and total N content in the field of HF were 33.78%, 1.43% and 50% higher than those in the field of DQ, respectively; however, the NO_3^- -N content and ammonium oxidase activity in the field of DQ were 49.2% and 97% higher than those in the field of HF. DQ may adapt to the nitrogen stress through the ways of absorbing more water, and convert more available N for plant absorption and utilization by increasing the ammonium oxidase activity. Therefore, the cultivation of *Fagopyrum tataricum* should consider the differences of varieties in order to increase efficiency on poor soil in the future.

Keywords: low nitrogen stress; different varieties of *Fagopyrum tataricum*; nutrient content

氮是植物体内许多重要化合物的组成成分,是植物生长发育必需的大量元素之一,通常植物在生长过程中对氮素的需求量要高于其他矿质元素,因而氮素常成为限制植物生长的主要元素^[1]。土壤氮素的供应水平直接制约着其生产力^[2],因此土壤氮匮乏会直接影响作物产量^[3]。为了改善土壤氮匮乏状况,提高作物产量,我国用于农业生产中的氮肥量在逐年增大^[4]。然而,长期向土壤中大量补充氮源,已导致土壤酸化板结、富营养化、氮肥利用率降低等诸多问题,

破坏了土壤生态系统的稳定性,对土壤环境构成威胁^[5]。所以急需提高作物的氮素吸收、利用效率以提高产量和减少环境污染^[4]。在土壤中,有机态氮素不能被植物直接吸收,需要通过一些土壤酶调控下的氨化、硝化作用等将其转化为能被植物直接吸收利用的无机态氮(铵态氮和硝态氮)^[2]。而在硝化过程中,氨氧化酶极其重要,它是硝化作用的限速步骤^[6]。因此选择耐低氮能力强的作物,挖掘胁迫条件下土壤酶活性强、氮素转化效率高的品种,是解决农业可持续发

展的重要途径^[7]。

植物在逆境下能够感应外界胁迫并通过自身调节系统使之在形态和生理上发生适应反应,以增强其在胁迫条件下的生存机会^[7]。在胁迫条件下,不同作物间和同一作物不同品种间,在对氮、磷等有效元素的吸收和利用效率上表现出明显的差异性^[8]。许多学者对小麦、水稻、玉米、大豆等作物开展了耐低氮特性研究,并获得了有价值的种质资源,但是对苦荞等小杂粮的研究比较少^[9]。苦荞在高寒高原山区具有明显的生长优势,是贫瘠地区重要的杂粮作物^[10]。其生育周期短,适应性强,耐旱、耐瘠薄,且具有极高的食用价值与药用价值^[9]。前人对苦荞的研究大多集中在食用药用价值、种质筛选以及栽培技术等方面,对苦荞在低氮胁迫下的养分利用效率研究较少。苦荞的综合抗瘠能力较强,但不同品种或同品种不同基因型之间的抗瘠性差异显著^[11]。有研究表明低氮胁迫下耐低氮苦荞品种具有明显的生长优势,不仅农艺性状、叶片光合作用及根系活性受低氮胁迫影响小,而且具有较高的根系保护酶活性、渗透调节物质含量以及氮积累量^[9]。张楚等^[12]通过对不同苦荞品种的各种指标进行研究后,发现迪庆苦荞具有较强的耐瘠性,而黑丰 1 号苦荞的耐瘠性较弱。有研究表明种子成熟期 80% 的氮素供给来自开花前植物体内养分的积累及后期在体内的转移^[6],如玉米花前营养器官氮素转运对籽粒氮素累积贡献率为 42%~62%^[13],所以作物开花前的土壤养分供给研究尤为重要。

因此,本文以迪庆苦荞和黑丰 1 号两种不同耐瘠性苦荞为材料,通过盆栽试验,研究低氮胁迫下其在开花前土壤养分含量的差异性,探究耐瘠性品种在低氮环境下的养分有效性与优势性,从而增加对苦荞耐贫瘠特性的认知,为黄土高原土壤冷凉地区农田氮肥优化管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为黄土母质上发育而成的褐土,其养分含量为:pH 值 7.75,全氮 0.105 g/kg,全磷 0.306 g/kg,全钾 4.57 g/kg,铵态氮 0.39 mg/kg,硝态氮 0.23 mg/kg,有效磷 3.69 μ g/g,速效钾 100.12 mg/kg。供试苦荞品种为黑丰 1 号(HF)和迪庆苦荞(DQ)。其中,黑丰 1 号为不耐瘠品种,由山西省农业科学院高寒作物研究所提供;迪庆苦荞为耐瘠性品种,由迪庆藏族自治州农业科学研究所提供。

1.2 试验设计

本试验于 2017 年 5 月在山西师范大学校塑料大

棚内进行。采用盆栽试验,共设置 3 个处理,分别为 N_0 (不施氮处理)、 N_1 (低氮处理,尿素 80 mg/kg)、 N_2 (常氮处理,尿素 160 mg/kg),每个处理设置 4 次重复,各种处理中均施入相同量的过磷酸钙(P_2O_5 , 150 mg/kg)与硫酸钾(K_2O , 60 mg/kg)。每个处理设置 2 个水平,种植不同耐瘠性苦荞品种:黑丰 1 号和迪庆苦荞。每盆装入 10 kg 土,并按相应处理施以肥料,混合均匀。每盆选取饱满均匀无病虫害的种子 16 粒,经去离子水浸泡 24 h 后,均匀播种,两叶一心间苗,每盆定苗 8 株,之后正常供应水分。

1.3 样品采集

苦荞于 5 月 8 日播种,三叶一心定苗,于 6 月 23 日采集。取回来的土样一部分铺展于干净的塑料布上,风干 1 周左右后,去杂、磨细、过筛后保存,用于土壤基本理化性质的测定。另一部分放置于 4℃ 气候箱保存,用于铵态氮、硝态氮、氨氧化酶的测定。

1.4 测定指标及方法

土壤含水量采用烘干法,称取少量鲜土放入铝盒,在 105℃ 烘干 24 h 后,计算含水量。土壤 pH 值采用电位法,取 10 g 鲜土,按土水比 1:2.5 比例加入 25 ml 蒸馏水,充分震荡 1 min,静置 30 min 后,用 pH 值计测定。土壤全氮采用 H_2SO_4 —混合催化剂消煮—半微量凯氏蒸馏法,全磷采用高氯酸硫酸消煮—钼锑抗比色法,全钾采用高氯酸硫酸消煮—火焰光度计法,有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度计法^[14]。土壤铵态氮和硝态氮均用 2 mol/L 氯化钾溶液浸提,用 SmarChem 全自动化学分析仪测定^[14]。土壤氨氧化酶:土壤样品中加入 20 ml 的 1 mmol/L 的硫酸铵溶液和 0.1 ml 的 1.5 mol/L 的氯酸钠溶液,混匀后在摇床上震荡并培养 5 h,培养期间释放的亚硝态氮用 2 mol/L 氯化钾溶液提取,并在 520 nm 下比色测定。其中,氯酸钠抑制亚硝态氮到硝态氮的氧化^[15]。

1.5 数据统计分析

数据统计结果运用 SPSS 22.0 软件,采用邓肯分析方法($p=0.05$),单因素方差分析和独立样本 T 检验来比较数据之间的差异性。运用 Origin 8 软件进行制图,利用 CANOCO 软件进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 氮处理和不同苦荞品种对土壤理化性质的影响

不同氮处理下,品种均对土壤的含水量、pH 值产生显著影响($p<0.05$),黑丰 1 号的土壤含水量分别较迪庆苦荞高 68.52%,33.78%,50.87%,黑丰 1 号的土壤 pH 值分别较迪庆苦荞高 1.43%,1.43%,

1.83%。N₁ 与 N₂ 处理相比,黑丰 1 号和迪庆苦养的土壤含水量分别显著减少 24.14%,14.45% ($p<0.05$);黑丰 1 号 N₁ 处理的土壤 pH 值略高于 N₂ 处理,但差异不显著;而迪庆苦养 N₁ 处理的土壤 pH 值显著高于 N₂ ($p<0.05$) (表 1)。

N₁ 处理下,黑丰 1 号的土壤全氮含量显著高于迪庆苦养 50% ($p<0.05$),而全磷、全钾含量无显著差异;此外,N₀,N₂ 处理下几种养分含量在品种间均无显著差

异。黑丰 1 号土壤中全氮含量在 N₁,N₂ 处理之间无显著差异,但分别比 N₀ 显著高 65.25%,83.05% ($p<0.05$);迪庆苦养土壤中全氮含量在 N₂ 处理下比 N₀ 显著高 1 倍,比 N₁ 高 80% ($p<0.05$) (表 1)。因此两种苦养土壤中全氮含量基本表现为随着氮肥施用量增加而增加。两种苦养全磷、全钾含量在 N₁,N₂ 处理下均无显著差异,由于本试验中不同氮处理所施磷肥、钾肥含量一样,因此磷和钾的总贮量差异不大。

表 1 氮处理和不同苦养品种对土壤含水量、pH 值、全氮、全磷、全钾的影响

项目	黑丰 1 号(HF)			迪庆苦养(DQ)		
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₀	N ₁	N ₂
含水量/%	27.300±2.33a*	19.800±1.88b*	26.100±1.87a*	16.200±1.16ab	14.800±1.47b	17.300±1.76a
pH 值	7.820±0.03*	7.810±0.07*	7.770±0.05*	7.710±0.05a	7.700±0.04a	7.630±0.04b
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.118±0.01b	0.195±0.02a*	0.216±0.03a	0.117±0.01b	0.130±0.01b	0.234±0.02a
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.357±0.03	0.362±0.04	0.389±0.02	0.358±0.02b	0.385±0.02ab	0.412±0.02a
全钾/(g·kg ⁻¹)	5.068±0.25b	5.397±0.22ab	5.633±0.30a	5.185±0.31b	5.649±0.29a	5.916±0.31a

注:N₀ 为不施氮处理,N₁ 为低氮处理,N₂ 为常氮处理。表中数值为平均值±标准偏差。小写字母表示同一品种不同氮处理间差异显著 ($p<0.05$),不标表示差异不显著 ($p>0.05$);同一氮处理下黑丰 1 号与迪庆苦养相比,* 表示差异显著 ($p<0.05$),不标表示差异不显著 ($p>0.05$)。

在 N₁ 和 N₂ 处理下,不同品种对土壤中 NH₄⁺-N 含量影响不大;而 N₀ 处理下,黑丰 1 号显著低于迪庆苦养 40.5% ($p<0.05$)。黑丰 1 号土壤中 NH₄⁺-N 含量在 N₁ 和 N₂ 之间无显著差异,但均与 N₀ 处理具有显著差异 ($p<0.05$),分别比 N₀ 高 1.192 倍,1.373 倍;而迪庆苦养土壤中 NH₄⁺-N 含量在 N₂ 处理下达到最高值,分别比 N₀,N₁ 显著高 47.4%,19.3% ($p<0.05$) (图 1A)。两种苦养土壤中铵态氮含量均大致表现为随着施氮量增加而增加。

N₀ 处理下,品种对土壤中 NO₃⁻-N 含量影响不大;N₁ 处理下,迪庆苦养土壤中 NO₃⁻-N 的含量显著高于黑丰 1 号 49.2% ($p<0.05$);而 N₂ 处理下,迪庆苦养土壤中 NO₃⁻-N 的含量显著低于黑丰 1 号 9.5% ($p<0.05$)。黑丰 1 号土壤中 NO₃⁻-N 含量在 N₂ 处理达到最高值,并与 N₀,N₁ 处理产生显著差异 ($p<0.05$),比 N₀ 高 1.01 倍,比 N₁ 高 44.3%。而迪庆苦养土壤中 NO₃⁻ 含量在 N₁ 处理达到最高值,比 N₀,N₂ 显著高 98.9%,14.3% ($p<0.05$) (图 1B)。说明黑丰 1 号土壤硝态氮含量大致表现为随着施氮量增加而增加,而迪庆苦养则表现为先升高后降低。

黑丰 1 号土壤中有效磷含量在 N₀,N₁ 处理下分别显著高于迪庆苦养 12.08%,12.78% ($p<0.05$),在 N₂ 处理下两品种无显著差异。黑丰 1 号土壤中有效磷含量在 N₁ 处理下达到最高值,分别比 N₀,N₂ 显著高 31.65%,17.06% ($p<0.05$);迪庆苦养土壤中 N₁ 和 N₂ 处理的有效磷含量差异不显著,但分别比 N₀ 显著高 30.83%,25.23% ($p<0.05$) (图 1C),说明两种苦养土壤中有效磷含量在低氮处理下具有显著差异,并且随着氮

肥施用量先增加后降低,在 N₁ 处达到最高值。

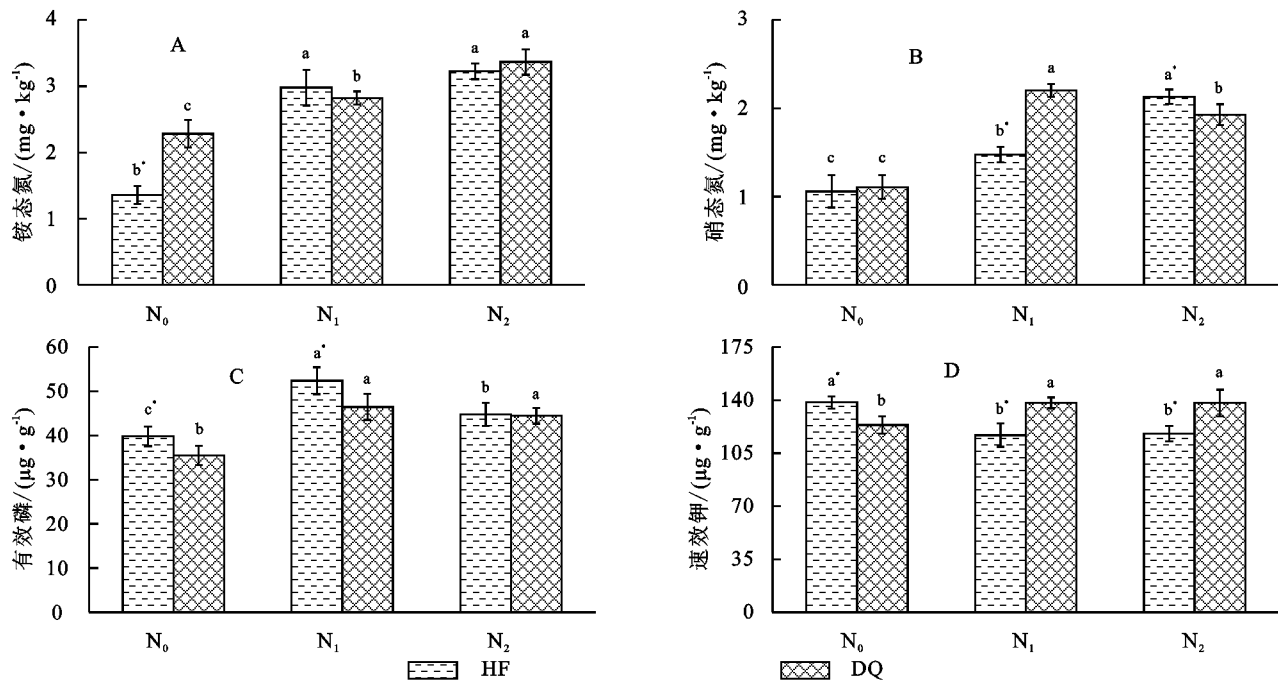
黑丰 1 号土壤中速效钾含量在 N₀ 处理下显著高于迪庆苦养 12.06%,在 N₁,N₂ 处理下分别显著低于迪庆苦养 15.43%,14.61% ($p<0.05$)。两种苦养土壤中速效钾含量在 N₁ 和 N₂ 处理下均无显著差异 (图 1D),说明施氮处理对土壤速效钾含量影响不大。

2.2 氮处理和不同苦养品种对土壤氨氧化酶活性的影响

不同苦养品种对土壤中氨氧化酶活性的影响具有显著差异 ($p<0.05$),不同氮处理下,迪庆苦养土壤中氨氧化酶含量分别比黑丰 1 号高 2.57 倍,97%,85%。两种苦养土壤中氨氧化酶活性均表现为随着氮肥施用量的增加而增强。N₂ 处理下,黑丰 1 号土壤中氨氧化酶含量分别比 N₀,N₁ 显著高 15.28 倍,2.2 倍,迪庆苦养土壤中氨氧化酶含量分别比 N₀,N₁ 显著高 7.44 倍,2.01 倍 ($p<0.05$) (图 2)。

2.3 品种和氮处理对结果产生的差异性

主成分分析结果表明,第一二主轴分别解释了总变异的 48.4%,33.8% (图 3)。黑丰 1 号和迪庆苦养可以沿第一主轴明显区分,但是 N₀ 处理下两品种的差异性与其他两个氮处理相反,表明品种对土壤理化性质以及酶活性的影响明显不同。黑丰 1 号的 N₀ 处理可以沿第二轴与 N₁,N₂ 明显区分,迪庆苦养的 N₀,N₁ 处理可以沿第二轴与 N₂ 明显区分,表明不施氮与施氮处理会对土壤理化性质以及酶活性产生不同的影响。另外,土壤含水量、pH 值均与土壤内全氮、全磷、全钾、铵态氮、硝态氮含量以及氨氧化酶活性呈显著负相关。



注: HF 为黑丰 1 号, DQ 为迪庆苦荞, N_0 为不施氮处理, N_1 为低氮处理, N_2 为常氮处理。误差线表示标准差, 其上小写字母表示同一品种不同氮处理间差异显著 ($p < 0.05$), 不标表示差异不显著 ($p > 0.05$); 同一氮处理下黑丰 1 号与迪庆苦荞相比, * 表示差异显著 ($p < 0.05$), 不标表示差异不显著 ($p > 0.05$)。下图同。

图 1 氮处理和不同苦荞品种对土壤速效养分的影响

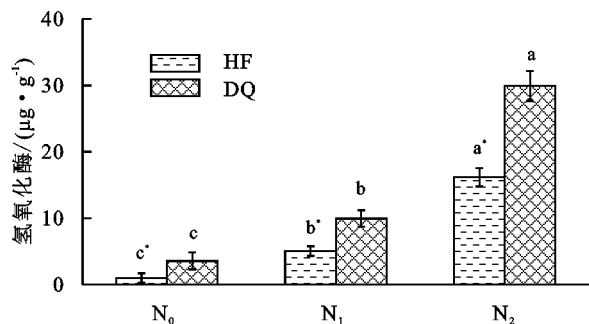


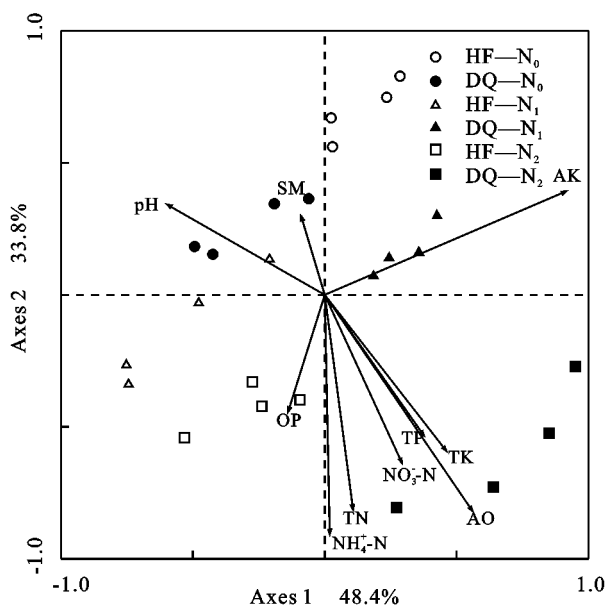
图 2 氮处理和不同苦荞品种对土壤脲酶活性的影响

3 讨论

3.1 氮处理对不同苦荞品种的土壤养分状况以及酶活性的影响

有研究表明在 $0 \sim 180 \text{ kg/hm}^2$ 施氮范围内, 施氮可明显增加土壤全氮含量^[16], 土壤中的氮以各种复杂的化学形态存在, 施用氮肥能显著增加土壤中铵态氮、硝态氮和碱解氮的含量, 改善根际土壤的养分状况, 增加养分有效性^[17-18], 而植物体主要以铵态氮和硝态氮形式吸收利用, 因此氮肥施用量多其体内吸收的氮素相应也会增加。在本试验中迪庆苦荞中土壤全氮、 NH_4^+-N 含量均表现为随着施氮量增加而增加并在 N_2 处理下达到最高值, 而土壤 NO_3^--N 含量则在 N_1 处理下达到最高值。黑丰 1 号中土壤 NO_3^--N 含量在 N_2 处理下达到最高值, 而土壤全氮、 NH_4^+-N 含量则在 N_1 处理下达到最高值。这可能是由于品种的耐瘠性不同, 使得低氮处理下迪庆

苦荞的氮转化效率更强, 由 NH_4^+-N 转化成的 NO_3^--N 的含量较多, 而黑丰 1 号较少。另外, 施氮会促进土壤微生物生长繁殖, 同时提高根际土壤酶活性^[19], 有研究表明施肥能明显增加土壤中纤维素降解酶、脲酶、蛋白酶等的活性^[20], 促进有机物质矿化, 以可同化的形式释放营养元素^[21]。在本试验中, 脲酶活性受施肥影响显著, 随着氮肥量增加而显著增强。



注: SM 为土壤含水量, pH 值为土壤酸碱度, TN 为全氮, TP 为全磷, TK 为全钾, OP 为有效磷, AK 为速效钾, NH_4^+-N 为铵态氮, NO_3^--N 为硝态氮, AO 为脲酶活性。

图 3 主成分分析

苦养品种不同,其在不同氮处理下的酶活性强度、土壤硝化作用速率均不同^[22]。低氮处理下,黑丰1号土壤全氮含量高于迪庆苦养,而土壤氨氧化酶活性、 NO_3^- -N含量均低于迪庆苦养。在硝化过程中,氨氧化酶起主导作用,它是硝化作用的限速步骤^[6],迪庆苦养土壤中较高的酶活性加速了土壤氮转化以及硝化过程,使其土壤中全氮含量较低,而 NO_3^- -N含量较多,养分有效性增强,植株吸收利用养分含量也随之增多。因为品种之间的差异性,使得耐低氮性的迪庆苦养在遭受胁迫时,对胁迫产生的一系列反应更强,其可吸收利用的养分含量更多。谢孟林等^[23]研究表明随着低氮胁迫程度的增大和时间的延长,耐低氮品种对低氮胁迫的适应性增强,不耐低氮品种则降低。另有研究表明,低氮条件下植物可通过扩大根系体积、增加根冠比的途径来改善其自身的氮素供应状况,以满足对氮素的需求^[24]。吴雅薇等^[4]研究表明耐低氮玉米品种在低氮胁迫下能够保持较高的根系活力,从而促进根系对一些营养物质的吸收利用,更好地维持了碳氮循环。

3.2 不同苦养土壤含水量、pH 值在低氮处理下的特征

低氮处理下,两种苦养的土壤含水量均低于常氮处理,说明低氮处理下,植株通过根系吸收的水分更多。有研究表明,作物面对胁迫时会增加主根的生长,来吸收离根系更深、更远处的水分、养分等^[9],因此低氮胁迫下,植株可能通过大量的蒸腾作用,让更多的水分携带养分物质带入到体内进行光合作用以维持生长,本文图3主成分分析结果表明,土壤水分和TP,TK,TN, NO_3^- -N和 NH_4^+ -N呈负相关关系,也很好证明了此观点。低氮处理下,黑丰1号的土壤含水量高于迪庆苦养,可能正是因为迪庆苦养在胁迫条件下的适应性更强,可能通过减少侧根密度^[25],增长根系^[26]的方式,提高吸收水分、养分的能力,使其植株耗水量增多;另外迪庆苦养在低氮处理下土壤 NO_3^- -N含量较多, NO_3^- -N被植物吸收的主要方式是质流,植物吸收 NO_3^- -N的同时需要消耗更多的水分^[27]。

低氮处理下,黑丰1号的土壤pH值高于迪庆苦养。首先,低氮处理下迪庆苦养土壤的硝化作用($\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$)较强,因此释放的 H^+ 也多^[27];其次,迪庆苦养在胁迫条件下可能会分泌大量的有机酸^[28],从而降低土壤pH值;最后,迪庆苦养在低氮胁迫下可吸收利用的 NO_3^- -N含量多于黑丰1号,因此其协同吸收的 H^+ 也多,为了维持pH值平衡所释放的 H^+ 也多^[29],因此土壤pH值较低。在上述分析中发现pH值与氨氧化酶活性呈负相关性(图3),并且有研究表明,较高的土壤pH值会毒害土壤硝化作用所

需的酶,使硝化过程受阻^[30],因此低氮胁迫下迪庆苦养土壤中适宜的pH值,其氨氧化酶活性较强,硝化作用下转化的可用氮素较多。

4 结论

不同基因型品种适应胁迫的能力不同,胁迫环境下,耐瘠性强的迪庆苦养比耐瘠性弱的黑丰1号更具有竞争力。作物成熟期80%的氮素供给来自开花前植物体内养分的积累及后期在体内的转移,因此植物在开花前积累的氮素极为重要,这样可以保证作物后期生长所需的营养,使其正常生长。低氮胁迫下迪庆苦养较黑丰1号吸收了更多水分,其根际土壤能够保持较高的氨氧化酶活性,使得转化出的有效态氮较多,而这些有效氮正是植物吸收利用氮素的主要来源。所以,对于未来贫瘠土壤上苦养的种植应考量其耐瘠性的差异,选育耐瘠性强的品种来提高氮素吸收利用效率,增加效益。

参考文献:

- [1] 张彦东,白尚斌. 氮素形态对树木养分吸收和生长的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(11):2044-2048.
- [2] 杨苗. 施氮对桉树林生长季土壤养分动态及温室气体通量的影响[D]. 河南焦作:河南理工大学,2015.
- [3] 张定一,张永清,杨武德,等. 不同基因型小麦对低氮胁迫的生物学响应[J]. 小麦研究,2006,32(1):1349-1354.
- [4] 吴雅薇,李强,豆攀,等. 低氮胁迫对不同耐低氮玉米品种苗期伤流液性状及根系活力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(2):278-288.
- [5] 于欢. 花前夜间增温下不同施氮量对麦田土壤养分及微生物的影响[D]. 南京:南京农业大学,2016.
- [6] 陈伟,皇甫倩华,孙建,等. 大气 O_3 升高对小麦根际土壤微生物量和氮素转化酶活性的影响[J]. 土壤通报,2017,48(3):623-630.
- [7] 张美俊,乔治华,杨武德,等. 不同糜子品种对低氮胁迫的生物学响应[J]. 植物营养与肥料学报,2014(3):661-669.
- [8] 郭程瑾,张立军,崔喜荣,等. 氮胁迫条件下中国春一代换系小麦苗期耐低氮特征研究[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(1):29-37.
- [9] 张楚,张永清,路之娟,等. 低氮胁迫对不同苦养品种苗期生长和根系生理特征的影响[J]. 西北植物学报,2017,37(7):1331-1339.
- [10] 张雄,王立祥,柴岩,等. 小杂粮生产可持续发展探讨[J]. 中国农业科学,2003,36(12):1595-1598.
- [11] 路之娟,张永清,张楚,等. 不同基因型苦养苗期抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 中国农业科学,2017,50(17):3311-3322.
- [12] 张楚,张永清,路之娟,等. 苗期耐低氮基因型苦养的筛选及其评价指标[J]. 作物学报,2017,43(8):1205-1215.

- [13] 张经廷,刘云鹏,李旭辉,等.夏玉米各器官氮素积累与分配动态及其对氮肥的响应[J].作物学报,2013,39(3):506-514.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [15] Cheang H S, Pell M D. The sound of sarcasm[J]. Speech Communication, 2008,50(5):366-381.
- [16] 梁国鹏, Houssou A. Albert, 吴会军,等.施氮量对夏玉米根际和非根际土壤酶活性及氮含量的影响[J].应用生态学报,2016,27(6):1917-1924.
- [17] 张南翼.模拟增温和氮沉降对松嫩草原土壤养分状况的影响[D].长春:东北师范大学,2013.
- [18] 马兴华,于振文,梁晓芳,等.施氮量和底施追施比例对土壤硝态氮和铵态氮含量时空变化的影响[J].应用生态学报,2006,17(4):630-634.
- [19] 马宗斌,熊淑萍,何建国,等.氮素形态对专用小麦中后期根际土壤微生物和酶活性的影响[J].生态学报,2008,28(4):1544-1551.
- [20] Allison S D, Czimczik C I, Treseder K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest [J]. Global Change Biology, 2008,14(5):1156-1168.
- [21] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005,37(5):937-944.
- [22] 方运霆,莫江明,周国逸.离子交换树脂袋法研究森林土壤硝态氮及其对氮沉降增加的响应[J].生态环境学报,2005,4(4):483-487.
- [23] 谢孟林,李强,查丽,等.低氮胁迫对不同耐低氮性玉米品种幼苗根系形态和生理特征的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(8):946-953.
- [24] 汪晓丽,陶玥玥,盛海君,等.硝态氮供应对小麦根系形态发育和氮吸收动力学的影响[J].麦类作物学报,2010,30(1):129-134.
- [25] 苏冰莹,颜丽,关连珠,等.长期不同施肥对黑土无机磷组分的影响[J].中国土壤与肥料,2010(3):4-7.
- [26] 李奕林.不同水稻品种根际土壤硝化特征研究[D].南京:南京农业大学,2007.
- [27] 杨柳燕,王楚楚,孙旭,等.淡水湖泊微生物硝化反硝化过程与影响因素研究[J].水资源保护,2016,32(1):12-22.
- [28] 杨迪,马瑞,黄文斌,等.养分和水分胁迫下2年生落叶松根系有机酸的分泌行为研究[J].安徽农业科学,2013(36):13932-13934.
- [29] 戢林,李廷轩,张锡洲,等.水稻氮高效基因型根系分泌物中有机酸和氨基酸的变化特征[J].植物营养与肥料学报,2012,18(5):1046-1055.
- [30] Gao W, Cheng S, Fang H, et al. Effects of simulated atmospheric nitrogen deposition on inorganic nitrogen content and acidification in a cold-temperate coniferous forest soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(2):114-121.

(上接第150页)

- [7] 金修宽,马茂亨,赵同科,等.测墒补灌和施氮对冬小麦产量及水分、氮素利用效率的影响[J].中国农业科学,2018,51(7):1334-1344.
- [8] 罗赛阳.不同水肥条件对冬小麦干物质积累及产量的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [9] 李玉山,喻宝屏.土壤深层储水对小麦产量效应的研究[J].土壤学报,1980,17(1):43-54.
- [10] 刘芬,同延安,王小英,等.渭北旱塬小麦施肥效果及肥料利用效率研究[J].植物营养与肥料学报,2013,19(3):552-558.
- [11] 董大学,郭民航.渭北旱塬农田水分状况与提高小麦水分利用途径的研究[J].水土保持通报,1990,10(6):13-20.
- [12] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.
- [13] 国家气象局.农业气象观测规范[Z].北京:气象出版社,1993.
- [14] 董大学,钟良平.冬小麦产量与底墒关系分析[J].水土保持通报,1993,13(5):58-61.
- [15] 邓振镛,张强,王强,等.黄土高原旱塬区土壤贮水量对冬小麦产量的影响[J].生态学报,2010,31(18):5281-5290.
- [16] 韩美坤,张萌,李金鹏,等.播前贮墒量对黑龙江平原旱作冬小麦产量及水分利用的影响[J].麦类作物学报,2017,37(9):1201-1208.
- [17] 任三学,赵花荣,郭安红,等.底墒对冬小麦植株生长及产量的影响[J].麦类作物学报,2005,25(4):79-85.
- [18] 党廷辉.施肥对旱地冬小麦水分利用效率的影响[J].生态农业研究,1999,7(2):28-31.
- [19] 钟良平,邵明安,李玉山.农田生态系统生产力演变及驱动力[J].中国农业科学,2004,37(4):510-515.
- [20] 李开元,邵明安,李玉山.不同水文年型作物的水肥产量效应与水分利用[C]//李玉山.黄土高原土壤水分循环与农田生产力.西安:陕西人民出版社,2015.
- [21] 张福锁,朱耀瑄.旱地小麦生产第一因素[J].干旱地区农业研究,1992,10(1):39-42.
- [22] 李超,刘文兆,林文,等.黄土塬区冬小麦产量及水分利用效率对播前底墒变化与生育期差别供水的响应[J].中国农业科学,2017,50(18):3549-3560.