

氮素营养对苦荞光合特性及土壤酶活性的调控

赵 鑫

(山西农业大学 山西功能食品研究院,山西 太原 030031)

摘要:为进一步加强苦荞氮肥的科学管理,研究了不同类型氮肥对不同生育时期苦荞光合特性、土壤酶活性及土壤氮素形态的影响。共设4个处理:普通尿素(U)、树脂包膜尿素(CRU)、硫包膜尿素(SU)和有机肥(ORU)。结果表明:与普通尿素相比,控释氮肥和有机肥处理可有效提高花后苦荞叶片的SPAD值、净光合速率(Pn),降低胞间CO₂浓度(Ci),SU处理的光合参数在开花期处于较好水平,而CRU和ORU处理下在灌浆中期处于较好水平;控释氮肥和有机肥对于改善土壤氮素相关酶活性有一定的促进作用,特别是有机肥对生育后期土壤酶活性的促进更为明显;控释氮肥和有机肥处理均显著提高了苦荞中后期的硝态氮和铵态氮水平,提高了后期土壤的氮素供应能力,通过相关性分析发现,硝态氮含量与各土壤酶活性均呈正相关关系(与脲酶和蛋白酶的相关性较高),铵态氮含量与土壤脲酶活性的相关系数在生育后期达到显著水平($P < 0.05$)。

关键词:苦荞;氮素营养;光合特性;土壤酶活性

中图分类号:S145.6;S143.1 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2020)增刊-0262-06

doi:10.7668/hbnxb.20191665



Regulations of Tartary Buckwheat Photosynthetic Characters and Soil Enzyme Activities by Nitrogen Fertilizer

ZHAO Xin

(Shanxi Institute for Functional Food, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: To strengthen the nitrogen management of tartary buckwheat, the effects of different types of nitrogen fertilizer on photosynthesis properties, soil enzyme activities and soil nitrogen forms of tartary buckwheat on different stages were investigated. In total four treatments were tested, including conventional urea (U), resin-coated urea (CRU), sulfur-coated urea (SU), organic fertilizer (ORU). The results showed: Compared with conventional urea, controlled release nitrogen fertilizer and organic fertilizer could increase the SPAD value, Pn and decrease Ci effectively; the photosynthesis parameters showed better level under SU treatment on flowering stage, and performed better under CRU and ORU treatment on middle filling stage; Controlled release nitrogen fertilizer and organic fertilizer could promote the soil nitrogen-related enzyme activities on certain degree, especially the effects of organic fertilizer on enzyme activities of late-growth stage was more obvious; Controlled release nitrogen fertilizer and organic fertilizer could increase the nitrate and ammonium nitrogen level significantly, and improve the soil nitrogen supply capacity. The relevant analysis showed, nitrate nitrogen content had positive correlation with soil enzyme activities (urease and protease); ammonium nitrogen content had significant correlation with urease activity on late-growth stage.

Key words: Tartary buckwheat; Nitrogen nutrition; Photosynthetic characters; Soil enzyme activities

苦荞 (*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn) 是蓼科荞麦属一年生草本植物,因其富含生物类黄酮、糖醇、多酚类化合物等生物活性物质,因此苦荞可提供基本营养以外的保健功效^[1]。在各种营养元素中,氮素是影响苦荞生长发育和产量形成最重要的元

素,其与磷钾肥的吸收也密切相关。苦荞是一种需氮量相对较大的作物,一般每生产100 kg籽粒,约需要从土壤中吸收氮3~4 kg,高于一般禾谷类作物^[2]。由于苦荞营养保健功能的逐步开发,在我国主要苦荞产区种植生产中,为了保持产量的提升,氮肥用量呈上升趋势

收稿日期:2020-08-16

基金项目:山西省重点研发计划重点项目(201703D211002-2);山西省面上青年基金项目(201801D221312)

作者简介:赵鑫(1988-),男,山西运城人,助理研究员,硕士,主要从事植物营养与作物品质研究。

势,虽然在一定程度上提高了经济利益,但导致其生产环境变差,品质变劣。因此,有必要对不同类型氮肥对苦荞氮素营养调控做进一步的研究。

控释氮肥最大的特点是能使养分释放与作物吸收同步,实现一次性施肥满足作物整个生长期对氮素的需求,协调作物的营养生长和生殖生长,促进作物生长、提高产量。控释尿素在玉米、小麦、水稻等作物上已经大量使用,肥效一般优于速效氮肥,即使在减量施用的情况下也可到达增产或不减产的效果^[3-4]。控释尿素“前控后保”的肥效特点,使其缓慢释放,有效防止后期脱肥现象,为植株提供充足持续的养分,而且可以提高氮素利用率,减少环境污染。目前,关于氮肥的施用量和施用时期对苦荞产量、品质及氮肥利用率影响的研究较多^[5-6],而有关氮肥对苦荞光合特性及土壤酶活性与土壤氮素形态相关性的报道较少。对于大多数作物而言,光合作用是作物干物质积累的主要来源,其强弱是决定作物产量的主要因素^[7]。土壤酶是土壤肥力及土壤生物活性的重要组成部分,在土壤物质循环和能量转化中起着极其重要的催化作用,其活性的高低可反映土壤养分转化的强弱,可作为评价土壤肥力的指标^[8]。本试验在大田条件下,研究树脂包膜尿素、硫包膜尿素、有机肥及普通尿素4种氮肥对苦荞光合特性、土壤酶活性及土壤氮素形态的影响,以期探明控释氮肥是否会协调苦荞光合强度促进籽粒建成及改善土壤环境促进氮素的有效吸收,为控释氮肥和有机肥在苦荞上的规范施用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于山西省农业科学院东阳试验基地进行,大田种植。试验地土壤为当地典型的黄黏土,土壤基本理化性质为有机质 8.55 g/kg,全氮 100 mg/kg,有效磷 14.5 mg/kg,速效钾 64.0 mg/kg,pH 值 8.04。

1.2 试验设计

田间试验设4个处理,分别为普通尿素(U)、树脂包膜尿素(CRU)、硫包膜尿素(SU)、生物有机肥(ORU)。各施氮处理荞麦生育期内的施氮量保持一致,均为 90 kg/hm²。树脂包膜尿素由中国-阿拉伯化肥有限公司生产,为水溶性聚合物包膜的控释尿素,含氮 44.5%,氮素释放曲线为 S 型,控释期为 60 d;硫包膜尿素由汉枫缓释肥料(江苏)有限公司生产,在尿素外包装硫肥及微晶蜡封而成,含氮 37%,硫 10%,释放曲线为 S 型,控释期为 50 d;生

物有机肥由平遥县润生态肥业有限公司生产,采用 70% 的鸡粪和 30% 的玉米糠醛渣发酵而成,含氮 2.1%;普通尿素含氮 46%。所有试验处理的磷、钾肥用量相同,分别为 P₂O₅ 120 kg/hm²(过磷酸钙,含 P₂O₅ 12%)、K₂O 52.5 kg/hm²(氯化钾,含 K₂O 60%)。所有肥料均于荞麦播种前一次性基施。

荞麦的种植密度均为 7.5 × 10⁵ 株/hm²。供试荞麦品种为黑丰 1 号,于 7 月 5 日播种,10 月 2 日收获,生育期 90 d。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合特性 分别于苦荞苗期(7 月 27 日)、开花期间(8 月 23 日)和灌浆期(9 月 10 日),使用便携式光合测定仪(LI-6400,USA)和 SPAD 502 叶绿素仪对苦荞叶片的光合参数(净光合速率/Pn、气孔导度/Gs、蒸腾速率/Tr)和叶绿素含量(SPAD 值)进行测定,每次测定选在晴朗天气的 9:00 - 11:00 进行,每个小区固定 5 株长势一致的苦荞,选取苦荞倒数第 4 片叶进行测定,3 次重复。

1.3.2 土壤养分及酶活性 分别于苦荞苗期、开花期、灌浆期和成熟期在各小区取土样。采用 5 点取样法分别采集 0 ~ 10 cm,10 ~ 20 cm,20 ~ 30 cm 3 个层次的土样。各土样混合均匀后过 2 mm 筛后,用于测定土壤硝态氮(NO₃⁻)、铵态氮(NH₄⁺)及土壤酶活性。

硝态氮(NO₃⁻)和铵态氮(NH₄⁺):经 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液振荡浸提后,采用流动分析仪同时测定;脲酶活性:苯酚钠-次氯酸钠比色法;蛋白酶活性:采用茚三酮比色法;硝酸还原酶活性:KNO₃ 为基质培养-KCl 比色法。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 软件进行试验数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 叶绿素相对含量(SPAD)

由图 1 可知,各种氮肥处理下叶片叶绿素相对含量(SPAD 值)均呈现出先增加后减少的趋势,在开花期达到最大值。在苗期,U、CRU 和 SU 处理下的 SPAD 值均显著高于 ORU 处理(P < 0.05);开花期 CRU 和 SU 处理高于 U 和 ORU 处理,且达到显著水平(P < 0.05);灌浆期 CRU、ORU 和 SU 之间无显著差异,但均显著高于 U 处理,相比 U 处理分别增长 9.78%,9.29%,8.07%,表明控释氮肥及有机肥在生育后期可以有效减缓叶片的衰老,有机肥处理在开花前的叶绿素相对含量处于较低水平。

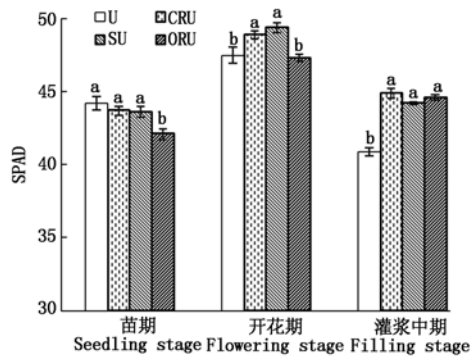


图1 不同类型氮肥对 SPAD 值的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen fertilizers on SPAD value

2.2 光合参数

随着生育时期的推进,各处理的 Pn(净光合速率)、Gs(气孔导度)、Tr(蒸腾速率)均呈先增后减

的趋势,Ci(胞间 CO₂浓度)呈先减后增的趋势。在苗期,U、CRU 和 SU 处理下的 Pn 和 Gs 均显著高于 ORU 处理($P < 0.05$),其中 U 处理均处于最高水平;ORU 和 U 处理下的 Ci 分别处于最高和最低水平;U 和 SU 处理下的 Tr 均显著高于 CRU 和 ORU ($P < 0.05$)。在开花期,SU 处理下的 Pn 显著高于其他处理($P < 0.05$);同时 SU 处理下的 Gs 和 Tr 在所有处理也均处于较高水平;ORU 的 Ci 显著高于其他处理($P < 0.05$)。在灌浆中期,ORU 和 CRU 处理下的 Pn 显著高于 SU 和 UC 处理;ORU 和 U 处理下的 Gs 分别处于最高和最低水平;U 处理下的 Ci 显著高于其他处理;ORU 处理下的 Tr 显著高于其他处理($P < 0.05$),SU 处理下 Tr 值最低(图 2)。

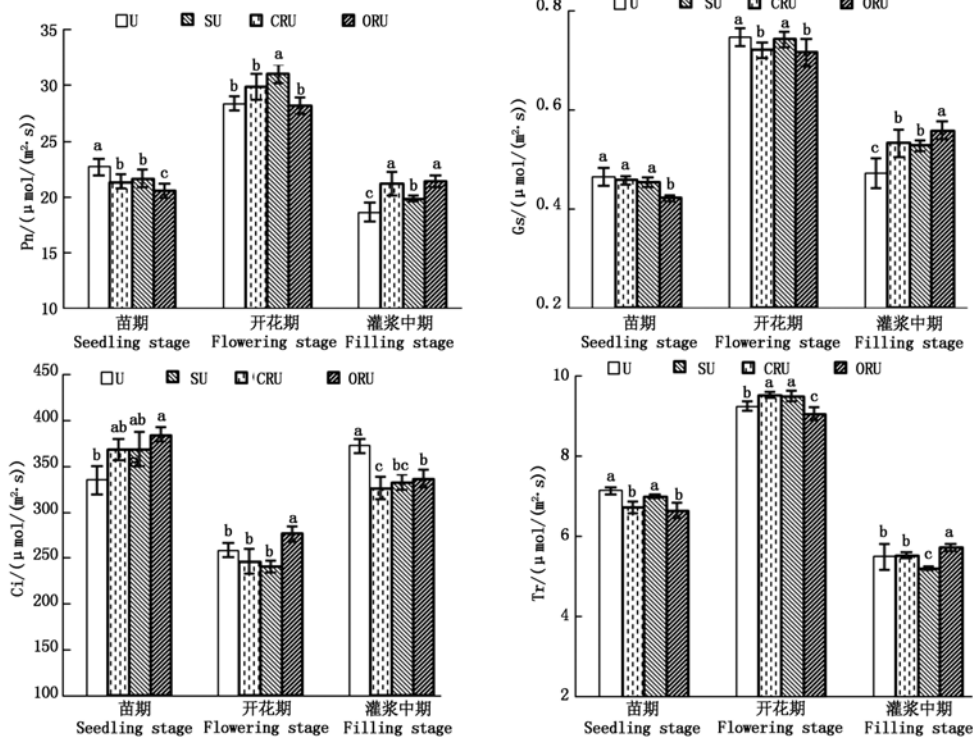


图2 不同类型氮肥对光合参数的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen fertilizer on photosynthetic parameters

2.3 土壤酶活性

2.3.1 脲酶 图3显示了各处理下0~30 cm 土层脲酶活性(以干质量计)的变化趋势。各处理下土壤的脲酶活性均呈现出先增加后减少的趋势,开花期达到最高峰,成熟期处于最低水平。U 处理下的脲酶活性在苗期处于最高水平,在开花期、灌浆中期和成熟期均显著低于其他处理($P < 0.05$)。在开花期,SU 处理的脲酶活性处于最高水平;在灌浆中期和成熟期,U 处理的脲酶活性处于最低水平。在灌浆中期,各处理间的脲酶活性差异达到最大,与 U 相比,ORU、SU 和 CRU 的脲酶活性分别提高23.4%、18.6%、14.3%。

2.3.2 蛋白酶 如图4所示,土壤蛋白酶活性(以

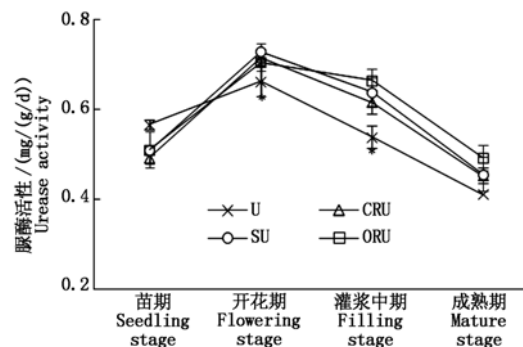


图3 不同类型氮肥对土壤脲酶活性的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen fertilizers on soil urease activity (干质量计) 随生育进程呈先增后减的趋势,灌浆中期处于最高水平,苗期处于最低水平。在苗期和开

花期, SU 处理的蛋白酶活性均处于较高水平, 但各处理间没有显著差异; 在灌浆中期和成熟期, 控释氮肥和有机肥处理的蛋白酶活性均显著高于尿素处理 ($P < 0.05$), CRU、SU 和 ORU 处理的蛋白酶活性相比 U 处理分别提高 12.0%, 9.5%, 5.1% (灌浆中期) 和 14.7%, 16.1%, 8.5% (成熟期)。

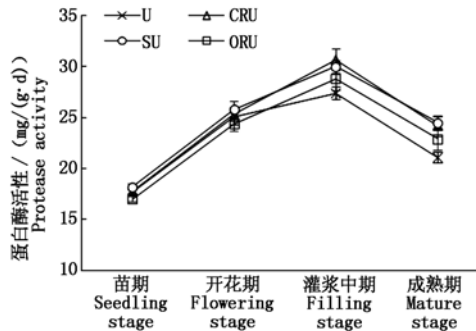


图4 不同类型氮肥对土壤蛋白酶活性的影响

Fig.4 Effects of nitrogen fertilizers on soil protease activity

2.3.3 硝酸还原酶 如图5所示, 各处理的土壤硝酸还原酶活性(以干质量计)均呈现出先增后减的趋势, 开花期达到峰值。在苗期, U 处理的硝酸还原酶活性显著高于其他处理; 在开花期, SU 处理的硝酸还原酶活性处于最高水平, ORU 处理最低, U 和 CRU 相当; 在灌浆中期, 控释氮肥和有机肥处理均显著高于普通尿素处理 ($P < 0.05$), CRU、SU 和 ORU 处理的硝酸酶活性相比 U 处理分别提高 7.9%, 12.6%, 9.7%; 在成熟期, ORU 处理的硝酸还原酶活性显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 相比 U、CRU 和

SU 分别增长 17.4%, 14.9%, 13.1%。

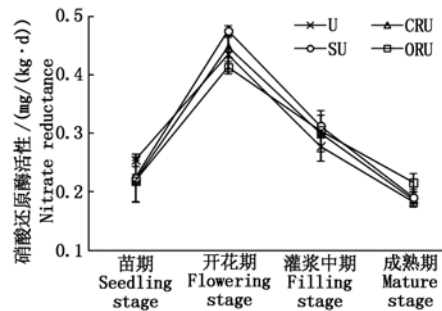


图5 不同类型氮肥对土壤硝酸还原酶活性的影响

Fig.5 Effects of nitrogen fertilizers on soil nitrate reductase activity

2.4 土壤氮素形态

如图6所示, 各处理的土壤硝态氮含量均随生育进程的推进呈下降趋势, U 处理的下降趋势相比其他处理更明显。在苗期, U 处理的硝态氮含量最高, 而在其他时期均低于其他处理。CRU 和 SU 处理的硝态氮含量分别在开花期和灌浆中期处于最高水平; 在成熟期, 控释氮肥处理和有机肥处理的硝态氮含量差异均不显著。

各处理的土壤铵态氮也均随生育进程推进呈下降趋势, 苗期-开花期下降幅度较大, 而在开花期-灌浆中期变化幅度不大。在苗期, U 处理的铵态氮含量显著高于其他处理 ($P < 0.05$); 在开花期, 各处理的铵态氮含量差异不明显; 在灌浆中期和成熟期, 土壤铵态氮含量均呈现出有机肥处理 > 控释氮肥处理 > 普通尿素处理的趋势。

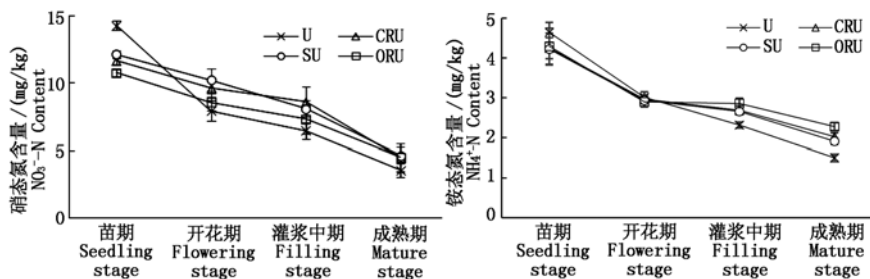


图6 不同类型氮肥对土壤硝态氮和铵态氮含量的影响

Fig.6 Effects of nitrogen fertilizers on the content of soil nitrate nitrogen and ammonia nitrogen

2.5 土壤氮素形态与土壤酶相关性

表1分析了各主要生育时期土壤氮素形态与土壤酶之间的相关关系。硝态氮含量与各土壤酶的活性均呈正相关关系。其中在苗期和开花期与脲酶与硝酸还原酶活性相关度较高; 而在灌浆中期和成熟期与蛋白酶相关度较高, 均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。在生育前期(苗期和开花期), 铵态氮含量与各土壤酶的相关度均不高; 在生育后期(灌浆中期和成熟期), 铵态氮含量与土壤脲酶活性的相关系数达到显著水平 ($P < 0.05$)。

3 结论与讨论

3.1 氮素营养对光合活性的影响

叶片的光合速率是决定作物干物质的重要因素, 作物 90% 以上的干物质来源于光合作用, 特别是开花后叶片的光合性能强弱对籽粒产量形成有决定性作用^[9,10]。通过合理增施氮肥可以有效提高叶片的氮含量和叶绿素含量, 延缓叶片衰老, 延长绿叶光合持续期, 从而提高光合速率^[11]。大量研究表明, 通过提升控释尿素的施用比例可显著提高作物功能叶中

表 1 土壤氮素形态与土壤酶相关性分析

Tab.1 Correlation analysis of soil nitrogen forms and soil enzymes

生育时期 Stage	氮素形态 Nitrogen forms	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	脲酶 Urease	硝酸还原酶 Nitrate reductase	蛋白酶 Protease
苗期 Seedling stage	NO ₃ ⁻ -N	1.000	0.231	0.676*	0.599*	0.182
开花期 Flowering stage	NH ₄ ⁺ -N	0.231	1.000	0.099	0.483	-0.276
灌浆中期 Filling stage	NO ₃ ⁻ -N	1.000	-0.135	0.725**	0.447	0.654*
成熟期 Mature stage	NH ₄ ⁺ -N	-0.135	1.000	-0.151	0.261	0.543
	NO ₃ ⁻ -N	1.000	0.513	0.377	0.304	0.836**
	NH ₄ ⁺ -N	0.513	1.000	0.690*	0.445	0.494
	NO ₃ ⁻ -N	1.000	0.714**	0.601*	0.042	0.746**
	NH ₄ ⁺ -N	0.714**	1.000	0.820**	0.478	0.536

注: ** 和 * 分别表示在 0.01 和 0.05 水平(双侧)上显著相关。

Note: ** and * mean significant correlation at level of 0.01 and 0.05, separately.

后期的氮素含量和叶绿素含量,花后的叶面积和 SPAD 值处于较高水平,有效延长叶片的功能期,提高净光合速率,促进作物高产^[12-14]。本研究结果发现,在生育前期(苗期),普通尿素处理下苦荞叶片的 SPAD 值、净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)均高于控释氮肥处理,表明在一定程度上,普通尿素处理下苦荞的光合活性较强,与尿素中氮素较快的释放速度有关;在生育后期(开花后),与普通尿素处理相比,控释氮肥和有机肥处理在各光合参数上逐渐体现优势,SU 处理的各参数在开花期处于较高水平,而 CRU 和 ORU 处理下在灌浆中期处于较高水平,这可能与氮素释放速率有关,CRU 的控释期相对 SU 较长;综合比较,控释氮肥处理和有机肥处理在生育前期光合活性较低,但有效促进了苦荞叶片中后期的光合活性,与前人研究基本一致,体现了控释尿素和有机肥的“前控后保”的作用特点^[15]。

3.2 氮素营养对土壤酶活性及氮素形态的影响

土壤酶参与土壤养分物质循环等生化过程,土壤酶活性能够反映土壤中微生物的活性、生化反应强度及养分物质循环状况^[16]。本研究主要探讨了土壤脲酶活性、蛋白酶活性及硝酸还原酶活性,这 3 种酶与土壤氮素转化循环密切相关,同土壤肥力相关性极强^[17]。土壤脲酶活性是影响尿素水解的最重要因素,其活性越强,水解越快;土壤蛋白酶能水解各种蛋白质和多肽,其水解产物是植物所需氮源之一;硝酸还原酶影响土壤中的氮素形态^[18-19]。有研究表明,利用 HQ(氢醌)包膜控释尿素,在生长前期能降低土壤脲酶活性,抑制尿素水解,而在后期能有效延长脲酶的作用时间,在整个生育时期都能保证较高的有效氮水平^[20]。适当增施控释氮肥不仅可以有效提高生育中后期土壤脲酶活性,其蛋白酶水平也处于较高水平,有效促进土壤氮素转化^[21]。在本试验中,土壤脲酶、蛋白酶、硝酸还原酶的活性均随生育期的推进呈现出先增后减的趋势,与小麦的土壤酶活性变化基本

一致^[22]。在苗期,普通尿素处理下土壤脲酶活性最强,表明在生育前期尿素水解活性最强;开花后,尿素处理的土壤脲酶活性均处于最低水平,树脂包膜尿素和有机肥处理的酶活性分别在开花期和灌浆中期后处于最高水平,表明控释氮肥和有机肥能控制引起尿素水解的脲酶活性,延长氮素作用的时间。苦荞土壤蛋白酶、硝酸还原酶的活性与土壤脲酶表现出类似的趋势,综合比较,控释氮肥和有机肥对于改善土壤氮素相关酶活性有一定的促进作用,特别有机肥对生育后期土壤酶活性的促进更为明显。

通过对土壤氮素形态的分析,控释氮肥处理和有机肥处理均显著提高了苦荞中后期的硝态氮和铵态氮水平,提高了后期土壤的氮素供应能力。通过对土壤氮素形态与土壤酶活性的相关性分析发现,硝态氮含量与各土壤酶活性均呈正相关关系,铵态氮含量与土壤脲酶活性的相关系数在生育后期达到显著水平($P < 0.05$),其原因可能是控释氮肥和有机肥可促进土壤中微生物的活动以及酶活性,酶和微生物可促进土壤养分的有效转化^[23],提高土壤的氮素供应水平。

参考文献:

- [1] Juan A G B, Zielinski H. Buckwheat as a functional food and its effects on health[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63 (36): 7896 - 7913. doi: 10.1021/acs.jafc.5b02498.
- [2] 任长忠,赵钢. 中国荞麦学[M]. 北京:中国农业出版社,2015.
- [3] Ren C Z, Zhao G. Buckwheat science in China [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2015.
- [4] 司贤宗,韩燕来,王宜仑,刘蒙蒙,谭金芳. 缓释氮肥与普通尿素配施提高冬小麦-夏玉米施肥效果的研究[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(7): 1390 - 1398. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2013.07.009.
- [5] Si X Z, Han Y L, Wang Y L, Liu M M, Tan J F. Improving nitrogen use efficiency by combined use of slow release nitrogen fertilizer with urea for high yielding winter wheat-summer maize rotation system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(7): 1390 - 1398.
- [6] 张敬昇,李冰,王昌全,罗晶,古珺,龙思帆,何杰,向毫,尹斌. 控释掺混尿素对稻麦产量及氮素利用率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2017, 31(3): 288 - 298. doi: 10.16819/j.1001-7216.2017.6143.
- [7] Zhang J S, Li B, Wang C Q, Luo J, Gu J, Long S F, He J, Xiang H, Yin B. Effects of controlled release blend bulk urea on the

- yield and nitrogen use efficiency of wheat and rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2017, 31(3): 288 - 298.
- [5] 向达兵, 赵江林, 胡雨雪, 赵钢. 施氮量对苦荞麦生长发育、产量及品质的影响[J]. *广东农业科学*, 2013, 40(14): 57 - 59. doi:10.16768/j.issn.1004-874x.
- Xiang D B, Zhao J L, Hu L X, Zhao G. Effect of nitrogen application on growth, yield and quality of tartary buckwheat[J]. *Journal of Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(14): 57 - 59.
- [6] 赵鑫, 邓妍, 陈少锋, 张宝林. 氮磷肥配施对旱地苦荞产量及水肥利用率的影响[J]. *华北农学报*, 2016, 31(S1): 350 - 355. doi:10.7668/hbnxb.2016.S1.059.
- Zhao X, Deng Y, Chen S F, Zhang B L. Effects of nitrogen combined with phosphate applying on yield and water and fertilizer use efficiency of tartary buckwheat in dryland[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(S1): 350 - 355.
- [7] 董树亭, 高荣岐, 胡昌浩, 王群瑛, 王空军. 玉米花粒期群体光合性能与高产潜力研究[J]. *作物学报*, 1997, 23: 318 - 325.
- Dong S T, Gao R Q, Hu C H, Wang Q Y, Wang K J. Study of canopy photosynthesis property and high yield potential after anthesis in maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23: 318 - 325.
- [8] 宋震震, 李絮花, 李娟, 林治安, 赵秉强. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 525 - 533. doi:10.11674/zwyf.2014.0302.
- Song Z Z, Li X H, Li J, Lin Z A, Zhao B Q. Long-term effects of mineral versus organic fertilizers on soil labile nitrogen fractions and soil enzyme activities in agricultural soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(3): 525 - 533.
- [9] 赵满兴, 周建斌, 杨绒, 郑险峰, 翟丙年, 李生秀. 不同施氮量对旱地不同品种冬小麦氮素累积、运输和分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2): 143 - 149. doi:10.3321/j.issn:1008-505X.2006.02.001.
- Zhao M X, Zhou J B, Yang R, Zheng X F, Zhai B N, Li S X. Characteristics of nitrogen accumulation, distribution and translocation in winter wheat on dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(2): 143 - 149.
- [10] 段巍巍, 李慧玲, 肖凯, 李雁鸣. 氮肥对玉米穗位叶光合作用及其生理生化特性的影响[J]. *华北农学报*, 2007, 22(1): 26 - 29. doi:10.3321/j.issn:1000-7091.2007.01.007.
- Duan W W, Li H L, Xiao K, Li Y M. Effects of nitrogen fertilizer on photosynthesis and its physiological and biochemical characteristics in ear-leaf of maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(1): 26 - 29.
- [11] 李耕, 高辉远, 刘鹏, 杨吉顺, 董树亭, 张吉旺, 王敬锋. 氮素对玉米灌浆期叶片光合性能的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(3): 536 - 542. doi:10.11674/zwyf.2010.0304.
- Li G, Gao H Y, Liu P, Yang J S, Dong S T, Zhang J W, Wang J F. Effects of nitrogen fertilization on photosynthetic performance in maize leaf at grain filling stage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(3): 536 - 542.
- [12] 黄思怡, 周旋, 田昌, 徐泽, 袁浩凌, 刘强, 谢桂先, 彭建伟. 控释尿素减施对双季稻光合特性和经济效益的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 736 - 742. doi:10.13758/j.cnki.tr.2020.04.012.
- Huang S Y, Zhou X, Tian C, Xu Z, Yuan H L, Liu Q, Xie G X, Peng J W. Effects of reducing controlled-release urea application on photosynthetic characteristics and economic benefit of double-rice cropping system[J]. *Soil*, 2020, 52(3): 736 - 742.
- [13] 蔡威威, 艾天成, 李然, 金紫缘, 徐金刚, 曹坤坤. 控释肥及尿素添加剂对双季稻光合特性及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(3): 54 - 60. doi:10.11838/sfsc.20180309.
- Cai W W, Ai T C, Li R, Jin Z Y, Xu J G, Cao K K. Effect of controlled release fertilizer and urea additive on photosynthetic characteristics and yield of double cropping rice[J]. *Chinese Soil and Fertilizers*, 2018(3): 54 - 60.
- [14] 郑宾, 赵伟, 徐铮, 高大鹏, 姜媛媛, 刘鹏, 李增嘉, 李耕, 宁堂原. 不同耕作方式与氮肥类型对夏玉米光合性能的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(6): 925 - 934. doi:10.3724/SP.J.1006.2017.00925.
- Zheng B, Zhao W, Xu Z, Gao D P, Jiang Y Y, Liu P, Li Z J, Li G, Ning T Y. Effects of tillage methods and nitrogen fertilizer types on photosynthetic performance of summer maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(6): 925 - 934.
- [15] 梁靖越, 张敬昇, 王昌全, 李冰, 向毫, 尹斌, 罗晶. 控释尿素对小麦籽粒产量和氮素利用率的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(1): 157 - 164. doi:10.11869/j.issn.100-8551.2018.01.0157.
- Liang J Y, Zhang J S, Wang C Q, Li B, Xiang H, Yin B, Luo J. Effects of controlled release urea on grain yield and nitrogen use efficiency in wheat[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(1): 157 - 164.
- [16] 曹群, 丁文娟, 赵兰凤, 刘小锋, 柳影, 李华兴. 生物有机肥对冬瓜枯萎病及土壤微生物和酶活性的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2015, 36(2): 36 - 42. doi:10.7671/j.issn.1001-411X.2015.02.007.
- Cao Q, Ding W J, Zhao L F, Liu X F, Liu Y, Li H X. Effects of biological organic fertilizer on wax gourd wilt disease, microorganism and enzyme activities in soil[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2015, 36(2): 36 - 42.
- [17] 皇甫倩华. 不同耐瘠性苦荞根际土壤酶调控下氮转化机制研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2018.
- Huangfu Q H. Study on the mechanism of nitrogen conversion under the control of soil enzymes of tartary buckwheat[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2018.
- [18] Baligar V C, Wright R J, Smedley M D. Enzyme activities in hill land soils of the appalachian region[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1988, 19(4): 367 - 384. doi:10.1080/00103628809367946.
- [19] 王淑英, 樊庭录, 丁宁平, 姜小凤, 张平良, 苏敏. 长期定位施肥对黄土旱塬黑垆土土壤酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(2): 307 - 310. doi:10.19336/j.cnki.trtb.2011.02.010.
- Wang S Y, Fan T L, Ding N P, Jiang X F, Zhang P L, Su M. Effect of long-term fertilization on soil enzyme activities in dryland black humus soil in the Loess Plateau[J]. *Soil Bulletin*, 2011, 42(2): 307 - 310.
- [20] 李玉, 王茂莹, 张倩, 朱营营, 董元杰, 贺明荣. 包膜脲酶抑制剂增效尿素对小麦生长的影响及其机理研究[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 283 - 289. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2020.02.040.
- Li Y, Wang M Y, Zhang Q, Zhu Y Y, Dong Y J, He M R. Effects of coated urease inhibitor synergic urea on wheat growth and its mechanism[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 283 - 289.
- [21] 李新悦, 王昌全, 李冰, 何杰, 李玉浩, 张敬昇, 梁靖越, 陈兰, 尹斌. 控释掺混氮肥对稻麦土壤微生物及酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(1): 35 - 43. doi:10.11838/sfsc.1673-6257.18175.
- Li X Y, Wang C Q, Li B, He J, Li Y H, Zhang J S, Liang J Y, Chen L, Yin B. Effect of controlled release blend bulk urea on soil microorganism and enzyme activity in rice and wheat rotation[J]. *Chinese Soil and Fertilizers*, 2019(1): 35 - 43.
- [22] 冯爱青, 张民, 李成亮, 杨越超. 控释氮肥对土壤酶活性与土壤养分利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 177 - 184. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2014.03.033.
- Feng A Q, Zhang M, Li C L, Yang Y C. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on soil enzyme activities and soil nutrient utilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 177 - 184.
- [23] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 查菲娜, 岳艳军, 张煜, 李耀昭. 氮素营养水平对小麦根际微生物及土壤酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 129 - 131, 140. doi:10.3321/j.issn:1009-2242.2006.03.031.
- Guo T C, Song X, Ma D Y, Cha F N, Yue Y J, Zhang Y, Li Y Z. Effect of nitrogen fertilizer on soil enzymatic activity and rhizosphere microorganisms of wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 129 - 131, 140.