

不同氮素形态对木薯生长及根际土壤养分与酶活性的影响

姜舒雅¹, 孙彬杰¹, 林 萱², 刘文杰¹, 朱杰辉^{3*}, 宋 勇^{1,4,5,6*}

1. 湖南农业大学园艺学院, 湖南长沙 410128; 2. 湖南湘研种业有限公司, 湖南长沙 410128; 3. 湖南农业大学东方科技学院, 湖南长沙 410128; 4. 湖南省马铃薯工程技术研究中心, 湖南长沙 410128; 5. 园艺作物种质创新与新品种选育教育部工程研究中心, 湖南长沙 410128; 6. 蔬菜生物学湖南省重点实验室, 湖南长沙 410128

摘 要: 通过研究不同氮素形态对华南 9 号 (SC9) 木薯生长及根际土壤养分、土壤酶活性的影响, 为湖南地区木薯科学施肥提供理论依据。本试验设 CK (不施氮肥)、T₁ (酰胺态氮-尿素)、T₂ (铵态氮-硫酸铵)、T₃ (硝态氮-硝酸钙) 4 个处理 (土壤肥力水平一致, 氮肥施用量均为 180 kg/hm²) 研究不同氮素形态处理对木薯的株高、茎粗、土壤养分、土壤酶活性及产量与品质的影响。结果表明: 不同氮素处理较 CK 处理均提高了木薯的株高、茎粗、产量与品质, T₂ 处理下木薯的株高、茎粗、产量、干物率、淀粉含量均最高, 较 CK 处理分别显著提高 13.51%、32.24%、61.72%、6.44%、19.86%。施氮改变了根际土壤养分含量, T₂ 处理对木薯根际土壤养分含量促进效果最好; T₂ 处理的土壤有机质、碱解氮含量均高于其他处理, 块根形成和块根膨大期 T₂ 处理的速效钾含量高于其他处理; 与 CK 处理相比, 施氮提高了木薯根际土壤酶活性。随着生长期的推移, 脲酶活性表现为逐渐升高, 蔗糖酶活性表现为先降低后升高, 过氧化氢酶和硝酸还原酶活性表现为先升高后降低。其中 T₂ 处理土壤蔗糖酶活性最高。综合来看, 在湖南地区, 氮素形态不同对木薯生长和土壤环境的影响具有差异性, 施氮处理较 CK 处理提高土壤的肥力水平, 进而提高了木薯地上部分的生长, 从而提高了木薯产量与品质, 其中以施用铵态氮肥更有利于木薯 SC9 生长和产量提高。

关键词: 木薯; 氮素形态; 土壤养分; 土壤酶活; 产量; 品质

中图分类号: S533 文献标识码: A

Effects of Different Nitrogen Forms on Cassava Growth, Rhizosphere Soil Nutrients and Enzyme Activities

JIANG Shuya¹, SUN Binjie¹, LIN Xuan², LIU Wenjie¹, ZHU Jiehui^{3*}, SONG Yong^{1,4,5,6*}

1. College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Hunan Xiangyan Seed Industry Co., Ltd., Changsha, Hunan 410128, China; 3. Orient Science & Technology College, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 4. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Potato, Changsha, Hunan 410128, China; 5. Engineering Research Center for Horticultural Crop Germplasm Creation and New Variety Breeding, Ministry of Education, Changsha, Hunan 410128, China; 6. Key Laboratory for Vegetable Biology of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China

Abstract: The effects of different nitrogen forms on the growth, rhizosphere soil nutrients and soil enzyme activities of cassava variety Huanan 9 (SC9) were studied to provide theoretical basis for the scientific fertilization of cassava in Hunan Province. CK (no nitrogen fertilizer), T₁ (amide nitrogen-urea), T₂ (ammonium nitrogen-ammonium sulfate) and T₃ (nitrate nitrogen-calcium nitrate) were set in the study. The level of soil fertility was the same, and the application rate of nitrogen fertilizer was 180 kg/hm². Effects of different nitrogen forms on plant height, stem diameter, soil nutrients, soil enzyme activity, yield and quality of cassava were studied. Compared with CK, different nitrogen treatments improved plant height, stem diameter, yield and quality of cassava. T₂ had the highest plant height, stem diameter, yield, dry matter rate and starch content, which was significantly higher than that of CK by 13.51%, 32.24%, 61.72%, 6.44%, 19.86%. Nitrogen application changed the nutrient content of rhizosphere soil, and T₂ had the best effect on the nutrient

收稿日期 2022-11-22; 修回日期 2022-12-31

基金项目 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设项目 (No. CARS-11-HNSY)。

作者简介 姜舒雅 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 木薯栽培生理与技术。*通信作者 (Corresponding author): 宋勇 (SONG Yong), E-mail: songyong1117@163.com; 朱杰辉 (ZHU Jiehui), E-mail: 870380021@qq.com。

content of cassava rhizosphere soil. The contents of soil organic matter and alkali-hydrolyzable nitrogen in T_2 were higher than those in the other treatments. The content of available potassium in T_2 was higher than that in other treatments at root formation stage and root expansion stage. Compared with CK, nitrogen application increased soil enzyme activity in cassava rhizosphere. With the passage of the growth period, urease activity increased gradually, sucrase activity decreased at first and then increased, catalase and nitrate reductase activity increased at first and then decreased. Among them, the soil sucrase activity in T_2 was the highest. Comprehensive analysis, in Hunan, the effects of different nitrogen forms on cassava growth and soil environment were different. Compared with CK, nitrogen application improved soil fertility, and then improved the growth of aboveground parts of cassava, thus improving the yield and quality of cassava. Among them, the application of ammonium nitrogen fertilizer is more beneficial to the growth and yield of cassava SC9.

Keywords: cassava; nitrogen form; soil nutrients; soil enzymatic activity; yield; quality

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.03.021

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 为大戟科木薯属旱地作物, 是全球三大薯类作物之一^[1], 木薯作为非粮能源作物, 具有重大的发展潜力, 主要用于制作淀粉、酒精等一系列产品, 在工业和农业上都存在重大利用价值^[2]。随着木薯产业的发展, 我国对木薯干片和淀粉的需求日益增大, 而国内木薯生产量较低, 木薯进口需求依存度较高^[3]。而提高木薯产量的措施之一便是合理施用氮肥^[4], 常见的氮肥形态有铵态氮、酰胺态氮和硝态氮^[5-6]。作物对氮素形态的偏好会为植物有效划分有限的土壤氮提供一种机制, 促进物种共存与维持生物多样性^[7]。氮素形态的差异影响植物对氮的吸收, 贮藏, 运输, 同化等, 从而也会影响植物的生理生长过程^[8], 选择合适的氮肥类型可以促进作物生长发育, 改善营养水平, 提高产量和品质。

前人研究表明, 氮素限制作物物质的累积, 直接或间接影响作物的生长发育^[9]。氮素的缺失会造成木薯植株矮小、叶片枯黄、块根数量缩减、质量下降^[10]。前人关于氮素形态对蔬菜作物的研究发现, 施用尿素结球甘蓝的株高, 茎粗效果都优于其他处理, 产量也最高^[11]; 马拉新^[12]的研究表明正常灌溉下施用硝酸铵木薯产量最高; 和锐敏等^[13]发现铵态氮促进甘蔗鲜重增加、侧根和不定根的形成, 硝态氮促进根系纵向增长。氮素通过影响植物体内蛋白质、糖、维生素、矿质元素等含量来影响品质^[14]。代新俊^[15]发现施用酰胺态氮肥小麦的淀粉、可溶性蛋白含量更高。土壤富含氮磷钾和其他微量元素, 土壤养分含量高低决定作物是否健康生长^[16]。土壤酶广泛存在于土壤中, 调控土壤物质循环和多种生物化学反应^[17]。吴勇等^[18]的研究结果表明施氮可以提高紫花苜蓿根际土壤有机质、碱解氮含量; 梁悦^[19]发现硫

酸铵处理土壤速效钾含量显著高于其他处理; 陈晓光等^[20]的研究结果显示甘薯土壤蔗糖酶活性在尿素处理下显著高于施硝酸钙、硫酸铵。王光华^[21]发现大豆根际土壤脲酶活性在铵态氮条件下表现为最高。马宗斌等^[22]的试验结果显示酰胺态氮处理下小麦根际土壤脲酶活性最高。可见, 不同氮素形态对不同种类作物的生长及土壤环境的影响不同。近年来, 我国学者就施氮量、施氮时期、施氮方式及施氮深度等对木薯生长发育、产量及品质的影响进行了研究, 而关于不同氮素形态对木薯生长及根际土壤环境的研究却鲜有报道^[23-25]。本试验通过研究不同氮素形态对木薯生长及根际土壤养分、土壤酶活性的影响, 以为木薯提供科学施肥依据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为华南 9 号 (SC9) 木薯品种, 由湖南省马铃薯工程技术研究中心提供。SC9 于 2021 年 5 月 2 日在湖南省长沙县湘研种业基地 (28°31'19"N, 113°30'05"E) 种植, 2021 年 11 月 13 日收获。试验地气候条件为亚热带季风湿润气候, 年均气温为 18.8 °C, 年降水量为 1472.9 mm。木薯种植前采用五点交叉取样法采取土样测量土壤基本理化性质, 土质为红壤土, 土壤 pH 5.46, 土壤碱解氮含量为 137 mg/kg, 有效磷为 5.2 mg/kg, 速效钾为 121 mg/kg, 全氮为 1.28 g/kg, 全磷为 0.50 g/kg, 全钾为 10.9 g/kg, 有机质为 19.5 g/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验设 CK (不施氮肥)、 T_1 (酰胺态氮—尿素 46%N)、 T_2 (铵态氮—硫酸铵 21%N)、 T_3 (硝态氮—硝酸钙 15%N) 4 个处理,

每处理重复 3 次,另设 3 次重复进行破坏性取样。钾肥选用氯化钾 ($60\%K_2O$),磷肥选用过磷酸钙 ($12\%P_2O_5$),施氮、磷、钾肥各 180 kg/hm^2 ,所有肥料种植前一次施入。试验处理采用随机区组排列,小区宽 1.8 m ,长 18 m ,小区面积 32.4 m^2 。木薯采用斜插法,一垄双行种植,宽行距 1 m ,窄行距 0.8 m ,株距 1 m ,每小区 36 株木薯。

1.2.2 样品采集 分别于木薯块根形成期(8月9日)、块根膨大期(10月9日)、块根成熟期(11月13日)取土样。于破坏性取样区每小区选取 5 株长势均匀的木薯连根拔起,将附着于木薯块根的土壤取下收集,去除杂根、石粒等杂质,装入无菌自封袋,放入冰盒带回实验室。鲜土样风干后过 60 目筛,一部分测定土壤酶活性,另一部分测定土壤养分含量。

1.2.3 指标测定 (1)木薯生长指标及产量和品质测定。每小区选取 5 株长势均匀的植株分别于同期测定木薯株高、茎粗;于块根成熟期测定木薯单株块根产量,计算小区产量,折算公顷产量。块根干物率采用烘干法^[26],每株取鲜薯 100 g 放于 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干称重计算干物率。鲜薯淀粉、可溶性蛋白、维生素 C 均采用苏州科铭生物技术有限公司提供的试剂盒测定。

(2)木薯根际土壤养分与酶活性测定。土壤有机质采用重铬酸钾容量法、土壤碱解氮采用水解性扩散法、土壤有效磷采用钼锑抗比色法、土

壤速效钾采用火焰光度法测定^[27];土壤脲酶采用靛酚蓝比色法、土壤蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法、土壤过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法、土壤硝酸还原酶采用酚二磺酸比色法测定^[28-29]。

1.3 数据处理

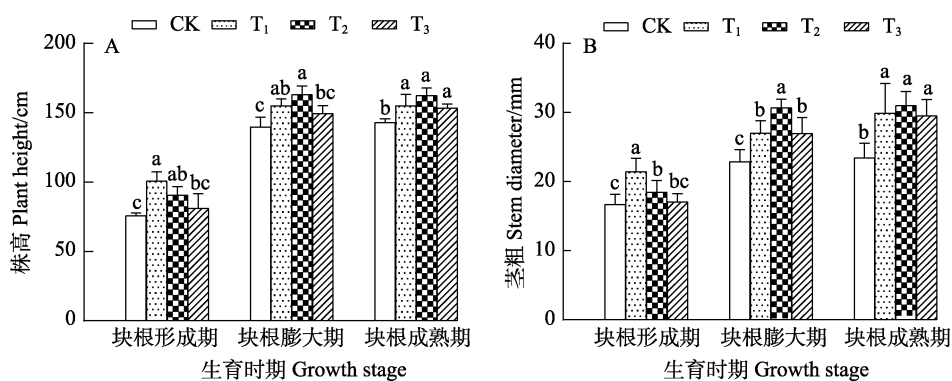
采用 Excel 2010 软件对数据进行整理,采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析及相关性分析,采用 GraphPad Prism 8.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同氮素形态对木薯生长的影响

由图 1A 可知,在块根形成期、块根膨大期和块根成熟期,施氮处理木薯株高均高于 CK 处理,在块根成熟期,株高表现为 T_2 处理最高。块根形成期, T_1 、 T_2 处理木薯株高分别较 CK 处理显著提高 33.07%、19.82%;块根膨大期, T_2 处理株高较 CK、 T_3 处理分别显著提高 16.71%、9.15%;块根成熟期, T_1 、 T_2 、 T_3 处理较 CK 处理分别显著提高 8.39%、13.51%、7.22%。

由图 1B 可知,施氮对木薯茎粗有促进作用,木薯块根膨大期 T_2 处理木薯茎粗最大。块根形成期 T_1 、 T_2 处理木薯茎粗较 CK 处理显著提高 28.23%、10.52%;块根膨大期 T_2 处理木薯茎粗较 CK、 T_1 、 T_3 处理显著提高 34.19%、13.58%、13.83%,块根成熟期 T_1 、 T_2 、 T_3 处理较 CK 处理显著提高 27.38%、32.24%、25.79%。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$).

图 1 不同氮素形态处理下的木薯株高和茎粗

Fig. 1 Plant height and stem diameter of cassava under different nitrogen forms

2.2 不同氮素形态对木薯根际土壤养分的影响

由图 2A 可知,施氮改变了木薯根际土壤有机质含量,块根形成期及膨大期, T_2 处理土壤有机质含量显著高于 CK 处理,表明 T_2 处理促进木薯根际

土壤有机质含量增加。块根形成期, T_2 处理较 CK、 T_1 、 T_3 处理分别显著提高 20.63%、16.56%、10.14%;块根膨大期, T_2 处理较 CK 处理显著提高 8.65%,其他处理间差异不显著;块根成熟期, T_2 、 T_3 处理

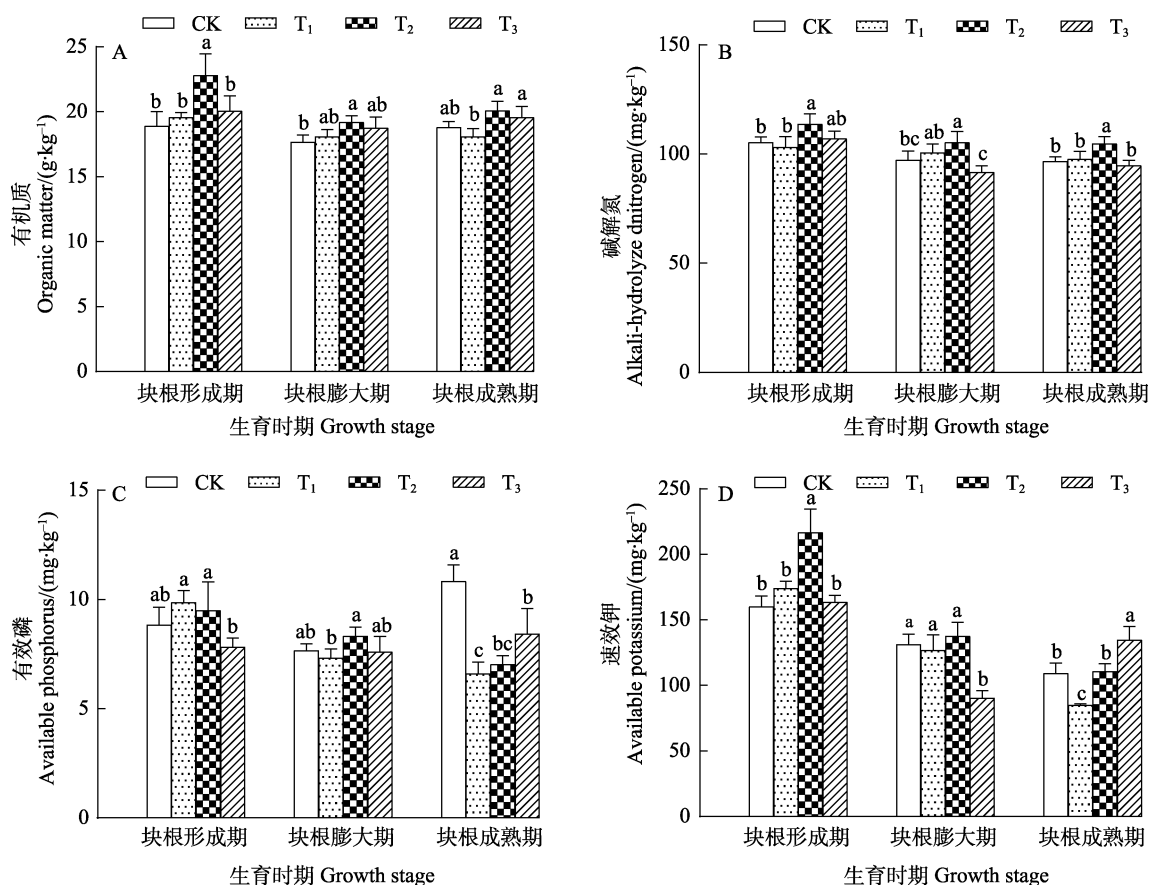
较 T₁ 处理分别显著提高 11.05%、8.57%。

由图 2B 可知,在各时期下,T₂ 处理木薯根际土壤碱解氮含量显著高于 CK 处理,表明 T₂ 处理对木薯根际土壤碱解氮含量有明显促进作用。块根形成期,T₂ 处理较 CK、T₁ 处理分别显著提高 7.92%、10.36%,其他处理间差异不显著;块根膨大期,T₂ 处理较 CK、T₃ 处理分别显著提高 8.22%、14.91%;块根成熟期,T₂ 处理较 CK、T₁、T₃ 处理分别显著提高 8.28%、7.17%、10.21%,其他处理间差异不显著。

由图 2C 可知,在木薯不同生育时期,不同氮素形态对木薯根际土壤有效磷的影响不同。块根形成期,T₂、T₁ 处理较 T₃ 处理分别显著提高

21.33%、25.93%,其他处理间差异不显著;块根膨大期,T₂ 处理较 T₁ 处理显著提高 13.64%,其他处理间差异不显著;块根成熟期,CK 处理显著高于其他处理,T₃ 处理显著高于 T₁ 处理。

由图 2D 可知,随着生育期的推移,土壤速效钾含量呈逐渐降低的趋势,施氮处理对根际土壤速效钾的影响在不同生育时期各不相同。块根形成期,T₂ 处理较 CK、T₁、T₃ 处理分别显著提高 35.41%、24.52%、32.40%,其他处理间差异不显著;块根膨大期,T₃ 处理显著低于其他处理,CK 与 T₂、T₁ 处理差异不显著;块根成熟期,T₃ 处理显著高于其他处理,T₂ 处理显著高于 T₁ 处理,与 CK 处理无显著差异。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同氮素形态处理下木薯根际土壤养分含量

Fig. 2 Nutrient contents in cassava rhizosphere soil under different nitrogen forms

2.3 不同氮素形态对木薯根际土壤酶活性的影响

由图 3A 可知,施氮改变根际土壤脲酶活性。在木薯不同时期,T₃ 处理根际土壤脲酶活性均显著高于其他处理,从块根形成期到成熟期,T₃ 处

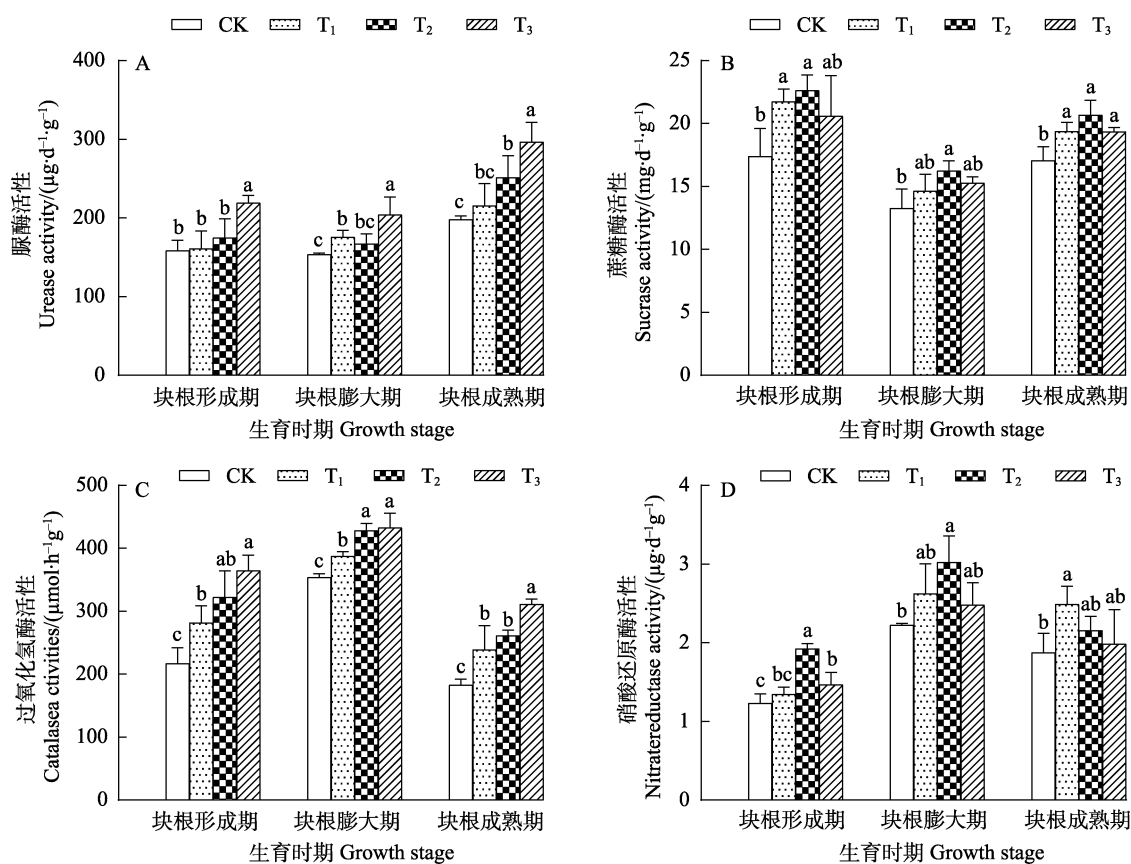
理较 CK 处理显著提高 38.15%、33.05%、49.68%,这表明 T₃ 处理更促进木薯根际土壤脲酶活性提高。块根膨大期,T₁ 处理脲酶活性显著高于 CK 处理;块根成熟期,T₂ 处理脲酶活性显著高于 CK 处理。

由图 3B 可知,随着木薯生育期的推移,根际土壤蔗糖酶活性先降后增,在块根膨大期达到最低。在各时期只有 T_2 处理土壤蔗糖酶活性均显著高于 CK 处理,且 T_2 处理土壤蔗糖酶活性最高,从块根形成期到成熟期, T_2 处理较 CK 处理分别显著提高 30.21%、22.51%、21.02%,这表明 T_2 较其他处理更好地促进土壤蔗糖酶活性提高。

由图 3C 可知,随着木薯生育期的推移,根际土壤过氧化氢酶活性表现为先增后降,块根膨大期最高。在不同时期,各氮素处理过氧化氢酶活性均显著高于 CK 处理,这表明施氮提高了土壤过氧化氢酶活性。块根形成期, T_3 处理土壤过氧

化氢酶活性较 CK、 T_1 处理分别显著提高 68.07%、29.65%;块根膨大期, T_3 处理其活性较 CK、 T_1 处理分别显著提高 22.18%、11.56%;块根成熟期, T_3 处理其活性较 CK、 T_1 、 T_2 处理分别显著提高 70.32%、30.41%、19.15%。

由图 3D 可知,随着木薯生育期的推移,根际土壤硝酸还原酶呈先升后降的趋势,在块根膨大期达到最大。土壤块根形成期, T_2 处理硝酸还原酶活性较 CK、 T_1 、 T_3 处理分别显著提高 31.15%、43.28%、56.09%;块根膨大期及成熟期, T_1 处理硝酸还原酶活性显著高于 CK 处理,分别提高 33.33%、33.15%,3 种氮素处理间无显著差异。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同氮素形态处理下木薯根际土壤酶活性

Fig. 3 Enzyme activities in cassava rhizosphere soil under different nitrogen forms

2.4 不同氮素形态对木薯产量的影响

由表 1 可知, T_2 、 T_3 、 T_1 处理木薯小区产量分别为 125.01、94.50、80.67 kg, 较 CK 处理分别增加 61.69%、22.23%、3.36%; T_2 、 T_3 、 T_1 处理木薯产量分别为 38.54、29.09、24.87 t/hm², 较 CK 分别增产 61.72%、22.07%、4.36%。 T_2 处理木薯产量最高 (38.54 t/hm²), 分别较 T_3 、 T_1 、CK

处理显著增产 31.45%、54.96%、61.72%。

2.5 不同氮素形态对木薯品质的影响

由表 2 可知, T_2 处理木薯块根干物率、淀粉含量较 CK 处理分别显著提高 6.44%、19.86%, 其他处理间差异不显著, T_1 处理木薯块根可溶性蛋白含量较 CK 处理显著提高 12.10%, T_3 处理木薯块根维生素 C 含量较 CK、 T_1 、 T_2 处理分别显

表 1 不同氮素形态处理下木薯产量

Tab. 1 Cassava yield under different nitrogen form

处理 Treatment	单株产量 Yield per plant/kg	小区产量 Plot yield/kg	产量 Yield/(t·hm ⁻²)
CK	2.15±0.36 ^b	77.31±12.97 ^b	23.83±4.00 ^b
T ₁	2.24±0.29 ^b	80.67±10.65 ^b	24.87±3.28 ^b
T ₂	3.47±0.91 ^a	125.01±33.09 ^a	38.54±10.21 ^a
T ₃	2.62±0.42 ^b	94.50±26.85 ^b	29.09±8.27 ^b

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

著提高 52.94%、72.06%、44.28%，这表明不同氮素形态处理对木薯块根品质的影响不同。

3 讨论

3.1 不同氮素形态对木薯产量、品质的影响

株高、茎粗是植物营养生长最直观的表型，产量与品质是作物对环境最直接的答复^[30]。研究表明，不同种类氮肥对木薯的生长及产量、品质均有促进效果。本研究发现，T₂ 处理下木薯的株

高、茎粗表现效果最好；木薯产量表现为 T₂>T₃>T₁>CK，这与史春余等^[31]的研究结果一致，铵态氮可以促进营养物质向块根转移，有利于产量提高；苟久兰等^[32]的结果也表明，铵态氮有利于氮、钾元素的吸收，且硫元素可提高木薯对氮肥的利用率进而提高产量^[33]；HARGROVE^[34]认为，尿素在酸性土壤中 NH₄⁺ 的损失潜力最大，且当年长沙地区雨水过多，尿素肥效流失致使木薯产量与不施肥无差异。干物质与淀粉含量一般呈正相关，干物率高淀粉含量高^[26]，本研究中，铵态氮处理干物率、淀粉含量最高，说明铵态氮较促进干物质、淀粉的累积；酰胺态氮处理可溶性蛋白含量显著高于对照，这与代新俊^[15]的结果一致；硝态氮处理维生素 C 含量显著高于其他处理，这与李会合^[35]的结果一致；各氮素处理对品质的影响不一，原因可能是氮素形态具有性质上的差异，植物吸收利用代谢转化的途径不同，导致植物体内形成糖、蛋白、维生素等营养物质的含量不同进而影响品质^[36]。

表 2 不同氮素形态处理下木薯品质分析

Tab. 2 Quality analysis of cassava under different nitrogen forms

处理 Treatment	干物率 Dry matter rate/%	淀粉 Starch/(mg·g ⁻¹)	可溶性蛋白 Soluble protein/(mg·g ⁻¹)	维生素 C Vitamin C/(μg·g ⁻¹)
CK	36.33±1.15 ^b	296.15±6.54 ^b	1.57±0.04 ^b	635.59±62.67 ^b
T ₁	37.00±1.00 ^{ab}	327.55±14.65 ^{ab}	1.76±0.01 ^a	664.99±89.11 ^b
T ₂	38.67±1.15 ^a	354.97±13.93 ^a	1.60±0.01 ^{ab}	670.97±70.15 ^b
T ₃	37.67±0.58 ^{ab}	329.25±21.65 ^{ab}	1.70±0.10 ^{ab}	972.11±82.22 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

3.2 不同氮素形态对木薯根际土壤养分的影响

土壤养分为植物吸收营养提供来源，影响作物根、茎、叶的生长发育，提高养分含量是作物优质高产的重要保障措施^[37]。本研究只测量了施肥前的土壤理化性质，从 5 月种植到 8 月块根形成，木薯地上部分的生长吸收了大量的养分，并且此时期长沙地区多雨，养分流失，导致多数处理的有机质含量低于种植前。本研究中，T₂ 处理土壤有机质含量高，矿化作用强，促进无效氮向有效氮的转化，提高土壤有效氮含量，从而使作物吸收更多的氮提高作物的株高与茎粗；木薯块根成熟期，CK 处理土壤有效磷含量高于 3 种氮素处理，这可能是施氮改变了土壤磷元素含量，促进木薯对磷元素的吸收，土壤磷素的消耗率提高，土壤有效磷含量降低。张锡州等^[38]的研究结果表

明，铵态氮更能提高土壤速效钾含量，这与本研究结果一致。这是因为 NH₄⁺ 和 K⁺ 吸附固定机制相似，二者竞争结合位点，NH₄⁺ 会影响 K⁺ 被土壤固化。此外，NH₄⁺ 也可与 K⁺ 进行交换，减少 K⁺ 固定，土壤速效钾含量增高^[39]。

3.3 不同氮素形态对木薯根际土壤酶活性的影响

土壤酶是衡量土壤肥力的重要指标，驱动养分吸收与转化。脲酶在一定程度上可以反映土壤的供氮能力。蔗糖酶可以增加土壤易溶性营养物质，在一定程度上表征土壤肥力水平^[40]。过氧化氢酶可以表征有机质的转化速度，减轻土壤和生物体在代谢过程中产生的过氧化氢毒害作用^[41]。硝酸还原酶是反硝化过程的关键酶，其活性大小反映氮素的损失^[42]。本研究发现，T₃ 处理脲酶、

过氧化氢酶活性高于其他处理,原因是 T_3 处理提供的有效氮含量较低,木薯长势较差,提高脲酶活性可促进土壤营养物质循环和无机氮的转化速度,导致土壤微生物活动增强,代谢产生的过氧化氢增多,刺激过氧化氢酶活性提高以减轻对植物的毒害作用。本研究中,木薯根际土壤蔗糖酶活性先降后升,在块根膨大期达到最低,严君等^[43]的研究表明,土壤蔗糖酶活性随大豆生长期表现为先升后降,出现结果不一致的原因是块根膨大期木薯营养生长和生殖生长旺盛,对土壤氮素营养、含碳化合物的利用率高,土壤养分含量降低,土壤肥力水平下降导致土壤蔗糖酶活性降低。本研究中,施氮提高了硝酸还原酶活性,但后期生长过程中 3 种氮素形态对硝酸还原酶活性的影响并无显著差异,这可能与土壤 pH、土壤水热、土壤通气状况、土壤氮含量有关,具体原因还需进一步研究探讨。

4 结论

综上所述,在湖南地区,施用铵态氮肥 (T_2) 更有利于木薯 SC9 株高和茎粗的增加,提高土壤有机质,碱解氮含量,最利于木薯 SC9 产量增加,且铵态氮明显提高木薯干物率、淀粉含量。氮肥的不同形态对土壤酶的影响各不相同,还需进一步研究植物生长期氮素形态对土壤酶的影响,进而探索酶活性对产量的影响。

参考文献

- [1] ZIDENGA T, LEYVA G E, MOON H, SIRITUNGA D, SAYRE R. Extending cassava root shelf life via reduction of reactive oxygen species production[J]. *Plant Physiology*, 2012, 159(4): 1396-1407.
- [2] 韦本辉, 何虎翼, 俞健, 甘秀芹, 宁秀呈, 陆柳英, 唐秀桦, 韦广波. 旱地土壤耕作生态对木薯生长及环境的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(2): 668-671.
WEI B H, HE H Y, YU J, GAN X Q, NING X C, LU L Y, TANG X Y, WEI G P. Effects of different soil farming ecological types in dry land on cassava growth and environment[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(2): 668-671. (in Chinese)
- [3] 唐杰, 李明娟, 张雅媛, 洪雁, 张彦军, 王颖, 游向荣, 周葵, 卫萍. 食用木薯的加工现状及发展前景[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(2): 469-476.
TANG J, LI M J, ZHANG Y Y, HONG Y, ZHANG Y J, WANG Y, YOU X R, ZHOU K, WEI P. Processing utilization and development prospect of edible cassava[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(2): 469-476. (in Chinese)
- [4] MOSIERA R, ZHU Z L. Changes in patterns of fertilizer nitrogen use in Asia and its consequences for N_2O emissions from agricultural systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57(1): 107-117.
- [5] 袁赫奕, 陈明婉, 戚金存, 李晨, 李昌珍, 杨福孙. 氮肥形态与用量对槟榔幼苗形态和生理特性的影响[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(16): 5553-5563.
YUAN H Y, CHEN M W, QI J C, LI C, LI C Z, YANG F S. Effects of nitrogen fertilizer form and dosage on the morphology and physiological characteristics of betel nut seedlings[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(16): 5553-5563. (in Chinese)
- [6] GUO X R, ZU Y G, TANG Z H. Physiological responses of *Catharanthus roseus* to different nitrogen forms[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(2): 589-598.
- [7] MCKANE R B, JOHNSON L C, SHAVER G R, NADELHOFFER K J, EDWARD B R. Resource-based niches provide a basis for plant species diversity and dominance in arctic tundra[J]. *Nature*, 2002, 415(6867): 68-71.
- [8] 孙亚卿, 邵金旺, 王莹, 樊明寿. 氮素形态对燕麦生长和根际 pH 值的影响[J]. *华北农学报*, 2004(3): 59-61.
SUN Y Q, SHAO J W, WANG Y, FAN M S. Influence of nitrogen forms on oat growth and rhizosphere pH[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2004(3): 59-61. (in Chinese)
- [9] 姚华, 蒋强, 董蒙蒙, 梁琼月, 康亮, 顾明华, 何冰. 不同施氮水平对块根膨大期木薯叶片光合特性的影响[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(7): 1516-1521.
YAO H, JIANG Q, DONG M M, LIANG Q Y, KANG L, GU M H, HE B. Effect of nitrogen level on photosynthetic characteristics at stage of root tuber expansion of cassava[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(7): 1516-1521. (in Chinese)
- [10] 漆智平, 余让水. 海南主要土壤钾素状况与热带农业[J]. *热带作物研究*, 1997(4): 48-54.
QI Z P, YU R S. Soil potassium status and tropical agriculture in Hainan[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 1997(4): 48-54. (in Chinese)
- [11] 魏晓军. 氮素形态对结球甘蓝产量及产量形成的影响[J]. *农业科技与信息*, 2017(12): 69-71.
WEI X J. Effects of nitrogen forms on yield and yield formation of heading cabbage[J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2017(12): 69-71. (in Chinese)
- [12] 马拉新. 不同氮肥种类及施用量与灌溉量对木薯生长和产量的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
MA L X. Effects of different species and application rate of nitrogen fertilizer and irrigation amount on the growth and

- yield of cassava[D]. Nanning: Guangxi University, 2016. (in Chinese)
- [13] 和锐敏, 张兴兴, 赖鉴添, 王鑫, 邵丹青, 何琴, 钟国华, 卢颖林. 氮素形态与吡虫啉对甘蔗根系和地上部生长的影响[J]. 热带作物学报, 2020, 41(12): 2467-2473.
- HE R M, ZHANG X X, LAI J T, WANG X, SHAO D Q, HE Q, ZHONG G H, LU Y L. Effects of nitrogen and imidacloprid on growth and root system of sugarcane[J]. Chinese Journal of Tropical crops, 2020, 41(12): 2467-2473. (in Chinese)
- [14] 邢瑶, 马兴华. 氮素形态对植物生长影响的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(2): 109-117.
- XING Y, MA X H. Research progress on effect of nitrogen form on plant growth[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(2): 109-117. (in Chinese)
- [15] 代新俊. 氮肥运筹方式对冬小麦植株氮代谢及产量品质的影响[D]. 太原: 山西农业大学, 2019.
- DAI X J. Effects of nitrogen application on nitrogen accumulation and grain yield and quality of winter wheat[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [16] HUANG R, LAN M, LIU J, GAO M. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(36): 27942-27952.
- [17] 高飞. 氮肥形态调控对玉米生长发育及根际养分利用的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- GAO F. Effects of nitrogen form regulation on growth and rhizosphere nutrient utilization of maize[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [18] 吴勇, 刘晓静, 童长春, 赵雅姣. 施氮对西北荒漠灌区紫花苜蓿土壤理化性质及微生物数量的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(6): 58-64.
- WU Y, LIU X J, TONG C C, ZHAO Y J. Effects of nitrogen application on soil physical and chemical property and microbial quantity of alfalfa in desert irrigation area of north-west China[J]. Grassland and Turf, 2020, 40(6): 58-64. (in Chinese)
- [19] 梁悦. 供氮水平和氮肥形态对棉花生长发育及养分吸收的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- LIANG Y. Effects of nitrogen supply level and nitrogen fertilizer forms on cotton growth and nutrient absorption[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [20] 陈晓光, 李洪民, 张爱君, 唐忠厚, 魏猛. 氮素形态对甘薯土壤微生物及酶活性的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(3): 619-623.
- CHEN X G, LI H M, ZHANG A J, TANG Z H, WEI M. Effects of nitrogen forms on soil microbes and soil enzyme activities in sweet potato yield[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(3): 619-623. (in Chinese)
- [21] 王光华, 金剑, 潘相文, 周克琴, 刘晓冰. 不同氮肥对大豆根圈土壤酶活性和氮营养分布的影响[J]. 大豆科学, 2003(3): 213-217.
- WANG G H, JIN J, PAN X W, ZHOU K Q, LIU X B. Effect of different nitrogen fertilizers on soil enzyme activity and nitrogen nutrient distribution across soybean rhizosphere[J]. Soybean Science, 2003(3): 213-217. (in Chinese)
- [22] 马宗斌, 熊淑萍, 何建国, 马新明. 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(4): 1544-1551.
- MA Z B, XIONG S P, HE J G, MA X M. Effects of nitrogen forms on rhizosphere microorganisms and soil enzyme activity under cultivation of contrasting wheat cultivars during booting and grain filling period[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008(4): 1544-1551. (in Chinese)
- [23] 寇太记, 徐晓峰, 朱建国, 谢祖彬, 郭大勇, 苗艳芳. CO₂浓度升高和施氮条件下小麦根际呼吸对土壤呼吸的贡献[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2533-2538.
- KOU T J, XU X F, ZHU J G, XIE Z B, GUO D Y, MIAO Y F. Contribution of wheat rhizosphere respiration to soil respiration under elevated atmospheric CO₂ nitrogen application[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10): 2533-2538. (in Chinese)
- [24] DENG S P, TABATABAI M A. Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils[J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, 22(30): 202-207.
- [25] VEPSLINEN M, KUKKONEN S, VESTBERG M. Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(1): 1665-1672.
- [26] 徐娟, 黄洁. 6份木薯种质营养成分与食味的初步分析及评价[J]. 热带作物学报, 2013, 34(2): 373-376.
- XU J, HUANG J. The elementary analysis and evaluation of nutritive content and edible quality on 6 cassava germplasm[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(2): 373-376. (in Chinese)
- [27] 胡慧蓉, 田昆. 土壤学实验指导教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- HU H R, TIAN K. Guidance course for soil science experiments[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [28] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN S M. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1986. (in Chinese)
- [29] 周宝利, 尹玉玲, 徐妍, 韩璐, 叶雪凌, 白丽萍. 嫁接对茄子根际土壤微生物和叶片硝酸还原酶的影响[J]. 园艺学报, 2010, 37(1): 53-58.
- ZHOU B L, YIN Y L, XU Y, HAN L, YE X L, BAI L P.

- Effect of grafting on rhizospheric soil microorganisms and leaf NR activities of eggplants[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37(1): 53-58. (in Chinese)
- [30] CHEN Z P, LI H P, YANG T Y, CHEN T T, DONG C X, GU Q, CHENG X M. Transcriptome analysis provides insights into the molecular bases in response to different nitrogen forms-induced oxidative stress in tea plant roots (*Camellia sinensis*)[J]. *Functional plant biology: FPB* 2020, 47(12): 1073-1082.
- [31] 史春余, 张晓冬, 张超, 陈晓光. 甘薯对不同形态氮素的吸收与利用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 389-394.
- SHI C Y, ZHANG X D, ZHANG C, CHEN X G. Absorption and utilization of different nitrogen for sweet potato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(2): 389-394. (in Chinese)
- [32] 苟久兰, 孙锐锋, 何佳芳, 秦松, 肖厚军, 周瑞荣, 袁玲. 种植模式和氮肥形态对威芋 3 号马铃薯产量及品质的影响[J]. *中国马铃薯*, 2011, 25(1): 36-41.
- GOU J L, SUN R F, HE J F, QIN S, XIAO H J, ZHOU R R, YUAN L. Effect of different cropping patterns and nitrogenous fertilizer form on potato yield and quality[J]. *Chinese Potato Journal*, 2011, 25(1): 36-41. (in Chinese)
- [33] XIN H Y, OWEN G, CHRISTOPHER M, AMY J. Effects of sulfur application rates and foliar zinc fertilization on cotton lint yields and qualities[J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(6): 1794-1803.
- [34] HARGROVE W L. Evaluation of ammonia volatilization in the field[J]. *JPA*, 1988, 1(2): 104-104.
- [35] 李会合. 氮素形态配比对莴笋品质和养分含量的影响[J]. *北方园艺*, 2011(3): 18-20.
- LI H H. Effect of nitrogen forms on quality and nutrient content of lettuce[J]. *Northern Horticulture*, 2011(3): 18-20. (in Chinese)
- [36] 李小龙. 不同氮素形态及配比对蔬菜光合特性和品质的影响[J]. *中国园艺文摘*, 2015, 31(4): 57-58, 6.
- LI X L. Effects of different nitrogen forms and ratios on photosynthetic characteristics and quality of vegetables[J]. *Chinese Horticultural Abstracts*, 2015, 31(4): 57-58, 6. (in Chinese)
- [37] 郭文义. 规模经营农田养分空间变异与精准管理[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- GUO W Y. Study on spatial variability and site-specific management of soil nutrients within fields in large scale operation system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011. (in Chinese)
- [38] 张锡洲, 余海英, 王永东, 刘媛媛, 李廷轩. 不同形态氮肥对设施土壤速效养分的影响[J]. *西南农业学报*, 2010, 23(4): 1182-1187.
- ZHANG X Z, YU H Y, WANG Y D, LIU Y Y, LI T X. Effects of different nitrogen fertilizers on available nutrients concentrations of greenhouse soil[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 23(4): 1182-1187. (in Chinese)
- [39] 唐辉, 李婷婷, 沈朝华, 胡渊渊, 吴家胜. 氮素形态对香榧苗期光合作用、主要元素吸收及氮代谢的影响[J]. *林业科学*, 2014, 50(10): 158-163.
- TANG H, LI T T, SHEN Z H, HU Y Y, WU J S. Effects of nitrogen forms on foliar photosynthesis, nutrient status and nitrogen metabolism of *Torreya grandis* seedling[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(10): 158-163. (in Chinese)
- [40] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 卯丹, 车升国, 李亚星. 土壤酶的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(21): 1-7.
- LIU S J, XIA X, CHEN G M, MAO D, CHE S G, LI Y X. Study progress on functions and affecting factors of soil Enzymes[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(21): 1-7. (in Chinese)
- [41] 贺仲兵, 杨仁斌, 郭正元, 何文, 邱建霞. 不同的施肥方式对土壤脲酶和过氧化氢酶活性的影响研究[J]. *武夷科学*, 2005, 21: 104-108.
- HE Z B, YANG R B, GUO Z Y, HE W, QIU J X. Effects of different fertilization systems on the activities of urease and catalase in soil[J]. *Wuyi Science Journal*, 2005, 21: 104-108. (in Chinese)
- [42] 聂兆君, 秦世玉, 刘红恩, 赵鹏, 吴香婷, 高巍, 李畅, 张雯雯, 睢福庆. 氮锌配施对冬小麦产量及土壤氮素转化相关酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 431-441.
- NIE Z J, QIN S Y, LIU H E, ZHAO P, WU X T, GAO W, LI C, ZHANG W W, JU F Q. Effects of combined application of nitrogen and zinc on winter wheat yield and soil enzyme activities related to nitrogen transformation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(3): 431-441. (in Chinese)
- [43] 严君, 韩晓增, 王树起, 李晓慧, 朱巍巍. 不同形态氮素对种植大豆土壤中微生物数量及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 341-347.
- YAN J, HAN X Z, WANG S Q, LI X H, ZHU W W. Effects of different nitrogen forms on microbial quantity and enzymes activity in soybean field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(2): 341-347. (in Chinese)