

腐植酸对番茄苗期氮素代谢的影响

刘敏, 李絮花, 刘文博, 杨柳, 李金鑫

(土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 腐植酸对肥料具有改性增效的作用, 以番茄为供试材料, 研究腐植酸增效剂不同添加量对番茄苗期生长及氮素代谢酶活性的影响, 为腐植酸的开发应用提供参考依据。采用砂培试验方法, 设置了向霍格兰营养液分别加入腐植酸增效剂 0(HA0), 1(HA1), 2(HA2), 5(HA3), 10(HA4) mL/L 处理。培养 30 天后, 测定番茄的生长指标、植株养分含量、硝酸还原酶活性、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸脱氢酶活性。添加适量腐植酸增效剂能促进番茄苗期生长, HA3 处理番茄根系干重比 HA0 提高了 31.68%, HA1 处理番茄地上部干重最大。添加腐植酸可以提高番茄苗期叶片叶绿素含量, HA3 处理番茄苗期叶片叶绿素总量和类胡萝卜素含量最高, 分别比 HA0 提高了 17.11%, 24.04%。添加适量腐植酸增效剂能增加番茄苗期根系和地上部对氮素的吸收, HA3 处理的番茄根系、地上部及总氮素积累量比 HA0 分别提高了 30.61%, 20.24%, 21.54%。添加腐植酸增效剂可以调控番茄根系和叶片氮素代谢过程, 提高了氮素代谢酶活性, 与 HA0 相比, HA4 处理根系硝酸还原酶活性最大, HA3 处理根系谷氨酰胺合成酶活性最高, HA2 处理根系谷氨酸脱氢酶的活性最大; HA3 处理番茄苗期叶片中硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸脱氢酶活性最大, 与 HA0 处理相比分别提高了 38.27%, 64.54%, 106.63%。添加腐植酸增效剂可以促进番茄苗期的生长和对氮素的吸收, 提高氮素代谢酶活性, 处理中以在营养液中添加 5 mL/L 腐植酸增效剂效果最佳, 腐植酸增效剂添加量低于 5 mL/L 时, 对番茄苗期的生长及氮素代谢具有明显的促进作用。

关键词: 番茄; 腐植酸增效剂; 氮代谢; 硝酸还原酶; 谷氨酰胺合成酶; 谷氨酸脱氢酶
中图分类号: S642.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)03-0327-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.048

Effect of Humic Acid on Nitrogen Metabolism at Tomato Seedling Stage

LIU Min, LI Xuhua, LIU Wenbo, YANG Liu, LI Jinxin

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: Humic acid could improve the effect of fertilizers. Tomato was used as material in this experiment, the effects of humic acid synergist on the growth of tomato seedlings and the activity of nitrogen metabolism enzymes were studied in order to provide a reference for the development and application of humic acid. In this sand culture experiment, the humic acid was added to Hoagland nutrient solution with 0 (HA0), 1 (HA1), 2 (HA2), 5 (HA3) and 10 mL/L (HA4) respectively with 6 replications for each treatment. After culture for 30 days, the plant growth index, nutrients contents, nitrate reductase activity, glutamine synthase and glutamate dehydrogenase activities were measured. Adding proper amount of humic acid could promote the growth of tomato seedling, and the dry weight of root system of HA3 treatment increased by 31.68% than that of HA0. The dry weight of aboveground of tomato treated with HA3 was the largest. Adding Humic Acid could increase chlorophyll contents in Tomato leaves at the seedling stage. The contents of chlorophyll and carotenoid in tomato leaves treated with HA3 were the highest, which were 17.11% and 24.04% higher than that of HA0, respectively. The addition of proper amount of humic acid could increase the assimilation of nitrogen in roots and shoots of tomato at seedling stage. The accumulation of nitrogen in root, shoot and total nitrogen of tomato treated with HA3 was increased by 20.24% and 21.54% than that of HA0, respectively. The addition of humic acid could regulate the nitrogen metabolism process of tomato roots and leaves, and increase the activities of nitrogen metabolizing enzymes. Compared with HA0, the

nitrate reductase activity of roots treated with HA4 was the highest, and the activity of glutamine synthase with HA3 was the highest. The maximum activity of glutamate dehydrogenase was found in root system treated with HA2. The activities of nitrate reductase, glutamine synthase and glutamate dehydrogenase in tomato leaves treated with HA3 were the highest, which increased by 38.27%, 64.54% and 106.63% respectively compared with HA0. The addition of humic acid could promote the growth and absorption of nitrogen and increase the activities of nitrogen metabolizing enzymes at tomato seedling stage. The best effect was found under the addition of 5 mL/L. When the addition was lower than 5 mL/L, it could promote the growth and nitrogen metabolism of tomato seedlings.

Keywords: tomato; humic acid; nitrogen metabolism; nitrate reductase; glutamine synthase; glutamate dehydrogenase

氮素是构成植物生长所需的氨基酸、蛋白质、核酸等物质的重要组成成分,与其相关的氮代谢是植物体内最基本的代谢之一,在植物体内起着重要的生理作用。氮素的同化过程是将 NO_3^- 经 NO_2^- 转化为 NH_4^+ , 最后以 NH_4^+ 形式被作物吸收成为有机化合物。在氮代谢的整个过程中,硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合酶(GOGAT)、谷氨酸脱氢酶(GDH)起到了非常关键的作用^[1]。氮素代谢过程对植物的生长发育起重要作用。

腐植酸(humic acids 简称为 HA)是一类成分复杂的天然有机物质^[2-3],含有多种官能团(羧基、酚羟基、羰基、醇羟基、甲氧基、醌基等)^[4],主要存在于褐煤、风化煤和泥炭中,其含量丰富^[5],易提取,且成本低。已有大量研究^[6-11]表明,不同来源的腐植酸及其复合肥可以促进不同种类、不同培养环境下植物的生长发育,促进作物对氮素的吸收;有研究^[12-13]提出,腐植酸通过调控土壤微生物及酶的活性,改善植物营养,促进植株生长;有研究^[14-20]表明,在逆境胁迫下,腐植酸通过提高作物抗氧化酶活性,提高作物的抗逆性,从而促进生长;也有研究^[21]认为,腐植酸可以促进植物光合作用、呼吸作用,影响植物代谢;有研究^[22]表明,在硝酸盐胁迫条件下,外源黄腐酸可提高小白菜氮素代谢酶(NR,GS 和 GDH)的活性。但是,尚缺乏腐植酸对作物氮素代谢的研究报道。

本试验在霍格兰营养液中添加不同量的腐植酸增效剂,研究不同腐植酸增效剂添加量对番茄苗期的生长发育及氮素代谢酶活性影响,以期深入揭示腐植酸增效剂对番茄苗期生长的调控机制,从而为腐植酸增效剂的开发与应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2017 年 5—7 月于山东农业大学资源与环境学院试验基地温室进行。供试番茄品种“金鹏八

号”,供试腐植酸增效剂为生物活化的液体腐植酸,腐植酸含量 16%,水分含量 84%,氮含量 0.78%,总酸性基 2.24 meq/g,羧基 0.19 meq/g,酚羟基 2.05 meq/g,CEC 0.52 meq/g。

试验共设置 5 个处理,分别为向霍格兰营养液加入腐植酸增效剂 0, 1, 2, 5, 10 mL/L, 记为 HA0、HA1、HA2、HA3 和 HA4。

试验所用石英砂粒径为 0.5~2 mm,经自来水多次冲洗后,用工业浓盐酸浸泡 4~6 天,再用自来水冲洗干净,最后用去离子水再洗多次,直至无氯离子反应为止。将处理好的石英砂装到培养钵(底部有排水孔)中,距离钵沿 2~3 cm。将处理好的番茄(两叶一心)定植于培养钵中,每盆 1 株,重复 6 次。随机区组排列,每 3 天更换 1 次位置,每隔 2~3 天浇灌 1 次营养液,每次 200 mL,以保持一定的湿度和养分浓度;持续培养 30 天。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 样品采集 培养 30 天后,将整株番茄(包括根系)冲洗取出,先用自来水冲洗,用蒸馏水洗净,吸水纸吸干水分,测定每株幼苗的根系、植株鲜重。随后分成根系、茎和叶 3 部分。取部分根系和叶片鲜样低温保存,以供测定生理生化指标,剩余植株样经 105 ℃杀青,80 ℃烘干,磨碎以供测定植株养分。

1.2.2 测定项目与方法 硝酸还原酶活性采用活体法^[23]测定;谷氨酰胺合成酶(GS)活性和谷氨酸脱氢酶(GDH)活性测定参照文献^[23];植株全氮采用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}$ 消煮、半微量开氏法^[23]测定。

2 结果与分析

2.1 腐植酸增效剂对番茄苗期生长的影响

由表 1 可知,添加腐植酸可以显著提高番茄苗期根系和地上部鲜、干重,随着添加量的增加,番茄根系和地上部鲜、干重呈现先增后减的趋势。

与 HA0 处理相比,添加腐植酸增效剂处理(HA1、

HA2、HA3、HA4)根系干重分别增加了 11.57%~31.68%,处理中以 HA3、HA4 处理根系干重最大,其次是 HA1、HA2 处理。

添加腐植酸增效剂处理(HA1、HA2、HA3、HA4)地上部干重比 HA0 处理分别增加了 15.64%,13.64%,11.14%,5.29%,处理中以 HA1、HA2、HA3 处理根系干重最大,其次是 HA4 处理,且 HA4 处理与 HA0 处理差异性不显著。

表 1 腐植酸增效剂对番茄苗期生长发育的影响

项目	处理	根系	地上部	总量
鲜重/ (g·株 ⁻¹)	HA0	12.34±0.67b	49.25±3.01b	61.57±3.98b
	HA1	13.47±2.21b	55.53±3.45a	69.00±4.18a
	HA2	14.94±0.86a	58.40±3.10a	73.19±3.02a
	HA3	15.97±1.41a	55.68±4.02a	71.66±3.93a
	HA4	15.14±0.96a	56.53±3.38a	71.67±3.68a
干重/ (g·株 ⁻¹)	HA0	1.59±0.16d	6.78±0.43c	8.37±0.55b
	HA1	1.78±0.14c	7.84±0.49a	9.62±0.51a
	HA2	1.82±0.08bc	7.70±0.75ab	9.53±0.59a
	HA3	2.10±0.18a	7.54±0.31ab	9.64±0.44a
	HA4	1.96±0.12ab	7.14±0.40bc	9.09±0.49a

注:表中数据为平均值±标准误差;同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

2.2 腐植酸增效剂对番茄苗期叶片叶绿素含量的影响

由表 2 可知,添加腐植酸增效剂可以提高番茄苗期叶片叶绿素含量,随着添加量的增加叶绿素含量呈现先增后减的趋势。番茄苗期叶片叶绿素含量和类胡萝卜素含量均以 HA3 处理最高,与 HA0 相比,分别增加了 17.11%,24.04%,且差异性显著。添加腐植酸增效剂处理叶绿素 a 含量比 HA0 处理增加了 3.37%,5.87%,12.18%,3.58%,叶绿素 b 增加了 5.02%,22.29%,26.25%,23.81%。

表 2 腐植酸增效剂对番茄苗期叶片叶绿素含量的影响

单位:mg/g

处理	叶绿素 a 含量	叶绿素 b 含量	叶绿素 总含量	类胡萝卜素
HA0	1.35±0.07b	0.60±0.07b	1.94±0.09c	0.15±0.02c
HA1	1.40±0.07ab	0.63±0.04ab	2.03±0.06bc	0.16±0.01bc
HA2	1.43±0.13ab	0.73±0.05a	2.16±0.17ab	0.18±0.02ab
HA3	1.51±0.12a	0.76±0.07a	2.27±0.18a	0.19±0.01a
HA4	1.40±0.09ab	0.74±0.08a	2.14±0.12ab	0.18±0.02ab

2.3 腐植酸增效剂对番茄苗期氮素积累量的影响

由表 3 可知,添加腐植酸增效剂增加了番茄苗期氮素吸收,提高根系和地上部氮素积累量,随着添加量的增加,氮素积累量呈现先增后减的趋势。与 HA0 相比,HA2、HA3、HA4 处理根系氮素积累量分别增加了 18.62%,30.61%,24.53%,HA1 处理与 HA0 差异不显著。HA1、HA2、HA3、HA4 处理番

茄地上部氮素积累量比 HA0 处理增加了 18.49%~20.04%,且都与 HA0 处理差异性显著,但不同添加量间差异性不显著。与 HA0 相比,添加腐植酸增效剂处理番茄总吸氮量平均增加了 19.49%,且都与 HA0 处理差异性显著,但腐植酸增效剂不同添加量之间差异性不显著。

表 3 不同腐植酸添加量对番茄苗期氮素积累量的影响

单位:mg/株

处理	根系	地上部	总积累量
HA0	35.04±5.65c	220.95±13.35b	255.99±14.38b
HA1	36.33±4.19bc	261.80±26.42a	302.49±29.10a
HA2	41.57±5.50ab	264.95±21.57a	301.32±24.93a
HA3	45.77±3.83a	265.24±13.29a	311.13±15.34a
HA4	43.64±6.94a	264.90±11.97a	308.54±15.74a

2.4 腐植酸增效剂对番茄苗期根系氮素代谢酶活性的影响

由表 4 可知,添加腐植酸增效剂可以调控番茄苗期根系氮素代谢过程,提高了根系硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸脱氢酶(GDH)活性。

处理中 HA4 处理根系 NR 活性最大,为 10.13 μg/(g·h),比 HA0 处理增加了 32.71%,且差异性显著;与 HA0 相比,HA2、HA3 处理下 NR 活性分别提高了 17.16%,19.68%,且差异性显著;HA1 处理与 HA0 处理差异性不显著。

随着腐植酸添加量的增加,GS 活性呈现先增后减的趋势。与 HA0 处理相比,HA2、HA3、HA4 处理 GS 活性分别增加了 18.02%,29.97%,16.59%,且与 HA0 差异性显著,HA1 处理与 HA0 处理差异性不显著。

添加腐植酸增效剂处理比 HA0 处理根系 GDH 活性分别增加了 17.68%,32.51%,26.55%,32.16%,处理中以 HA2、HA3、HA4 处理根系 GDH 活性最高,其次是 HA1 处理。

表 4 番茄苗期根系硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸脱氢酶活性

处理	硝酸还原酶活性/ (N·μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	谷氨酰胺合成酶活性/ (ΔA·g ⁻¹ Pr·h ⁻¹)	谷氨酸脱氢酶活性/ (ΔE·min ⁻¹ ·g ⁻¹ Pr)
HA0	7.63±0.31c	15.89±0.99c	0.492±0.029c
HA1	8.66±0.95bc	16.83±1.26bc	0.579±0.084b
HA2	8.94±0.24ab	18.75±2.19ab	0.652±0.037a
HA3	9.13±0.98ab	20.65±1.27a	0.623±0.022ab
HA4	10.13±1.13a	18.53±1.69b	0.650±0.061a

2.5 腐植酸增效剂对番茄苗期叶片氮素代谢酶活性的影响

由表 5 可知,添加腐植酸增效剂可以促进番茄苗期叶片氮素代谢,提高叶片 NR、GS 和 GDH 活性;随

着添加量的增加,叶片 NR、GS 和 GDH 活性呈现先增后减的趋势。

添加腐植酸增效剂处理(HA1、HA2、HA3、HA4)处理叶片 NR 活性比 HA0 处理分别提高了 7.3%, 28.81%, 38.27%, 30.98%;与 HA0 比,添加腐植酸增效剂处理叶片 GDH 活性分别增加了 59.74%, 90.82%, 106.63%, 99.05%;处理中以 HA2、HA3、HA4 处理叶片 NR 和 GDH 活性最高,其次是 HA1 处理。

与 HA0 处理相比,添加腐植酸增效剂处理叶片 GS 活性增加了 35.61%~64.54%,且都与 HA0 处理差异性显著,处理中以 HA3、HA4 处理叶片 GS 活性最高,其次是 HA1、HA2 处理。

表 5 番茄苗期叶片硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸脱氢酶活性

处理	硝酸还原酶活性/ ($N \cdot \mu g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)	谷氨酰胺合成酶活性/ ($\Delta A \cdot g^{-1} Pr \cdot h^{-1}$)	谷氨酸脱氢酶活性/ ($\Delta E \cdot min^{-1} \cdot g^{-1} Pr$)
HA0	6.57±0.58b	3.48±0.27c	0.262±0.022c
HA1	7.05±0.61b	4.72±0.25b	0.419±0.065b
HA2	8.46±0.66a	4.91±0.26b	0.50±0.051a
HA3	9.08±0.38a	5.73±0.69a	0.541±0.037a
HA4	8.61±0.62a	5.16±0.57ab	0.522±0.052a

3 讨论

添加适量的腐植酸可以提高根系干重,腐植酸刺激根系生长,提高根系活力,促进干物质的积累^[24];王汝娟等^[25]研究也表明,能促进甘薯块根膨大前、中期光合产物向块根运输,显著提高甘薯 R/T(某一时块根重/对应的地上部鲜重),促进块根膨大。已有研究^[26]表明,植物根系可吸收腐植酸,腐植酸吸附在细胞壁可增加质膜上的质子泵($H^+ - ATPase$)的数量,促进 H^+ 向细胞外输出,使细胞壁酸化,多糖水解,细胞壁软化松弛,使细胞易于伸长、分裂,从而促进植物生长。本研究表明,添加适量腐植酸增效剂能显著提高番茄苗期根系、地上部的鲜、干重,促进番茄苗期的生长,这可能与腐植酸能促进细胞伸长、分裂密切相关,具体原因有待于进一步研究揭示。

腐植酸可显著提高葡萄^[27]、小麦^[28]、辣椒^[29]叶片叶绿素含量,刘美等^[24]认为,适量的腐植酸可显著增加番茄叶片叶绿素和类胡萝卜素的含量,提高光合速率,且适量的腐植酸对叶绿素 b 的提高幅度大于叶绿素 a。本研究表明,添加适量的腐植酸增效剂可以提高番茄苗期叶片叶绿素 a、b,叶绿素总量和类胡萝卜素含量;且适量的腐植酸增效剂用量对叶绿素 b 的提高幅度大于叶绿素 a;从而光合作用加强,番茄干物质积累量增加。这与刘美等^[24]、赵砺军^[30]的研

究结果一致。

氮代谢是植物生长发育过程中重要的生理代谢过程。硝酸还原酶(NR)是作物氮代谢过程中的关键酶,谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸脱氢酶(GDH)是氮同化的关键酶。有研究^[25,31-32]表明,适量的腐植酸有利于提高番茄叶片、辣椒叶片硝酸还原酶活性,提高甘薯块根和叶片中谷氨酰胺合成酶活性。施用腐植酸可以显著提高夏玉米各部位氮含量,并促进氮素向籽粒的转移^[33],施用不同量腐植酸可使烤烟氮素积累量提高 1.7~2.0 倍^[34]。本试验结果表明,添加腐植酸后番茄根系和叶片中 NR 活性提高,腐植酸可提高番茄对氮素的同化能力,促进氮素的积累。腐植酸添加量为 10 mL/L 时根系 NR 活性达到最大,而叶片 NR 活性在添加量为 5 mL/L 时最大。谷氨酰胺合成酶和谷氨酸脱氢酶可提高氮素同化速率,促进氮的积累。在本试验中,添加腐植酸处理提高了番茄根系和叶片中 GS、GDH 活性,且随着添加量的增加根系和叶片中 GS 活性呈现先增后减的趋势,这与番茄氮素积累量的趋势相同,当腐植酸添加量为 5 mL/L 时,GS 活性达到最大。同一处理下,腐植酸对叶片 NR、GS、GDH 活性的提高幅度远大于根系 NR、GS、GDH 活性,腐植酸对番茄叶片氮素代谢酶的影响要大于对根系的影响。

4 结论

添加适量的腐植酸增效剂可以显著提高番茄苗期根系和叶片中 NR、GS、GDH 活性,促进根系和地上部氮素吸收,增加光合色素含量,增加番茄苗期根系和地上部干物质积累量,本试验条件下,随着腐植酸增效剂添加量的增加,腐植酸的作用呈现先促进后抑制的趋势,以添加腐植酸增效剂 5 mL/L 的处理表现较佳,促进番茄生长效果最好。

参考文献:

- [1] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 23-35.
- [2] Asli S, Neumann P M. Rhizosphere humic acid interacts with root cell walls to reduce hydraulic conductivity and plant development [J]. Plant and Soil, 2010, 336: 313-322.
- [3] Schiavon M, Pizzeghello D, Francioso O, et al. High molecular size humic substances enhance phytylpropanoid metabolism in maize (*Zea mays* L.) [J]. Journal of Chemical Ecology, 2010, 36(6): 662-669.
- [4] 曾宪成. 腐植酸从哪里来,到哪里去[J]. 腐植酸, 2012(3): 1-10, 30.
- [5] Simpson A J, Kingery W L, Hayes M H, et al. Molec-

- ular structures and associations of humic substances in the terrestrial environment [J]. *Naturwissenschaften*, 2002, 89(2): 84-88.
- [6] Canellas L P, Dantas D J, Aguiar N O, et al. Probing the hormonal activity of fractionated molecular humic components in tomato auxin mutants [J]. *Annals of Applied Biology*, 2011, 159(2): 202-211.
- [7] 梁太波,王振林,刘兰兰,等. 腐植酸尿素对生姜产量及氮素吸收、同化和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 903-909.
- [8] Dobbss L B, Canellas L P, Olivares F L, et al. Bioactivity of chemically transformed humic matter from vermicompost on plantroot growth [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(6): 3681-3688.
- [9] 王振振,张超,史春余,等. 腐植酸缓释钾肥对土壤钾素含量和甘薯吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 249-255.
- [10] 梁太波,王振林,王汝娟,等. 腐植酸钾对生姜根系生长发育及活性氧代谢的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 813-817.
- [11] 刘红恩,张胜男,刘世亮,等. 腐植酸尿素对冬小麦产量、养分吸收利用和土壤养分的影响[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(7): 944-952.
- [12] 李作梅,刘兰兰,史春余,等. 腐植酸肥料对生姜土壤脲酶活性及氮素吸收的影响[J]. *中国蔬菜*, 2009(4): 44-47.
- [13] 彭正萍,门明新,薛世川,等. 腐植酸复合肥对土壤养分转化和土壤酶活性的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2005, 28(4): 1-4.
- [14] 郭伟,王庆祥. 腐植酸浸种对盐碱胁迫下小麦幼苗抗氧化系统的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2539-2545.
- [15] 张小冰,邢勇,郭乐,等. 腐植酸钾浸种对干旱胁迫下玉米幼苗保护酶活性及MDA含量的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(7): 69-72.
- [16] García A C, Berbara R L L, Fariás L P, et al. Humic acids of vermicompost as an ecological pathway to increase resistance of rice seedlings to water stress [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(13): 3125-3134.
- [17] Muscolo A, Sidari M, Attinà E, et al. Biological activity of humic substances is related to their chemical structure [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(1): 75-85.
- [18] 金平,刘山莉. 腐殖酸与水稻抗冷性的研究初探[J]. *东北农业大学学报*, 1997, 28(1): 90-93.
- [19] 郭伟,于立河. 腐植酸浸种对盐胁迫下小麦萌发种子及幼苗生理特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(1): 90-96.
- [20] 马建军,邹德文,吴贺平,等. 腐植酸钠对镉胁迫小麦幼苗生物效应的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(2): 91-93.
- [21] 张辉,姜文勇,刘波. 不同来源腐植酸促进植物生长活性及作用机理研究 II. 腐植酸对植物酶活性、呼吸作用及光合作用的影响[J]. *腐植酸*, 2000(2): 16-19.
- [22] 庞强强,陈日远,刘厚诚,等. 硝酸盐胁迫下黄腐酸对小白菜生长及氮代谢相关酶活性的影响[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(12): 2136-2140.
- [23] 中国科学院上海植物生理研究所,上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社, 1999: 156-158.
- [24] 刘美,王秀峰,谷端银,等. 育苗基质添加腐植酸促进番茄穴盘苗生长改善生理特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1636-1644.
- [25] 王汝娟,王振林,梁太波,等. 腐植酸钾对食用甘薯品种钾吸收、利用和块根产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 520-526.
- [26] Hager A, Debus G, Edel H G, et al. Auxin induces exocytosis and the rapid synthesis of a high turnover pool of plasma-membrane H^+ -ATPase [J]. *Planta*, 1991, 185(4): 527-537.
- [27] 社会英,薛世川,孙忠富,等. 不同用量腐植酸复合肥对葡萄叶片养分积累及其生理指标的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(1): 49-51.
- [28] 梁太波,王振林,刘娟,等. 灌溉和旱作条件下腐植酸复合肥对小麦生理特性及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(5): 900-904.
- [29] 孙志梅,薛世川,刘淑萍. 不同组分的腐植酸复合肥在辣椒上的施用效应及其生理机制研究[J]. *土壤通报*, 2003, 34(5): 440-443.
- [30] 赵励军. 不同来源腐植酸促进植物生长活性及作用机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2005.
- [31] 孙志梅,薛世川,梁文举,等. 不同用量腐植酸复合肥在辣椒上的施用效应及其防衰增产机理研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 81-84.
- [32] 柴沙沙,史春余,张立明,等. 腐植酸对食用型甘薯块根硝酸盐积累的影响[J]. *山东农业科学*, 2013, 45(4): 68-70, 74.
- [33] 袁天佑,王俊忠,冀建华,等. 施用腐植酸对夏玉米产量、氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(4): 794-802.
- [34] 穆金丽,丁松爽,李健鹏,等. 腐植酸与氮肥互作对烤烟生长和氮素吸收的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(6): 1399-1403.