

淹涝胁迫和氮形态对苗期玉米糖、氮代谢底物量的影响*

周自强^{1,2} 王福友¹ 陈建飞¹ 刘盼盼^{1,2} 周毅^{1**} 汪建飞¹

(1. 安徽科技学院城建与环境学院 凤阳 233100; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院 南京 219500)

摘要 采用砂培培养方法,比较研究淹水和不同氮形态(铵态氮、硝态氮以及铵态氮:硝态氮为1:1)对苗期玉米根、茎鞘和叶的糖、氮代谢底物——可溶性糖、还原糖、硝态氮和游离氨基酸等物质含量的影响。结果表明,当淹涝胁迫持续7d时,在非淹涝胁迫条件下,铵态氮处理的根、茎鞘和叶的可溶性糖和游离氨基酸含量均显著高于硝态氮处理($P<0.05$);在淹涝胁迫条件下,硝态氮处理的根、茎鞘和叶的生物量干重显著低于铵态氮处理($P<0.05$),其根和叶的生物量干重也显著低于铵态氮、硝态氮混合处理($P<0.05$)。与非淹涝条件相比,在淹涝胁迫条件下,硝态氮处理的根系和叶的硝态氮含量显著降低($P<0.05$),降低幅度分别高达62.6%和30.0%;此外,与非淹涝条件相比,在淹涝胁迫条件下,铵态氮处理的根的可溶性糖、还原糖以及游离氨基酸含量,茎鞘的可溶性糖和还原糖含量以及叶的可溶性糖和游离氨基酸含量均显著升高($P<0.05$),而硝态氮处理仅根、茎鞘和叶的还原糖含量以及叶的游离氨基酸含量显著升高($P<0.05$)。因此,在本试验条件下,由于糖、氮代谢底物含量充足,铵态氮处理的苗期玉米具有相对较强的耐淹涝胁迫能力。

关键词 淹涝胁迫 铵态氮 硝态氮 玉米 糖代谢 氮代谢

中图分类号: S513; S311 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2013)06-0715-05

Effect of water-logging and nitrogen form on substrates of sugar and nitrogen metabolism in maize (*Zea mays* L.) at seedling stage

ZHOU Zi-Qiang^{1,2}, WANG Fu-You¹, CHEN Jian-Fei¹, LIU Pan-Pan^{1,2}, ZHOU Yi¹, WANG Jian-Fei¹

(1. College of Urban Construction and Environment, Anhui University of Science and Technology, Fengyang 233100, China;
2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 219500, China)

Abstract The effects of water stress (water logging and non-water logging) and nitrogen forms (ammonium, nitrate and mixture of both) on concentrations of substrates in sugar and nitrogen metabolism (including nitrate, soluble sugar, reducing sugar and free amino acid) in roots, sheaths and stems, and leaves of maize at seedling stage were analyzed in a sand culture experiment. The results showed that under non-water logging conditions, ammonium treated maize had the highest concentration of soluble sugar and free amino acid in different parts of the plant. Dry biomass of different parts of nitrate-treated maize plants was significantly lower than that of ammonium-treated plants. Root and leaf dry biomasses were also significantly lower in ammonium-treated plants than plants treated with mixed nitrogen after seven days of water logging. Water logging significantly reduced nitrate concentration in roots and leaves of nitrate-treated maize plants by 62.6% and 30.0%, respectively. Furthermore, water logging significantly increased soluble/reducing sugar and free amino acid concentrations in roots, soluble/reducing sugar concentrations in sheaths and stems, and soluble sugar and free amino acid concentrations in leaves of ammonium-fed plants. It, however, increased reducing sugar concentration in roots, sheaths and stems and leaves, and free amino acid concentration in leaves of nitrate-fed plants. Ammonium rather than nitrate or mixed nitrogen alleviated therefore the negative effects of water logging resulting from more substrates of sugar and nitrogen

* 国家自然科学基金项目(31101598)、安徽省优秀青年科技基金项目(10040606Y02)、安徽省自然科学基金项目(090411002)和安徽科技学院大学生创新课题(第八批)资助

** 通讯作者: 周毅(1972—), 女, 副教授, 主要从事植物光合与水分氮生理调控研究。E-mail: zhouyi_nwau@sohu.com
周自强(1991—), 男, 本科, 研究方向为逆境植物营养生理与调控。E-mail: 997279361@qq.com

收稿日期: 2012-10-21 接受日期: 2013-01-17

metabolism when ammonium was the solely form of nitrogen.

Key words Water logging, Ammonium nitrogen, Nitrate nitrogen, Maize, Sugar metabolism, Nitrogen metabolism
(Received Oct. 21, 2012; accepted Jan. 17, 2013)

糖、氮代谢是植物的基础代谢,也是植物生长发育的能量和物质基础。在淹水和低氧环境条件下,植物维持正常的或至少是最低的能量和养分供应必不可少^[1]。已有研究认为,植物体内糖含量的增加有利于提高植物抗低氧胁迫的能力^[2];而糖代谢不仅为植物提供能量,也为氮同化提供碳骨架,故糖、氮代谢密不可分。在淹涝条件下,糖酵解或戊糖磷酸途径得到加强,此时,土壤中的无机氮——硝态氮和铵态氮的含量也呈现此消彼长的变化趋势^[3]。已有研究表明,当栽培介质中的硝态氮被铵态氮替代后,植物组织中的可溶性糖、可溶性蛋白^[4-5]和游离氨基酸^[4]以及全氮和全磷等物质含量^[6]均呈增加趋势;而在淹涝胁迫条件下,提高供氮水平不利于苗期铵态氮营养玉米的生长^[7],但对于硝态氮营养玉米而言,则可通过显著提高其对氮、磷和钾的吸收与累积,增强其对淹涝胁迫的适应性^[6-7],说明糖、氮代谢底物含量差异可能是影响不同供氮形态下,玉米抗淹涝性的关键限制因子。本试验通过砂培试验,探讨模拟淹涝胁迫条件和供氮形态对苗期玉米根、茎鞘和叶糖、氮代谢底物——可溶性糖、还原糖、硝态氮和游离氨基酸含量的影响,为进一步阐明在不同供氮形态下苗期玉米对淹涝胁迫条件的生理响应提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验方法

供试玉米(*Zea mays* L.)品种为“郑单 958”。试验采用室内砂培模拟培养方式,营养液参照霍格兰营养液配方,并略做改动,具体如下:氮浓度与霍格兰营养液的氮浓度($15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)一致,但氮形态设 3 种处理,分别为铵态氮[A,以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 形式提供]、硝态氮[N,以 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 形式提供]以及铵态氮、硝态氮混合[AN, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 按 1:1 混合];水分供给设非淹涝胁迫和淹涝胁迫 2 种处理,共计 6 个处理。营养液中另加 $0.75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 双氰胺(氮素用量的 5%)^[8],以防止发生硝化作用。

采用直播育苗的方式。玉米种子用 10% 的双氧水浸泡 30 min,洗净后直接播种于塑料杯(直径 7.1 cm,高 8.9 cm)中;塑料杯底部钻若干小孔,放置于长方形塑料盒(长×宽×高=21.4 cm×14.0 cm×8.2 cm)中,共计 24 盒,每个处理设置 4 个重复;通

过调节塑料盒中营养液的高度,控制塑料杯中的液面高度,以模拟非淹涝胁迫(250 mL 营养液)和淹涝胁迫(1 L 营养液,淹至砂面)条件。每个塑料杯中播种 1 粒种子,待 2 叶 1 心期,挑选长势一致的幼苗对其进行不同供氮形态处理。待 3 叶 1 心期时,再进行模拟淹涝胁迫处理。为降低两种水分条件下实际的供氮容量差异(营养液加入体积不同所致),及淹涝条件下氮的反硝化损失的影响,每天淋洗砂面,并更换 1 次营养液。营养液的 pH 调节至 6.00 ± 0.05 ,培养温度(25 ± 2) °C。在模拟淹涝胁迫处理的第 7 d 取样测定。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 植株根、茎鞘和叶生物量鲜重

将玉米分根、茎鞘和叶 3 部分收获,分别称鲜重,剪碎混匀后,一部分于 $105 \sim 110$ °C 杀青 30 min,再于 $70 \sim 80$ °C 烘至质量恒定,并称干重。另一部分用于糖、氮代谢底物含量的测定。

1.2.2 根、茎鞘和叶可溶性糖、还原糖、硝态氮和游离氨基酸含量

参照《植物生理生化实验原理和技术》方法^[9],可溶性糖、还原糖、硝态氮和游离氨基酸含量分别采用蒽酮比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法、水杨酸还原比色法和茚三酮试剂显色法测定。

1.3 数据分析

采用 SAS 软件(8.02)和 Excel 2003 对试验数据进行分析,并用最小显著差数法进一步对不同处理之间的差异进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 淹涝胁迫和氮形态对玉米植株叶、茎鞘和根生物量的影响

如图 1 所示,在非淹涝胁迫条件下,3 种氮形态处理的玉米整株生物量之间差异不显著($P > 0.05$,余同);但在淹涝胁迫条件下,硝态氮处理的根、茎鞘和叶的生物量干物质量显著低于铵态氮处理,其根和叶的生物量干物质量也显著低于铵态氮、硝态氮混合处理,说明在本试验的短期淹涝胁迫条件下,苗期玉米的栽培介质中加入硝态氮可能不利于其生长。

与非淹涝胁迫条件下的相同氮形态处理相比,淹涝胁迫对硝态氮处理和铵态氮、硝态氮混合处理的生物量干重没有明显影响;但是,铵态氮处理的

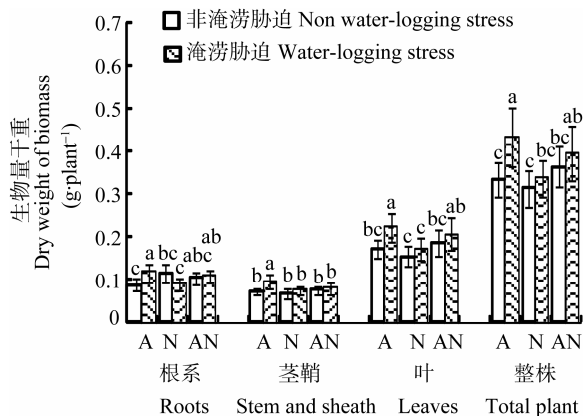


图 1 淹水胁迫和氮形态对苗期玉米根、茎和叶生物量干重的影响

Fig. 1 Effect of water-logging stress and nitrogen forms on the dry weight of roots, stem and leaves biomass of maize seedling
A、N 和 AN 分别表示铵态氮、硝态氮和铵态氮、硝态氮混合处理, 不同小写字母表示在同一植株部位、不同处理之间的差异达 0.05 显著水平, 下同。A, N and AN indicate the treatments of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and the mixture of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$, respectively. Different small letters in the same parts of maize plants indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

根、茎鞘和叶的生物量干重显著增高。故而, 在本试验条件下, 铵态氮处理的苗期玉米可能具有相对较强

的耐淹涝胁迫能力。

2.2 淹涝胁迫和氮形态对苗期玉米根系可溶性糖、硝态氮和游离氨基酸含量的影响

由表 1 可以看出, 在两种水分条件下, 苗期玉米根系的 4 种物质成分中, 对于硝态氮处理而言, 只有硝态氮的含量显著高于铵态氮以及铵态氮、硝态氮混合处理; 尽管如此, 与非淹涝条件相比, 在淹涝胁迫条件下, 其根系硝态氮含量显著降低, 降低幅度达 62.6%; 而其可溶性糖、还原糖以及游离氨基酸的含量均显著低于铵态氮处理, 但与铵态氮、硝态氮混合处理差异不显著。对于铵态氮处理而言, 除了非淹涝胁迫条件下的游离氨基酸含量与铵态氮、硝态氮混合处理差异不显著, 其余均显著高于铵态氮、硝态氮混合处理。与此同时, 与非淹涝条件相比, 在淹涝胁迫条件下, 铵态氮处理的根可溶性糖、还原糖以及游离氨基酸含量均显著升高, 升高幅度分别为 71.4%、81.0%和 41.0%; 而铵态氮、硝态氮混合处理的根中所测 4 种物质的含量均无明显变化。因此, 根系糖、氮代谢底物含量充足, 可能是本试验条件下铵态氮处理具有较强耐淹涝胁迫能力的原因之一。

表 1 淹涝胁迫和氮形态对苗期玉米根系可溶性糖、硝态氮和游离氨基酸含量的影响

Table 1 Effects of water-logging stress and nitrogen forms on concentration of nitrate nitrogen, soluble sugar, reductive sugar and free amino acid in root of maize seedling

处理 Treatment	铵态氮 Nitrate nitrogen ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	可溶性糖 Soluble sugar ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	还原糖 Reductive sugar ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	游离氨基酸 Free amino acid ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	
非淹涝胁迫 Non water-logging stress	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	7.4±0.5c	25.0±1.7b	1.59±0.11b	21.7±0.8b
	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	79.7±11.7a	16.1±3.0c	0.64±0.04d	17.0±1.1c
	铵、硝混合氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}+\text{NO}_3^-\text{-N}$	9.6±1.0c	16.8±1.9c	0.69±0.09cd	18.5±0.9bc
淹涝胁迫 Water-logging stress	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}$	9.1±0.3c	42.8±0.5a	2.87±0.33a	30.6±2.6a
	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$	29.8±1.6b	16.6±1.1c	1.05±0.07c	18.9±3.4bc
	铵、硝混合氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}+\text{NO}_3^-\text{-N}$	12.2±1.3c	14.1±2.3c	0.74±0.01cd	22.7±0.2b

2.3 淹涝胁迫和氮形态对苗期玉米茎鞘可溶性糖、硝态氮和游离氨基酸含量的影响

如表 2 所示, 在淹涝条件下, 尽管硝态氮处理的茎鞘硝态氮含量显著高于铵态氮和铵态氮、硝态氮混合处理; 但是, 与非淹涝条件相比, 在淹涝胁迫条件下, 茎鞘硝态氮含量显著升高, 升高幅度达 95.1%; 而在茎鞘的 4 种物质成分中, 对于铵态氮处理而言, 只有可溶性糖和游离氨基酸含量均显著高于硝态氮处理和铵态氮、硝态氮混合处理, 而还原糖含量与硝态氮处理差异不显著, 且只在淹涝胁迫条件下明显高于铵态氮、硝态氮混合处理。与非淹涝胁迫条件相比, 在淹涝胁迫条件下, 铵态氮处理茎鞘可溶性糖和还原糖含量均显著升高, 但游离氨基酸含量显著降低; 而硝态氮和铵态氮、硝态氮混合处理的游离氨基酸含量则显著升高; 此外, 硝态

氮处理的还原糖含量也显著升高。

2.4 淹涝胁迫和氮形态对苗期玉米叶可溶性糖、硝态氮和游离氨基酸含量的影响

如表 3 所示, 在两种水分条件下, 叶的硝态氮含量也是硝态氮处理显著高于铵态氮和铵态氮、硝态氮混合处理; 且与非淹涝条件相比, 在淹涝胁迫条件下, 硝态氮处理的叶硝态氮含量显著降低, 降低幅度达 30.0%, 还原糖含量则显著升高; 而在叶的 4 种物质成分中, 铵态氮处理只有可溶性糖和游离氨基酸的含量均显著高于硝态氮处理和铵态氮、硝态氮混合处理, 还原糖含量则只在非淹涝胁迫条件下明显高于其他 2 种氮形态处理。此外, 与非淹涝胁迫条件相比, 在淹涝胁迫条件下, 铵态氮和铵态氮、硝态氮混合处理的叶可溶性糖和游离氨基酸含量均显著升高, 还原糖含量则没有明显变化。

表 2 淹涝胁迫和氮形态对苗期玉米茎鞘可溶性糖、硝态氮和游离氨基酸含量的影响
Table 2 Effects of water-logging stress and nitrogen forms on concentration of nitrate nitrogen, soluble sugar, reductive sugar and free amino acid in stem and sheath of maize seedling

处理 Treatment		硝态氮 Nitrate nitrogen (mg·g ⁻¹)	可溶性糖 Soluble sugar (mg·g ⁻¹)	还原糖 Reductive sugar (mg·g ⁻¹)	游离氨基酸 Free amino acid (μg·g ⁻¹)
非淹涝胁迫 Non water-logging stress	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	6.2±0.9c	22.5±2.0b	1.75±0.12bc	62.6±1.6a
	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	30.5±0.2b	15.9±2.9c	1.59±0.07c	22.0±2.6e
	铵、硝混合氮 NH ₄ ⁺ -N+NO ₃ ⁻ -N	31.5±0.5b	15.2±3.5c	2.09±0.07bc	29.5±1.1d
淹涝胁迫 Water-logging stress	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	8.9±2.1c	38.2±1.7a	2.60±0.40a	48.6±0.0b
	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	59.5±1.9a	16.4±3.9c	2.23±0.22ab	26.6±0.2d
	铵、硝混合氮 NH ₄ ⁺ -N+NO ₃ ⁻ -N	31.7±0.5b	16.3±3.1c	1.71±0.15c	39.0±0.1c

表 3 淹涝胁迫和氮形态对苗期玉米叶可溶性糖、硝态氮和游离氨基酸含量的影响
Table 3 Effects of water-logging stress and nitrogen forms on concentration of nitrate nitrogen, soluble sugar, reductive sugar and free amino acid in leaves of maize seedling

处理 Treatment		硝态氮 Nitrate nitrogen (mg·g ⁻¹)	可溶性糖 Soluble sugar (mg·g ⁻¹)	还原糖 Reductive sugar (mg·g ⁻¹)	游离氨基酸 Free amino acid (μg·g ⁻¹)
非淹涝胁迫 Non water-logging stress	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	10.5±0.6c	16.5±1.6b	1.61±0.05a	41.5±2.5b
	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	36.1±2.9a	11.8±0.7c	1.08±0.12c	22.9±1.2d
	铵、硝混合氮 NH ₄ ⁺ -N+NO ₃ ⁻ -N	14.3±1.4c	11.7±2.1c	1.24±0.13bc	25.3±0.8d
淹涝胁迫 Water-logging stress	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	9.8±0.8c	27.4±3.1a	1.47±0.10ab	47.5±1.5a
	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	25.3±3.0b	12.1±1.0c	1.33±0.07b	24.9±0.3d
	铵、硝混合氮 NH ₄ ⁺ -N+NO ₃ ⁻ -N	13.7±1.0c	16.2±1.3b	1.09±0.09c	37.2±1.2c

3 讨论和结论

淹水对植物的危害主要是根际低氧^[9]。因此, 一直以来, 关于植物耐淹胁迫生理的相关研究, 主要集中在抗缺氧方面^[1]。大量研究表明, 在低氧胁迫条件下, 尽管植物根系的生长减慢或停止, 代谢减弱, 消耗的碳水化合物也减少, 但光合产物仍会运输到根部, 为糖酵解和发酵途径等无氧阶段提供碳源, 使根系的碳水化合物含量呈现升高趋势^[2]。在本试验的 3 种氮形态处理中, 与非淹涝胁迫条件相比, 在淹涝胁迫条件下, 只有铵态氮处理根系的可溶性糖和还原糖含量均明显增加。植物组织中的可溶性糖既包含葡萄糖和果糖这两个还原类糖, 又包含蔗糖这一非还原类糖^[9]。其中蔗糖作为玉米根系中的主要碳源, 可经蔗糖合成酶分解为葡萄糖和果糖。已有研究表明, 在低氧胁迫条件下, 玉米根系的蔗糖、葡萄糖、果糖和淀粉含量可成倍增加, 为糖酵解和发酵途径提供了底物^[10]。此外, 根系中可溶性糖的增加还可起到渗透调节作用, 并有利于纤维素和胼胝质的合成, 促使次生壁加厚, 以抵抗低氧胁迫对细胞组织的破坏^[2], 或降低根系氧气的径向损失^[1], 进而增强玉米耐低氧胁迫能力^[2]。在本试验的淹涝胁迫条件下, 铵态氮处理不仅根系和茎鞘可溶性糖和还原糖含量以及叶可溶性糖含量均明显增加, 根、茎鞘和叶生物量干重也均显著增高, 表明可溶性糖和还原糖的积累量呈明显增长趋势, 故而不同

部位的糖酵解和发酵途径底物供应充足, 使生物量明显增加, 表现出相对较强的耐淹涝胁迫能力。

氮素供应充足时, 植株过量吸收的氮素以硝酸盐的形式积累。从氮代谢过程来看, 作物累积硝态氮的根本原因在于根、茎、叶对硝态氮的吸收、转运和还原同化作用不平衡^[11]。正常条件下, 一般采用叶片硝态氮含量评价作物的氮营养状况。有研究表明, 根际低氧处理可使网纹甜瓜幼苗的根系累积硝态氮, 且耐性较强的品种硝态氮含量相对较高^[12], 这可能是由于硝态氮在硝酸还原酶(NR)的作用下, 代替氧作为电子受体, 降低氧消耗^[13-14]并提供维持细胞代谢功能的底物, 增强幼苗对低氧的抗性^[12]。已有研究证实, 在霍格兰营养液的供氮水平下(15 mmol·L⁻¹), 淹涝胁迫可显著降低硝态氮处理苗期玉米的氮素累积量^[15], 同时降低其木质部伤流液中的硝态氮含量^[16]; 而提高供硝态氮的水平, 具有提高硝态氮营养条件下玉米耐淹涝胁迫能力的效应^[7]。在本试验中, 淹涝胁迫条件下硝态氮处理的根系和叶硝态氮含量均明显降低, 可能是由其氮素吸收不足引起的。本试验中, 笔者同时测定的作为植株体内氮化物的主要存在方式和运输形式的游离氨基酸的含量结果表明: 铵态氮处理根系和叶的游离氨基酸含量均明显升高, 硝态氮处理只有茎鞘的游离氨基酸含量明显升高; 而铵态氮、硝态氮混合处理的茎鞘和叶的游离氨基酸含量则均明显升高, 进

一步说明在本试验的淹涝胁迫条件下, 铵态氮处理下玉米表现较强的抗性可能与其氮代谢的底物供应充足有关。

参考文献

- [1] 胡田田, 康绍忠. 植物淹水胁迫响应的研究进展[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2005, 34(1): 18-23
Hu T T, Kang S Z. A review of response of plants to waterlogging stress[J]. Journal of Fujian A & F University: Natural Science Edition, 2005, 34(1): 18-23
- [2] 郝云红, 胡艳丽, 沈向, 等. 外源硝态氮提高淹水甜樱桃根系糖含量及蔗糖相关酶活性[J]. 园艺学报, 2009, 36(7): 937-944
Hao Y H, Hu Y L, Shen X, et al. Exogenous NO_3^- enhanced sugar contents and sucrose correlated enzymes activity in roots of sweet cherry under waterlogging condition[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(7): 937-944
- [3] 李亚娟, 杨俞娟, 张友润, 等. 水分状况与供氮水平对土壤可溶性氮素形态变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1153-1160
Li Y J, Yang Y J, Zhang Y R, et al. Effects of water condition and nitrogen level on soil dissolved nitrogen compounds[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1153-1160
- [4] Horchani F, Hajri R, Aschi-Smiti S. Effect of ammonium or nitrate nutrition on photosynthesis, growth, and nitrogen assimilation in tomato plants[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 173(4): 610-617
- [5] Yang X P, Guo S W, Guo L L, et al. Ammonium enhances the uptake, bioaccumulation, and tolerance of phenanthrene in cucumber seedlings[J]. Plant and Soil, 2012, 354(1/2): 185-195
- [6] 郭九信, 杨瑛, 周毅, 等. 铵硝态氮单独供应对苗期淹水胁迫玉米氮磷钾累积的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(8): 185-192
Guo J X, Yang Y, Zhou Y, et al. Effect of ammonium and nitrate sole supply and nitrogen levels on nitrogen, phosphorus and potassium content and accumulation of maize (*Zea mays* L.) under water-logging stress at seedling stage[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2012, 40(8): 185-192
- [7] 郭九信, 杨瑛, 周毅, 等. 单一铵、硝营养对苗期淹水胁迫玉米光合与生物学性状的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(5): 80-86
Guo J X, Yang Y, Zhou Y, et al. Effect of nitrogen form and nitrogen supply level on maize (*Zea mays* L.) biology and photosynthesis characteristics under water-logging stress at seedling stage[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2010, 38(5): 80-86
- [8] 钱晓晴, 沈其荣, 王娟娟, 等. 模拟水分胁迫条件下水稻的氮素营养特征[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(4): 9-12
Qian X Q, Shen Q R, Wang J J, et al. Nitrogen nutrition characteristics of rice in simulating water stress condition[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2003, 26(4): 9-12
- [9] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2005: 122-123, 199-205, 207
Wang X K. Experimental principle and technique for physiology and biochemistry (2nd)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 122-123, 199-205, 207
- [10] 李亚玲, 孙周平, 时雪. 马铃薯幼苗对根际低氧胁迫的生长响应及耐性分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 799-804
Li Y L, Sun Z P, Shi X. Growth response and tolerance of potato (*Solanum tuberosum* L.) seedlings to root-zone hypoxia stress [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 799-804
- [11] Biemelt S, Hajirezaei M R, Melzer M, et al. Sucrose synthase activity does not restrict glycolysis in roots of transgenic potato plants under hypoxic conditions[J]. Planta, 1999, 210(1): 41-49
- [12] 王朝辉, 李生秀. 蔬菜不同器官的硝态氮与水分、全氮、全磷的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(2): 144-152
Wang Z H, Li S X. Relationships between nitrate contents and water, total N, as well as total P in different organs of vegetable plants[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1996, 2(2): 144-152
- [13] 高洪波, 郭世荣, 汪天. 根际低氧胁迫对网纹甜瓜硝态氮、铵态氮和蛋白质含量的影响[J]. 园艺学报, 2004, 31(2): 236-238
Gao H B, Guo S R, Wang T. Effect of root-zone hypoxia on NO_3^- -N, NH_4^+ -N and protein contents of muskmelon seedlings[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2004, 31(2): 236-238
- [14] Horchani F, Hajri R, Khayati H, et al. Does the source of nitrogen affect the response of subterranean clover to prolonged root hypoxia?[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 173(2): 275-283
- [15] 刘盼盼, 伍大利, 陈建飞, 等. 淹涝胁迫和氮形态对苗期玉米营养特性的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(6): 112-117
Liu P P, Wu D L, Chen J F, et al. Effect of water-logging stress and nitrogen forms on the characteristics of nutrition in maize plant at seeding stage[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(6): 112-117
- [16] 刘盼盼, 伍大利, 王福友, 等. 淹涝胁迫和供氮形态耦合对苗期玉米根系的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(9): 133-140, 146
Liu P P, Wu D L, Wang F Y, et al. Effect of water-logging stress and nitrogen forms on roots of maize (*Zea mays* L.) plants at seeding stage[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2012, 40(9): 133-140, 146