

网络出版时间:2012-07-18 10:06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120718.1006.005.html>

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

郭九信^{1,2}, 杨 瑛^{1,2}, 周 毅¹, 段立珍¹, 汪建飞¹

(1 安徽科技学院 城建与环境学院, 安徽 凤阳 233100; 2 南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

【摘要】【目的】研究不同供氮水平铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)对苗期淹水胁迫玉米氮、磷、钾含量及累积的影响,为采取氮营养调控途径优化玉米的氮、磷、钾营养特性及提高玉米的抗涝性提供理论依据。【方法】采用室内砂砾培养及模拟淹水胁迫的方法,研究2个玉米品种(“利民15”和“皖玉9号”)分别在苗期单独供应不同水平(3, 7 mmol/L) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 时,根、茎、叶中氮、磷、钾含量及累积量对淹水胁迫的响应。【结果】在2种氮形态和供氮水平下,淹水胁迫分别对低供 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 处理(A3F)和高供 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 处理(N7F)苗期玉米生长的影响相对较小,且淹水胁迫对根系生长的抑制效应明显大于地上部。在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 营养条件下,提高氮素供应水平对苗期淹水胁迫玉米氮、磷、钾的累积无显著影响,但根系氮含量显著增加而钾含量显著降低;在 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 营养条件下,提高氮素供应水平则可显著提高苗期淹水胁迫玉米对氮、磷、钾的累积与吸收。【结论】在模拟淹水胁迫条件下,提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 供应水平可明显增加苗期玉米根系含氮量并降低其根系含钾量,导致氮、钾比例失调,进而降低其耐淹性;但提高 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 供应水平则可明显增加苗期玉米对氮、磷和钾的累积与吸收,相对增强了玉米的耐淹性。

【关键词】 铵态氮与硝态氮;玉米;淹水胁迫;氮磷钾

【中图分类号】 S513.062;S311

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)08-0185-08

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

GUO Jiu-xin^{1,2}, YANG Ying^{1,2}, ZHOU Yi¹, DUAN Li-zhen¹, WANG Jian-fei¹

(1 College of Urban Construction and Environment, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China;

2 College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: 【Objective】Effect of water-logging stress on nitrogen, phosphorus and potassium content and accumulation was studied in a sand cultivation experiment, in order to provide a theoretical basis for enhancing water-logging stress tolerance by using nitrogen supply to optimize nitrogen, phosphorus and potassium nutrition. 【Method】Response of nitrogen, phosphorus and potassium content, and accumulation of two maize cultivars (Wanyu 9 and Limin 15) to nitrogen forms (ammonium and nitrate) and nitrogen levels (3 mmol/L and 7 mmol/L) under water-logging stress at seedling stage were studied in the experiment. 【Result】The results showed that, maize plants supplied with low level of ammonium-nitrogen (A3F) was higher than those supplied with high level (A7F). In contrast, inhibitory effect of water-logging

* [收稿日期] 2012-01-23

[基金项目] 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);安徽省教育厅项目(KJ2008B207)

[作者简介] 郭九信(1987—),男,安徽安庆人,在读硕士,主要从事逆境植物营养生理与调控研究。

[通信作者] 周 毅(1972—),女,新疆哈密人,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

stress on growth of nitrate-treated maize plants alleviated with increasing nitrate-nitrogen supply. Root appears suffering from much more reduction in biomass when compared with shoot (stem and sheath, and leaves) of maize plants under the stress conditions. Increase in ammonium-nitrogen showed no significant effect on nitrogen, phosphorus and potassium uptake and accumulation, while considerably increased nitrogen content, and reduced potassium content in the root of maize plants at the same time. By contrast, higher nitrate-nitrogen treated plants showed a pronounced increase in nutrients uptake and higher nutrients accumulation in the maize plants under water-logging stress. 【Conclusion】 The presented data revealed that nitrogen form and nitrogen level are two major factors affecting maize plants responses to water-logging stress, and negative effects of the water-logging stress under higher ammonium-nitrogen supply led to the imbalance between nitrogen and potassium in the roots, probably due to the increase in nitrogen content and reduction in potassium content. Contrary to that observed for ammonium-treated plants, plants treated with higher nitrate supply accumulated much more nitrogen, phosphorus and potassium.

Key words: ammonium and nitrate nutrition; maize; water-logging stress; nitrogen, phosphorus and potassium

淹涝引起的低氧胁迫,是其抑制作物吸收矿质离子和有益微量元素的根本原因^[1-3]。多数研究认为,淹水能迅速降低氧气向根系的扩散速率,抑制根系的有氧呼吸,导致能量(ATP)供应减少,进而阻碍根系对氮、磷、钾、钙和镁等离子的主动吸收及向地上部的运输^[4]。同时,在缺氧条件下,土壤中的硝化作用受到抑制,减缓了土壤铵态氮向硝态氮的转化进程^[5-6],但反硝化作用增强,故土壤无机氮水平及其中的铵、硝态氮所占比例均发生明显变化^[6];而供氮形态是影响植物耐低氧胁迫的主要因素之一^[7]。赵锋等^[8]的研究表明,与铵态氮单独供应相比,铵、硝态氮混合供应可明显提高水培水稻的生物量和氮素累积;而 Horchani 等^[7]认为,相对于硝态氮,铵态氮可提高三叶草耐低氧胁迫的能力。目前,关于供氮形态对淹水或低氧胁迫下除氮以外其他养分的影响尚少见报道。本课题组前期研究表明,苗期玉米的抗淹涝性随氮素供应形态和供应水平而异;在低铵态氮和高硝态氮条件下,苗期玉米表现出相对较强的耐淹性^[9]。本试验拟进一步比较铵态氮和硝态氮 2 种供氮形态及氮水平对淹水胁迫条件下苗期玉米氮、磷、钾含量及累积量的影响,探讨二者与苗期玉米耐淹性的关系,以期采用氮营养调控途径优化涝渍胁迫条件下玉米的氮、磷、钾营养特性及提高玉米的抗淹涝性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试玉米 “利民 15”(低抗淹水胁迫萌发)和“皖玉 9 号”(高抗淹水胁迫萌发)玉米种子购自安

徽省凤阳县种子公司。

1.1.2 营养液 营养液选用改进的霍格兰营养液和阿农微量营养元素配方^[10],并添加 Na_2SiO_3 以保持营养液中 SiO_2 的浓度为 0.2 mmol/L,同时添加 2 mg/L 的双氰胺(DCD)作为硝化抑制剂。

1.2 试验方法

采用砂培模拟培养方式。试验设计 2 种供氮形态: NH_4^+-N (以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 形式提供)和 NO_3^--N (以 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 形式提供);2 种氮素供应水平:3 mmol/L 和 7 mmol/L;2 个玉米品种:“利民 15”和“皖玉 9 号”;2 种水分胁迫方式:非淹水胁迫和淹水胁迫。进行完全组合设计,共计 16 个处理,其中每个玉米品种下的 8 个处理分别为 3 mmol/L NH_4^+-N (A3)、3 mmol/L NH_4^+-N + 淹水胁迫(A3F)、7 mmol/L NH_4^+-N (A7)、7 mmol/L NH_4^+-N + 淹水胁迫(A7F)、3 mmol/L NO_3^--N (N3)、3 mmol/L NO_3^--N + 淹水胁迫(N3F)、7 mmol/L NO_3^--N (N7)、7 mmol/L NO_3^--N + 淹水胁迫(N7F)。每处理重复 4 次。

将 2 个品种的玉米种子用去离子水培养至 2 叶 1 心期,去除胚乳(种子)后移栽,在饱和 CaSO_4 溶液中缓苗 24 h 再同时进行不同供氮形态、供氮水平和淹水胁迫处理。移栽后的培养容器为长方体、底部钻孔的塑料盒,其长×宽×高为 7.7 cm×7.7 cm×9.3 cm,每个塑料盒内移栽 1 株幼苗。将培养容器放置在长×宽×高为 34.2 cm×26.4 cm×12.8 cm 的塑料箱中,调节塑料箱中的营养液液面高度,对培养容器中的玉米进行非淹水胁迫和淹水胁迫控制处理,其中非淹水胁迫处理营养液液面的高度保持在箱内距底部 0.5 cm 处,淹水胁迫处理营养液液面的

高度保持在箱内距底部 8.8 cm 处,与砂面等高;移栽后每隔 1 d 对砂面淋洗 1 次,并将营养液 pH 调节至 6.00 ± 0.05 ,每 7 d 更换 1 次营养液。培养温度 $(30\pm2)^\circ\text{C}$,处理 30 d 后收获。

1.3 样品的采集与测定

1.3.1 苗期玉米植株不同部位生物量的测定 将玉米分根、茎和叶 3 部分收获,用去离子水洗净擦干,于 $105\sim110^\circ\text{C}$ 烘箱中杀青 30 min 后,于 $70\sim80^\circ\text{C}$ 烘箱中烘至恒质量,记录根、茎和叶的生物量。

1.3.2 植株氮、磷和钾含量及累积量的测定^[11] 粉碎后的植株样品采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消煮,待测液中的氮含量采用流动分析仪(AA3,德国BRAN+LUEBBE 公司)测定,磷含量采用磷钼蓝比色法测

定,钾含量采用火焰光度计法测定;氮(磷、钾)累积量=生物量×氮(磷、钾)含量。

1.4 数据分析

采用软件 SAS(8.02)和 Excel 2003 进行数据处理、制图和方差分析,并用最小显著差数法(LSD)对不同处理间的差异进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 淹水胁迫对铵、硝营养及其不同供氮水平下苗期玉米生物量的影响

图 1 显示,淹水胁迫对苗期玉米的生长有一定的抑制效应,且该抑制效应的强弱因供氮形态与供氮水平而异。

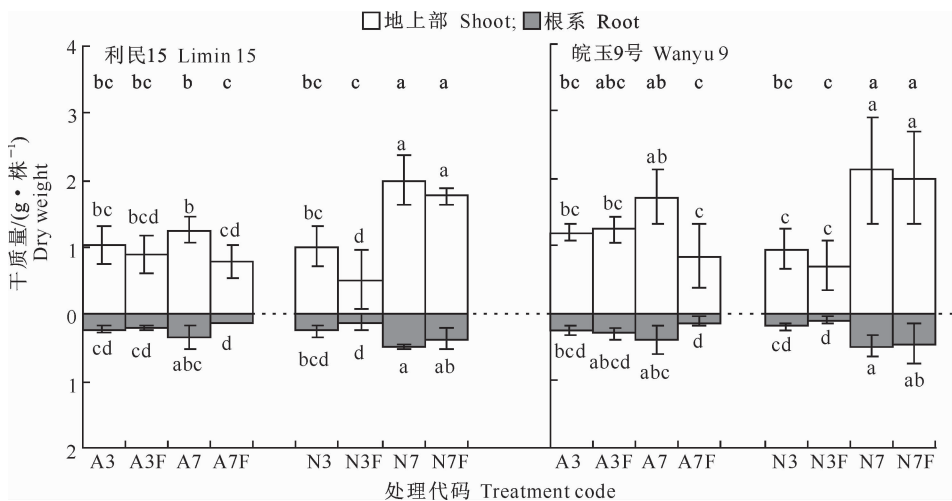


图 1 淹水胁迫对铵、硝营养及其不同供氮水平下苗期玉米生物量的影响
图柱上标不同字母者表示在 $P=5\%$ 水平上差异显著;图上方加粗的不同字母表示植株总生物量存在显著差异

Fig. 1 Effect of water-logging stress on biomass of maize cultivars supplied with different nitrogen form and nitrogen levels at seedling stage

Different letters in the same column of the same cultivars indicates significant at $P=5\%$ level;

Different bold letters at the top of the figure indicates significant at $P=5\%$ level on the total plants basis

在供铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)条件下,与非淹水胁迫条件下的相同氮形态处理相比,淹水胁迫条件下“利民 15”低供氮(3 mmol/L, A3F)和高供氮(7 mmol/L, A7F)处理的地上部干质量分别降低了 12.2%和 41.6%,根系干质量分别降低了 6.67%和 66.7%;而“皖玉 9 号”A3F 处理的地上部和根系干质量分别增加了 2.98%和 12.9%,A7F 处理的地上部和根系干质量则分别降低了 50.7%和 68.3%。在供硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)条件下,与非淹水胁迫条件下的相同氮形态处理相比,淹水胁迫条件下“利民 15”低供氮处理(N3F)的地上部和根系干质量分别降低了 48.3%和 53.0%,而高供氮处理(N7F)的地上部和根系干质量分别降低了 4.79%和 22.9%;“皖玉 9

号”N3F 处理的地上部和根系干质量分别降低了 26.2%和 44.2%,N7F 的地上部和根系干质量则分别降低了 2.37%和 7.58%。由此可见,在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 营养条件下,淹水胁迫对低供氮处理的苗期玉米生长的影响相对较小;而在 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 营养条件下,则对高供氮处理的苗期玉米生长的影响相对较小。同时,不同处理根系生物量的下降幅度始终高于地上部,证实淹水胁迫对根系生长的抑制效应明显大于地上部。

2.2 单一铵、硝营养及其不同供氮水平对苗期淹水胁迫玉米氮含量及氮累积量的影响

由表 1 可以看出,当营养液的供氮水平提高时,在 2 种水分胁迫条件下,“利民 15”和“皖玉 9 号”的

植株氮含量和氮累积量均呈不同程度的增高趋势。其中在非淹水胁迫条件下,供 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 2 个玉米品种和供 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的“皖玉 9 号”在低供氮与高供氮处理间的氮含量与氮累积量差异均达显著水平,而供 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的“利民 15”只有氮累积量在低供氮与高供氮处理间的差异达显著水平,而氮含量随供氮水平的提高无显著变化。在淹水胁迫条件下,供 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 时,低供氮与高供氮处理植株的氮含量差异显著,但氮累积量差异不显著;供 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 时,低供氮与高供氮处理植株的氮含量差异不显著,但氮累积量差异显著。说明施用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 时,淹水胁迫对玉米干物质积累的抑制效应可能大于其对氮素吸收的抑制效应,而施用 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 时,淹水胁迫对玉米干物质积累的抑制效应则可能相对低于其对氮素吸收的抑制效应,这尚待进一步研究证实。在 2 种水分条件下,当供氮形态相同时,随着供氮水平的提高,叶片和茎中氮含量升高的幅度均高于根系(淹水胁迫条件下供 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 处理除外),这可能也是在淹水胁迫条件下,根系生长受到的抑制程度相对较大

的原因之一。

当供氮形态和水平相同时,淹水胁迫条件下,玉米植株及其根、茎和叶中氮含量均高于非淹水胁迫条件下。不同处理的氮累积量呈现的规律与生物量的变化规律基本一致,即在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 营养条件下,淹水胁迫对低供氮处理玉米氮累积量的影响相对较小;而在 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 营养条件下,则对高供氮处理的影响相对较小。由于 A7F 处理的氮累积量均小于 A7 处理,而该处理下植株及其不同部位的氮含量均高于 A7 处理,这很可能是生物量降低引起的浓缩效应,即由淹水胁迫对干物质积累的抑制效应大于氮素累积所致;但在 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 营养条件下,“皖玉 9 号”N3F 处理的叶片和植株中氮累积量均高于 N3 处理,只有“利民 15”的 N3F 处理植株及其不同部位的氮累积量小于 N3 处理,而 N3F 处理植株及其不同部位的氮含量高于 N3,说明“利民 15”的氮含量升高也是淹水条件下干物质积累速率相对下降引起的浓缩效应。可见,在同一氮形态下,2 个玉米品种的氮素营养特性对淹水胁迫的响应存在差异。

表 1 铵、硝营养及其不同供氮水平对苗期淹水胁迫玉米氮含量及氮累积量的影响

Table 1 Effect of nitrogen form and nitrogen level on nitrogen content and accumulation of different parts of maize cultivars at seedling stage under water-logging stress condition

品种 Cultivars	处理 Treatments	氮含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Nitrogen content				氮累积量/($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$) Nitrogen accumulation			
		根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total	根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total
利民 15 Limin 15	A3	15.02 bcd	9.29 c	14.48 de	13.22 cd	3.12 b	2.87 bc	10.42 bcd	16.42 c
	A7	16.78 ab	13.06 b	21.20 ab	18.00 b	5.37 a	6.58 a	16.98 b	28.93 b
	N3	13.01 cd	8.05 c	11.58 e	10.98 d	3.22 b	2.83 c	7.58 cd	13.63 c
	N7	12.05 d	8.64 c	14.31 de	12.07 d	5.70 a	6.01 ab	16.21 bc	27.91 b
	A3F	15.78 bc	13.84 b	18.80 bc	17.18 b	3.06 b	3.06 b	12.59 bc	18.71 bc
	A7F	19.56 a	17.38 a	23.24 a	21.63 a	2.23 b	3.17 bc	14.20 bcd	19.60 bc
	N3F	17.52 ab	11.35 bc	16.92 cd	15.36 bc	1.70 b	2.11 c	5.45 d	9.27 c
	N7F	16.11 abc	12.90 b	20.54 ab	17.86 b	5.76 a	8.39 a	27.02 a	41.16 a
皖玉 9 号 Wanyu 9	A3	13.99 cd	8.80 cd	14.15 e	12.85 e	3.61 bcd	3.03 bc	12.08 cd	18.72 cd
	A7	13.72 de	14.15 ab	19.87 bc	17.43 bc	5.36 abc	6.73 ab	23.87 ab	35.97 ab
	N3	12.03 e	7.04 d	10.31 f	9.77 f	2.42 d	2.22 c	6.50 d	11.14 d
	N7	12.38 de	10.85 bcd	16.12 de	13.89 de	6.14 ab	6.62 ab	21.04 abc	33.80 abc
	A3F	12.17 e	11.86 abc	18.49 cd	15.84 cd	3.63 bcd	4.01 bc	16.84 bcd	24.48 bcd
	A7F	20.98 a	15.29 a	24.29 a	21.50 a	2.65 cd	3.47 bc	14.57 bcd	20.69 bcd
	N3F	15.66 bc	11.62 abc	19.30 bc	16.88 bc	1.74 d	2.18 c	9.93 d	13.85 d
	N7F	16.37 b	14.05 ab	21.30 b	18.56 b	7.16 a	9.75 a	29.55 a	46.47 a

以养分含量或累积量胁迫系数(淹水胁迫下的养分含量或累积量与非淹水胁迫下的养分含量或累积量之比)作为评价指标,计算不同处理玉米植株及其不同部位的养分含量和累积量胁迫系数,结果如表 2 所示。由表 2 可知,玉米植株及其不同部位的氮含量胁迫系数均大于 1(“皖玉 9 号”A3F 处理的

根系除外),但植株及其不同部位氮累积量的胁迫系数除了 A3F 和 N7F 处理外,其余基本小于 1,且在同一处理中均以根系的氮累积量胁迫系数小于茎和叶,说明含氮量的变化必须结合生物量的变化才能相对较真实地反映植物的抗淹性强弱。

表 2 铵、硝营养及其不同供氮水平对苗期淹水胁迫玉米不同部位氮含量及氮累积量胁迫系数的影响

Table 2 Effect of nitrogen form and nitrogen level on nitrogen content and accumulation stress coefficient of maize cultivars at seedling stage under water-logging stress condition

品种 Cultivar	处理 Treatment	氮含量胁迫系数 Nitrogen content stress coefficient				氮累积量胁迫系数 Nitrogen accumulation stress coefficient			
		根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total	根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total
利民 15 Limin 15	A3F	1.05	1.49	1.30	1.30	0.98	1.06	1.21	1.14
	A7F	1.17	1.33	1.10	1.20	0.42	0.48	0.84	0.68
	N3F	1.35	1.41	1.46	1.40	0.53	0.75	0.72	0.68
	N7F	1.34	1.49	1.44	1.48	1.01	1.40	1.67	1.47
皖玉 9 号 Wanyu 9	A3F	0.87	1.35	1.31	1.23	1.01	1.32	1.39	1.31
	A7F	1.53	1.08	1.22	1.23	0.49	0.52	0.61	0.58
	N3F	1.30	1.65	1.87	1.73	0.72	0.98	1.53	1.24
	N7F	1.32	1.29	1.32	1.34	1.17	1.47	1.40	1.37

2.3 铵、硝营养及其不同供氮水平对苗期淹水胁迫玉米磷含量及磷累积量的影响

表 3 显示,不同处理磷含量与植株氮含量的变化趋势不同。在非淹水胁迫条件下,“利民 15”A7 和 N7 处理的植株磷含量和磷累积量均分别高于相应的 A3 和 N3 处理,但差异均不显著。对于“皖玉 9 号”而言,只有 A7 处理的植株磷含量和磷累积量均高于 A3 处理,且差异均未达显著水平;而 N7 处理的植株磷累积量虽然也高于 N3 处理,但植株磷

含量反而显著低于 N3 处理。在淹水胁迫条件下,当供氮形态相同时,提高氮素供应水平对植株总磷含量影响的规律性不明显,这可能与生物量变化引起的浓缩或稀释效应混杂于其中有关。无论遭受淹水胁迫与否,在同一供氮形态下,提高氮素供应水平可降低根系磷含量,且在 NO₃⁻-N 营养条件下,根系磷含量降低的幅度相对更大,推测与 NO₃⁻ 和 H₂PO₄⁻ 均带负电荷,故二者可能存在一定的拮抗效应有关,这有待进一步研究。

表 3 铵、硝营养及其不同供氮水平对苗期淹水胁迫玉米磷含量及磷累积量的影响

Table 3 Effect of nitrogen form and nitrogen level on phosphorus content and accumulation of different parts of maize cultivars at seedling stage under water-logging stress condition

品种 Cultivar	处理 Treatment	磷含量/(mg·g ⁻¹) Phosphorus content				磷累积量/(mg·株 ⁻¹) Phosphorus accumulation			
		根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total	根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total
利民 15 Limin 15	A3	0.524 bc	0.323 d	0.278 ab	0.329 c	0.110 ab	0.092 d	0.205 ab	0.407 cd
	A7	0.494 bc	0.431 bcd	0.292 ab	0.376 bc	0.168 a	0.208 abc	0.225 ab	0.601 abc
	N3	0.430 c	0.380 cd	0.208 b	0.297 c	0.110 ab	0.131 cd	0.136 b	0.377 cd
	N7	0.387 c	0.323 d	0.314 ab	0.331 c	0.182 a	0.220 ab	0.363 a	0.765 ab
	A3F	0.696 a	0.607 a	0.382 a	0.487 a	0.136 ab	0.134 bcd	0.266 ab	0.537 bc
	A7F	0.616 ab	0.538 ab	0.390 a	0.449 ab	0.071 b	0.100 d	0.240 ab	0.411 cd
	N3F	0.711 a	0.485 abc	0.356 a	0.454 ab	0.073 b	0.087 d	0.099 b	0.259 d
	N7F	0.466 bc	0.455 bc	0.284 ab	0.358 bc	0.169 a	0.273 a	0.372 a	0.814 a
皖玉 9 号 Wanyu 9	A3	0.472 bc	0.401 bc	0.312 b	0.360 ab	0.123 bc	0.141 bcd	0.268 ab	0.532 bc
	A7	0.466 bc	0.467 abc	0.351 ab	0.401 ab	0.186 ab	0.229 abc	0.422 a	0.838 ab
	N3	0.401 cd	0.386 c	0.576 a	0.488 a	0.081 bc	0.121 cd	0.387 a	0.589 abc
	N7	0.350 d	0.385 c	0.248 b	0.306 b	0.171 ab	0.264 ab	0.316 ab	0.751 ab
	A3F	0.548 a	0.527 ab	0.384 ab	0.448 a	0.165 abc	0.176 bcd	0.352 ab	0.694 ab
	A7F	0.506 ab	0.539 a	0.452 ab	0.480 a	0.065 c	0.123 cd	0.255 ab	0.443 bc
	N3F	0.539 a	0.459 abc	0.280 b	0.362 ab	0.061 c	0.090 d	0.139 b	0.291 c
	N7F	0.495 ab	0.486 ab	0.293 b	0.377 ab	0.232 a	0.311 a	0.399 a	0.942 a

表 4 显示,除“利民 15”N7F 处理的叶片以及“皖玉 9 号”N3F 处理的叶片和植株的磷含量胁迫系数小于 1 外,其他处理玉米植株及其不同部位的磷含量胁迫系数均大于 1。除了处理 A3F 和 N7F 外,其他处理根、茎、叶、植株的磷累积量胁迫系数基

本小于 1。

2.4 铵、硝营养及其不同供氮水平对苗期淹水胁迫玉米钾含量及钾累积量的影响

表 5 显示,在非淹水胁迫条件下,“利民 15”A7 处理植株钾含量相对高于 A3 处理;而 N7 处理植株

钾含量则相对低于 N3 处理,且达差异显著水平。但在淹水胁迫条件下,“利民 15”植株钾含量的变化趋势则恰好与此相反,即 A7F 处理的植株钾含量相对低于 A3F 处理,而 N7F 处理的植株钾含量相对高于 N3F 处理;其中 A7F 处理的根系钾含量显著低于 A3F 处理,而 N7F 处理的茎钾含量显著高于 N3F 处理。在非淹水胁迫条件下,当供氮形态相同时,“皖玉 9 号”的植株钾含量有随氮素供应水平升高而增高的趋势;而在淹水胁迫条件下,当供氮形态

相同时,高供氮处理的植株钾含量低于低供氮处理,其中 A7F 处理的根系和茎钾含量显著低于 A3F 处理,而 N7F 处理只有根系钾含量显著低于 N3F 处理。结合生物量和钾累积量的变化趋势分析,2 个玉米品种 A7F 处理根系钾含量的下降原因与 N7F 明显不同,分析原因可知,前者是钾吸收量下降所致,而后者则是干物质积累大于钾吸收速率引起的稀释效应,这可能也是 2 个玉米品种中 A7F 处理的耐淹水胁迫能力均低于 A3F 处理的主要原因之一。

表 4 铵、硝营养及其不同供氮水平对苗期淹水胁迫玉米不同部位磷含量及磷累积量胁迫系数的影响

Table 4 Effect of nitrogen form and nitrogen level on phosphorus content and accumulation stress coefficient of maize cultivars at seedling stage under water-logging stress condition

品种 Cultivar	处理 Treatment	磷含量胁迫系数 Phosphorus content stress coefficient				磷累积量胁迫系数 Phosphorus accumulation stress coefficient			
		根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total	根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total
利民 15 Limin 15	A3F	1.33	1.88	1.37	1.48	1.24	1.46	1.30	1.32
	A7F	1.25	1.25	1.34	1.19	0.42	0.48	1.07	0.68
	N3F	1.65	1.28	1.71	1.80	0.66	0.66	0.73	0.69
	N7F	1.20	1.41	0.90	1.08	0.93	1.24	1.02	1.06
皖玉 9 号 Wanyu 9	A3F	1.16	1.31	1.23	1.24	1.34	1.25	1.31	1.30
	A7F	1.09	1.15	1.29	1.20	0.35	0.54	0.60	0.53
	N3F	1.34	1.19	0.49	0.74	0.75	0.74	0.36	0.49
	N7F	1.41	1.26	1.18	1.23	1.36	1.18	1.26	1.25

表 5 铵、硝营养及其不同供氮水平对苗期淹水胁迫玉米钾含量及钾累积量的影响

Table 5 Effect of nitrogen form and nitrogen level on potassium content and accumulation of different parts of maize cultivars at seedling stage under water-logging stress condition

品种 Cultivar	处理 Treatment	钾含量/(mg·g ⁻¹) Potassium content				钾累积量/(mg·株 ⁻¹) Potassium accumulation			
		根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total	根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total
利民 15 Limin 15	A3	8.67 c	18.03 c	16.17 ab	15.29 de	1.89 c	5.61 bcd	11.80 bc	19.30 bc
	A7	8.96 c	21.28 bc	18.07 a	17.25 bcd	2.91 bc	10.32 bc	14.17 bc	27.40 bc
	N3	14.21 b	19.64 bc	16.93 ab	17.14 cd	3.68 bc	6.81 bcd	11.32 bc	21.82 bc
	N7	10.59 bc	15.62 c	14.31 b	13.81 e	4.99 ab	10.65 b	16.23 ab	31.87 b
	A3F	18.51 a	28.46 a	18.09 a	20.36 ab	3.61 bc	6.30 bcd	12.47 bc	22.37 bc
	A7F	12.72 bc	25.34 ab	17.90 a	18.60 abc	1.47 c	4.72 d	11.16 bc	17.34 c
	N3F	20.47 a	21.27 bc	16.66 ab	18.62 abc	2.67 bc	4.93 cd	6.27 c	13.88 c
	N7F	18.96 a	28.17 a	18.40 a	21.02 a	6.88 a	17.56 a	23.92 a	48.36 a
皖玉 9 号 Wanyu 9	A3	8.84 cd	16.79 cd	16.02 bcd	14.88 cd	2.27 cd	5.79 bc	13.62 bc	21.68 bc
	A7	7.65 d	21.84 bc	16.26 abcd	16.00 cd	2.95 bcd	10.59 bc	19.56 ab	33.10 bc
	N3	12.08 c	14.23 d	14.50 d	14.02 d	2.50 bcd	4.34 c	9.30 c	16.15 c
	N7	9.35 c	18.77 cd	15.29 cd	15.02 cd	4.42 bc	12.50 ab	19.57 ab	36.49 ab
	A3F	17.33 b	28.64 a	18.30 abc	20.41 ab	5.15 b	9.77 bc	16.78 bc	31.70 bc
	A7F	11.07 cd	21.28 c	17.54 abcd	17.72 bc	1.57 d	4.81 c	10.56 c	16.94 c
	N3F	23.84 a	28.13 a	18.62 ab	21.69 a	2.77 bcd	5.63 bc	9.57 c	17.96 c
	N7F	19.26 b	27.10 ab	19.36 a	21.32 a	8.04 a	18.44 a	25.89 a	52.37 a

由表 5 和表 6 可以看出,当供氮形态和水平相同时,与非淹水胁迫条件下相比,淹水胁迫条件下植株的钾含量均有不同程度的增高,钾含量胁迫系数基本大于 1,这可能是由于干物质积累下降引起的浓缩效应所致,如 A7F 处理和 N3F 处理钾含量的变化。而 A3F(除叶片钾含量外)较 A3 和 N7F 较

N7 植株不同部位钾含量及其总钾含量的增高幅度均达差异显著水平,且其中以根系的增高幅度最明显;与此同时,尽管其钾累积量胁迫系数低于钾含量胁迫系数,但二者的差距分别相对低于处理 A7F 和 N3F,与之相比,这均可能是淹水胁迫对处理 A3F 和 N7F 影响相对较低的根本原因。

表 6 铵、硝营养及其不同供氮水平对苗期淹水胁迫玉米不同部位钾含量及钾累积量胁迫系数的影响

Table 6 Effect of nitrogen form and nitrogen level on potassium content and accumulation stress coefficient of maize cultivars at seedling stage under water-logging stress condition

品种 Cultivar	处理 Treatment	钾含量胁迫系数 Potassium content stress coefficient				钾累积量胁迫系数 Potassium accumulation stress coefficient			
		根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total	根 Root	茎 Sheath	叶 Leave	植株 Total
利民 15 Limin 15	A3F	2.13	1.58	1.12	1.33	1.91	1.12	1.06	1.16
	A7F	1.42	1.19	0.99	1.08	0.51	0.46	0.79	0.63
	N3F	1.44	1.08	0.98	1.09	0.73	0.72	0.55	0.64
	N7F	1.79	1.80	1.29	1.52	1.38	1.65	1.47	1.52
皖玉 9 号 Wanyu 9	A3F	1.96	1.71	1.14	1.37	2.27	1.69	1.23	1.46
	A7F	1.45	0.97	1.08	1.11	0.53	0.45	0.54	0.51
	N3F	1.97	1.98	1.28	1.55	1.11	1.30	1.03	1.11
	N7F	2.06	1.44	1.27	1.42	1.82	1.48	1.32	1.44

3 讨 论

一般认为,淹水对植物的伤害主要是严重缺氧所造成的次生胁迫伤害。缺氧影响养分的吸收、生长调节物质的合成与转移、植物的光合与呼吸作用以及碳水化合物的分配,最终导致减产^[12]。淹水 10 h 后番茄就可停止除硝酸根以外的养分吸收^[13]。因此,淹水会造成植物叶片氮、磷、钾含量下降^[12,14]。而提高供氮水平^[15-16]或采用液面喷施补氮等方式^[15],均可减轻淹涝胁迫对产量形成的不利影响。本试验中,苗期玉米对氮素供应增加的响应与供氮形态密切相关,这与人前关于植物在不同供氮形态下对淹涝或低氧胁迫的适应能力存在明显差异^[7,17-18]的研究结果基本一致。Morard 等^[13]认为,植物可以利用硝酸盐还原反应生成的氧来确保植物对水分和硝态氮的吸收,因而硝态氮吸收受淹涝胁迫的影响最小。在低氧胁迫条件下,甚至出现硝态氮的吸收增加、硝酸还原酶活性(NR)升高^[19-22]以及细胞质酸化趋势减缓^[20]等适应性生理变化;提高植物耐淹涝途径的机制也被证实与上述变化存在一定关联^[21]。本试验中,提高硝态氮的供氮水平可明显增加淹涝胁迫条件下苗期玉米对氮素的累积,进而提高其耐淹涝胁迫能力。Ferreira 等^[12]的研究表明,在淹涝胁迫条件下,耐淹涝品种通常吸收更多的矿质元素。同理,在本试验中,提高铵态氮的供氮水平则降低了苗期玉米的耐淹涝胁迫能力,这可能与非淹涝胁迫条件下铵态氮处理的植株氮含量已经相对较高有关,即其在遭遇淹涝胁迫时,影响植物生长的最小限制因子可能不是氮素缺乏,故在这种情况下,提高供氮水平不但不能增加氮素累积,反而可能加重了淹涝胁迫造成的伤害。

有研究表明,某些低磷的碱性土壤发生淹水胁迫时,土壤磷的生物有效性呈增高趋势,且可因此短

暂提高植物的磷含量;此外,淹水条件下土壤增加的亚铁离子也可通过置换土壤胶体表面的交换性钾,使土壤溶液中的钾含量增加而促进植物对钾的吸收^[12]。近来的研究表明,植物为适应淹涝胁迫条件下的根系低氧环境而形成的通气组织,能降低植物根系的氮、磷、钾养分含量与代谢消耗,促进养分的再利用,使植物适应耐低养分环境条件^[23]。在本试验的砂培模拟培养条件下,外源磷的生物有效性基本不会改变,在淹涝胁迫条件下,提高供氮水平会导致根系磷含量、钾含量明显下降,这种变化对硝态氮处理的影响较小,但对铵态氮处理却明显不利,推测可能与二者根系通气组织的形成特征有关,这尚待进一步研究证实。Morard 等^[13]认为,钾是对低氧胁迫最敏感的元素,进一步从淹涝胁迫条件下铵态氮和硝态氮处理根系的氮、磷、钾含量的变化进行分析,在铵态氮营养条件下,提高供氮水平能显著增加根系氮含量,对根系磷含量影响不显著,但显著降低根系含钾量;在硝态氮营养条件下,提高供氮水平对根系氮含量无显著影响,但使根系磷含量和钾含量呈降低的趋势,但这在 2 个供试玉米品种中的变化幅度不同,其中“利民 15”的根系磷含量和“皖玉 9 号”的根系钾含量在高供氮处理与低供氮处理间差异达显著水平。由此可见,在淹涝胁迫条件下,提高供氮水平可能导致铵态氮处理根系的氮/钾失调,最终引起其耐淹涝胁迫能力下降。

[参考文献]

[1] Dat J F,Capelli N,Folzer H,et al. Sensing and signalling during plant flooding [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2004,42:273-282.

[2] Sairam R K,Kumutha D,Ezhilmathi K. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants [J]. Biologia Plantarum,2008,52(3):401-412.

[3] Irfan M,Hayat S,Hayat Q,et al. Physiological and biochemical

- changes in plants under waterlogging [J]. *Protoplasma*, 2010, 241:3-17.
- [4] Milroy S P, Bange M P, Thongbai P. Cotton leaf nutrient concentrations in response to waterlogging under field conditions [J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(3/4):246-255.
- [5] 李奕林, 张亚丽, 胡江, 等. 淹水条件下籼稻与粳稻苗期根际土壤硝化作用的时空变异 [J]. *生态学报*, 2006, 26(5):1461-1467. (in Chinese)
- Li Y L, Zhang Y L, Hu J, et al. Spatiotemporal variations of nitrification in rhizosphere soil for two different rice cultivars at the seedling stage growing under waterlogged conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5):1461-1467.
- [6] 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]. *植物营养与肥科学报*, 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. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 赵锋, 徐春梅, 张卫建, 等. 根际溶氧量与氮素形态对水稻根系特征及氮素积累的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2011, 18(4):195-200.
- Zhao F, Xu C M, Zhang W J, et al. Effects of rhizosphere dissolved oxygen content and nitrogen form on root traits and nitrogen accumulation in rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 18(4):195-200. (in Chinese)
- [9] 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: Nat Sci Ed*, 2010, 38(5):80-86. (in Chinese)
- [10] 毛达如. 植物营养研究方法 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2004:18.
- Mao D R. Research method on plant nutrition [M]. Beijing: China Agriculture University Press, 2004:18. (in Chinese)
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2007:263-271.
- Bao S D. Analysis of soil agrochemical [M]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2007:263-271. (in Chinese)
- [12] Ferreira J L, Coelho C H M, Magalhães P C, et al. Evaluation of mineral content in maize under flooding [J]. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2008, 8:134-140.
- [13] Morard P, Locoste L, Silvestre J. Effect of oxygen deficiency on uptake of water and mineral nutrients by tomato plants in soilless culture [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(8):1063-1078.
- [14] Smethurst C F, Garnett T, Shabala S. Nutritional and chlorophyll fluorescence responses of lucerne (*Medicago sativa*) to waterlogging and subsequent recovery [J]. *Plant and Soil*, 2005, 270(1):31-45.
- [15] Singh N T, Vig A C, Singh R. Nitrogen response of maize under temporary flooding [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1985, 6(2):111-120.
- [16] Lauer J. Flooding impacts on corn growth and yield [J]. *Field Crops*, 2008, 28:49-56.
- [17] Islam M A, Macdonald S E. Current uptake of ^{15}N -labeled ammonium and nitrate in flooded and non-flooded black spruce and tamarack seedlings [J]. *Annals of Forest Science*, 2009, 66(1):102-113.
- [18] Jampeetong A, Brix H. Oxygen stress in *Salvinia natans*: Interactive effects of oxygen availability and nitrogen source [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 66:153-159.
- [19] Allègre A, Silvestre J, Morard P, et al. Nitrate reductase regulation in tomato roots by exogenous nitrate: A possible role in tolerance to long-term root anoxia [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(408):2625-2634.
- [20] Libourel I G L, van Bodegom P M, Fricker M D, et al. Nitrite reduces cytoplasmic acidosis under anoxia [J]. *Plant Physiology*, 2006, 142:1710-1717.
- [21] Gao H B, Jia Y X, Guo S R, et al. Exogenous calcium affects nitrogen metabolism in root-zone hypoxia-stressed muskmelon roots and enhances short-term hypoxia tolerance [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(11):1217-1225.
- [22] Horchani F, R'bia O, Aschi-Smiti S. Oxygen sensing and plant acclimation to soil flooding [J]. *International Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(3):227-237.
- [23] Postma J A, Lynch J P. Root cortical aerenchyma enhances the growth of maize on soils with suboptimal availability of nitrogen, phosphorus, and potassium [J]. *Annals of Botany*, 2011, 107(5):829-841.