

氮肥种类和淹水胁迫对砂姜黑土区玉米苗期生长和养分吸收的影响

江 杰^{1,3}, 韩贻涛¹, 苗 琪¹, 刘 畅¹, 程昕昕², 周 毅^{1,2*}, 段立珍¹, 刘 正²

(1. 安徽科技学院城建与环境学院, 安徽 凤阳 233100; 2. 玉米育种安徽省工程技术研究中心, 安徽 凤阳 233100; 3. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘 要: 采用盆栽土培方法, 比较 0~14 d 持续淹水胁迫条件下, 不同形态的氮肥以及施氮、磷和钾肥对砂姜黑土区富钾低肥土壤上种植玉米苗期植株的地上部生物量、氮、磷和钾含量与累积量的影响。结果表明, 在玉米 3 叶 1 心期 (淹水胁迫处理前), 施硝酸钾处理地上部的生物量明显高于除施硝酸铵处理以外的其它处理 ($P < 0.05$)。在 3 个缺素处理中, 不施钾处理地上部的生物量明显低于不施磷处理 ($P < 0.05$), 但与不施氮处理差异不显著。在淹水胁迫过程中, 施肥和淹水胁迫的交互作用影响不显著, 在淹水胁迫处理 7 d 时, 施不同形态的氮肥以及施氮、磷和钾肥显著影响玉米地上部的生物量和氮累积量 ($P < 0.05$), 并极显著影响磷累积量和钾累积量 ($P < 0.01$); 淹水胁迫也显著降低了此时玉米植株地上部的氮累积量, 并极显著降低其钾累积量 ($P < 0.01$), 且当胁迫处理延长至 14 d 时, 淹水胁迫还引起生物量和磷累积量的显著下降 ($P < 0.05$)。延长淹水胁迫持续时间, 对生物量、氮累积量和钾累积量的肥效差异与胁迫的抑制效应分别呈现加大和增强的趋势。比较 F 值大小可知, 在淹水胁迫处理 7 d 时, 氮肥种类是玉米地上部生物量、氮和磷累积量变化的主要诱因; 而当胁迫处理延长至 14 d 时, 淹水胁迫则上升为主要决定因子。与此不同, 胁迫处理开始后, 淹水胁迫始终是钾累积量变化的主要决定因子。在淹水胁迫条件下, 尿素可能是有利于提高富钾低肥土壤苗期玉米耐淹水胁迫性的氮肥种类。

关键词: 玉米; 氮肥种类; 淹水胁迫; 砂姜黑土区

中图分类号: S513; S311

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2016) 01-0057-07

砂姜黑土是黄淮海平原三大低产土壤之一, 有近三分之二的砂姜黑土分布于淮北平原^[1]。该地区处于我国南北过渡的暖温带半湿润季风气候带, 虽然长年降水量充沛, 但年内分配不均, 60% 的降水主要集中在 6~9 月份; 且暴雨多, 降雨强度大^[2]。此外, 淮北平原地势低洼, 地面比降 1/16 000 ~ 1/10 000, 地下水位较高, 农田的抗灾能力差, 加剧频繁发生的旱涝渍危害, 成为限制当地农业生产的主要障碍因子之一^[1]。

大部分砂姜黑土都属于变性土^[3], 是土壤粘粒含量高的富钾土壤 (速效钾平均含量高达 153 mg/kg)^[2]。但越来越多的研究表明, 长期偏施

氮、磷肥的施肥结构, 已导致砂姜黑土区的速效钾含量开始出现迅速下降的态势, 不但影响了土壤的生产力, 还降低了施肥效益^[4-5]。玉米是重要的粮食作物, 种植面积和总产量仅次于小麦、水稻。在淮北平原, 玉米的生长期降雨十分集中, 涝害时有发生, 对玉米生产造成严重危害^[1]。在涝渍条件下, 根系有氧呼吸受抑, 三磷酸腺苷 (ATP) 生成数量下降, 导致氮、磷、钾、钙和镁等离子的主动吸收及向地上部的运输受到阻碍^[6]。同时, 在缺氧条件下, 土壤中的硝化作用减缓而反硝化作用增强, 故而土壤的无机氮水平及其中的铵态氮、硝态氮所占的比例均发生明显变化^[7]。已有研究证实, 供氮形态是影响植物耐低氧胁迫的主要因素之一。然而, 对于提高作物耐淹性状的氮肥形态目前仍存在较大争议。不少研究认为, 硝态氮可以代替氧气作为电子受体, 通过降低氧气的消耗缓解缺氧对植物的危害, 并可为植物提供还原力和 ATP, 减轻叶片萎蔫和黄化等受害症状^[8]。而赵锋等^[9]的研究结果表明, 与单一供应铵态氮相比, 铵态氮、

收稿日期: 2014-11-21; 最后修订日期: 2015-03-31

基金项目: 国家公益性行业项目 (201203013); 国家自然科学基金项目 (31101598); 安徽省自然科学基金项目 (090411002); 安徽科技学院第十批大学生创新课题 (13XSZ64)。

作者简介: 江杰 (1991-), 男, 安徽省六安市人, 主要从事逆境植物营养生理与调控研究。E-mail: 1540940316@qq.com。

通讯作者: 周毅, E-mail: zhouyi_nwau@sohu.com。

硝态氮混合供应可明显提高水稻的生物量和氮素累积。也有研究表明, 相对于硝态氮, 铵态氮营养可提高三叶草耐低氧胁迫的能力^[10]。在非淹水胁迫条件下, 供应铵态氮植株的氮和磷含量相对较高, 且淹水胁迫对氮、磷和钾在其植株不同部位的分配的影响相对较低, 故使其具有相对较强的耐淹水胁迫能力^[11]。本文通过比较 0 ~ 14 d 持续淹水胁迫条件下, 氮、磷和钾肥以及不同形态的氮肥对砂姜黑土区富钾低肥土壤上种植玉米苗期植株的氮、磷和钾含量及累积量的影响, 旨在为采用氮营养调控途径优化涝渍胁迫条件下玉米的氮、磷和钾的营养特性, 提高玉米的抗淹水性, 为建立和完善淮北平原砂姜黑土富钾低肥土壤的耐涝减灾栽培技术体系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验方法

试验设计采用 2 因素完全组合设计, 2 因素分别为: ①水分条件: 淹水和不淹水 2 个水平。②氮肥种类: 尿素、氯化铵、硫酸铵、碳酸氢铵、硝酸钙、硝酸铵、硝酸钾。③不施氮、磷和钾肥, 计 10 个水平。共计 20 个处理。每个处理重复 9 次。所用肥料均采用分析纯试剂。

供试玉米品种为郑单 958。供试土壤为砂姜黑土, 基础土样理化性状见表 1。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中; 塑料杯底部钻若干小孔, 每 3 个塑料杯放置在 1 个 3 L 的塑料桶中; 通过调节塑料桶中水层的高度, 控制塑料杯中的液面高度, 以模拟正常水分条件和淹水胁迫条件 (图 1)。正常水分条件在田间管理阶段的土壤含水量保持在田间持水量的 80%。淹水胁迫条件则将水位淹至土面。肥料用量按照 $N:P_2O_5:K_2O=0.15:0.10:0.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤施用, 其中磷肥选用磷酸二氢钾 (不施钾肥处理以磷酸二氢钠代替); 不足的钾素以硫酸钾补齐, 不施磷肥处理全部施用硫酸钾。所有肥料均以分析纯试剂代替。每个塑料杯中播种 5 粒种子。将玉米培养至 3 叶 1 心期定植至 3 棵, 并开始进行淹水处理,

在连续淹水培养的第 0、7 和 14 d 随机剪取其中 1 棵玉米的地上部进行相关指标的测定。

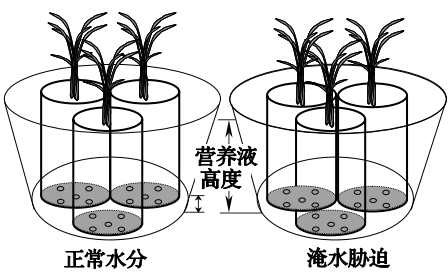


图 1 淹水胁迫培养装置示意图

1.2 测定项目与方法

1.2.1 植株地上部生物量

采用称重法测定植株地上部鲜重。于 105 ~ 110℃ 杀青 30 min, 再于 70 ~ 80℃ 烘至恒重并称重。

1.2.2 植株根、茎和叶的氮、磷和钾含量以及氮、磷和钾累积量

粉碎后的植株样品采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消煮, 待测液中的含氮量采用流动分析仪 (AA3) 测定; 含磷量采用磷钼蓝比色法测定; 含钾量采用火焰光度计法测定。氮 (磷、钾) 累积量 = 生物量 × 全氮 (磷、钾) 含量。

1.3 数据处理

试验数据应用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥种类对淹水胁迫苗期玉米生物量的影响

如表 2 所示, 在玉米 3 叶 1 心期 (淹水胁迫处理前), 施硝酸钾处理的地上部的生物量明显高于除施硝酸铵处理以外的其它处理 ($P<0.05$)。在 3 个缺素处理中, 不施钾处理的地上部的生物量明显低于不施磷处理 ($P<0.05$), 但与不施氮处理差异不显著。说明氮、磷和钾养分对该阶段玉米的生长已产生影响。

比较 F 值大小可知, 在淹水胁迫处理 7 d 时, 玉米地上部的生物量受氮肥种类影响显著 ($P<0.05$), 氮肥种类是其变化的主要诱因。当胁迫处理延长至 14 d 时, 淹水胁迫也对地上部的生物量影响显著 ($P<0.05$), 并上升为其主要决定因子。说明在本试验的淹水胁迫条件下, 苗期玉米地上部生物量受抑制的效应在胁迫后第 7 ~ 14 d 才明显表现。但氮肥种类和淹水胁迫的交互作用影响始终不

表 1 供试土壤的基本理化性状

有机质 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 ($\text{P}, \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{K}, \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解氮 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH 值
5.47	2.64	241	24.0	7.57

显著。与非淹水胁迫条件下相比,在淹水胁迫 14 d 时,除施尿素处理外,各处理的地上部生物量均不同程度地下降,但其中只有施氯化铵处理的降低达差异显著水平 ($P < 0.05$)。

表 2 氮肥种类对淹水胁迫苗期玉米地上部生物量的影响 (g)

肥料种类	淹水胁迫前	淹水胁迫 7 d		淹水胁迫 14 d	
		正常水分	淹水胁迫	正常水分	淹水胁迫
尿素	0.52 ± 0.02bc	1.00 ± 0.24ab	0.91 ± 0.19abc	2.04 ± 0.34ab ^a	2.20 ± 0.15a ^a
氯化铵	0.56 ± 0.07b	1.02 ± 0.06ab	0.79 ± 0.12bcd	2.60 ± 0.00a ^a	2.21 ± 0.12a ^b
硫酸铵	0.51 ± 0.01bc	0.92 ± 0.49ab	1.00 ± 0.06abc	2.30 ± 0.31ab ^a	1.77 ± 0.24ab ^a
碳酸氢铵	0.52 ± 0.03bc	1.21 ± 0.06a	1.11 ± 0.05ab	2.14 ± 0.27ab ^a	2.07 ± 0.00a ^a
硝酸铵	0.59 ± 0.06ab	0.81 ± 0.00ab	0.86 ± 0.12abc	2.04 ± 0.44ab ^a	2.02 ± 0.56a ^a
硝酸钙	0.54 ± 0.05b	0.99 ± 0.17ab	0.82 ± 0.25bcd	2.12 ± 0.12ab ^a	1.75 ± 0.38ab ^a
硝酸钾	0.69 ± 0.18a	1.11 ± 0.09a	0.97 ± 0.16abc	2.51 ± 0.40ab ^a	2.06 ± 0.47a ^a
不施氮	0.47 ± 0.02bc	0.61 ± 0.10b	0.53 ± 0.02d	1.24 ± 0.14c ^a	1.16 ± 0.18b ^a
不施磷	0.54 ± 0.07b	0.96 ± 0.06ab	0.74 ± 0.23cd	1.89 ± 0.30bc ^a	1.83 ± 0.04a ^a
不施钾	0.41 ± 0.12c	1.23 ± 0.05a	1.15 ± 0.02a	2.19 ± 0.32ab ^a	1.70 ± 0.15ab ^a
双因素方差分析					
氮肥种类		4.42 **		4.91 **	
淹水胁迫		3.48		6.27 *	
氮肥种类 × 淹水胁迫		0.35		0.68	

注:表中数据为平均值 ± 标准差;其后不同小写字母表示不同氮肥种类处理下的效应达 5% 显著差异 ($P < 0.05$);上标不同小写字母表示同种肥料在两种水分条件下的效应达 5% 显著差异。“*”和“**”分别表示双因素方差分析达 5% 和 1% 显著差异,下同。

2.2 不同形态氮肥对淹水胁迫苗期玉米氮含量的影响

如表 3 所示,氮肥种类和淹水胁迫对玉米地上部氮累积量的影响均显著 ($P < 0.05$),且延长淹水胁迫持续时间,存在肥效差异与胁迫的抑制效应分别加大和增强的趋势,但二者的交互作用影响也不显著。在淹水胁迫处理 7 d 时,比较 F 值大小可知,氮肥种类是玉米地上部氮累积量变化的主要诱因;而当胁迫处理延长至 14 d 时,淹水胁迫则上升为其主要决定因子。

表 3 氮肥种类对淹水胁迫苗期玉米地上部氮累积量的影响 (mg)

肥料种类	淹水胁迫 7 d		淹水胁迫 14 d	
	正常水分	淹水胁迫	正常水分	淹水胁迫
尿素	29.45 ± 3.61abc ^a	26.17 ± 5.44abc ^a	55.36 ± 12.95abc ^a	47.24 ± 1.84a ^a
氯化铵	30.75 ± 1.26abc ^a	22.25 ± 3.77bc ^a	62.22 ± 2.12abc ^a	49.10 ± 2.75a ^b
硫酸铵	24.84 ± 11.24bc ^a	27.49 ± 1.85abc ^a	50.49 ± 2.59abc ^a	38.35 ± 8.44a ^a
碳酸氢铵	36.95 ± 7.00a ^a	27.12 ± 2.26abc ^a	48.09 ± 5.37bc ^a	45.75 ± 3.32a ^a
硝酸铵	23.46 ± 1.78c ^a	21.79 ± 3.92c ^a	54.90 ± 41.6abc ^a	47.55 ± 13.01a ^a
硝酸钙	25.71 ± 1.28abc ^a	22.54 ± 5.96bc ^a	47.17 ± 12.6c ^a	40.57 ± 6.08a ^a
硝酸钾	35.99 ± 5.43ab ^a	30.56 ± 2.26ab ^a	64.29 ± 8.00ab ^a	44.96 ± 7.07a ^a
不施氮	8.09 ± 1.02d ^a	8.57 ± 0.83d ^a	19.27 ± 1.28d ^a	16.87 ± 1.12b ^a
不施磷	28.77 ± 2.17abc ^a	22.42 ± 6.33bc ^a	52.47 ± 8.89abc ^a	46.26 ± 3.88a ^a
不施钾	35.41 ± 7.00ab ^a	31.97 ± 0.44a ^a	66.86 ± 13.21a ^a	50.13 ± 7.41a ^a
双因素方差分析				
氮肥种类		9.95 **		10.66 **
淹水胁迫		6.92 *		18.42 **
氮肥种类 × 淹水胁迫		0.69		0.68

在两种水分条件下,玉米的地上部氮累积量以不施氮最低,且与不施磷和不施钾均达差异显著水平 ($P<0.05$)。在淹水胁迫条件下,以不施钾的地上部氮累积量最高。与非淹水胁迫条件下相比,在淹水胁迫 7 d 时,采用独立样本的 t 检验分析两种水分条件下地上部氮累积量的差异,结果表明,10 种肥料效应的差异均未达 5% 显著水平。当淹水胁迫 14 d 时,所有施肥处理的地上部氮累积量均有不同程度的下降,但仍然只有施氯化铵处理降低达差异显著水平 ($P<0.05$)。

2.3 不同形态氮肥对淹水胁迫苗期玉米磷含量的影响

如表 4 所示,比较 F 值大小可知,在淹水胁迫处理 7 d 时,只有氮肥种类对玉米地上部的磷累积量影响极显著 ($P<0.01$)。胁迫处理延长至 14 d 时,氮肥种类和淹水胁迫对玉米地上部的磷累积量影响均显著 ($P<0.05$)。但氮肥种类始终是地上部磷累积量变化的主要诱因,且其与淹水胁迫的交互作用影响始终不显著。

表 4 氮肥种类对淹水胁迫苗期玉米磷累积量的影响 (mg)

肥料种类	淹水胁迫 7 d		淹水胁迫 14 d	
	正常水分	淹水胁迫	正常水分	淹水胁迫
尿素	3.97 ± 0.55bc	3.74 ± 0.90bc	5.53 ± 1.17bc ^a	5.16 ± 0.05b ^a
氯化铵	4.04 ± 0.09bc	3.42 ± 0.80bcd	6.38 ± 0.09b ^a	5.31 ± 0.16b ^b
硫酸铵	3.40 ± 1.30bc	3.94 ± 0.10bc	6.65 ± 0.53b ^a	4.62 ± 0.374b ^b
碳酸氢铵	5.52 ± 0.71b	4.59 ± 0.23b	6.73 ± 0.25b ^a	5.48 ± 0.23b ^b
硝酸铵	3.25 ± 0.34bc	3.66 ± 0.24bcd	5.62 ± 0.39bc ^a	4.89 ± 3.08b ^a
硝酸钙	3.96 ± 0.21bc	3.48 ± 0.88bcd	4.75 ± 0.68bc ^a	4.71 ± 0.95b ^a
硝酸钾	3.85 ± 0.81bc	3.85 ± 0.09bc	5.55 ± 1.10bc ^a	4.31 ± 0.92bc ^a
不施氮	2.99 ± 0.34b	2.71 ± 0.46cd	4.25 ± 0.07bc ^a	3.75 ± 0.38bc ^a
不施磷	2.25 ± 0.20c	2.24 ± 0.27d	2.41 ± 0.25c ^a	2.08 ± 0.389c ^a
不施钾	12.70 ± 3.55a	11.48 ± 1.49a	16.99 ± 4.17a ^a	13.49 ± 1.21a ^a
双因素方差分析				
氮肥种类	29.48 **		27.89 **	
淹水胁迫	0.76		7.13 *	
氮肥种类 × 淹水胁迫	0.30		0.61	

在两种水分条件下,不施磷的地上部的磷累积量最低,而不施钾的最高。尚不清楚在缺钾条件下,地上部磷累积量大幅度增长的原因。与非淹水胁迫条件下相比,在淹水胁迫 14 d 时,所有施肥处理的地上部磷累积量均呈现降低趋势,且其中施氯化铵、硫酸铵和碳酸氢铵处理降低均达差异显著水平 ($P<0.05$)。

2.4 不同形态氮肥对淹水胁迫苗期玉米钾含量的影响

如表 5 所示,氮肥种类和淹水胁迫对玉米地上部钾累积量的影响均极显著 ($P<0.01$),且延长淹水胁迫持续时间,也存在肥效差异与胁迫的抑制效应分别加大和增强的趋势,但二者的交互作用影响同样也不显著。由 F 值大小可以看出,在淹水胁迫条件下,淹水胁迫始终是玉米地上部钾累积量变化

的主要决定因子。

在两种水分条件下,施硝酸钾处理的地上部的钾累积量始终最高。在正常水分条件下,不施氮的地上部的钾累积量始终最低。在淹水胁迫处理 7 d 时,其地上部的钾累积量也最低,但当胁迫处理延长至 14 d 时,不施钾的地上部的钾累积量则降至最低,且与正常水分条件下的不施钾达差异显著水平 ($P<0.05$)。

3 结论与讨论

砂姜黑土是黄淮海地区典型的低产土壤^[1,11]。研究表明,砂姜黑土的通气孔隙度相对较低,当土壤含水量接近田间持水量时,就会影响土壤中的气体交换,使农作物根部呼吸受阻,出现涝渍害^[1]。对不同肥力土壤的分析表明,砂姜黑土区土壤普遍极缺氮,超过三分之一的土壤有效磷含量低于临界

表 5 氮肥种类对淹水胁迫苗期玉米钾累积量的影响

(mg)

肥料种类	淹水胁迫 7 d		淹水胁迫 14 d	
	正常水分	淹水胁迫	正常水分	淹水胁迫
尿素	29.04 ± 6.08cd ^a	24.15 ± 7.24bc ^a	54.93 ± 7.56bcde ^a	45.03 ± 0.49bc ^a
氯化铵	36.31 ± 2.20abc ^a	23.33 ± 2.47bc ^b	69.92 ± 10.04bc ^a	53.91 ± 5.69ab ^a
硫酸铵	31.51 ± 15.37bcd ^a	31.90 ± 0.88ab ^a	72.87 ± 9.09b ^a	45.11 ± 6.53bc ^a
碳酸氢铵	44.38 ± 3.08ab ^a	35.61 ± 1.58a ^a	64.00 ± 6.85bcd ^a	56.97 ± 3.96ab ^a
硝酸铵	26.52 ± 0.05cd ^a	24.89 ± 4.95bc ^a	60.10 ± 10.24bcde ^a	52.92 ± 15.03ab ^a
硝酸钙	30.28 ± 0.24cd ^a	21.33 ± 6.12c ^a	56.78 ± 2.24bcde ^a	40.38 ± 7.34bc ^a
硝酸钾	47.65 ± 7.16a ^a	36.72 ± 3.69a ^a	93.63 ± 14.09a ^a	63.79 ± 17.13a ^a
不施氮	22.79 ± 2.42d ^a	17.75 ± 1.44c ^a	41.04 ± 4.04e ^a	34.32 ± 4.60c ^a
不施磷	32.42 ± 0.65bcd ^a	21.17 ± 5.35c ^a	53.02 ± 12.9de ^a	42.91 ± 0.81bc ^a
不施钾	31.28 ± 1.76bcd ^a	23.47 ± 0.89bc ^b	47.22 ± 3.63cde ^a	30.62 ± 2.24c ^b
双因素方差分析				
氮肥种类	7.04 **		7.93 **	
淹水胁迫	19.98 **		29.37 **	
氮肥种类 × 淹水胁迫	0.72		0.95	

值^[4-5]；且由于砂姜黑土的矿物组成以蒙脱石为主，耕层粉砂含量高，有机质含量也相对较低^[1]。但是，砂姜黑土的粘土矿物中水云母较多，土壤含钾较为丰富，一般全钾含量在 1.7% 左右^[12]。在本试验中，供试土壤的有机质、有效磷和碱解氮含量均相对较低，而速效钾含量则属于“高”指标范围（>130 mg · kg⁻¹）^[5]，符合砂姜黑土的“缺氮、少磷而富钾”的肥力特点^[12]。这可能是本试验中，在两种水分条件下，不施钾处理的地上部生物量与其他施钾处理差异不显著的主要原因。张义丰等^[1]的研究表明，在砂姜黑土区，单施氮、磷肥以及氮磷配施对玉米均有显著的增产效应，但钾的肥效不显著，与本试验结果基本一致。孙克刚等^[5]建议，在钾素含量高的砂姜黑土中，应适当减少钾肥用量，避免因土壤养分间的拮抗作用，降低土壤其他营养成分的作用。但也有较早的研究表明，当土壤速效钾水平下降且种植对钾需要量较大的玉米等作物时，施钾对玉米有一定的增产效果，特别是在连续单施化肥而不施有机肥、产量相对较高的砂姜黑土上，钾肥的增产效果更为突出^[13]。因此，钾肥的肥效除了与土壤钾含量有关外，还与土壤中其他养分的状况密切相关。如前所述，供试土壤的有机质、有效磷和碱解氮含量均相对较低，说明在本试验中，钾不是限制苗期玉米生长的主要和直接因素。这已由后两个采样时期，不施氮处理的生物量

和氮累积量始终最低得到证实。即施肥处理的氮效应最明显，这与张效朴等^[13]关于氮磷配施和单施氮的效应均明显高于单施磷的试验结果相吻合，说明氮是砂姜黑土区富钾低肥土壤上苗期玉米生长的主要限制因子。目前尚不清楚，在淹水胁迫处理前，不施钾处理的生物量最低的原因。推测可能与该阶段玉米对外源不同养分的响应及对种子中贮存的钾素的耗竭特性存在差异有关^[14]，但也可能与不施钾处理的磷累积的大幅度升高（表 4），影响了植株体内的氮、磷和钾平衡有关，有待进一步的研究证实。

淹水胁迫对玉米的影响随胁迫持续时间和生育期各异。刘祖贵等^[15]的研究表明，在土培条件下，苗期和拔节期进行淹水胁迫（水层深度维持在地面以上 5~8 cm）对玉米生长和产量形成的影响最大，在苗期，淹水历时达到 2 d 时就会造成玉米植株株高和叶面积指数的明显下降，进而引起显著减产。在本试验中，淹水胁迫处理的水位只淹至土面，胁迫强度相对较弱，因此，当淹水胁迫持续至 14 d 时，玉米地上部生物量的降低才达到差异显著水平（ $P < 0.05$ ）。事实上，当淹水胁迫持续至 7 d 时，氮和钾累积的降低已先于生物量达差异显著水平，且随时间延长，淹水胁迫对氮、钾累积和生物量增长的抑制均存在效应增强的趋势。在淹水条件下，土壤的养分供给状态发生显著改变。矿质态氮以铵

态氮为主^[7]。于飞等^[16-17]认为,不同形态氮肥显著影响磷肥在土壤中的迁移转化和有效性。但是,对淹水条件下,土壤有效磷的变化趋势目前仍存在争议,这可能与淹水土壤的理化性质不同有关。于飞等^[16]的研究表明,在淹水条件下,水溶性磷肥施入黄泥土 1 d 后,即有 50% 左右的磷发生了固定;且随着淹水时间的延长,土壤有效磷含量迅速降低。培养 1 d 时,与不施氮肥相比,不同氮肥对土壤有效磷的变化趋势均无显著影响,但显著加快了土壤水溶性磷含量的降低趋势。硝酸铵、硝酸钙和尿素处理则减缓了之后的土壤有效磷和水溶性磷含量的降低趋势。在正常水分条件下,与不施氮肥相比,除了硝酸铵外,不同氮肥均加快了土壤有效磷含量的降低趋势,且其降低幅度大于淹水条件下的相同氮肥处理^[17]。这可能也是本试验条件下,淹水胁迫对玉米磷累积量的影响相对低于其氮和钾累积量的原因。

与正常水分条件下相比,淹水胁迫条件下硫酸铵处理地上部生物量、氮、磷和钾累积量在胁迫处理 7 d 时未受明显影响,但在第 14 d,降低幅度均大于其他处理,可能与淹水条件下 SO_4^{2-} 快速还原生成 S^{2-} 或 H_2S ,并在土壤中积累,对玉米的根系造成伤害有关。与之相比,氯化铵在淹水胁迫处理 7 d 后地上部生物量、氮、磷和钾累积量就开始低于其正常水分条件下的相同氮肥处理,也可能是氯过量引起的毒性效应。目前,关于氯对玉米的毒害临界浓度的相关研究尚少见报道,但同为禾本科的小麦的中毒剂量为 $\text{Cl}^- 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[17]。在本试验的氯化铵处理的土壤中,按每千克土施 N 0.15 g 计算,随之施入的 Cl^- 的浓度为 $380 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 风干土,因此,可能使土壤中的 Cl^- 的浓度达到中毒阈值。同时,整个试验过程虽然不存在淋失的可能,但在淹水胁迫条件下,高浓度的 Cl^- 可能随水流分布于整个土体中,而在正常水分条件下,则可能主要分布于下部土体中,故而接触根系或通过根系吸收的机率和危害也相对较低。在淹水胁迫条件下,尿素处理的氮、磷和钾的累积量处于中等水平,受淹水胁迫的影响均相对较低,且其生物量未受明显影响;而碳酸氢铵和硝酸铵处理的生物量的降低幅度虽然也相对较低,但碳酸氢铵处理在淹水胁迫第 7 d 时氮、磷和钾累积量,硝酸铵和碳酸氢铵处理在淹水胁迫第 14 d 的磷和钾累积量的降低幅度均相对较高,故而尿素可能是有利于提高苗期玉米耐淹

水胁迫性的氮肥种类。

参考文献:

- [1] 张义丰,王又丰,刘录祥,等. 淮北平原砂姜黑土旱涝(渍)害与水土关系及作用机理[J]. 地理科学进展, 2001, 20 (2): 169-176.
- [2] 景卫华,罗纨,贾忠华,等. 砂姜黑土区多目标农田排水系统优化布置研究[J]. 水利学报, 2012, 43 (7): 842-851.
- [3] 李德成,张甘霖,龚子同. 我国砂姜黑土土种的系统分类归属研究[J]. 土壤, 2011, 43 (4): 623-629.
- [4] 孙克刚,李丙奇,和爱玲,等. 砂姜黑土区麦田土壤有效磷丰缺指标及推荐施磷量研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28 (2): 159-161, 181.
- [5] 孙克刚,李丙奇,和爱玲,等. 砂姜黑土区麦田土壤有效钾施肥指标及小麦施钾研究[J]. 华北农学报, 2010, 25 (2): 212-215.
- [6] Milroy S P, Bange M P, Thonghai P. Cotton leaf nutrient concentrations in response to waterlogging under field conditions[J]. Field Crops Research, 2009, 113 (3, 4): 246-255.
- [7] 李奕林,张亚丽,胡江,等. 淹水条件下水稻与梗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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 郑学博,张祥志,崔键,等. 秸秆全量还田条件下配施化肥对沿淮砂姜黑土培肥及玉米产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44 (6): 972-976.
- [12] 张祥明,郭熙盛,李录久,等. 砂姜黑土上氮钾配施对粮菜轮作中产量与品质的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35 (5): 574-578.
- [13] 张效朴,詹其厚. 淮北砂姜黑土区玉米高产施肥的理论与实践[J]. 土壤, 1998, 5: 198-204.
- [14] 周毅,孙美玲,程娟娟,等. 籽粒大小、养分含量对苗期玉米的养分敏感性及其生长的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29 (1): 108-116.
- [15] 刘祖贵,刘战东,肖俊夫,等. 苗期与拔节期淹涝抑制夏玉米生长发育、降低产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (5): 44-52.
- [16] 于飞,周健民,王火焰,等. 淹水条件下不同氮肥对水稻土中磷肥转化的动态影响[J]. 中国土壤与肥料, 2006, (6): 29-32.
- [17] 于飞,周健民,王火焰,等. 不同氮肥对油菜生长和养分吸收的影响[J]. 土壤肥料, 2005, (1): 20-22, 41.

Effect of nitrogen forms fertilizers on nutrient characters of maize (*Zea mays* L.) seedlings under water-logging stress condition in lime concretion black soil

JIANG Jie^{1,3}, HAN Yi-tao¹, MIAO Qi¹, LIU Chang¹, CHENG Xin-xin², ZHOU Yi^{1,2*}, DUAN Li-zhen¹, LIU Zheng²
(1. College of Urban Construction and Environment, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100; 2. Engineering Technology Research Center of Anhui Maize Breeding, Fengyang Anhui 233100; 3. College of Resources of Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing Jiangsu 210095)

Abstract: Effects of different nitrogen forms fertilizer, and with or without phosphorus and potassium supply on nutrient characters of maize (*Zea mays* L.) at seedling stage under 0 ~ 14 days of water-logging stress condition were carried out in lime concretion black soil by incubation experiment. The result showed that, shoot biomass of maize plants with 3rd leaves under KNO_3 treatment were significantly higher than that of under the other fertilizer treatments, except of NH_4NO_3 treatment ($P < 0.05$) before water-logging stress. Shoot biomass of maize plants was affected by nitrogen, phosphorus and potassium supply, since shoot biomass of maize plants without potassium supply was significantly lower than that of maize plants without phosphorus supply ($P < 0.05$), while there were no significant difference existed between non-potassium supply treatment and non-nitrogen supply treatment. No interaction between fertilizers and water-logging stress on growth and nutrition accumulation of maize plants was observed. Fertilization significantly affected shoot biomass, and nitrogen accumulation ($P < 0.05$), phosphorus and potassium accumulation ($P < 0.01$) on the 7th day of water-logging stress incubation. At the same time, water-logging stress greatly reduced shoot nitrogen accumulation ($P < 0.05$), potassium accumulation ($P < 0.01$), and shoot biomass and phosphorus accumulation ($P < 0.05$) on the 14th day of stress incubation. The effects of fertilization on shoot biomass, nitrogen and potassium accumulation were enhanced with the stress incubation time. Fertilizer was the main factor affecting shoot biomass, nitrogen and phosphorus accumulation on the 7th day of stress incubation, which was replaced by water-logging stress on the 14th day of stress incubation. However, the stress was always the main factor leading to the change in potassium accumulation. Urea supply rather than the other nitrogen forms fertilizers was helpful to alleviate the reduction in shoot biomass and nitrogen, phosphorus and potassium accumulation.

Key words: maize; fertilizers with different nitrogen forms; water-logging stress; lime concretion black soil