

淹水条件下玉米耐淹阈值研究

陈敏, 徐珊, 蒋丽娜, 常江*, 郅红建, 章力干
(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要:以沿淮低洼地砂姜黑土为研究对象, 研究玉米对淹水胁迫的反应及水淹程度的定量表达和耐淹阈值。试验在砂姜黑土原装土柱中进行, 共设置6个处理, 每个处理埋设相应的根袋, 分别在六叶期和大喇叭口期进行淹水。淹水期间每天取2个根袋测定玉米植株养分含量和生物量; 淹水结束后再统一取样进行相应的测定。结果显示, 淹水对玉米生长影响很大, 2个时期的生物量均随淹水时间的延长大幅度下降, 营养元素(N、P、K)的吸收受到严重抑制, 六叶期比大喇叭口期更敏感。六叶期处理间生物量与淹水时间呈极显著的(0.996*)抛物线关系。根据方程计算, 减至对照50%生物量的淹水阈值约为3d, 这一结果和生物量与氮素含量或累积量的相关分析结果完全一致。淹水严重影响玉米生长、降低生物量、抑制养分的吸收。不同时期淹水只是影响程度不同。六叶期淹水其耐淹阈值约为3d。

关键词: 淹水; 砂姜黑土; 玉米; 耐淹阈值

中图分类号: S513; S152.75

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2013)04-0585-07

Submergence tolerance threshold of maize under flooded conditions

CHEN Min, XU Shan, JIANG Li-na, CHANG Jiang, GAO Hong-jiang, ZHANG Li-gan
(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: We studied the maize response to flooding stress, and quantitatively determined the expression and submergence tolerance threshold of the maize under flooded conditions in the low-lying areas along Huai River. Test was conducted in the lime concretion black soil of the Original soil column, 6 treatments were treated with burying the corresponding root bag, and flooding in six leaf stage and Huge bellbottom period, respectively. Nutrient content and biomass of two root bags of maize stalk were measured each day during the flood, and overall measurement was performed by uniform sampling after the flood. Significant impact of water-logging on maize growth was found. For the two studied periods, biomass dropped substantially with the extension of submergence time, and absorption of the nutrition elements (*N*, *P*, *K*) was severely inhibited. They were more sensitive in Six leaf stage than in Huge bellbottom period. At Six leaf stage, a parabola relationship ($R^2 = 0.986$) could be fitted between biomass and the flooded time. According to the equation, the time for biomass reduction to half of CK, i.e. submergence tolerance threshold, is three days. The result is consistent with the analysis between biomass and nitrogen content or its cumulant. In conclusion, water-logging would influence the growth of maize seriously, with lower biomass and restraint of nutrients absorption. Varied degrees of influence was observed for different periods of submergence. The submergence tolerance threshold for Six leaf stage is approximately three days.

Key words: flooding; lime concretion black soil; maize; submergence tolerance threshold

涝渍胁迫是我国玉米的主要逆境因子之一, 对植株形态和代谢产生严重影响, 导致植物生长受到限制, 常常造成大幅度减产^[1-5]。通过研究玉米植株对淹水的相关反应, 探寻某种量化指标作为玉米的

耐淹阈值, 以结合生物量或产量的研究建立量化的相关关系, 从而为玉米抗逆栽培提供理论依据, 增强沿淮低洼地中低产田区御灾能力, 提高沿淮低洼地中低产田作物的持续丰产高效能力, 对实现农

收稿日期: 2013-04-17

基金项目: 国家科技支撑项目计划(2009BADA6B04)资助。

作者简介: 陈敏, 女, 硕士研究生。

* 通信作者: 常江, 男, 教授。E-mail: thbg@ahau.edu.cn

业的可持续发展意义重大。淹水是一类特殊的环境影响因子,国外从20世纪60年代起就对洪水泛滥以及实验性淹水对植被的影响从各个方面展开了研究^[6]。国内相关方面研究也有很多,淹水胁迫会降低植物光合速率^[7]。连洪燕^[8]等研究表明淹水在多方面影响作物正常生理活动,甚至影响整个光合作用系统;朱桂才^[9]等对植物通气组织与植株耐淹性进行研究,淹水影响了植物的呼吸作用,呼吸代谢受抑制,呼吸强度下降^[10];郑圣先等^[11]研究发现淹水导致土壤氮素损失严重。夏玉米具有发育进程快、生长期短及对水分状况反应敏感等特点^[12]。玉米苗期不同程度的淹水,均会导致产量下降,但其下降幅度与受淹时期以及受淹程度、时间长短有关^[13-15]。由于我国幅员辽阔,各地水文、土壤及气象条件变异大,相关试验站点少,试验数据代表性差,不同条件下作物水分生产函数的关系不同^[16],所以应针对地区特点开展试验,研究淹水胁迫条件下作物受水分影响及减产规律,并计算相关函数^[17]。淮北地区耕地面积 $2.10 \times 10^6 \text{ hm}^2$,是安徽省主要的农业生产区,针对沿淮低洼地中低产田水利设施不完善,易遭雨涝渍害,降水时空分布不均,土壤调蓄水分能力弱,土壤水物理性质不良等问题^[18-20],土壤淹水导致的作物水分胁迫是沿淮地区最常见的农业灾害,定量评估作物涝渍状况从而采取相应的管理措施在生产实践中十分重要。作物对于土壤水分胁迫有复杂的调控反馈机制^[21-23],所以在特定的作物和栽培条件下,土壤淹水应当存在一个临界状况,在此临界状况之前作物对淹水产生适应性的变化,生理过程没有受到明显影响,恢复正常后没有较大影响;而当淹水程度超过这一临界状态,作物受到永久性的损害,即使恢复正常后生理指标也不能正常恢复,产量显著降低,这一临界状况称为植物的耐

淹阈值^[24-25]。目前,研究水分胁迫对植物的影响,很少考虑到通过阈值描述植株的耐淹情况,本研究以对照的50%生物量作为不同时期玉米耐淹阈值的定量指标^[26],定量描述玉米耐淹时间和耐淹状况。应用原状土柱和根袋试验,在持续淹水的条件下,研究玉米养分吸收与累积,揭示养分吸收和积累与淹水时间、生物量之间的变化规律,建立玉米淹水随时间的定量阈值。

1 材料与方法

1.1 试验地

试验于2010年在安徽省淮委新马桥五道沟水文水资源试验站(东经 $117^{\circ}21'$,北纬 $33^{\circ}09'$)进行。五道沟水文水资源实验站是平原区大型综合实验站,位于安徽省淮北平原中部,属暖温带半湿润季风气候。该试验站的土壤、水文、仪器设备以及气象资料等在沿淮地区均具有较好的代表性,站内有大型地中蒸渗观测室:观测室为圆型钢筋混凝土结构,高6.5 m,地面下净深5.5 m、内径11.0 m,建成于1989年。配有砂姜黑土、黄泛区砂壤土2种土壤的原状土柱,有5种不同器口面积(即0.3、0.5、1.0、2.0和 4.0 m^2),15种地下水位控制埋深(即0 cm、10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm、60 cm、80 cm、1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m、4.0 m和5.0 m),可自行控制土柱内水位升降,各类地中蒸渗仪60套(其中含1套人工回填土),可进行多项试验研究。

1.2 供试植物

玉米品种为弘大8号,6月上中旬播种,9月中下旬收获。试验期间采集的植株样,经蒸馏水洗净, 110°C 杀青, 75°C 烘干,粉碎后用作分析样。

表1 试验设计
Table 1 Experiment design

淹水时期 Flooding period	处理 Treatment					
六叶期 Six leaf period	CK	T1	T2	T3	T4	T5
大喇叭口期 Huge bellbottom period	CK	T1	T2	T3	T4	T5

注:CK、T1、T2、T3、T4、T5 分别表示连续淹水0 d、1 d、3 d、5 d、7 d和9 d。

Note: CK, T1, T2, T3, T4 and T5 denote water logging for 0 d, 1 d, 3 d, 5 d, 7 d and 9 d, respectively.

1.3 供试土样与试验方法

应用原状土柱和根袋法进行研究。供试土壤为发育于古黄河性河湖相与河流相沉积物上的砂姜黑土。砂姜黑土具有土壤僵硬、胀缩性强、营养元素缺乏等特性,且易被水淹,符合本试验要求。选取

11个大小相同的侧桶,侧桶土壤基本理化性质为pH(H_2O)7.77,速效钾 $93.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $15.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质 $9.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $94.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。将根袋埋于侧桶中,所有处理重复2次,每个重复埋2个根袋。淹水期间内每天取

淹水小区与空白小区根袋样品, 以测定生物量及各项指标。淹水一个时期结束后, 从各处理包括对照小区各取 6 株玉米计算平均生物量, 此为各处理间生物量。侧桶中玉米施肥按大田生产进行配方施肥。具体实验处理见表 1。

1.4 测定方法

土样有机质用重铬酸钾外加热法, 全氮用浓硫酸消煮半微量凯氏法, 速效磷采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaH}_2\text{CO}_3$ 浸提分光光度法; 速效钾用 $1.0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NH}_4\text{OAc}$ 浸提火焰光度法。

玉米植株用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮, 磷钼锑抗分光光

度法; 全氮半微量凯氏法; 全钾用火焰光度法^[27]。

1.5 数据分析

试验数据采用 Microsoft excel-2007 和 SPSS (18.0) 软件进行回归与差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 淹水对玉米生物量的影响

淹水对玉米的生长产生明显的影响, 随着淹水时间的延长, 植株生物量下降增加。但不同时期淹水对玉米生物量的影响不同, 六叶期明显大于大喇叭口期 (图 1)。

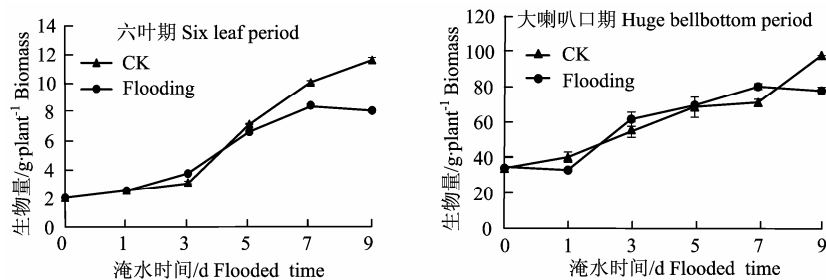


图 1 生物量随淹水天数变化

Figure 1 The change of the biomass with flooded time

表 2 生物量 *t* 检验结果

Table 2 *T*-test results of the biomass

淹水时期 Flooding period	淹水时间/d Flooded time				
	1	3	5	7	9
六叶期 Six leaf period	0.840 2	0.000 3**	0.004 7**	0.000 9**	0.001 9**
大喇叭口期 Huge bellbottom period	0.039 1*	0.073 5	0.803 4	0.033 0*	0.003 7**

注: *, ** 分别表示 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 显著水平。下同。

Note: *and** denote significance at the 0.05 and the 0.01 levels, respectively. The same below.

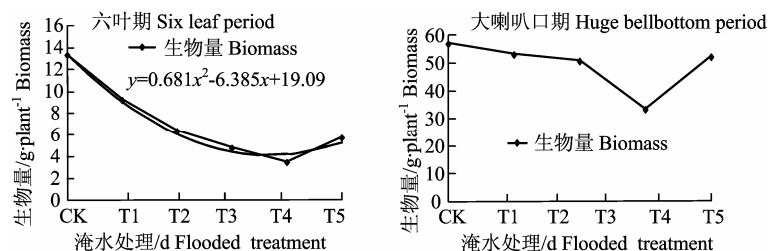


图 2 淹水对生物总量的影响

Figure 2 Influence of flooding on the sum biomass

六叶期对照小区生物量呈生长曲线增长, 在 $0\sim d$ 天生长速度相对较慢, 3 d 以后生长速度明显加快, 曲线斜率远大于淹水小区。淹水至第 5 天后, 玉米生长开始减缓, 甚至停滞。随着生育期进展, 各处理玉米生物量累积逐渐增强^[28], 大喇叭口期对照小区玉米生长几乎呈线性增加, 而淹水小区生物量

增长呈二次曲线, 前期影响较小, 淹至第 7 天生物量才开始下降, 表明玉米大喇叭口期比苗期更耐淹。运用成对数据 *t* 检验发现六叶期生物量第 3 天开始淹水与对照间有显著差异; 大喇叭口期淹至第 9 天才与对照产生极显著差异 (表 2)。

由于淹水对植株内部各项指标都有影响^[13], 导

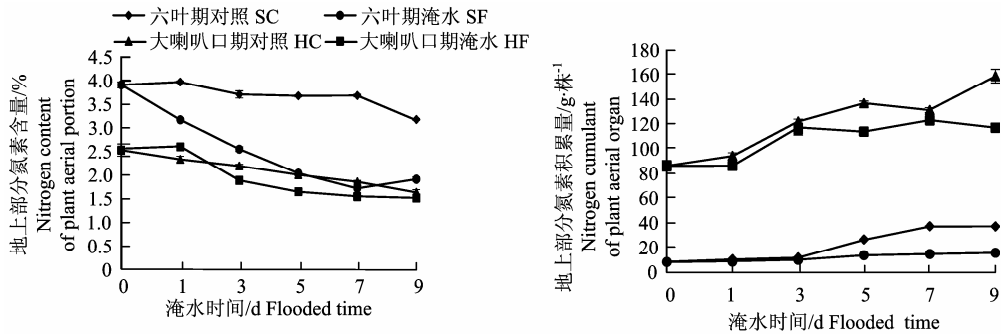
致最终生物总量的下降。实验结果表明，淹水条件下，玉米生长明显受到抑制，在退水后，各处理间生物量差异明显（图2）。

六叶期，处理 T1、T2、T3、T4 和 T5 生物量分别为 CK 的 68.92%、47.28%、35.54%、25.75% 和 42.78%。应用单样本 *t* 检验发现淹水处理与对照间差异显著 ($P=0.001<0.05$)，可见淹水时间越长的处理最终生物量越低。对各处理进行回归分析，符合抛物线方程，相关极显著 (0.986^{**})，说明生物量对于土壤淹水存有明显阈值反应。若把生物量减至 CK 50%作为淹水阈值，根据方程计算为 2.8 d。

大喇叭口期淹水与六叶期不同，T2、T3、T4 和 T5 分别占对照的 93.15%、89.02%、58.40%和 91.83%，单样本 *t* 检验结果淹水处理与对照间差异不显著 ($P=0.134>0.05$)，这也表明玉米生育后期耐淹能力明显增强。

2.2 淹水对养分吸收与积累的影响

2.2.1 淹水对氮素养分吸收与积累的影响 试验结果表明，淹水影响玉米植株地上部氮素养分含量，氮素含量随着淹水时间增加呈快速下降趋势，但不同时期淹水对氮素吸收的影响存在明显差异(图3)。



SC: Six leaf period CK; SF: Six leaf period Flooded; HC: Huge bellbottom period CK; HF: Huge bellbottom period flooded

图 3 淹水对地上部分氮素含量、积累量的影响

Figure 3 Influence of flooding on the aerial part of plant nitrogen content and accumulation

表 3 淹水对地上部分磷素含量的影响

Table 3 Influence of flooding on the aerial part of plant phosphorus content

g·kg⁻¹

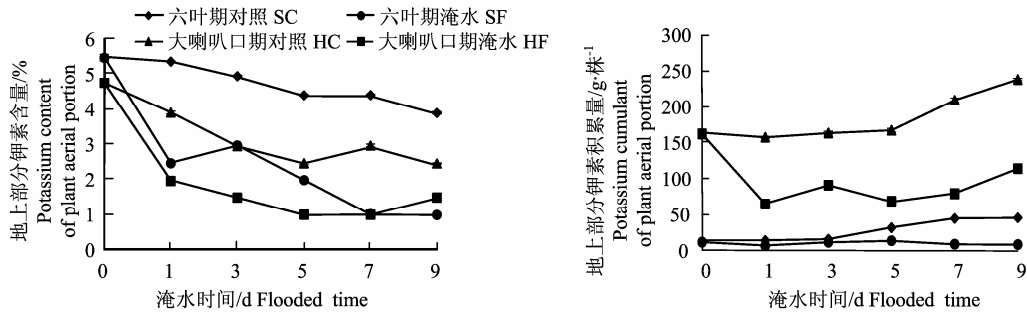
淹水时间/d Flooded time	六叶期 Six leaf period		大喇叭口期 Huge bellbottom period	
	淹水 Flooded	对照 CK	淹水 Flooded	对照 CK
0	2.31±0.130	2.31±0.130	3.28±0.100	3.28±0.100
1	1.07±0.052	1.85±0.067	2.53±0.072	3.01±0.166
3	1.38±0.056	2.13±0.042	1.76±0.049	2.30±0.141
5	1.07±0.121	1.76±0.030	1.51±0.003	2.67±0.101
7	1.12±0.080	3.33±0.148	1.83±0.020	2.23±0.107
9	0.95±0.034	2.46±0.198	1.54±0.114	2.23±0.056

表 4 淹水对地上部分磷素积累量的影响

Table 4 Influence of flooding on the aerial part of plant phosphorus accumulation

g·kg⁻¹

淹水时间/d Flooded time	六叶期 Six leaf period		大喇叭口期 Huge bellbottom period	
	淹水 Flooded	对照 CK	淹水 Flooded	对照 CK
0	4.69±0.264	4.69±0.264	111.82±3.409	111.82±3.409
1	2.73±0.133	4.72±0.171	83.76±2.378	121.56±6.702
3	5.15±0.205	6.66±0.130	108.21±3.027	127.88±7.822
5	7.06±0.797	12.55±0.213	104.60±0.222	182.56±6.936
7	9.47±0.670	33.47±1.491	146.74±1.611	158.43±7.620
9	7.64±0.273	28.61±2.297	119.57±8.807	218.21±5.480



SC: Six leaf period CK; SF: Six leaf period flooded; HC: Huge bellbottom period CK; HF: Huge bellbottom period flooded
图 4 淹水对地上部分钾素含量、累积量的影响

Figure 4 Influence of flooding on the aerial part of plant potassium content and accumulation

表 5 两个时期氮、磷、钾元素的含量、累积量 *t* 检验结果

Table 5 *T*-test results of the N, P and K contents and accumulation in two periods

淹水时期 Flooding period	淹水时间/d Flooded time	氮素 Nitrogen		磷素 Phosphorus		钾素 Potassium	
		含量	累积量	含量	累积量	含量	累积量
		Content	Accumulation	Content	Accumulation	Content	Accumulation
六叶期 Six leaf period	1	0.000 30	0.000 29	0.007 72	0.007 67	0.000 00	0.000 00
	3	0.003 88	0.013 91	0.005 43	0.015 90	0.000 19	0.000 47
	5	0.000 01	0.000 00	0.005 71	0.003 75	0.000 05	0.000 04
	7	0.000 35	0.000 22	0.003 54	0.002 69	0.000 04	0.000 03
	9	0.000 14	0.000 01	0.007 68	0.004 97	0.000 08	0.000 06
大喇叭口期 Huge bellbottom period	1	0.028 35	0.041 78	0.072 42	0.018 69	0.000 03	0.000 03
	3	0.005 81	0.059 24	0.009 46	0.019 22	0.000 52	0.000 67
	5	0.000 68	0.000 84	0.002 37	0.002 46	0.000 12	0.000 12
	7	0.001 63	0.010 94	0.032 03	0.154 95	0.000 11	0.000 13
	9	0.033 64	0.003 16	0.019 56	0.006 92	0.000 30	0.000 14

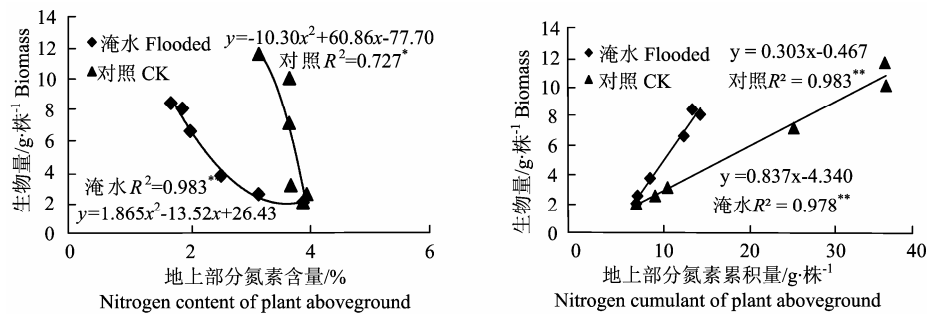


图 5 生物量与地上氮素含量、累积量的关系

Figure 5 The relationship between biomass and nitrogen content and accumulation

由于植株生长的稀释效应, 2 个时期的对照小区氮素含量均有不同程度的下降, 但变化不明显。淹水小区随淹水时间增加下降速度较快。六叶期对淹水更为敏感, 淹至第 7 天时仅为对照的 46.54%; 大喇叭口期淹水第 7 天仍占对照的 83.16%。应用成对样本 *t* 检验发现六叶期与大喇叭口期在第 1、3、5、7 和 9 天淹水前后氮素含量间均有显著差异(表 5)。

地上部分氮素积累量随植株的生长呈上升趋

势。六叶期对照小区累积量呈生长曲线增长, 在 0~3 d 增长速度较慢, 3 d 后上升趋势加快。而淹水小区增长速度缓慢, 第 9 天仅为对照小区的 41.71%。大喇叭口期对照小区氮素累积量几乎呈线性增长, 淹水小区前 3 d 与对照增长几乎一致, 3 d 以后增长速度明显变缓, 甚至下降, 淹水至第 9 天为对照的 73.63%, 与氮素含量变化趋势相吻合, 同样表明大喇叭口期更耐淹。应用成对样本 *t* 检验发现六叶期

淹水期间,淹水与对照小区间氮素累积量有显著差异;大喇叭口期除第3天,其他1、5、7和9 d淹水前后氮素累积量均有显著差异(表5)。

2.2.2 淹水对磷素养分吸收与积累的影响 淹水同样抑制了玉米对磷的吸收,淹水时间越长影响越大。与氮素不同的是,两个时期淹水均产生明显的抑制效应(表3)。应用成对样本 t 检验发现六叶期淹水期间,淹水与对照小区间磷素含量有显著差异;大喇叭口期淹水第1天处理间无显著差异,淹至第3天对照与淹水之间磷素含量差异显著(表5)。

两个时期磷素累积量均有增长,变化趋势存在差异(表4)。由于前期生物量小,需磷量小,所以植物体内磷素积累较少,拔节期后,植物生长旺盛,生物量迅速上升,磷素累积量也随之增大。六叶期淹水小区增长速度低于对照小区,至第9天为对照小区的26.57%,影响很大;大喇叭口期对照小区前期增长缓慢,后期增长速度高于淹水小区,淹水小区第9天数值为对照的54.81%,受淹水影响比六叶期小。由此可见,两个时期淹水处理磷素吸收的下降幅度均大于氮素。应用成对样本 t 检验发现六叶期淹水期间,淹水与对照小区间磷素累积量有显著差异;大喇叭口期前7 d与第9天淹水前后磷素累积量差异显著,第7天无显著差异。对磷素含量与累积量的分析表明,大喇叭口期相对六叶期更耐淹,与氮素所得结果相似(表5)。

2.2.3 淹水对钾素养分吸收与积累的影响 淹水对玉米植株钾素含量的影响与对氮素影响相似,随着淹水天数的延长,两个时期均表现为下降趋势,对六叶期的影响远大于大喇叭口期(图4)。

运用成对样本 t 检验发现六叶期与大喇叭口期在淹水前后钾素含量均有极显著差异(表5)。

两个时期对照小区钾素累积量均呈上升趋势,前期增长较慢,3~7 d增长速率加快,7 d后增长再度变缓。淹水小区增长速率低于对照小区,随着淹水时间增加,差值增大。淹至第7天,六叶期淹水小区仅为对照小区的18.94%;而大喇叭口期淹水小区为对照小区的37.61%。运用成对样本 T 检验发现六叶期与大喇叭口期在淹水前后钾素累积量均有极显著差异(表5)。表明淹水严重抑制了钾的吸收。

两个时期无论是淹水还是对照营养元素(N、P、K)均表现为含量六叶期大于大喇叭口期,累积量大喇叭口期大于六叶期。这符合玉米生长进程,淹水只改变营养元素的吸收量。从淹水的影响程度来看,六叶期比大喇叭口期更严重。

2.3 生物量与养分含量、积累量之间相关性研究

图5结果表明,淹水严重影响玉米生长,降低生物量,抑制营养元素吸收,经相关分析发现,六叶期生物量与玉米地上部分氮素含量呈极显著的负相关,与氮素累积量呈极显著的正相关,相关方程分别是: $y=1.865x^2-13.52x+26.43$; $y=0.837x-4.340$,把生物量减少至对照的50%作为耐淹阈值,计算结果分别为2.8和2.7 d,这一结果与处理间随淹水时间变化方程计算结果完全一致。

3 结论

淹水严重影响了玉米生长,降低生物量,抑制氮、磷、钾吸收,不同时期淹水只是影响程度不同。由成对样本 t 检验分析发现,淹水对钾的吸收抑制最严重,两个时期与对照相比均存在极显著差异。

六叶期玉米处理间生物量随淹水时间的变化规律符合抛物线方程,相关关系极显著;地上部氮素含量、氮素累积量与生物量间存在高度的负相关、正相关,把生物量减少至对照50%作为耐淹阈值,其计算结果均约为3 d。

参考文献:

- [1] 姜华武,张祖新.淹水对玉米根系几种酶活性的影响[J].湖北农学院学报,1999,19(3):209-211.
- [2] 汪贵斌,蔡金峰,何肖华.涝渍胁迫对喜树幼苗形态和生理的影响[J].植物生态学报,2009,33(1):134-140.
- [3] 张祖新,姜华武,魏中一,等.淹水胁迫下不同耐渍性玉米自交系根系中的酶学研究[J].湖北农业科学,2003(3):25-27.
- [4] Thomas A L, Guerreiro S M C, Sodek L. Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the flooded root system of nodulated soybean[J]. Annals of Botany, 2005, 96(7): 1191-1198.
- [5] Chen L Z, Wang W Q, Lin P. Photosynthetic and physiological responses on *Kandelia candel* L. Druce seedlings to duration of tidal immersion in artificial seawater[J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, 54: 256-266.
- [6] 刘可心,张哲,何玲玲,等.不同程度淹水对8种草种的可溶性糖含量的影响[J].草业与畜牧,2009(2):25-27.
- [7] Carvalho L C, Amâncio S. Antioxidant defence system in plantlets transferred from in vitro to ex vitro: effects of increasing light intensity and CO₂ concentration[J]. Plant Science, 2002, 162: 33-40.
- [8] 连洪燕,权伟,芦建国.淹水胁迫对石楠幼苗根系活力和光合作用影响[J].林业科技开发,2009,23(2):51-54.
- [9] 朱桂才,罗春梅.淹水胁迫下禾本科植物解剖结构研究进展[J].安徽农学通报,2008,14(18):166-167.
- [10] 王闯,胡艳丽,高相彬,等.硝态氮对淹水条件下甜樱

- 桃根系呼吸速率及相关酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1433-1438.
- [11] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 137-142.
- [12] 张莢普, 何武权, 韩健. 水分胁迫对玉米生理生态特性的影响[J]. 西北水资源与水工程, 1999, 10(3): 18-20.
- [13] 梁哲军, 陶洪斌, 王璞. 淹水解除后玉米幼苗形态及光合生理特征恢复[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3977-3985.
- [14] 汪宗立, 刘晓忠, 王志霞. 夏玉米不同株龄对土壤涝渍的敏感度[J]. 江苏农业学报, 1987, 3(4): 14-19.
- [15] 吴荣生, 刘桂华. 玉米敏感期内淹水临界值及其应用[J]. 江苏农业科学, 1991(4): 24-25.
- [16] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 24-27.
- [17] 张红亚, 王友贞, 汤广民. 安徽省淮北地区旱作物灌溉制度优化的研究[J]. 南京农业大学学报, 2007, 30(1): 124-128.
- [18] 詹其厚, 陈杰. 淮北地区小麦生长期灌溉对产量和水肥利用效率的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 1047-1051.
- [19] 孙怀文. 砂姜黑土的水分特性及其与土壤易早的关系[J]. 土壤学报, 1993, 30(4): 423-431.
- [20] 詹其厚, 袁朝良, 张效朴. 有机物料对砂姜黑土的改良效应及其机制[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 420-425.
- [21] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 持续干旱及复水对玉米幼苗生理生化指标的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 59-61.
- [22] 马富裕, 李蒙春, 杨建荣, 等. 花铃期不同时段水分亏缺对棉花群体光合速率及水分利用效率影响的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35: 1467-1472.
- [23] 王修贵, 沈荣开, 王友贞, 等. 受渍条件下作物水分生产函数的田间试验研究[J]. 水利学报, 1999(8): 40-45.
- [24] 陈家宙, 王石, 张丽, 等. 玉米对持续干旱的反应及红壤干旱阈值[J]. 中国农业科学, 2007, 40(3): 532-539.
- [25] 李钟学, 张季中, 王玉莲. 水稻涝害的研究与探讨[J]. 中国林副特产, 2004(6): 24-25.
- [26] 刘一明, 程凤枝, 王齐, 等. 四种暖季型草坪植物的盐胁迫反应及其耐盐阈值[J]. 草业学报, 2009, 18(3): 192-199.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-109; 265-271.
- [28] 李青军, 张炎, 胡伟, 等. 氮素运筹对玉米干物质积累、氮素吸收分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 755-760.