

# 淹水胁迫对玉米苗期根系形态与养分吸收累积的影响

王 寒, 高 敏, 金梦灿, 郜红建\*

(安徽农业大学资源与环境学院, 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 合肥 230036)

**摘 要:** 采用盆栽试验的方法, 研究了不同淹水时间对玉米苗期(四叶期)根系长度、根表面积、根体积、分枝数、交叉数等根系形态, 根系生物量, 氮磷钾含量和累积量的影响, 对比分析正常生长和淹水条件下玉米根系形态与养分吸收的耦合关系。结果表明, 正常生长的玉米, 其根系的主根长、总根长、根表面积、根体积以及分枝数、交叉数等形态指标均随培养时间延长而逐渐增加; 而淹水胁迫使这些根系形态指标均呈先增加后减少的变化规律, 并于淹水处理 72 h 后分别低于正常生长 53.8%、51.0%、34.2%、13.3%、49.5% 和 37.5%。玉米幼苗正常生长时, 根系中氮含量、磷含量、钾含量随培养时间增加均呈递增趋势; 而淹水处理使根系中氮含量先增加后减少并高于正常生长; 磷含量先增加, 处理 48 h 后趋于稳定; 钾含量先增加后减少, 并于淹水 48 h 后低于正常生长。正常生长和淹水处理根系中氮素、磷素、钾素累积量均持续增加, 而淹水处理 72 h 后三者累积量分别显著低于正常生长 7.0%、20.2% 和 39.1% ( $P < 0.05$ )。正常生长的玉米, 根体积对氮、磷含量影响最大、主根长对钾含量影响最大, 总根表面积对氮、磷、钾素累积量影响最大; 淹水胁迫后, 以总根表面积对氮、磷含量影响最大, 交叉数对根系钾含量以及氮累积量影响最大, 以总根体积对氮素、磷素累积量影响最大。综上, 淹水胁迫抑制了玉米幼苗根系的生长发育, 降低了根系对氮、磷和钾的吸收与累积, 导致玉米生长受阻。

**关键词:** 玉米; 淹水; 根系形态; 养分吸收

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2018)03-0538-07

## Influences of waterlogging stress on morphology and nutrient uptake of maize roots at seedling stage

WANG Han, GAO Min, JIN Mengcan, GAO Hongjian

(Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** In this paper, we investigated the effect of waterlogging on maize root morphology, such as root length, root surface area, root volume, number of branches, as well as root biomass, contents of nitrogen, phosphorus and potassium in root, and the correlation between the root morphology and nutrients accumulation at seedling stage (4-leaf stage) under the simulated condition in the lab. The results showed that the main root length, total root length, root surface area, root volume, branch number and crossing number were all increased under the normal growth condition, but they were increased firstly and then decreased under waterlogging condition, which were significantly lower by 53.8%, 51.0%, 34.2%, 13.3%, 49.5% and 37.5% than those under normal condition after incubation for 72 h, respectively. The concentrations of nitrogen, phosphorus and potassium in maize roots were gradually increased under the normal growth condition, but the nitrogen concentration in maize roots firstly increased, and then decreased in the whole waterlogging period, which was higher than that under the normal growth condition. The phosphorus concentration in maize roots initially increased and then tended to be stable after 48 h after treatment. The potassium concentration increased initially and then decreased after incubation 48 h after waterlogging treatment, which was lower than that under the normal growth condition. The quantities of nitrogen, phosphorus and potassium accumulated in maize roots increased under both the normal and waterlogging conditions. The amounts of nitrogen, phosphorus and potassium accumulated in maize roots under waterlogging

收稿日期: 2017-12-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAD07B08)资助。

作者简介: 王 寒, 硕士研究生。E-mail: wanghandeh@sina.com

\* 通信作者: 郜红建, 教授, 博士生导师。E-mail: gaohongjian2@163.com

condition were significantly lower by 7.0%, 20.2%, and 39.1%, respectively than those under the normal growth condition 72 h after waterlogging treatment ( $P < 0.05$ ). Under the normal growth condition, the root volume was the most influential factor on both nitrogen and phosphorus contents; the main root length was the greatest influential factor on the potassium content; the root surface was the most influential factor on the amounts of nitrogen, phosphorus and potassium accumulated in maize roots. Under the waterlogging condition, however, the root surface area was the most influential factor on root nitrogen and phosphorus contents; the number of branches was the most influential factor on root potassium contents and amounts of nitrogen accumulated in maize roots, and the total root volume was the most influential factor on amounts of nitrogen and phosphorus accumulated in maize roots. In summary, the growth and development of the maize root system were inhibited by waterlogging stress at the seedling stage. Waterlogging decreased the uptake and accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in maize roots, and impeded maize growth.

**Key words:** maize; waterlogging; root morphology; nutrients accumulation

作物在生长过程中出现长时间阴雨天气或农田排水不畅、地下水位过高造成土壤水分过饱和、根层土壤含水量大于田间持水量的情况, 导致土壤中氧气含量严重不足, 抑制作物生长发育和对养分的吸收累积, 进而影响作物的产量和品质<sup>[1]</sup>。玉米苗期(三叶期-四叶期)对水分敏感, 田间过多水分抑制了根系生长, 使根毛减少、根尖变褐呈铁锈状<sup>[2]</sup>, 根系活力下降; 同时叶片叶绿素降低、养分含量下降<sup>[3]</sup>, 加速了叶片衰老, 严重抑制玉米的生长, 使产量降低。

有关淹水对植物生长发育和生理生化机理等方面的影响已有一些研究<sup>[4-6]</sup>。淹水使植物细胞膜通透性和自由基受损, 根系进行无氧呼吸而导致丙酮酸脱羧酶(pyruvate decarboxylase, PDC)活性和乙醇脱氢酶(alcohol dehydrogenase, ADH)活性增加、改变了三羧酸循环中关键酶活性及代谢途径, 进而影响植株的生长发育<sup>[7]</sup>。淹水使水稻叶柄和根尖产生低氧应激反应, 根系缺氧后细胞进入程序性死亡, 严重影响其生长发育进程<sup>[8]</sup>。小麦淹水后, 根系细胞膜透性增强, 细胞内生物大分子外渗增加, 脯氨酸、可溶蛋白和可溶性糖浓度升高, 细胞程序性死亡, 从而影响根系和植株的生长发育<sup>[9]</sup>。淹水胁迫使黄瓜幼苗的根系中, 乙烯和乙醇等有毒物质逐渐积累, 根系活力下降, 抑制根系生长发育<sup>[10]</sup>。前期研究多关注淹水时期和淹水时间长短对植株生物量<sup>[11-12]</sup>、养分吸收与累积及产量<sup>[13]</sup>的影响, 也有研究分析了淹水对根系生长<sup>[14]</sup>及根系内乙烯、乙醛、乙醇等生理生化指标的影响<sup>[15]</sup>。根系作为植物吸收养分和水分的重要器官, 也是物质同化、转化或合成的场所, 其形态变化可直接影响植物对营养物质的吸收累积, 进而影响植物的生长发育和产量, 但是有关淹水对作物根系形态和养分吸收的影响及其耦合关系还鲜有报道。

本研究以‘中单 909’玉米品种为材料, 通过室内模拟培养的方法研究不同淹水时间对四叶期玉米根系生物量, 根系长度、根表面积、根体积、分枝数和交叉数等根系形态指标和氮磷钾含量与累积量的影响, 对比分析正常生长和淹水培养条件下玉米根系形态与养分吸收的耦合关系, 为玉米根系形态构建与养分调控提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

玉米培养试验在安徽农业大学生物科技楼人工气候室内进行。供试土壤(0~20 cm)为安徽省合肥市庐江县郭河试验基地黄棕壤, 土壤湿筛去除杂草后, 风干过 2 mm 网筛。土壤养分初始含量为有机质 7.17 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 26.83 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 29.83 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 139.09 mg·kg<sup>-1</sup>、pH 值为 5.27。取 10 kg 过筛的土壤, 加入尿素 4.1 g, 过磷酸钙粉状磷肥 3.3 g, 氯化钾肥 0.65 g, 充分混匀, 装入 50 L 体积的箱中平衡 5 d 后, 待用。

‘中单 909’玉米种子经 3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消毒后, 纯水清洗并浸泡 12 h 后, 播种在种植杯中(上方口径 11 cm, 下方口径 6 cm), 每个种植杯播种 3 粒种子, 待发芽后留长势一致的幼苗 2 株。种植杯底部设有 3 个大小均匀的透气孔, 杯中插入一根注水管, 用作灌溉。每天用称重法方法测定土壤含水量, 定时浇灌蒸馏水, 以保持 60% 的田间最大持水量。25℃ 恒温培养, 每天调换种植杯位置以保证其受光均匀。玉米幼苗生长至四叶期时开始进行淹水处理<sup>[16]</sup>, 种植杯中保持水层高出土层表面 2 cm, 淹水时间设定为 0、6、12、24、48、72 和 120 h。以土壤含水量为田间最大持水量 60% 的试验组为对照, 定期取样测定玉米根系形态、生物量、根系氮磷钾含量和累积量指标。

### 1.2 测定项目与方法

**1.2.1 根系形态** 取不同淹水时间处理、长势一致的玉米幼苗3株,依次用自来水和蒸馏水洗净表面,吸水纸沾干表面水分后,用刻度尺测定单株主根的长度。用专用根系扫描仪(Epson perfection V700 photo, Japan)数字化扫描玉米幼苗总根长、总根表面积、根体积、分枝数和交叉数等根系形态参数。玉米根系于105℃烘箱中杀青30 min,再于80℃烘箱中烘干至恒重,冷却至室温后称重即为根系生物量。

**1.2.2 玉米根系氮磷钾养分和累积量含量的测定** 称取磨碎根系样品0.12 g,放于100 mL消化管中,蒸馏水将样品润湿,加5 mL浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,摇匀并放置过夜,在消化管瓶口放置一个弯颈漏斗,消化炉先低温加热,待冒白烟时逐渐升高温度,当消化管内溶液呈棕黑色时,取下消化管冷却,逐滴加入300 g·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 10滴,摇匀使其充分反应,加热至沸,取下消化管冷却,逐滴加H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 10滴,以上反复3次,加热直至消煮液呈无色,加热10 min。取出消煮管,冲洗弯颈漏斗,洗液和消煮液用蒸馏水定容到100 mL。同时做空白试验以校正误差。此消煮液用于氮、磷、钾等元素的测定。根系中全氮含量采用凯氏定氮法测定,全磷采用钼锑钒比色法测定,全钾采用火焰光度法测定。以玉米根系中养分含量乘以生物量计算氮磷钾养分累积量。

### 1.3 统计分析

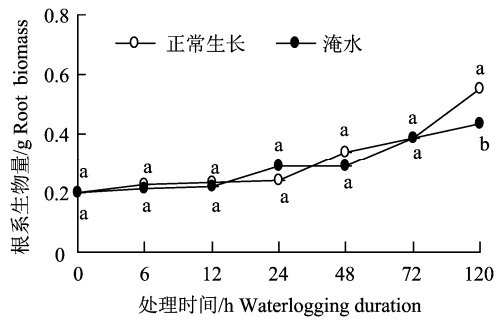
采用winRHIZO软件进行根系形态的数据分析,EXCEL和SPSS22.0软件进行养分累积的统计分析、根系形态指标和养分累积的线性回归分析,用X<sub>i</sub>参数表征Y<sub>i</sub>,其中X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub>、X<sub>4</sub>、X<sub>5</sub>和X<sub>6</sub>分别代表玉米总根长、主根长、总根表面积、根体积、分枝数、交叉数,Y<sub>1</sub>、Y<sub>2</sub>、Y<sub>3</sub>、Y<sub>4</sub>、Y<sub>5</sub>、Y<sub>6</sub>和Y<sub>7</sub>分别代表生物量、N含量、P含量、K含量、N、

P和K的累积量。

## 2 结果与分析

### 2.1 淹水对根系生物量的影响

根系生物量的大小可以反映根系的生长发育状态,成为根系吸收水分和养分能力的重要指标之一。在整个试验时间内,正常生长(对照)和淹水的玉米根系生物量均呈逐渐增加的趋势,处理72 h之内两者无显著差异;处理至120 h时,淹水处理的玉米根系生物量比正常生长条件降低20%,且两者间差异显著(P<0.05)(图1)。



小写字母a、b代表相同处理时间不同处理方式之间差异性。下同

lowercase letters a and b mean the diversity of the same processing periods under different treatments. The same below

图1 淹水对玉米根系生物量的影响

Figure 1 Effect of waterlogging on root biomass of maize

### 2.2 淹水对玉米根系形态的影响

**2.2.1 根系长度** 正常生长的玉米,根系总长度和主根长均呈递增趋势,而淹水胁迫使根系总长度和主根长在0~48 h范围内呈递增趋势,而后呈下降趋势。根系总根长在淹水培养72 h和120 h阶段分别低于对照27.4%和53.8%;而淹水胁迫使主根长在处理至120 h时,低于对照51.0%,两者间差异显著(P<0.05)(图2)。

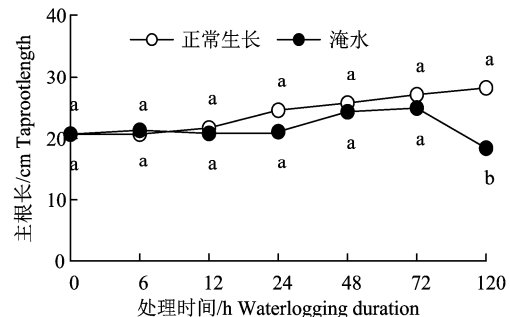
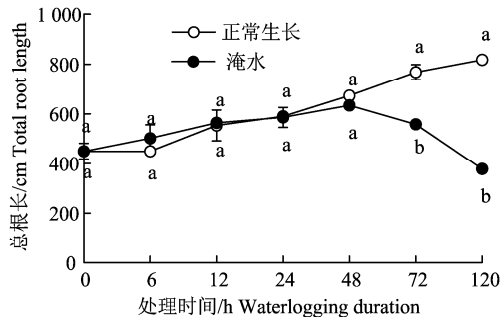


图2 淹水对玉米根长的影响

Figure 2 Effects of waterlogging on root length of maize

**2.2.2 根系表面积和根系体积** 正常生长的玉米,根表面积以及根体积均呈递增趋势,而淹水胁迫使

总根表面积在处理0~48 h阶段递增并高于正常生长,而后总根表面积开始下降,且显著低于正常生

长的幼苗 ( $P < 0.05$ )。淹水 72 h 后, 总根表面积比正常生长低 5.4%; 处理至 120 h, 已比正常生长低 34.2%, 两处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。正常生长及

淹水胁迫的玉米根系总根体积均呈递增趋势, 但淹水胁迫使总根体积低于正常生长, 两者间无显著差异 ( $P > 0.05$ ) (图 3)。

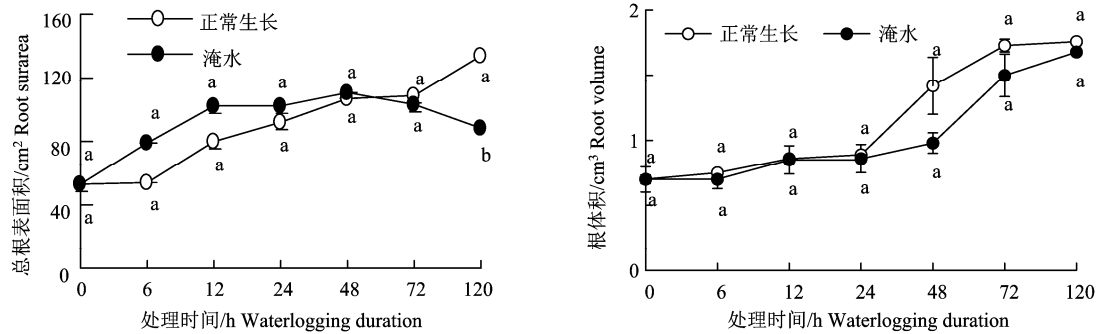


图 3 淹水对玉米根系总根表面积和根体积的影响

Figure 3 Effects of waterlogging on the surface area and root volume of maize roots

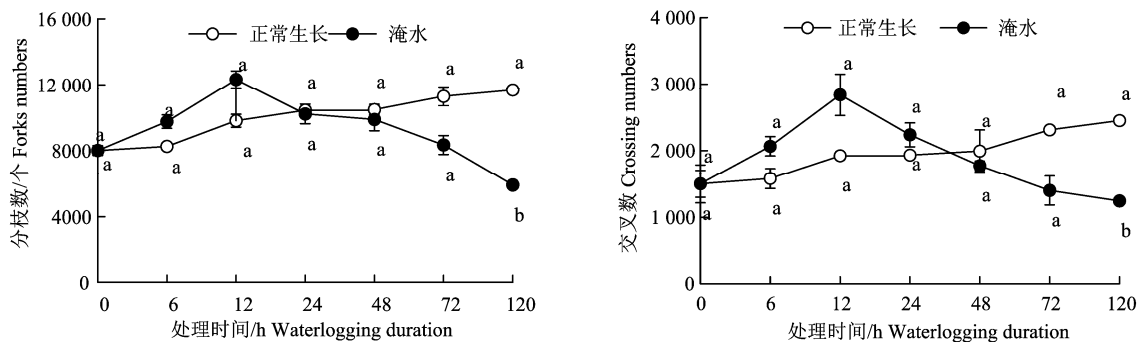


图 4 淹水对玉米根系分枝数和交叉数的影响

Figure 4 Effects of waterlogging on the branches and crossing numbers of maize roots

表 1 玉米根系氮磷钾含量的变化

Table 1 Contents of nitrogen, phosphorus and potassium in maize roots

处理时间/h Treatment time	N 含量/N content		P 含量/P content		K 含量/K content	
	正常生长 Regular growth	淹水 Waterlogging	正常生长 Regular growth	淹水 Waterlogging	正常生长 Regular growth	淹水 Waterlogging
0	1.30±0.00 <sup>a</sup>	1.30±0.00 <sup>a</sup>	0.13±0.00 <sup>a</sup>	0.13±0.00 <sup>a</sup>	1.91±0.00 <sup>a</sup>	1.91±0.00 <sup>a</sup>
6	1.48±0.14 <sup>a</sup>	1.67±0.03 <sup>a</sup>	0.13±0.01 <sup>a</sup>	0.19±0.02 <sup>a</sup>	1.91±0.07 <sup>a</sup>	1.91±0.12 <sup>a</sup>
12	1.42±0.06 <sup>a</sup>	1.51±0.05 <sup>a</sup>	0.12±0.03 <sup>a</sup>	0.15±0.01 <sup>a</sup>	1.83±0.12 <sup>b</sup>	2.11±0.05 <sup>a</sup>
24	1.52±0.06 <sup>b</sup>	1.72±0.10 <sup>a</sup>	0.15±0.00 <sup>a</sup>	0.17±0.03 <sup>a</sup>	1.86±0.04 <sup>b</sup>	2.16±0.07 <sup>a</sup>
48	1.83±0.01 <sup>b</sup>	2.00±0.06 <sup>a</sup>	0.15±0.00 <sup>a</sup>	0.18±0.03 <sup>a</sup>	2.36±0.06 <sup>b</sup>	3.14±0.08 <sup>a</sup>
72	1.81±0.03 <sup>b</sup>	2.14±0.04 <sup>a</sup>	0.18±0.04 <sup>a</sup>	0.18±0.00 <sup>a</sup>	2.87±0.09 <sup>a</sup>	2.47±0.11 <sup>b</sup>
120	1.72±0.03 <sup>b</sup>	2.00±0.15 <sup>a</sup>	0.18±0.01 <sup>a</sup>	0.18±0.00 <sup>a</sup>	2.95±0.09 <sup>a</sup>	2.27±0.04 <sup>b</sup>

注: 表中小写字母 a、b 代表相同处理时间不同处理方式之间差异性。下同。

Note: Lowercase letters a and b mean the diversity of the same processing periods under different treatments. The same below.

**2.2.3 根系分支数和交叉数** 正常生长的玉米, 根系分枝数和交叉数均呈递增趋势, 而淹水胁迫使根系分枝数和交叉数 0~12 h 阶段递增且高于正常生长, 而后逐渐下降。淹水处理至 72 h 和 120 h, 玉米根系分枝数分别比正常生长低 26.2% 和 49.5%; 而根系交叉数分别比正常生长低 14.2% 和 37.5%,

且处理至 120 h 时, 两处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) (图 4)。

### 2.3 淹水对玉米根系养分累积的影响

正常生长和淹水胁迫使玉米根系内氮、磷、钾含量均随处理时间的增加呈递增趋势。正常生长及淹水胁迫至 120 h 时, 玉米根系中氮素含量分别比

初始培养时（四叶期）提高了 32.3%和 53.8%；而淹水胁迫至 120 h，根系中氮素含量比正常生长高 16.2%，且两处理间差异显著（ $P<0.05$ ）（表 1）。玉米根系中氮素累积量呈现出与氮素含量类似的规律：在淹水胁迫 6~72 h 阶段，玉米根系中氮素累积量高于正常生长 35.1%~52.4%；处理至 120 h，根系中氮素累积量比正常生长低 7.0%。正常生长及淹水胁迫至 120 h，根系中磷素含量比初始培养时提高了 38.5%，两处理间无显著差异（ $P>0.05$ ）。淹水胁迫 6~72 h 阶段，根系中磷累积量高于正常生

长的 14.8%~90.3%；处理至 120 h 时比正常生长低 20.2%（表 2）。正常生长至 120 h 时，玉米根系内钾素含量及钾素累积量比初始培养时分别提高了 54.4%和 269.4%；而淹水胁迫 72~120 h 阶段，其根系内钾素含量分别比正常生长低 13.9%和 23.1%，两处理间均有显著差异（ $P<0.05$ ）。淹水处理至 6~48 h 阶段，根系中钾素累积量比正常生长高 34.9%~53.0%；而淹水处理至 72~120 h，根系中钾素累积量已比正常生长低 0.1%和 39.1%，两处理间差异显著（ $P<0.05$ ），具体见表 1 和表 2。

表 2 玉米根系氮磷钾累积量的变化

Table 2 Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in maize roots mg

处理时间/h Treatment time	N 累积量 N cumulant		P 累积量 P cumulant		K 累积量 K cumulant	
	正常生长 Regular growth	淹水 Waterlogging	正常生长 Regular growth	淹水 Waterlogging	正常生长 Regular growth	淹水 Waterlogging
	0	3.00±0.00 <sup>a</sup>	3.00±0.00 <sup>a</sup>	0.30±0.00 <sup>a</sup>	0.30±0.00 <sup>a</sup>	4.39±0.00 <sup>a</sup>
6	3.40±0.13 <sup>a</sup>	5.18±0.30 <sup>a</sup>	0.31±0.06 <sup>a</sup>	0.59±0.02 <sup>a</sup>	4.39±0.25 <sup>b</sup>	5.92±0.55 <sup>a</sup>
12	4.11±0.09 <sup>a</sup>	6.34±0.14 <sup>a</sup>	0.35±0.01 <sup>a</sup>	0.63±0.05 <sup>a</sup>	5.31±0.60 <sup>b</sup>	8.86±0.17 <sup>a</sup>
24	3.65±0.40 <sup>b</sup>	4.99±0.25 <sup>a</sup>	0.36±0.03 <sup>a</sup>	0.49±0.07 <sup>a</sup>	4.46±0.36 <sup>b</sup>	6.26±0.02 <sup>a</sup>
48	5.12±0.26 <sup>b</sup>	5.80±0.10 <sup>a</sup>	0.42±0.04 <sup>a</sup>	0.52±0.10 <sup>a</sup>	6.61±0.10 <sup>b</sup>	9.11±0.19 <sup>a</sup>
72	6.15±0.11 <sup>b</sup>	8.31±0.09 <sup>a</sup>	0.61±0.00 <sup>a</sup>	0.70±0.09 <sup>a</sup>	9.63±0.09 <sup>b</sup>	9.76±0.67 <sup>a</sup>
120	9.46±0.19 <sup>a</sup>	8.80±0.51 <sup>b</sup>	0.99±0.11 <sup>a</sup>	0.79±0.10 <sup>a</sup>	16.22±1.06 <sup>a</sup>	9.88±0.26 <sup>b</sup>

表 3 不同水分处理下玉米根系营养指标与形态指标多元线性回归分析

Table 3 Multiple linear regression between nutritional indices and morphological indices of maize roots under different water treatments

参数 Parameter	正常生长 Regular growth			淹水 Waterlogging		
	因变量 Dependent variable	回归方程 Regression equation	$R^2$	因变量 Dependent variable	回归方程 Dependent variable	$R^2$
	生物量/g Biomass	$Y_1$	$Y_1=0.13-1.32X_1-2.13X_2+2.95X_3-0.29X_4+1.58X_5-0.33X_6$	1	$Y_8$	$Y_8=0.25-0.28X_1+0.16X_2+0.87X_4$
N 含量/% N content	$Y_2$	$Y_2=1.12+0.90X_4$	0.79	$Y_9$	$Y_9=1.27+0.89X_3-0.73X_6$	0.92
P 含量/% P content	$Y_3$	$Y_3=0.11+0.68X_4$	0.43	$Y_{10}$	$Y_{10}=0.14+0.71X_3-0.43X_5$	0.38
K 含量/% K content	$Y_4$	$Y_4=0.40-0.94X_1+1.40X_2+0.31X_5$	0.99	$Y_{11}$	$Y_{11}=0.41+0.69X_3+1.10X_5-1.46X_6$	0.76
N 累积量/mg N accumulation	$Y_5$	$Y_5=5.16-0.77X_1-1.92X_2+3.43X_3-0.95X_4+1.22X_5-0.84X_6$	0.99	$Y_{12}$	$Y_{12}=11.12-0.69X_1+0.78X_4+1.82X_5-2.09X_6$	0.96
P 累积量/mg P accumulation	$Y_6$	$Y_6=0.32-0.73X_1+1.55X_3$	0.97	$Y_{13}$	$Y_{13}=0.53-0.23X_1+0.79X_4$	0.81
K 累积量/mg K accumulation	$Y_7$	$Y_7=-2.64-1.26X_1+2.31X_3-1.44X_4+1.19X_5-0.60X_6$	1	$Y_{14}$	$Y_{14}=1.61+0.53X_3+0.55X_4-0.35X_6$	0.86

注： $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  和  $X_6$  分别代表玉米总根长、主根长、总根表面积、根体积、分枝数和交叉数。

Note:  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  and  $X_6$  represent total root length, main root length, total root surface area, root volume, branch number and crossover number, respectively.

2.4 养分累积与根系形态的多元线性回归分析

在正常生长和淹水胁迫条件下，玉米根系形态

参数和氮、磷、钾含量及累积量之间的多元线性逐步回归方程中， $X_i$  对  $Y_i$  的决定系数（ $R^2$ ）皆呈极显

著相关, 分别在 0.43~1.00 和 0.38~0.97 之间。正常生长与淹水胁迫的根系中磷含量与根系形态的决定系数 ( $R^2$ ) 均为最低, 分别为 0.38 和 0.43。正常生长的玉米, 根系形态参数对根系生物量均有影响, 其中以总根表面积对其影响最大, 决定系数为 2.95; 而淹水胁迫条件下, 主根长、总根长及根体积对根系生物量均有影响, 其中以根体积对其影响最大, 其系数为-0.87。正常生长时, 根体积对根系中氮素和磷素含量有影响, 主根长对根系中钾含量影响最大; 而淹水胁迫条件下, 根表面积对根系中氮、磷含量影响最大; 交叉数对钾含量影响最大。从根系中氮、磷、钾累积量分析, 正常生长的幼苗根系形态指标对根系中氮累积量和钾累积量均有影响, 其中以总根表面积对两者影响最大, 系数分别为 3.43 和 2.31; 主根长与总根表面积对根系中磷累积量有影响, 系数分别为-0.73 和 1.55。而淹水胁迫条件下, 主根长、根体积、分枝数、交叉数对根系中氮累积量有影响, 其中以交叉数对其影响最大, 其系数为-2.09。根体积对根系中磷累积量和钾累积量影响最大, 决定系数分别为 0.79 和 0.55 (表 3)。

### 3 讨论与结论

植株受淹水胁迫后, 土壤含氧量减少, 植株与大气间的气体交换受阻<sup>[17]</sup>, 根系发生无氧呼吸等生理反应<sup>[18-19]</sup>, 进而引起根系形态变化<sup>[20-21]</sup>。本研究结果表明, 淹水胁迫使玉米根系的主根长、总根长和总根表面积呈先增加再降低的趋势。这可能是因为淹水胁迫导致根系泌氧少, 根系细胞呼吸代谢方式从有氧呼吸转变为无氧呼吸, 导致根系发育不良<sup>[22]</sup>, 短时间内根系中乙烯增多, 植株体内生长素运输受阻, 促进根系形态参数值的增加<sup>[23-24]</sup>, 但随着淹水时间增加, 细胞分裂素和赤霉素的合成减少, 乙烯累积量过多, 同时乙醇含量增加, 激素平衡紊乱, 导致根系活力下降, 初生根受损死亡, 根系的形态参数值呈降低趋势<sup>[25-26]</sup>。

根系形态是影响养分吸收最重要的因素, 淹水胁迫影响了植物的根系形态, 进而影响植物对养分的吸收和累积<sup>[27]</sup>。陈敏等<sup>[28]</sup>和任佰朝<sup>[29]</sup>认为, 淹水使玉米地上部分的氮、磷、钾含量明显减少, 且淹水时间越长, 对其影响越显著。淹水还提高了氮磷钾以及干物质在茎秆中的分配比例<sup>[30]</sup>。陈晨等<sup>[31]</sup>的研究结果表明, 水稻根系的总根体积、根表面积、总根长、分枝数这四个形态指标与根系氮含量和氮累积量的相关性最为显著。本试验的研究结果显示, 淹水胁迫使根系中氮含量持续增加且高于正常生

长; 磷含量先增加, 处理至 48 h 后无显著变化; 钾含量先增加, 淹水 48 h 后递减且低于对照。这可能是由于淹水胁迫导致根系吸收、分配、转运氮素、磷素能力减弱<sup>[32-34]</sup>, 而对钾素的运输和分配影响较小<sup>[34]</sup>。淹水胁迫后, 玉米根表面积和交叉数对根系中氮含量和磷含量有影响; 而总根表面积、分枝数和交叉数对钾含量影响最大。交叉数对根系氮累积量影响最大; 根体积对根系中磷累积量以及钾累积量的影响最大。这可能是由于根系的总根长、根表面积与养分吸收能力密切相关, 淹水胁迫使两者均减少, 根系对养分的吸收能力减弱<sup>[35-36]</sup>, 进而导致根系中氮、磷、钾累积量均低于正常生长。

综上所述, 淹水处理前期 (0~24 h), 由于玉米根系对土壤环境变化产生应激反应呈现出根表面积、根体积、分枝数、交叉数均高于正常生长的现象, 促进根系中氮磷钾素养分的累积, 而后趋于平缓; 淹水后期 (48~120 h), 玉米根系分枝数显著低于正常生长, 次生根与主根逐渐脱落, 根系发育受阻, 养分吸收下降, 氮、磷、钾累积量显著低于正常处理, 其中交叉数对根系氮累积量影响最大, 根体积对根系中磷累积量以及根系钾累积量的影响最大。

### 参考文献:

- [1] 聂伟燕, 赵尊练, 夏云飞, 等. 水分胁迫对线辣椒根系生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 30-36.
- [2] ANDREEV V Y, GENEROZOVA I P, VARTAPETIAN B B. Energy status and mitochondrial ultrastructure of excised pea root at anoxia and postanoxia [J]. Plant Physiol Bioch, 1991, 29(2): 171-176.
- [3] 郭庆法, 高新学, 刘强, 等. 黄淮海夏玉米区玉米育种现状及创新[J]. 玉米科学, 2007, 15(6): 1-4.
- [4] ARBONA V, HOSSAIN Z, LÓPEZ-CLIMENT M F, et al. Antioxidant enzymatic activity is linked to waterlogging stress tolerance in citrus[J]. Physiol Plantarum, 2008, 132(4): 452-466.
- [5] BAILEY-SERRES J, CHANG R. Sensing and signalling in response to oxygen deprivation in plants and other organisms[J]. Ann Bot, 2005, 96(4): 507-518.
- [6] ISLAM M A, MACDONALD S E, ZWIAZEK J J. Responses of black spruce (*Picea mariana*) and tamarack (*Larix laricina*) to flooding and ethylene[J]. Tree Physiol, 2003, 23(8): 545-552.
- [7] WATERS I, KUIPER P J C, WATKIN E, et al. Effects of anoxia on wheat seedlings: I. Interaction between anoxia and other environmental factors[J]. J Exp Bot, 1991, 42(11): 1427-1435.
- [8] PHUKAN U J, MISHRA S, SHUKLA R K. Waterlogging and submergence stress: affects and acclimation[J]. Crit Rev Biotechnol, 2016, 36(5): 956-966.

- [9] YU M, ZHOU Z Q, DENG X Y, et al. Physiological mechanism of programmed cell death aggravation and acceleration in wheat endosperm cells caused by waterlogging[J]. *Acta Physiol Plant*, 2017, 39(1): 23-34.
- [10] XU X W, WANG H H, QI X H, et al. Waterlogging-induced increase in fermentation and related gene expression in the root of cucumber (*Cucumis sativus*, L.)[J]. *Sci Hortic*, 2014, 179:388-395.
- [11] 游惠明. 秋茄幼苗对盐度、淹水环境的生长适应[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3):675-680.
- [12] 房稳静, 武建华, 陈松, 等. 不同生育期积水对夏玉米生长和产量的影响试验[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(4): 616-618.
- [13] 李金才, 董琦, 余松烈. 不同生育期根际土壤淹水对小麦品种光合作用和产量的影响[J]. *作物学报*, 2001, 27(4): 434-441.
- [14] 刘玉芳, 陈双林, 李迎春, 等. 长期淹水环境下河竹鞭根系统形态、生物量和养分的适应性调节[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3641-3648.
- [15] VIDOZ M L, MIGNOLLI F, AISPURU H T, et al. Rapid formation of adventitious roots and partial ethylene sensitivity result in faster adaptation to flooding in the aerial roots (aer) mutant of tomato[J]. *Sci Hortic*, 2016, 201: 130-139.
- [16] 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(4): 14-20.
- [17] 白团辉, 马锋旺, 李翠英, 等. 苹果砧木幼苗对根际低氧胁迫的生理响应及耐性分析[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(12): 4140-4148.
- [18] BAILEY-SERRES J, BRINTON E. Waterproofing crops: effective flooding survival strategies.[J]. *Plant Physiol*, 2012, 160(4): 1698.
- [19] 李志霞, 秦嗣军, 吕德国, 等. 植物根系呼吸代谢及影响根系呼吸的环境因子研究进展[J]. *植物生理学报*, 2011, 47(10): 957-966.
- [20] AHMED S, NAWATA E, HOSOKAWA M, et al. Alterations in photosynthesis and some antioxidant enzymatic activities of mungbean subjected to waterlogging[J]. *Plant Sci*, 2002, 163(1): 117-123.
- [21] 范伟国, 杨洪强. 平邑甜茶根系构型、养分吸收和新梢生长对根域形状的反应[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(19): 3907-3913.
- [22] 徐春梅, 谢涛, 王丹英, 等. 根际氧浓度对水稻分蘖期养分吸收和根系形态的影响[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(6): 619-627.
- [23] MIAN M A R, NAFZIGER E D, KOLB F L, et al. Root growth of wheat genotypes in hydroponic culture and in the greenhouse under different soil moisture regimes[J]. *Crop Sci*, 1993, 33(2): 283-286.
- [24] 周苏玫, 王晨阳, 张重义, 等. 土壤渍水对冬小麦根系生长及营养代谢的影响[J]. *作物学报*, 2001, 27(5): 673-679.
- [25] 张悟民, 徐肖华, 马善林, 等. 土壤水分逆境下大麦小麦生育反应及氮磷钾肥的抗逆作用[J]. *土壤通报*, 1997(5): 227-228.
- [26] 董建国, 余叔文. 细胞分裂素对渍水小麦衰老的影响[J]. *植物生理学报*, 1984, 10(1): 55-61.
- [27] THOMAS A L, GUERREIRO S M C, SODEK L. Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the flooded root system of nodulated soybean[J]. *Ann Bot*, 2005, 96(7): 1191-1198.
- [28] 陈敏, 徐姗, 蒋丽娜, 等. 淹水条件下玉米耐淹阈值研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2013, 40(4): 585-591.
- [29] 任佰朝. 淹水对夏玉米产量和品质及其生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [30] 张星, 赵向阳, 管艳霞, 等. 淹水胁迫对不同土壤类型养分及玉米苗期养分吸收分配的影响[J]. *玉米科学*, 2018, 26(1): 74-82.
- [31] 陈晨, 龚海青, 张敬智, 等. 不同基因型水稻苗期氮营养特性差异及综合评价[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(10): 1347-1355.
- [32] 曹秀, 夏仁学, 杨环宇, 等. 沙培条件下磷、钾、钙亏缺对枳(*Poncirus trifoliata*)幼苗根系形态及营养吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 981-988.
- [33] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对夏玉米养分吸收与转运的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 298-308.
- [34] 周苏玫, 王晨阳, 张重义, 等. 土壤渍水对冬小麦根系生长及营养代谢的影响[J]. *作物学报*, 2001, 27(5): 673-679.
- [35] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 等. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(12): 2221-2232.
- [36] 林雅茹, 唐宏亮, 申建波. 野生大豆根系形态对局部磷供应的响应及其对磷吸收的贡献[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(1): 158-165.