

局部根区水氮耦合对玉米幼苗养分吸收利用的影响

王旭明,张 铮,王海红,祝鹏飞,王 馨,束良佐*

(淮北师范大学生命科学学院,资源植物生物学安徽省重点实验室,安徽 淮北 235000)

摘 要: 研究局部根区水分胁迫下不同氮形态与供应部位对玉米幼苗养分吸收利用的影响。氮设三种形态(50% $\text{NO}_3^- - \text{N} + 50\% \text{NH}_4^+ - \text{N}$; $\text{NO}_3^- - \text{N}$; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$)。采用分根培养的方法,用聚乙二醇(PEG6000)模拟水分胁迫。PEG和氮只加入到分根装置的一侧根室,形成局部根区水分胁迫下水氮同区、水氮异区六个处理。收获时测玉米幼苗植株生物量和各养分浓度。结果表明,水氮同区比水氮异区更利于玉米幼苗生长,氮、磷、钾、钙、镁、铁总含量和增量都高于相应氮形态的水氮异区处理。不同氮形态相比,混合氮有利于促进玉米幼苗生长和增强氮的吸收能力;相对于铵态氮,硝态氮促进了钾、钙、镁、铁总量和增量的增加;养分利用效率基本上与其地上部分该养分浓度的高低呈负相关。

关键词: 局部根区水分胁迫;氮形态;供氮部位;养分利用;玉米幼苗

中图分类号: Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)03-0107-07

近年来,面对世界范围内水资源日益紧缺与农田灌水水分利用效率较低这一矛盾的加剧,国内外出现了局部根区灌溉(国际上也称局部根区水分胁迫,partial root-zone drying)的研究与实践^[1-3]。局部根区水分胁迫的理论基础是水分胁迫侧根系能够感受到干旱胁迫,并产生信号物质(如脱落酸)向地上部运输,从而调节气孔开度以及蒸腾作用,以达到节水增产的目的,而处于湿润侧(灌溉侧)的根系仍然能够吸收水分、养分^[1,4,5]。氮营养能够显著影响植物的生长,同时氮肥在农业生产上也是大量施用的肥料之一。对于局部根区灌溉下的水氮耦合作用已经作了大量的研究,主要集中在不同水氮耦合的节水效应与机理、氮在土壤中的残留以及植物吸收等方面^[6-9]。在农业生产中,农民有随水冲肥(氮)的习惯(本文称“水氮同区”),但从减少淋洗与增加氮在土壤中的残留考虑,氮宜施用在不灌溉的一侧(即“水氮异区”)^[10-13]。氮对于植物生长的影响不仅表现在氮的供应量上,氮形态对植物的生长发育以及植物的抗旱性也会产生显著的影响^[14-16]。然而在局部根区水分胁迫下,不同的氮形态与氮供应部位(水氮同区、水氮异区)对植物干旱胁迫反应的调节缺少研究。因此关于局部根区水分胁迫下的水氮耦合,还有一系列的问题需要深入研究。本文利用玉米幼苗为材料,采用营养液添加聚乙二醇(PEG)模拟水分胁迫的方法,探讨局部根区水分胁迫下氮形态与供应部位对玉米幼苗养分利用效率的影响,

以进一步丰富局部根区灌溉理论,为节水抗旱农业生产实践提供理论指导与试验支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

供试玉米品种为金海五号(由山东莱州金海种业有限公司提供)。种子经0.1% HgCl_2 消毒、冲洗后催芽、去主根、砂培至第一片真叶展开,然后移入1/2完全营养液(参照梁瑞霞^[17]完全营养液基本配方,略做修改),具体如下(mol/L): K_2SO_4 7.5×10^{-4} , MgSO_4 6.5×10^{-4} , KCl 1.0×10^{-4} , KH_2PO_4 2.5×10^{-4} , H_3BO_3 1.0×10^{-6} , MnSO_4 1.0×10^{-6} , CuSO_4 1.0×10^{-7} , ZnSO_4 1×10^{-6} , $(\text{NH}_4)_6\text{MO}_7\text{O}_{24}$ 5.0×10^{-9} , Fe-EDTA 1.0×10^{-4} , 氮源 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 各为50%的1 mmol/L混合氮,预培养至五叶一心后,挑选生长均匀一致的苗移栽至自制分根装置中。分根装置是由两个容器组成,每个容器盛液1.5 L,每盆移植2株,每株幼苗保留均匀的8条根,每边4条。营养液为完全营养液。氮浓度为4 mmol/L N,供氮形态设为3种: $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,以及混合氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 各为50%)。不同形态的氮分别用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 供应,在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 营养液中加入 CaCl_2 以补充 Ca^{2+} 。向一侧根室中加入聚乙二醇(PEG6000)以模拟水分胁迫(强度为-0.2 MPa)。每种氮形态的供应部位设两种:即氮只加到

收稿日期:2009-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(30771286);资源植物生物学安徽省重点实验室项目(KLPRB200901)

作者简介:王旭明(1962—),男,江苏苏州人,学士,副教授,研究方向为环境植物学。E-mail: xuming02@163.com。

* 通讯作者:束良佐(1969—),男,安徽芜湖人,博士,教授,从事植物营养与环境植物学研究。E-mail: shulz69@163.com。

不含 PEG 的一侧(模拟水氮同区),或含 PEG 的一侧(模拟水氮异区),共 6 个处理,实验设置处理方案见表 1,每个处理 5 次重复。此外,添加 CaCO_3 以保持营养液中 pH 值的稳定,加入双氰胺作为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 硝化抑制剂。整个培养过程中,每天调节营养液 pH

至 6.3 ± 0.1 , 24 h 通气,每 4 d 更换 1 次营养液。用日光灯提供光照,苗顶光强约 $180 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,温度 $28^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$,光暗周期为 12 h/12 h。水分胁迫处理 16 d 后测定指标。

表 1 实验处理方案
Table 1 Design of experimental treatments

标记 Mark	处理 Treatment	无 PEG 侧根室 Root compartment without PEG		加 PEG 侧根室 Root compartment added with PEG	
		混合氮 Mixed nitrogen	含硝态氮:铵态氮为 1:1 的混合氮营养液 Nutrient solution with mixed nitrogen supplied as $50\% \text{NO}_3^- - \text{N} + 50\% \text{NH}_4^+ - \text{N}$	不含氮的营养液 + PEG Nutrient solution without nitrogen + PEG	不含氮的营养液 + PEG Nutrient solution without nitrogen + PEG
HT	水氮同区 Nitrogen supplied to non-water- stressed compartment	混合氮 Mixed nitrogen	含硝态氮:铵态氮为 1:1 的混合氮营养液 Nutrient solution with mixed nitrogen supplied as $50\% \text{NO}_3^- - \text{N} + 50\% \text{NH}_4^+ - \text{N}$	不含氮的营养液 + PEG Nutrient solution without nitrogen + PEG	不含氮的营养液 + PEG Nutrient solution without nitrogen + PEG
XT		硝态氮 Nitrate nitrogen	含硝态氮的营养液 Nutrient solution with $\text{NO}_3^- - \text{N}$	不含氮的营养液 + PEG Nutrient solution without nitrogen + PEG	不含氮的营养液 + PEG Nutrient solution without nitrogen + PEG
AT		铵态氮 Ammonium nitrogen	含铵态氮的营养液 Nutrient solution with $\text{NH}_4^+ - \text{N}$	不含氮的营养液 + PEG Nutrient solution without nitrogen + PEG	不含氮的营养液 + PEG Nutrient solution without nitrogen + PEG
HY	水氮异区 Nitrogen supplied to water-stressed compartment	混合氮 Mixed nitrogen	不含氮的营养液 Nutrient solution without nitrogen	含硝态氮:铵态氮为 1:1 的混合氮营养液 + PEG Nutrient solution with mixed nitrogen supplied as $50\% \text{NO}_3^- - \text{N} + 50\% \text{NH}_4^+ - \text{N}$, and PEG	含硝态氮:铵态氮为 1:1 的混合氮营养液 + PEG Nutrient solution with mixed nitrogen supplied as $50\% \text{NO}_3^- - \text{N} + 50\% \text{NH}_4^+ - \text{N}$, and PEG
XY		硝态氮 Nitrate nitrogen	不含氮的营养液 Nutrient solution without nitrogen	含硝态氮的营养液 + PEG Nutrient solution with $\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{PEG}$	含硝态氮的营养液 + PEG Nutrient solution with $\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{PEG}$
AY		铵态氮 Ammonium nitrogen	不含氮的营养液 Nutrient solution without nitrogen	含铵态氮的营养液 + PEG Nutrient solution with $\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{PEG}$	含铵态氮的营养液 + PEG Nutrient solution with $\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{PEG}$

注:每个处理 5 次重复。Note: Each treatment with five replicates.

1.2 测定项目

1.2.1 生物量 植株收获后于 105°C 烘箱中杀青 30 min,再降温至 70°C 烘至恒重后称量。

1.2.2 养分利用效率 植株 N、P、K 含量的测定:采用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮法,其中全 N 测定采用凯氏定氮仪(瑞士 BÜCHI)测定;全 P 测定采用钼锑抗比色法测定;全 K 采用原子吸收分光光度计法测定。

植株 Ca、Mg、Fe 含量的测定:采用 $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$ 消煮法,原子吸收分光光度计法测定。

然后根据水分胁迫处理后各元素在植株体内的增量以及植株干重增量,计算养分利用效率。

1.3 数据处理

数据用 SPSS13.0 进行统计方差分析和 LSD 多重比较($\alpha = 0.05$),判断处理之间差异的显著性。

2 结果与讨论

2.1 局部根区水氮耦合对玉米幼苗生物量的影响

由图 1 可见,同一氮形态供应下水氮同区处理的生物量高于水氮异区处理。这可能是由于水氮同区供应的玉米幼苗虽然有一侧根系经受水分胁迫,但是另一侧根系水氮供应都充足,从而能够满足植物对水分以及养分的吸收;而水氮异区的玉米幼

苗两侧根系都受到了胁迫,分别为水分胁迫和氮营养胁迫,从而抑制了植株生长。在水氮同区或者在水氮异区条件下,不同的氮形态之间比较表明,植株总干重以混合氮、硝态氮、铵态氮的顺序依次降低,在水氮异区条件下,XY、AY 处理之间的差异减小(图 1)。不同形态氮素对植物生长状况的影响已有很多报道,一般情况下植物生长在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 混合氮营养中能够表现出最佳的生物学效应^[18,19]。而铵态氮与硝态氮对植物生长的影响有不同的报道^[20,21],本文观察到铵态氮无论在水氮同区或水氮异区条件下对植物的生长都表现为抑制作用,尤其在水氮异区下更加明显。有研究表明, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 抑制植物的生长与根系中细胞分裂素的合成减少有关。由于细胞分裂素具有促进地上部生长发育的作用, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 通过抑制根中细胞分裂素的合成及向地上部运输,从而抑制了植物的生长。不同氮形态下植物的生长差异与其光合能力的差异也有密切关系,铵态氮通过抑制光能转化和利用效率抑制植株生长。另外,生长在以铵态氮为唯一氮源下的植株需要很多的碳水化合物用于铵的解毒^[22],如果碳源不足, NH_4^+ 的吸收超过代谢速率,就会发生铵毒害^[23],抑制植株生长。

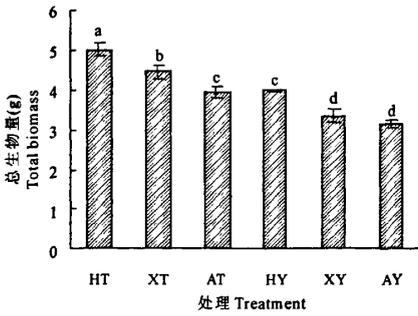


图1 局部根区水氮耦合对玉米幼苗总生物量的影响
Fig.1 Interactive effects of water and nitrogen supply on total biomass of maize seedlings under partial root-zone water stress
注:图中柱上标不同字母者为差异显著($\alpha = 0.05$).
Note: Different lowercase letters above the bars indicate significant difference at 5% level.

2.2 局部根区水氮耦合对玉米幼苗养分吸收利用的影响

2.2.1 氮的吸收利用 地上部分氮的浓度以水氮同区高于相应的水氮异区处理,且铵态氮处理的低于相应的硝态氮处理,混合氮最高;植株总含氮量和氮增量也呈现上述规律(表2)。根系中的氮分布表

表2 局部根区水氮耦合对玉米幼苗氮含量及利用效率的影响
Table 2 Interactive effects of water and nitrogen supply on N content and use efficiency of maize seedlings under partial root - zone water stress

处理 Treatment	地上部氮浓度 N concentration of shoot (mg/g)	根系氮浓度(mg/g) N concentration of root		植株总含氮量 Total N content (mg)	氮增量 Increment of N (mg)	氮利用效率 N use efficiency (g/g)
		无 PEG 侧 Non - PEG side	PEG 侧 PEG added side			
		HT	41.22 ± 1.31 a			
XT	31.64 ± 0.90 b	29.37 ± 0.95 b	15.48 ± 0.09 d	115.85 ± 5.73 b	107.90 ± 5.73 b	38.31 ± 1.27 e
AT	22.71 ± 0.36 c	18.87 ± 0.38 c	11.36 ± 0.15 ef	87.66 ± 1.75 c	79.71 ± 1.75 c	45.78 ± 1.12 d
HY	18.84 ± 0.40 d	18.75 ± 0.48 c	14.43 ± 0.48 d	66.38 ± 1.76 d	58.43 ± 1.76 d	62.75 ± 0.93 c
XY	18.31 ± 0.47 d	8.62 ± 0.13 g	11.69 ± 0.35 e	52.79 ± 3.08 de	44.84 ± 3.08 de	67.15 ± 1.98 b
AY	16.06 ± 0.40 e	10.16 ± 0.50 efg	10.01 ± 0.15 fg	47.29 ± 1.17 e	39.34 ± 1.17 e	71.43 ± 1.55 a

注:数据后标不同小写字母者为差异显著($\alpha = 0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters beside the data denote significant difference at 5% level. The following table form is the same.

2.2.2 磷的吸收利用 由表3可见,水氮同区供应下硝态氮处理(XT)降低了地上部分磷的浓度,磷的增量也较低,可能是硝态氮本身是阴离子,对磷酸根阴离子的吸收具有抑制作用^[27]。水氮异区条件下铵态氮(AY)或硝态氮(XY)处理地上部磷浓度没有显著性的差异,但都高于混合氮处理(HY)以及相应的水氮同区氮形态处理,可能是由于生长的稀释效应造成的^[28]。根系磷浓度分布表明,无论水氮同区还是异区,除了AY处理外,根系磷浓度均以供氮侧低于不供氮侧,可能是根系生长在缺氮的环境下增

加了磷的吸收和积累,其机理有待于进一步研究。铵态氮供应侧的根系磷浓度高于其它形态氮的供应,表明铵态氮相对促进磷的吸收,可能是植物吸收阳离子铵态氮后,为了维持电荷平衡,就会增加阴离子的吸收^[29],导致供铵态氮侧的根系磷浓度较高。磷的总量与增量在水氮异区不同氮形态处理间没有显著性的差异,但低于相应的水氮同区处理。表明水氮异区不利于磷的吸收。植株磷的利用效率与地上部磷的浓度呈极显著负相关($R^2 = 0.87, r = 0.933^{**}, n = 6$),并以AT、AY、XY处理最低。

表 3 局部根区水氮耦合对玉米幼苗磷含量及利用效率的影响

Table 3 Interactive effects of water and nitrogen supply on P content and use efficiency of maize seedlings under partial root - zone water stress

处理 Treatment	地上部磷浓度 P concentration of shoot (mg/g)	根系磷浓度(mg/g) P concentration of root		总含磷量 Total P content (mg)	磷增量 Increment of P (mg)	磷利用效率 P use efficiency (g/mg)
		无 PEG 侧 Non - PEG side	PEG 侧 PEG added side			
HT	4.531 ± 0.140 b	4.339 ± 0.129 cd	5.128 ± 0.180 b	21.787 ± 0.755 a	19.965 ± 0.755 a	0.236 ± 0.009 ab
XT	3.973 ± 0.066 c	4.184 ± 0.051 d	4.781 ± 0.176 bc	18.116 ± 0.716 bc	16.294 ± 0.716 bc	0.255 ± 0.011 a
AT	4.801 ± 0.038 b	5.047 ± 0.153 b	5.913 ± 0.151 a	19.954 ± 0.615 ab	18.132 ± 0.615 ab	0.202 ± 0.007 b
HY	3.992 ± 0.275 c	5.223 ± 0.122 b	4.084 ± 0.157 d	16.624 ± 1.040 c	14.802 ± 1.040 c	0.253 ± 0.018 a
XY	5.454 ± 0.070 a	4.976 ± 0.158 b	4.438 ± 0.090 cd	16.856 ± 0.702 c	15.034 ± 0.702 c	0.202 ± 0.009 b
AY	5.409 ± 0.204 a	4.482 ± 0.072 cd	4.474 ± 0.234 cd	15.817 ± 0.315 c	13.995 ± 0.315 c	0.201 ± 0.005 b

2.2.3 钾的吸收利用 地上部分钾的浓度除混合氮供应的以水氮同区高于水氮异区处理之外,其它氮源处理下氮的供应部位对地上部的钾的浓度没有影响(表 4)。不同氮形态之间比较,以铵态氮处理的低于相应的硝态氮处理,尤其在水氮异区供应下差异达到显著水平。根系钾浓度分布表明,水氮同区供应下,PEG 侧根系钾浓度反而高于氮供应侧(非

水分胁迫侧),可能是水分胁迫下缺氮反而促进了根系对钾的吸收;而水氮异区下只有铵态氮供应侧(PEG 侧)根系钾浓度高于无 PEG 侧,其它两种氮形态的两侧根系钾浓度无差异。总钾量和钾增量以水氮同区高于相应的水氮异区处理,且铵态氮处理最低;整株钾的利用效率表明,除 AT 显著高于 XT 处理外,其它处理间无显著性差异。

表 4 局部根区水氮耦合对玉米幼苗钾含量及利用效率的影响

Table 4 Interactive effects of water and nitrogen supply on K content and use efficiency of maize seedlings under partial root - zone water stress

处理 Treatment	地上部钾浓度 K concentration of shoot (mg/g)	根系钾浓度(mg/g) K concentration of root		总含钾量 Total K content (mg)	钾增量 Increment of K (mg)	钾利用效率 K use efficiency (g/mg)
		无 PEG 侧 Non - PEG side	PEG 侧 PEG added side			
HT	95.394 ± 1.057 a	33.103 ± 0.808 c	55.043 ± 0.638 a	0.415 ± 0.015 a	0.393 ± 0.015 a	11.993 ± 0.450 ab
XT	91.930 ± 1.057 ab	25.142 ± 0.654 d	54.415 ± 2.450 a	0.379 ± 0.015 a	0.357 ± 0.015 a	11.630 ± 0.482 b
AT	85.321 ± 1.231 bc	35.556 ± 0.827 c	53.307 ± 2.887 a	0.288 ± 0.010 bc	0.267 ± 0.009 bc	13.724 ± 0.480 a
HY	82.356 ± 3.334 c	36.341 ± 0.198 c	36.954 ± 0.924 c	0.301 ± 0.005 b	0.279 ± 0.005 b	13.116 ± 0.222 ab
XY	90.353 ± 1.454 ab	41.045 ± 0.440 b	42.736 ± 0.597 b	0.256 ± 0.017 cd	0.235 ± 0.016 cd	13.019 ± 0.941 ab
AY	83.115 ± 2.058 c	34.249 ± 1.393 c	43.801 ± 1.836 b	0.235 ± 0.006 d	0.213 ± 0.007 d	13.207 ± 0.403 ab

2.2.4 钙的吸收利用 由表 5 可见,无论是水氮同区还是水氮异区处理,硝态氮处理都相应地提高了植株地上部分钙的浓度,并且 XT 显著高于 XY 处理,除硝态氮外,其它形态氮下不同氮的供应部位对地上部钙的浓度没有显著性的影响;根系钙浓度分布表明,水氮同区供应下,硝态氮供应促进根系对钙的吸收,尤其在供氮侧显著高于水分胁迫侧;水氮异区供应条件下在水分胁迫侧也即氮供应侧更能促进钙在该侧根系的积累,并以硝态氮供应侧较高。总含钙量和钙增量以水氮同区高于相应的水氮异区处理,且以硝态氮大于混合氮大于铵态氮,这可能是 NH_4^+ 对其他阳离子的吸收产生拮抗作用,而 NO_3^-

则促进阳离子吸收,另一方面, NO_3^- 还可促进木质部中伴随的阳离子的运输^[30]。整株钙的利用效率表明,钙利用效率以相应的硝态氮低于铵态氮和混合氮,与植株地上部钙浓度呈显著负相关($R^2 = 0.83, r = 911^*, n = 6$)。

2.2.5 镁的吸收利用 由表 6 可见,地上部分镁的浓度以水氮同区高于水氮异区处理,平均高出 1.4 倍,以 AY 处理最低。根系镁浓度分布表明,所有处理根系镁的浓度都以无 PEG 侧高于 PEG 侧,说明水分供应比氮素对镁吸收的影响更大;氮形态之间的比较发现,水氮同区供应下,以混合氮处理的两侧浓度较高,铵态氮较低,水氮异区条件下水分胁迫侧氮

形态之间没有显著性差异,而非水分胁迫侧以混合氮最高,铵态氮与硝态氮处理间没有显著性的差异。总含镁量以水氮同区显著高于相应的水氮异区处理,相差 1.7~2.2 倍,且铵态氮处理的低于相应的

硝态氮和混合氮处理;镁增量与总含镁量规律相同。整株镁的利用效率与植株地上部镁浓度呈极显著负相关($R^2 = 0.94, r = 0.970^{**}, n = 6$)。

表 5 局部根区水氮耦合对玉米幼苗钙含量及利用效率的影响

Table 5 Interactive effects of water and nitrogen supply on Ca content and use efficiency of maize seedlings under partial root - zone water stress

处理 Treatment	地上部钙浓度 Ca concentration of shoot (mg/g)	根系钙浓度(mg/g) Ca concentration of root		总含钙量 Total Ca content (mg)	钙增量 Increment of Ca (mg)	钙利用效率 Ca use efficiency (g/mg)
		无 PEG 侧 Non-PEG side	PEG 侧 PEG added side			
HT	1.039 ± 0.047 bc	0.769 ± 0.030 efg	0.880 ± 0.054 de	4.342 ± 0.031 b	4.056 ± 0.031 b	1.156 ± 0.009 a
XT	1.449 ± 0.016 a	1.406 ± 0.082 a	1.106 ± 0.016 b	5.978 ± 0.142 a	5.692 ± 0.142 a	0.728 ± 0.018 c
AT	0.949 ± 0.029 c	0.882 ± 0.056 de	0.940 ± 0.039 cd	3.755 ± 0.173 c	3.469 ± 0.173 c	1.062 ± 0.053 a
HY	0.941 ± 0.023 c	0.647 ± 0.014 fg	1.035 ± 0.016 cd	3.469 ± 0.088 cd	3.183 ± 0.088 cd	1.154 ± 0.033 a
XY	1.143 ± 0.066 b	0.641 ± 0.015 g	1.218 ± 0.023 ab	3.822 ± 0.338 bc	3.536 ± 0.338 bc	0.876 ± 0.086 bc
AY	1.030 ± 0.027 bc	0.788 ± 0.028 efg	1.124 ± 0.086 b	3.056 ± 0.108 d	2.770 ± 0.108 d	1.019 ± 0.040 ab

表 6 局部根区水氮耦合对玉米幼苗镁含量及利用效率的影响

Table 6 Interactive effects of water and nitrogen supply on Mg content and use efficiency of maize seedlings under partial root - zone water stress

处理 Treatment	地上部镁浓度 Mg concentration of shoot (mg/g)	根系镁浓度(mg/g) Mg concentration of root		总含镁量 Total Mg content (mg)	镁增量 Increment of Mg (mg)	镁利用效率 Mg use efficiency (g/mg)
		无 PEG 侧 Non-PEG side	PEG 侧 PEG added side			
HT	3.275 ± 0.185 a	2.809 ± 0.209 a	1.606 ± 0.089 c	15.894 ± 0.400 a	15.340 ± 0.400 a	0.306 ± 0.008 c
XT	3.499 ± 0.030 a	2.989 ± 0.015 a	1.120 ± 0.042 de	15.077 ± 0.462 a	14.523 ± 0.462 a	0.286 ± 0.009 c
AT	3.476 ± 0.026 a	1.381 ± 0.035 cd	1.002 ± 0.016 ef	12.051 ± 0.417 b	11.497 ± 0.417 b	0.318 ± 0.011 c
HY	2.609 ± 0.068 b	1.783 ± 0.093 b	0.854 ± 0.083 ef	9.329 ± 0.312 c	8.775 ± 0.312 c	0.419 ± 0.015 b
XY	2.488 ± 0.042 b	1.131 ± 0.038 de	0.734 ± 0.044 f	6.859 ± 0.338 d	6.305 ± 0.338 d	0.482 ± 0.028 b
AY	2.206 ± 0.057 c	1.026 ± 0.066 e	0.745 ± 0.016 f	5.516 ± 0.259 e	4.962 ± 0.259 e	0.571 ± 0.033 a

2.2.6 铁的吸收利用 地上部分铁的浓度以水氮异区供应条件下铵态氮和硝态氮处理高于混合氮以及水氮同区处理(表 7);根系中铁的浓度较地上部

分高。铁属于难移动元素,根系吸收铁以后不能迅速运输到地上部分。根系中铁浓度分布表明,除了 AT 处理外,其它处理均以非水分胁迫侧根系铁浓度

表 7 局部根区水氮耦合对玉米幼苗铁含量及利用效率的影响

Table 7 Interactive effects of water and nitrogen supply on Fe content and use efficiency of maize seedlings under partial root - zone water stress

处理 Treatment	地上部铁浓度 Fe concentration of shoot (mg/g)	根系铁浓度(mg/g) Fe concentration of root		总含铁量 Total Fe content (mg)	铁增量 Increment of Fe (mg)	铁利用效率 Fe use efficiency (g/mg)
		无 PEG 侧 Non-PEG side	PEG 侧 PEG added side			
HT	0.192 ± 0.004 b	0.625 ± 0.010 e	0.513 ± 0.015 f	1.446 ± 0.042 b	1.161 ± 0.042 b	4.061 ± 0.149 a
XT	0.206 ± 0.003 b	0.686 ± 0.043 de	0.626 ± 0.016 e	1.603 ± 0.078 a	1.318 ± 0.078 a	3.168 ± 0.182 b
AT	0.211 ± 0.004 b	0.825 ± 0.050 bc	0.909 ± 0.034 ab	1.420 ± 0.022 bc	1.135 ± 0.022 bc	3.216 ± 0.062 b
HY	0.204 ± 0.006 b	0.768 ± 0.022 cd	0.523 ± 0.016 f	1.253 ± 0.045 d	0.968 ± 0.045 d	3.809 ± 0.167 a
XY	0.259 ± 0.006 a	0.987 ± 0.044 a	0.705 ± 0.029 de	1.393 ± 0.066 bod	1.108 ± 0.066 bod	2.747 ± 0.168 b
AY	0.261 ± 0.006 a	0.859 ± 0.022 bc	0.675 ± 0.025 e	1.269 ± 0.043 cd	0.984 ± 0.043 cd	2.871 ± 0.126 b

高于水分胁迫侧根系,并以混合氮处理的两侧根系铁浓度相应较低。这些可能是由于混合氮促进了植株生物量增加(图 1),对铁浓度有一定的稀释效应,所以混合氮处理下铁在各部位的浓度有低于同样水分条件下其它氮形态的趋势;一般而言 NH_4^+ 会对其他阳离子的吸收产生拮抗作用,但是本实验表明铵态氮处理并没有降低植株体内铁的含量,可能是因为 NH_4^+ 有利于活化根中的铁使其向地上部的运输增加^[31]。整株总含铁量和铁增量以水氮同区高于水氮异区,且以相应的硝态氮处理略高于(水氮异区下)或者显著高于(水氮同区下)铵态氮处理,这与硝态氮促进生长(水氮同区)或促进阳离子吸收(水氮异区)有关;同一氮形态下铁利用效率在水氮异区和水氮同区间无显著性差异,氮形态之间比较,铁利用效率以混合氮处理高于硝态氮或铵态氮处理的,与地上部铁浓度之间没有明显的相关性。

3 结 论

在局部根区水分胁迫下,与水氮异区相比,水氮同区更利于玉米幼苗生长,同一氮形态供应下以水氮同区处理的生物量高于水氮异区处理;不同氮形态相比,混合氮有利于促进玉米幼苗生长,植株生物量较高,而供应铵态氮的植株生物量较低。不同矿质元素的吸收、分布和利用在不同的水氮耦合处理下表现出来的规律也不一致。植株氮、磷、钾、钙、镁、铁总含量和增量都高于相应氮形态的水氮异区处理。混合氮处理增强了氮的吸收能力;相对于铵态氮,硝态氮促进了植株钾、钙、镁、铁总量和增量的增加,而铵态氮处理促进了根系磷浓度增加;除钾、铁的利用效率与地上部浓度相关性不大之外,其他养分利用效率基本上与其地上部分该养分浓度的高低呈负相关($r = 0.91 \sim 0.97$)。

参 考 文 献:

- [1] Kang S Z, Zhang J H. Controlled alternate partial root - zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency [J]. *J Exp Bot*, 2004, 55: 2437—2446.
- [2] De Souza C R, Maroco J P, Dos Santos T P, et al. Partial rootzone drying: regulation of stomatal aperture and carbon assimilation in field - grown grapevines (*Vitis vinifera* cv. *Moscato*) [J]. *Funct Plant Biol*, 2003, 30(6): 653—662.
- [3] Mingo D M, Theobald J C, Bacon M A, et al. Biomass allocation in tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants grown under partial rootzone drying: enhancement of root growth [J]. *Funct Plant Biol*, 2004, 31(10): 971—978.
- [4] Neales T F, Masia A, Zhang J H, et al. The effects of partially drying part of the root system of *Helianthus annuus* on the abscisic acid content of the roots, xylem sap and leaves [J]. *J Exp Bot*, 1989, 40: 1113—1120.
- [5] 胡田田,康绍忠,高明霞,等.玉米根系分区交替供水、氮的效应与高效利用机理[J].作物学报,2004,30(9):866—871.
- [6] Shahnazari A, Ahmadi S H, Laerke P E, et al. Nitrogen dynamics in the soil - plant system under deficit and partial root - zone drying irrigation strategies in potatoes [J]. *Eur J Agron*, 2008, 28(2): 65—73.
- [7] 胡田田,康绍忠,李志军,等.局部湿润方式下玉米对不同根区氮素的吸收与分配[J].植物营养与肥料学报,2009,15(1): 105—113.
- [8] 刘小刚,张富仓,田育丰.交替隔沟灌溉和施氮对玉米根区水氮迁移的影响[J].中国农业科学,2008,41(7):2025—2032.
- [9] Hu T T, Kang S Z, Li F S, et al. Effects of partial root - zone irrigation on the nitrogen absorption and utilization of maize [J]. *Agric Water Manage*, 2009, 96(2): 208—214.
- [10] Benjamin J G, Porter L K, Duke H R, et al. Nitrogen movement with furrow irrigation method and fertilizer band placement [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1998, 62: 1103—1108.
- [11] Skinner R H, Hanson J D, Benjamin J G. Root distribution following spatial separation of water and nitrogen supply in furrow irrigated corn [J]. *Plant Soil*, 1998, 199(2): 187—194.
- [12] 邢维芹,骆永明,王林权,等.半干旱区玉米水肥空间耦合效应 I. 氮素的吸收和残留及其环境效应 [J]. 土壤, 2003, (2): 118—121.
- [13] 邢维芹,王林权,李立平,等.半干旱区玉米水肥空间耦合效应. II. 土壤水分和速效氮的动态分布 [J]. 土壤, 2003, 35(3): 242—247.
- [14] Claussen W, Lenz F. Effect of ammonium or nitrate nutrition on the photosynthesis, growth, and activity of the enzymes nitrate reductase and glutamine synthetase in blueberry, raspberry and strawberry [J]. *Plant Soil*, 1999, 208: 95—102.
- [15] Mihalovic N, Jelic G, Filipovic R, et al. Effect of nitrogen form on maize response to drought stress [J]. *Plant Soil*, 1992, 144: 191—197.
- [16] 高迎旭,周毅,郭世伟,等.不同形态氮素营养对水稻抗旱性影响的研究 [J]. 干旱地区研究, 2006, 23(4): 598—602.
- [17] 梁瑞霞,李春俭,宋建兰. 6-BA 对缺磷白羽扇豆排根形成和有机酸分泌的影响 [J]. 植物生理与分子生物学学报, 2004, 30(6): 619—624.
- [18] 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.
- [19] 孙传范,戴廷波,荆奇,等.不同生育时期增铵营养对小麦生长及氮素利用的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 753—757.
- [20] 周毅,郭世伟,宋娜,等.供氮形态和水分胁迫对苗期一分蘖期水稻光合与水分利用效率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 334—339.
- [21] Guo H X, Liu W Q, Shi Y C. Effects of different nitrogen forms on photosynthetic rate and the chlorophyll fluorescence induction kinetics of flue - cured tobacco [J]. *Photosynth*, 2006, 44(1): 140—142.
- [22] Givan C V. Metabolic detoxification of ammonia in tissues of higher plants [J]. *Phytochem*, 1979, 18: 375—382.
- [23] Kato T. Nitrogen metabolism and utilization in citrus [J]. *Hort Rev*, 1986, 8: 181—216.
- [24] Robinson D. The responses of plants to non - uniform supplies of nutrients [J]. *New Phytol*, 1994, 127: 635—674.

- [25] Hodge A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients[J]. *New Phytol*, 2004, 162:9—24.
- [26] Hu T T, Kang S Z, Zhang F C, et al. Alternate application of osmotic and nitrogen stresses to partial root system: Effects on root growth and nitrogen use efficiency[J]. *J Plant Nutri*, 2006, 29(12):2079—2096.
- [27] Serma M D, Legaz B F, Primomillo E. The influence of nitrogen concentration and ammonium/nitrate ratio on N uptake mineral composition and yield of citrus[J]. *Plant Soil*, 1992, 147:13—23.
- [28] 王小燕, 于振文. 不同施氮量条件下灌溉量对小麦氮素吸收转运和分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(10):3015—3024.
- [29] 艾绍英, 王美丽, 姚建武, 等. 氮素营养条件对菜心吸收矿质养分的影响及其与硝酸盐累积的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(5):578—581.
- [30] Hartman P L, Mills H A, Jones J B. The influences of nitrate: ammonium ratios on growth, fruit development and element concentration in 'Floradel' tomato plants[J]. *J Am Soc Hortic Sci*, 1986, 111:487—490.
- [31] 邹春琴, 张福锁. 叶片质外体 pH 降低是铵态氮改善植物铁营养的重要机制[J]. *科学通报*, 2003, 48(16):1791—1795.

Interactive effects of water and nitrogen supply on nutrient absorption and utilization of maize seedlings under partial root - zone water stress

WANG Xu-ming, ZHANG Zheng, WANG Hai-hong, ZHU Peng-fei, WANG Xin, SHU Liang-zuo*

(School of Life Science, Huaibei Normal University, Key Laboratory of Plant Resources and Biology of Anhui Province, Huaibei, Anhui 235000, China)

Abstract: Effects of nitrogen form and its application position on nutrient absorption and utilization of maize seedlings under partial root-zone water stress were examined by using solution culture technique. A split-root system composed of two root compartments was used. Polyethylene glycol (PEG6000) was added to one root compartment simulating partial root-zone water stress. Nitrogen was set as three forms (50% $\text{NO}_3^- - \text{N} + 50\% \text{NH}_4^+ - \text{N}$; $\text{NO}_3^- - \text{N}$; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$) and supplied to just one root compartment (water-stressed or non-water-stressed-compartment). Plant biomass and nutrient concentration were examined when plants were harvested. It showed that, plant growth, total content and increment of N, P, K, Ca, Mg, Fe in plants were improved when nitrogen was supplied to non-water-stressed compartment compared to water-stressed one. Comparing to other nitrogen form, the growth and nitrogen absorption by plants treated with mixed nitrogen were the highest. Supply of nitrate increased absorption and increment of K, Ca, Mg and Fe compared to ammonium nutrition. Nutrient use efficiency was oppositely correlated to its concentration in shoot in most case.

Keywords: partial root-zone water stress; nitrogen form; nitrogen supply position; nutrient utilization; maize seedling

(上接第 82 页)

Effects of no-tillage with different corn stubble treatments on topsoil structure properties

ZHANG Wen, CONG Wei-wei, ZHAO Hong-liang, YI Ying, HOU Li-bai

(Agronomy College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: Based on no-tillage with ridge way of corn in cold, windy and sandy areas in Northeast China, through the fixed-point experiment of conservation tillage in Zhangwu County from 2003, the effects on topsoil (0 ~ 30 cm) structure properties under three different kinds of corn stubble treatments of stubble mulch(SM), stubble coverage(SC) and Elimination of stubble(ES) were studied comparatively. The results showed that the treatment of SC to improve the soil structure properties was performed obviously. On the soil layers of 0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm and 20 ~ 30 cm, > 0.25 mm water stable aggregate content and aggregate stability were $\text{SC} > \text{SM} > \text{ES}$, and they decreased with the soil depth increasing. In different soil layers, soil bulk density showed $\text{ES} > \text{SM} > \text{SC}$, soil total porosity showed $\text{SC} > \text{SM} > \text{ES}$, and it showed a decreasing trend with the deepening of topsoil. In different soil layers, the sand content of SC was less than that of SM and ES, but with topsoil getting deeper, the clay content of each treatment showed no regular change.

Keywords: no tillage; corn stubble treatment; topsoil structure; soil aggregate