

河套灌区微咸淡水交替灌溉对加工番茄根系生长的影响

郭梦吉¹ 刘宇² 任树梅^{1*} 杨培岭¹ 张钟莉莉¹ 张重¹ 夏玉红³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083;

2. 辽宁省水利厅,沈阳 110000;

3. 巴彦淖尔市水科所,内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要 为研究微咸水灌溉对加工番茄根系生长的影响,于2013—2014年连续2年在河套灌区对加工番茄进行不同生育期微咸水(矿化度3 g/L)淡水(矿化度1 g/L)交替灌溉的田间试验。结果表明:1)番茄根系的干物质量主要集中在0~20 cm的土层,在开花期进行微咸水灌溉处理,番茄的根长密度较淡水灌溉减小25%~30%,根表面积减小约20%;果期进行微咸水灌溉处理,番茄的根长密度较淡水灌溉增加22%~24%,根表面积增加20%~30%;开花期和果期都进行微咸水灌溉处理对根系总长度、根长密度和根表面积没有显著影响。2)微咸水对根系的影响主要集中体现在直径<2 mm的根系上。3)微咸水灌溉对加工番茄根系的的空间分布没有显著影响。

关键词 微咸水;滴灌;番茄;根系生长特性

中图分类号 S 275.6; S 641.2

文章编号 1007-4333(2016)02-0065-08

文献标志码 A

Effect of alternative irrigation between brackish water and fresh water on root growth of processing tomato in Hetao

GUO Meng-ji¹, LIU Yu², REN Shu-mei^{1*}, YANG Pei-ling¹, ZHANGZHONG Li-li¹,
ZHANG Chong¹, XIA Yu-hong³

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. East-to-West Water Diversion Engineering Construction Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110000, China;

3. Water Science Research Institute of Bayannaoer, Bayannaoer 015000, China)

Abstract To study the effect of brackish water irrigation on root growth of processing tomato, experiment of alternate irrigation between brackish water and fresh water was carried on a two-year (2013 – 2014) field in Hetao irrigation district. Results showed that: 1) The amount of dry matter was mainly concentrated in 0 – 20 cm soil layer. The treatment of brackish water throughout the flowering stage inhibited the root growth, while the root length density decreased by 25% – 30% and the root surface area decreased by 20%. Throughout the fruiting stage, the treatment of brackish water irrigation promoted the root development with the root length density increasing by 22% – 24% and the root surface area increasing by 20% – 30%. However, the total length of root, root length density and root surface area was not affected by the treatment of brackish water throughout the whole growth stage; 2) Main influence was reflected on roots with the diameter of less than 2 mm; 3) There was no significant effect on processing tomato's root spatial distribution under brackish water irrigation.

Keywords brackish water; drip irrigation; processing tomato; root growth

随着淡水资源供需矛盾的日益突出,开发新的灌溉水源已成为各国解决水资源危机普遍关注的问

题,因此丰富的微咸水资源越来越得到人们的重视,并且在一些国家和地区,开发利用微咸水已经成为

收稿日期:2015-03-16

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201301094)

第一作者:郭梦吉,硕士研究生,E-mail:gmjj25@163.com

通讯作者:任树梅,教授,主要从事灌溉排水理论与新技术研究,E-mail:cauren@cau.edu.cn

解决当地淡水资源不足的有效办法之一。

与淡水相比,微咸水中大量的盐分会引起作物根区土壤溶液渗透势下降,造成作物吸水困难,这不仅导致种子不能萌发或延迟发芽,而且影响作物的正常吸水,严重时会使细胞吸水收缩,导致细胞死亡^[1]。另外,土壤盐分过多,特别是易溶解的盐类(如 NaCl, Na₂SO₄ 等)过多时,对大多数植物是有害的。高浓度的 NaCl 可置换细胞膜结合的 Ca²⁺,引起膜结合的 Na⁺/Ca²⁺ 增加,膜结构破坏,功能也改变,最终导致细胞内的钾、磷和有机溶质外渗。因此需要对不同作物进行咸水灌溉研究,使咸水在能够得到利用的同时保证作物的正常生长。

根系是作物吸收水分和养分最活跃的器官,在作物的生长发育和产量形成中起着非常重要的作用^[2]。咸水和微咸水灌溉导致根区土壤盐分增加,对作物危害最直接的部位是根系^[3]。深入了解微咸水灌溉对作物根系分布的影响有助于改进作物生产方法和掌握合适的灌溉制度。研究表明咸水滴灌条件下,盐分在根区呈梯度分布,在这种盐分非均匀分布的情况下,高盐度区根系对水分和养分吸收会减少,而低盐度区根系的吸收明显增加^[4];万书勤等^[5]连续3年(2003—2005)在华北半湿润地区就滴灌条件下不同盐分浓度微咸水对番茄地下部分生长的影响进行了研究,结果表明微咸水灌溉对番茄根系整体参数没有明显的影响。Pastemak 等^[6]在以色列砂土上进行了咸水灌溉研究,发现在高频率的滴灌条件下,可用 6.2 dS/m 的咸水灌溉番茄,其各项生长指标不会受到明显的影响。Papadopoulos 等^[7]研究表明相对于地上部分,作物地下部分更加耐盐;Cuartero 等^[8]研究指出番茄根系的耐盐度阈值大约为 4~6 dS/m。同时,也有研究表明在盐分胁迫下,作物根系为满足其本身的需水要求,根冠比会有增

大的趋势^[9]。此外关于作物在不同生育期进行咸淡水轮灌的研究,结果表明当单独使用咸水灌溉时棉花作物根系发育主要受到盐分胁迫的影响;而且咸淡水轮灌条件下,棉花作物根系的发育在距离滴头 40 cm 的范围内都受到盐分胁迫的影响^[10]。

基于此,本研究拟对河套地区加工番茄进行微咸淡水轮灌处理,研究该条件下加工番茄作物根系干物质质量、根长密度、根表面积以及根系分布范围等指标,以期为我国半干旱-干旱地区微咸水滴灌技术的推广和发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2013—2014 年连续 2 年在内蒙古河套灌区巴彦淖尔市水利科学研究所曙光试验站完成。该试验区属大陆性气候,多年平均温度在 6.8℃。多年平均降雨量为 140 mm,年均光照 3 229.9 h。试验小区土壤质地主要为沙壤土,耕作层平均土壤容重约 1.58 g/cm³,田间持水量 0.22,地下水深度 1.8 m。

1.2 试验设计

本试验对加工番茄不同生育期进行微咸淡水交替灌溉处理,共设置了 3 种交替轮灌灌溉制度,1 个对照处理,共 4 个试验小区(表 1)。为了保证番茄苗的成活率,苗期统一用淡水灌溉,在成熟期不进行灌水处理,以免果实因湿度大而腐烂。滴灌可以形成有利于作物生长的水盐环境^[11],同时由于滴灌的淋洗作用,滴灌条件下的土壤含盐量明显比其他灌溉条件下的盐分含量要低^[12],因此本试验采取滴灌灌溉方式。试验所用淡水为内蒙古河套灌区曙光试验站地下水(矿化度 1 g/L),微咸水是根据内蒙古河套灌区地下水离子成分加入 NaHCO₃、KCl 和 NaCl 配置而成,总矿化度 3 g/L。

表 1 2013—2014 年加工番茄微咸水试验处理

Table 1 Treatments of brackish water on processing tomato in 2013-2014

处理 Treatment	苗期 Seeding stage	花期 Flowering stage	果期 Fruit stage	成熟期 Maturity stage
CK	淡	淡	淡	—
RI1	淡	咸	淡	—
RI2	淡	淡	咸	—
RI3	淡	咸	咸	—

番茄品种为石屯二号,采用宽垄覆膜种植,垄宽 0.9 m,垄高 0.3 m,垄长 20 m,沟心距 1.5 m。每个小区 3 垄,种植面积为 90 m²。1 垄 2 行,垄上番茄行距 0.4 m,株距 0.3 m。每行铺设 1 条滴灌带置于作物根部附近,灌水器工作流量为 1.2 L/h,灌水器间距为 0.3 m。番茄移苗前,施入腐熟的有机肥、二胺肥和磷酸二氢钾作为底肥,施肥量分别为 22.5、240 和 150 kg/hm²,2014 年仅施入二胺肥和磷酸二氢钾作为底肥。移苗后,滴灌 20 m³ 的淡水作为缓苗水。在果期初期和中期分别追施尿素 45 kg/hm² 和 22.5 kg/hm²。灌溉频率选取为 1 d,花期的灌溉定额为 2 mm,果期的灌溉定额为 3 mm。其中:2013 年花期 29 d,果期 43 d,灌水定额为 187 mm;2014 年花期 23 d,果期 31 d,灌水定额 149 mm。

试验测定内容为番茄地下部分根干物质量、根长密度、根表面积和根平均直径,测试方法如下:

1)在番茄开花与坐果末期,分别在 4 个处理中各自选取 3 株番茄,取整根冲洗后烘干,称取干物质量精确至 0.01 g。

2)在番茄的生育期末分别在 4 个处理中各选择有代表性的番茄 1 株,用根钻(内径为 9 cm,高度 10 cm,体积 635.85 cm³)取根,其中取样位置分别为水平方向距离主根 0、20、50 cm,深度分别为 0~10、10~20、20~40 和 40~60 cm。

3)用 EPSON EXPRESSION 1680 型扫描仪对

根样进行扫描,扫描仪的分辨率设为 400dpi。扫描时为使根样的分枝不互相缠绕,将根样放入透明的托盘中,并注入 3~5 mm 深的水,用镊子取根于扫描盘上,并整齐排列。

4)扫描好的 TIF 文件用 WinRHIZO 根系分析软件分析计算得到根系的长度、表面积和平均直径等形态特征参数值。WinRHIZO 是一套专业根系分析系统,采用非统计学方法测量计算出交叉重叠部分根系长度参量^[13],用于分析根系特征参数值。

5)根系相关参数值采用 SPSS17.0 进行分析处理。

2 试验结果与分析

作物根区土壤过量盐分的存在会降低土壤溶液的渗透势,致使作物根系吸水困难,影响养分的吸收和根系的生长,并引起根系以及地上部分胜利和形态上的变化。因此了解微咸水滴灌条件下作物根系的分布规律,有助于解释作物生长发育的变化机理^[5]。

2.1 不同处理对番茄根系干物质量的影响

根系生物量是根系发育程度的重要指标,其大小表征作物对水分的吸收能力和抗逆能力^[14]。2013 年本试验中不同处理对番茄根系干物质量在花期末期和果期末期均有显著影响(表 2),其中在花期采用微咸水灌溉处理的 RI1 和 RI3 的根系干物

表 2 不同处理番茄根系干物质量

Table 2 The amount of tomato's dry matter of different treatment g

年份 Year	处理 Treatment	开花期末期 The end of flowering stage	坐果期末期 The end of fruit stage
2013	CK	6.12 a	10.9 bc
	RI1	4.18 b	10.2 c
	RI2	6.39 a	12.1 a
	RI3	4.86 b	11.9 ab
2014	CK	5.88 a	9.9 b
	RI1	3.96 b	10.1 b
	RI2	6.01 a	12.1 a
	RI3	4.26 b	11.7 a

注:同列数据相同字母表示在 0.05 水平上无显著差异。

Note: Values followed by the same letters in each column are not significantly different at 0.05 level from each other.

质量在花期末期分别较淡水处理减小 31.7% 和 20.6%;在果期进行交替灌溉处理之后,RI2 处理根系在果期末期达到最大值 12.1 g,且比全生育期采用淡水灌溉处理的根系重 1.2 g,RI1 处理根系干物质质量最小,为 10.2 g,RI3 处理结果与全生育期采用淡水处理结果无显著差异。

2014 年,不同处理对番茄根系干物质的影响规律较 2013 年类似,但不同处理根系干物质均小于 2013 年同期干物质(降低 5%~10%),这可能是受到番茄重茬种植的影响(表 2)。

2.2 不同处理对整根特征参数的影响

根长、根表面积和平均直径是表征整根生理特性的重要指标参数。表 3 为 2013—2014 年不同处

理的整根特征参数,可见不同处理对根系的平均直径影响不显著,但各个处理间的根长以及根表面积差异较为显著。其中 RI1 处理较 CK 处理根长降低 27%,根表面积降低 20%。RI2 处理的整体参数明显大于 CK 处理,其中根长增加 23%,根表面积增加 29%。RI3 处理对根系整根的各项参数影响不大,与正常灌溉处理之间的差异不显著。2014 年不同处理之间的分布规律与 2013 年类似,但是由于受到重茬种植的影响,除平均直径外,其他整根的各项参数都有所降低(表 3)。2014 年根系的直径较 2013 年并没有显著的降低,这可能是由于 2014 年土壤积盐情况比 2013 年严重,而根系在盐胁迫下,会向着短粗的方向发展。

表 3 不同处理整根特征参数

Table 3 Root characteristic parameters of different treatment

年份 Year	处理 Treatment	总根长/cm Root length	总根表面积/cm ² Root surface area	平均直径/mm Average diameter
2013	CK	2 150.51	451.63	0.64
	RI1	1 569.21	363.66	0.62
	RI2	2 626.95	581.09	0.64
	RI3	2 185.23	465.51	0.65
2014	CK	1 835.14	425.98	0.61
	RI1	1 360.71	347.04	0.64
	RI2	2 404.03	516.51	0.66
	RI3	2 090.15	451.05	0.62

番茄进入坐果期后需水量大幅度提高,坐果期根系生长发育的情况将影响到番茄的最终产量。试验结果表明在开花期进行微咸水灌溉抑制了番茄根的正常生长,即使在坐果期改用淡水灌溉,也无法使番茄根系恢复正常发育,最终导致根系在生育期末整体较小;而在坐果期进行微咸水灌溉能有促进番茄根系生长的作用,因此根系在生育期末整体较大。花期和果期都进行微咸水灌溉处理对番茄整根参数的影响不显著,表明开花期灌溉微咸水对根系生长产生的负面影响,可通过在坐果期继续灌溉微咸水得到缓解。

图 1 为 2013 年不同处理不同直径分级下的根系特征参数。从图 1(a)可以看出,较 CK 处理,

RI1、RI2 和 RI3 处理中直径 >1 mm 的根系根长分别降低 7%,升高 4%,升高 1%,处理之间差异不显著。对于直径 <1 mm 的根系,RI1 处理根长降低 33%,RI2 升高 30%,RI3 升高 13%,该结果表明微咸水处理主要是影响了直径 ≤1 mm 的根系长度,而直径 >1 mm 的根系长度没有显著变化。从图 1(b)中可以看出,不同处理引起根表面积的变化主要体现在对直径 ≤2 mm 的根系影响上,3 个处理根表面积分别降低 27%、升高 42%、升高 19%,>2 mm 的根系表面积 3 个处理间差异不显著。2014 年试验结果同样表明微咸水灌溉对番茄根系的影响主要表现在细小(直径 ≤2 mm)的根系上(图 2)。

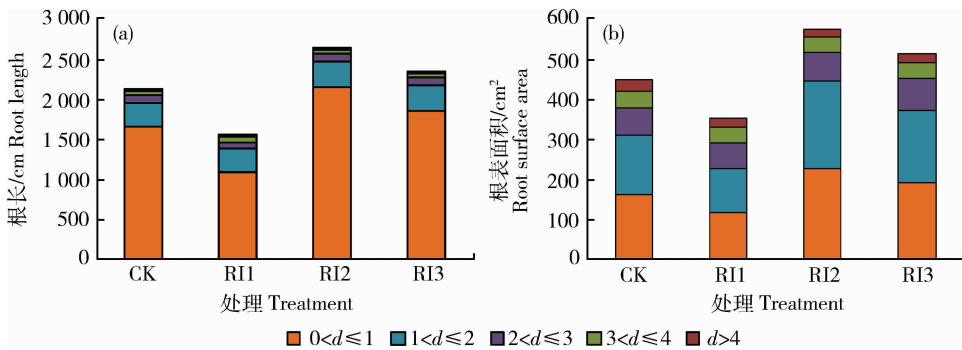


图 1 2013 年不同直径 d 分级根长 (a) 和根表面积 (b) 的变化

Fig. 1 Root characteristic parameters of different diameter classes in 2013

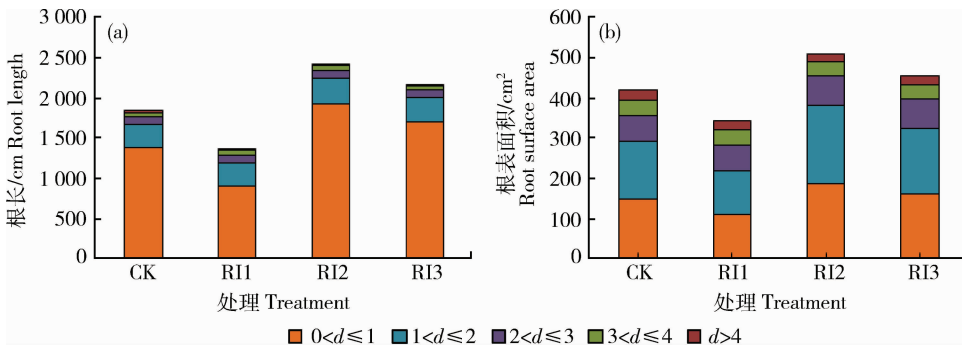


图 2 2014 年不同直径 d 分级根长 (a) 和根表面积 (b) 的变化

Fig. 2 Root characteristic parameters of different diameter classes in 2014

2.3 不同处理对根长密度的影响

2.3.1 根长密度的垂直分布

根长密度是指单位体积土壤中的根量,是反映根系空间变化的重要参数,也是反映作物水肥吸收能力的重要指标。图 3(a)给出了 2013 年番茄整个根系根长密度随着深度的变化情况。可以看出,番茄根系集中在 0~60 cm 土层,且随着深度增加根密度快速递减,这与 Bar-Yosef 等^[15]和 Oliveira^[16]的结论相同。不同处理之间,番茄的根密度变化趋势变化不大,主要根密度都是集中在 0~20 cm 的土层中。但是各土层根密度所占比例有所不同。0~10 cm 的土层中,CK 和 RI3 处理根密度占各层根密度总和的比重接近,分别为 54%和 56%。RI1 处理所占比例较高为 63%,RI2 处理最低为 46%。造成这种差异的原因可能是由于花期番茄根系下扎不深,用淡水灌溉,表层土壤水分充足,根系能够吸收土壤表层土壤水分;用咸水灌溉,一方面咸水带入的 K⁺促进了根系的生长,另一方面咸水提高了表层土壤的水势,使根系从表层土壤吸水变得困难,根系需向下生长吸收深层土壤水分。整体上,RI2 处理的

根长密度最大,说明花期淡水灌溉果期咸水灌溉可以使番茄根系壮大。RI3 处理与 CK 处理差别不显著,说明花期和果期同时进行咸水灌溉对番茄根系无显著影响。2014 年不同处理条件下番茄根长密度在土壤中的分布规律与 2013 年类似(图 3(b))。

对土壤深度与番茄根系根长密度的关系进行回归分析,得到在微咸水滴灌条件下加工番茄根系根长密度在 0~80 cm 深的土壤中随深度变化的模型(土层深度≥80 cm 的范围内基本没有根系,根长密度取 0 cm/cm³):

$$r = Ax^2 + Bx + C$$

式中: r 为根长密度,cm/cm³; x 为土壤深度,cm; A , B , C 为模拟参数(表 4)。由拟合结果可以看出,番茄根系根长密度根土壤深度之间存在拟合度较高的 2 次函数关系。随着土壤深度的增加番茄的根长密度逐渐降低,降低速度逐渐变慢,在 80 cm 的土层处根系密度趋近于 0。根长密度在 0~30 cm 深度内下降速度最快,由约 1.2 降低到约 0.18 cm/cm³,30~60 cm 的土层内根长密度变化缓慢,由约 0.18 降低到约 0.02 cm/cm³。

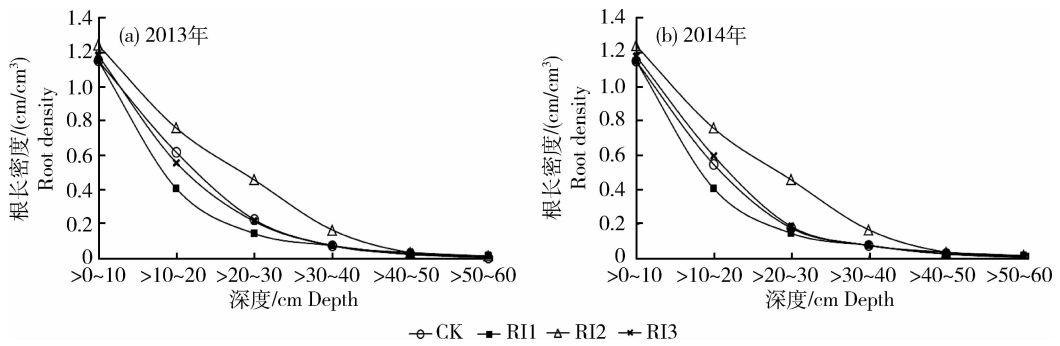


图3 不同处理根长密度垂直分布

Fig. 3 Distribution of root density along with the depth of different treatments

表4 根长密度模型模拟参数

Table 4 Parameters of plants root density model

年份 Year	处理 Treatment	模拟参数 Parameter			
		A	B	C	R
2013	CK	0.069 8	-0.706 5	1.767 0	0.993 5
	RI1	0.080 2	-0.757 2	1.741 0	0.953 7
	RI2	0.053 2	-0.616 8	1.800 0	0.998 6
	RI3	0.075 0	-0.739 3	1.800 0	0.986 2
2014	CK	0.073 7	-0.718 5	1.74 9	0.983 4
	RI1	0.072 2	-0.686 6	1.59 5	0.954 3
	RI2	0.055 9	-0.619 5	1.73 9	0.965 2
	RI3	0.073 9	-0.725 2	1.74 2	0.976 2

2.3.2 根长密度的空间分布

滴灌作物的根系主要集中在滴管带下^[17],根据2013年番茄根长密度在土体中的分布情况(表5),研究发现微咸水滴灌条件下番茄的根系空间分布并未受到影响,根系仍比较庞大,各处理之间差异不显著。垂直方向上根系主要集中在0~20 cm的表层土壤中,占根系总根长密度的60%~80%,水平方向上根系主要集中在离滴头20 cm的范围内,占根系总根长密度的80%~90%。已有研究表明,滴灌方式下作物根系的分布较广^[18],本试验同样发现在80 cm深和距离滴头50 cm远处仍有根系的存在,但都是比较细小的根系。2014年根长密度的空间分布同2013年类似,但80%左右的根都集中在0~20 cm的表层土壤中,水平方向上大约有80%的根系集中在距离滴头15 cm处的土壤中(数据略)。

3 结论

通过河套灌区加工番茄微咸水淡水轮灌试验,研究了不同生育期微咸水灌溉对于番茄根系的影响,得到以下结论:

1)花期和果期同时进行微咸水灌溉处理对加工番茄根系影响不显著,但是在不同的生育期进行微咸水灌溉处理对番茄根系生长特性有显著的影响。花期进行微咸水灌溉处理抑制了根系的生长,较淡水灌溉,根干物质质量降低约7%,根长密度降低25%~35%,根表面积降低约20%。果期进行微咸水灌溉处理促进了根系的生长,较淡水灌溉,根干物质质量增加约10%,根长密度增加22%~24%,根表面积增加20%~30%。

2)微咸水滴灌对番茄根系的影响主要体现在细小的根系(直径<2 mm)上。

表5 2013年番茄生育期末不同处理根长密度分布
Table 5 Root length density distributions of different treatments in the late growing period of tomatoes in 2013

处理 Treatment	深度/cm Depth	根长密度分布比例/% The proportion of root length density distribution			
		L=0 cm	L=20 cm	L=35 cm	L=50 cm
CK	0~20	13	60	5	0
	>20~40	10	6	1	1
	>40~60	2	1	0	0
	>60~80	1	0	0	0
RI1	0~20	14	52	13	1
	>20~40	9	2	1	1
	>40~60	2	4	0	0
	>60~80	1	0	0	0
RI2	0~20	11	43	2	1
	>20~40	14	10	3	0
	>40~60	4	8	1	0
	>60~80	2	1	0	0
RI3	0~20	9	50	4	2
	>20~40	9	7	2	0
	>40~60	6	4	3	0
	>60~80	2	1	1	0

注:L为测点与滴头的水平距离,cm。

Note:L,the horizontal distance from emitter,cm.

3)微咸水滴灌条件下番茄根系空间分布未受到显著性影响,粗大的主根主要分布在距离滴头20 cm处0~20 cm的表层土壤中,但在60~80 cm深和距离滴头50 cm处的土壤中仍有比较细小的根系。

参 考 文 献

- [1] West D W, Hoffman G J, Fisher M J. Photosynthesis, leaf conductance, and water relations of cowpea under saline conditions[J]. *Irrigation Science*, 1986, 7(3): 183-193
- [2] 梁宗锁,康绍忠,石培泽,潘英华,何立绩. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益[J]. 中国农业科学, 2000, 33(6): 26-32
- Liang Z S, Kang S Z, Shi P Z, Pan Y H, He L J. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,

- 2000, 33(6): 26-32 (in Chinese)
- [3] Bates T R, Lynch J P. Stimulation of root hair elongation in *Arabidopsis thaliana* by low phosphorus availability[J]. *Plant Cell and Environment*, 1996, 19(5): 529-538
- [4] Flores P, Carvajal M, Cerdá A, Martínez ACV. Salinity and ammonium/nitrate interactions on tomato plant development, nutrition, and metabolites [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, 24(10): 1561-1573
- [5] 万书勤,康跃虎,王丹,刘士平. 华北半湿润地区微咸水滴灌对番茄生长和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 30-35
- Wan S Q, Kang Y H, Wang D, Liu S P. Effect of saline water on tomato growth and yield by drip irrigation in semi-humid regions of north China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(8): 30-35 (in Chinese)
- [6] Pasternak D, Malach Y D. Irrigation with brackish water under desert conditions X. Irrigation management of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mills) on desert sand dunes [J]. *Agricultural Water Management*, 1995, 28(2): 121-132

- [7] Papadopoulos I, Rendig V V. Tomato plant response to soil salinity[J]. *Agronomy Journal*, 1983, 75(4):696-700
- [8] Cuartero J, Fernández-Muñoz R. Tomato and salinity [J]. *Scientia Horticulturae*, 1999, 78(1):83-125
- [9] Chauhan R P S, Singh S P, Ram S. Effect of saline water on okra (*Hibiscus esculentus*) and potato (*Solanum tuberosum*) and properties of soil [J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 1990, 60(5):350-353
- [10] 郑九华, 冯永军, 于开芹, 王兆峰, 袁秀杰. 秸秆覆盖条件下微咸水灌溉棉花试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4):26-31
Zheng J H, Feng Y J, Yu K Q, Wang Z F, Yuan X J. Irrigation with brackish water under straw mulching[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(4):26-31 (in Chinese)
- [11] 王全九, 徐益敏, 王金栋, 王永平, 蒋清华. 咸水与微咸水在农业灌溉中的应用[J]. 灌溉排水, 2002, 21(4):73-77
Wang Q J, Xu Y M, Wang J D, Wang Y P, Jiang Q H. Application of saline and slight saline water for farmland irrigation[J]. *Irrigation and Drainage*, 2002, (21)4:73-74 (in Chinese)
- [12] Phene C J, Davis K R, Hutmacher R B, Hutmacher B, Bar-yosef, Meek D W, Misaki J. Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn [J]. *Irrigation Science*, 1990, (12):135-140
- [13] 郑纯辉, 康跃虎, 姚素梅, 颜长珍, 孙泽强. 基于地理信息系统的植物根系分析方法[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1):181-183.
Zheng C H, Kang Y H, Yao S M, Yan C Z, Sun Z Q. Method of root analysis using GIS technology [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1):181-183 (in Chinese)
- [14] 方志刚, 马富裕, 崔静, 郑重, 冯胜利, 王冀川. 加工番茄膜下滴灌根系分布规律的研究[J]. 新疆农业科学, 2008, 45(1):15-20
Fang Z G, Ma F Y, Cui J, Zheng C, Feng S L, Wang J C. A study on root system distribution of processing tomato under film drip irrigation [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2008, 45(1):15-20 (in Chinese)
- [15] Bar-Yosef B, Stammers C, Sagiv B. Growth of trickle-irrigated tomato as related to rooting volume and uptake of N and water [J]. *Agronomy Journal*, 1980, 72(5):815-822
- [16] Oliveira M R G, Calado A M. Tomato root distribution under drip irrigation [J]. *Journal of The American Society for Horticulture*, 1996, 121(4):644-648
- [17] Kadouri F, Gaihbe A, Abdel G G, Arslan A. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999-2002) [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1-2):39-53
- [18] Flowers T J, Malash N, Arslan A, Cuartero J, Ragab R, Abdel G G. Sustainable strategies for irrigation in salt-prone Mediterranean: ALTMED [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1):3-14

责任编辑: 刘迎春