

不同生育期水分亏缺和施氮量对茄子根系生长、产量及水分利用效率的影响

杨振宇^{a,b}, 张富仓^a, 邹志荣^b

(西北农林科技大学 a 旱区农业水土工程教育部重点实验室, b 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】研究 3 个不同生育期水分亏缺和施氮量对茄子根系生长、空间分布及产量和水分利用效率的影响。【方法】利用盆栽试验,设置低氮(N_1 , 0.1 g/kg)、中氮(N_2 , 0.3 g/kg)、高氮(N_3 , 0.5 g/kg) 3 个施氮水平,分别在茄子开花坐果期、初果期、盛果期 3 个不同生育期进行水分亏缺处理,以不亏水处理为对照(CK),共 12 个处理,对不同生育期水、氮处理茄子的总根长、总根干质量和鲜质量、产量及水分利用效率进行测定,并建立相应的水分生产函数。【结果】在施氮量相同的情况下,与不亏水处理相比,盛果期水分亏缺 N_1 、 N_2 和 N_3 处理对总根长和总根干质量影响显著,其中茄子总根长较对照分别降低了 12.39%, 18.82% 和 15.29%, 总根干质量分别下降了 42.31%, 33.46% 和 25.42%。与对照相比,开花坐果期、初果期、盛果期水分亏缺处理茄子的总根鲜质量在 N_1 处理下分别较对照降低了 21.86%, 9.35% 和 39.03%; N_2 处理下,分别降低了 2.7%, 14.99% 和 48.23%; N_3 处理下,分别降低了 41.1%, 3.7% 和 35.07%。与对照相比,开花坐果期、初果期、盛果期水分亏缺处理茄子的产量在 N_1 处理下,分别较对照降低了 6.13%, 10.84% 和 14.64%; N_2 处理下,分别降低了 3.94%, 5.62% 和 11.6%; N_3 处理下,分别降低了 11.35%, 4.23% 和 16.14%。随着施氮量的增加,所有处理总根长、总根干质量、鲜质量和产量均呈现先上升后下降的趋势。在低氮和中氮条件下,开花坐果期水分亏缺处理既获得了较高的产量,也实现了较高的水分利用效率。茄子根系干质量在垂直方向上呈对数递减趋势;盛果期水分亏缺对各层根系分布的影响最大;随着施氮量的增加,根系分布呈现高氮浅根化趋势。在 N_1 和 N_2 处理下,水分敏感指数在盛果期最大,其次是初果期和开花坐果期;在 N_3 处理下,各水分敏感指数的大小顺序依次为盛果期>开花坐果期>初果期。【结论】茄子对盛果期的水分亏缺最为敏感,该时期亏水不仅限制了根系的生长和空间分布,而且降低了茄子的产量;在低氮和中氮条件下,开花坐果期的水分亏缺对茄子根系生长发育、产量的影响较小,而且获得了较高的水分利用效率。与低氮和高氮相比,中等施氮水平有利于茄子根系的生长及产量和水分利用效率的提高。

【关键词】 茄子;生育期亏缺灌溉;根质量;根长;根系质量空间分布;水分生产效率;水分生产函数

【中图分类号】 S275;S158.3

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)07-0141-08

Coupling effects of deficit irrigation (DI) in different growth stages and different nitrogen applications on the root growth, yield, WUE of eggplant

YANG Zhen-yu^{a,b}, ZHANG Fu-cang^a, ZOU Zhi-rong^b

(a Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education;

b College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This research was to explore the coupling effects of deficit irrigation at different growth stages and different nitrogen fertilizer applications on root growth, spatial distribution, yield and

* [收稿日期] 2010-01-05

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50879073);国家科技支撑计划项目(2007BAD88B10)

[作者简介] 杨振宇(1983—),男,山西忻州人,在读硕士,主要从事温室节水灌溉理论与技术研究。E-mail: baby8410@yahoo. cn

[通信作者] 张富仓(1962—),男,陕西武功人,教授,博士,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。

E-mail: zhangfc@nwsuaf. edu. cn

WUE of eggplant. 【Method】 Four irrigation modes were designed as T_1 (DI in blossom and fruit-set period), T_2 (DI in the first fruit period), T_3 (DI in the full bearing period and CK (Normal irrigation) with three N application levels, N_1 (0.1 g/kg), N_2 (0.3 g/kg), N_3 (0.5 g/kg), through which root length, root volume, root fresh weight, root dry weight, yield and water use efficiency were studied and water production function was built. 【Result】 Compared with CK, under the same application amount of nitrogen fertilizer, treatments of DI at the full bearing period were significantly influenced and the total root length decreased 12.39%, 18.82%, 15.29% respectively and the total root dry weight decreased 42.31%, 33.46%, 25.42% respectively. Compared with CK, treatments of DI at blossom and fruit-set period, the first fruit period, and full bearing period were significantly influenced and under N_1 condition, the root fresh weight decreased 21.86%, 9.35%, 39.03%; under N_2 condition, it decreased 2.7%, 14.99%, 48.23%; under N_3 condition, it decreased 41.1%, 3.7%, 35.07% respectively. Compared with CK, the yield of treatments of DI at blossom and fruit-set period, the first fruit period, and full bearing period were significantly influenced and under N_1 condition, the yield decreased 6.13%, 10.84%, 14.64%; under N_2 condition, it decreased 3.94%, 5.62%, 11.6%; under N_3 condition, it decreased 11.35%, 4.23%, 16.14% respectively. With the increase of nitrogen fertilizer application, root length, root dry weight, fresh weight and the yield of all treatments rose steadily and reached the peak at middle nitrogen fertilizer application level and with the further increase of nitrogen application, data of all treatments began to fall down. At N_1 and N_2 levels, treatments of DI at blossom and fruit-set period obtained high WUE on the basis of high yield. Root weight logarithmically reduced in the vertical direction of soil layers. With the increase of nitrogen fertilizer application, root inclined to distribute in shallow soil layers. Under N_1 and N_2 levels, water sensitivity index of DI in the full bearing period was the highest, followed by treatments of DI in the first fruit period and DI in blossom and fruit-set period, while under high nitrogen application level, water sensitivity index of DI in the first fruit period increased remarkably. 【Conclusion】 The eggplant was most sensitive to deficit irrigation at the full bearing period, which not only restrained root growth and spatial distribution, but also significantly reduced the yield. At low and middle nitrogen fertilizer application level, treatments of DI at blossom and fruit-set period were lightly affected by DI and finally, high WUE was obtained on the basis of high yield. Moderate nitrogen level positively affected root growth, the yield and WUE of eggplant.

Key words: eggplant; deficit irrigation at different growth periods; root weight; root length; root weight spatial distribution; water use efficiency; crop water production function

水分和养分是制约植物生长发育和作物产量的重要因素。我国蔬菜生产基本上还处于追求产量的阶段,农民依靠水分和肥料的大量投入来获得较高的产量,这不仅导致水肥利用率下降,而且极易引起土壤环境恶化^[1-2]。另外,我国的人均水资源占有率较低,而蔬菜又是水分投入较大的作物,因此蔬菜的节水灌溉成为农业节水的重要组成部分。国内外科研人员对此进行了大量研究,已明确了不同的灌水量、灌溉方式、肥料种类、施肥量、施用时期对作物生长发育、生理活性、产量和品质及水分利用效率的影响,并建立了针对不同种类作物的水肥耦合模型^[3-10]。但是,关于不同生育期水分亏缺和施肥对作物生长和生理指标影响的研究尚处于起步阶段^[11-12]。此外,作物对水分和养分的吸收主要依赖

于根系,其数量及空间分布特征直接或间接地影响着植株地上部分的生长发育和产量的高低。为此,本研究以茄子为试验材料,在盆栽条件下,研究了不同生育期水分亏缺和不同的氮肥施用量,对茄子根系形态和空间分布、产量及水分利用效率的影响,以期通过调控水、氮状态来控制茄子根系的生长发育和空间分布,提高茄子的产量和水分利用效率,为茄子的高效节水栽培提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试作物为陕西绿茄子。供试土壤为西北农林科技大学灌溉试验站的耕层土壤(楼土)。将经过自然风干和过筛(3 mm)的土壤按照 1.35 g/cm³ 的

体积质量装入内径 30 cm、高 30 cm 的盆中,盆底铺有细砂且均匀分布有 6 个小孔,以保持良好的通气条件。供试土壤的基本理化参数为:pH 8.14,有机质含量 6.08 g/kg,全氮 0.89 g/kg,全磷 0.72 g/kg,全钾 13.8 g/kg,碱解氮 55.93 g/kg,速效磷 8.18 g/kg,速效钾 102.30 g/kg,田间持水量 24%。播前将盆内土壤灌水至田间持水量,于 05-17 定植,每盆 1 株。

1.2 试验设计

试验于 2009-05-17—09-14 在教育部旱区农业重点实验室西北农林科技大学灌溉试验站进行。试验设置不同生育期水分亏缺和氮肥施用量 2 个因素。不同生育期水分亏缺设开花坐果期亏水(T_1 ,从定植后 20 d 开始亏水,持续 19 d,然后恢复正常)、初果期亏水(T_2 ,从定植后 39 d 开始亏水,持续 32 d,其他时间正常灌水)、盛果期亏水(T_3 ,从播种后 70 d 开始亏水,持续 50 d,其他时间正常灌水),以全生育期不亏水作为对照(CK)。亏水与不亏水以土壤含水量占田间持水量的百分数来衡量,即不亏水时的土壤含水量为田间持水量的 85%~70%,亏水时的土壤含水量为田间持水量的 70%~55%。施氮水平设低氮(N_1 ,0.1 g/kg)、中氮(N_2 ,0.3 g/kg)、高氮(N_3 ,0.5 g/kg)3 个水平。供试氮肥用尿素,磷钾肥用磷酸二氢钾,所有肥料与土壤混匀一次性施入。试验共设 12 个处理,每个处理重复 3 次,随机排列,共 36 盆。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根鲜质量、干质量 分别于开花坐果期、初果期、盛果期每处理取 3 盆用于茄子根鲜质量和干质量的测定。根样的采集用冲根法进行,即将塑料皮管一头接自来水,一头沿着待取样的盆钵盆壁进行冲洗,利用水压冲去泥垢,最终完整地整盆植株取出;继续用自来水冲洗 10 min 左右,将剩余的泥土冲洗干净。冲洗过程中应避免水压过大而对根造成损伤。将取出的根用吸水纸擦干后,直接称其鲜质量;然后将根样放入烘箱中,在 105 ℃下杀青 1 h,75 ℃烘干至质量恒定后称其干质量。

1.3.2 根系长度 取出根系后,用 Epson 扫描仪对根样品进行扫描,扫描仪的分辨率设置为 400 bpi,扫描时为避免根样的分支互相缠绕,可将根放入一透明的托盘内,并加入 3~5 mL 水,最后将扫描出的图像用 WinRHIZO 根系软件进行分析,得到总根长。

1.3.3 根系质量空间分布 将得到的根样平放在

棉布上,以每 5 cm 为 1 层进行分层,然后测定各层根样的鲜质量和干质量。

1.3.4 产量 待茄子成熟后,各盆单独收获,以 3 次重复产量的平均值作为该处理的实际产量。

1.3.5 水分利用效率 作物水分利用效率是单位水量消耗所生产的产品的数量,其计算公式为:

$$WUE=Y/ET。$$

式中: WUE 为水分利用效率(kg/m^3); Y 代表茄子单位面积产量(kg/hm^2); ET 为茄子生育期单位面积的耗水量(m^3/hm^2)。

2 结果与分析

2.1 不同生育期水分亏缺和施氮量对茄子根系生长的影响

由表 1 可以看出,不同生育期水分亏缺和施氮对茄子总根长有一定的影响。在任何施氮水平下,与不亏水处理(CK)相比较,开花坐果期水分亏缺对总根长没有显著影响;初果期水分亏缺的 N_1 、 N_2 处理对总根长的影响不显著,但 N_3 处理总根长显著大于 CK;盛果期的水分亏缺对总根长有明显的抑制作用,其 N_1 、 N_2 和 N_3 处理的总根长较对照分别降低了 12.39%,18.82%和 15.29%。不论是全生育期不亏水处理,还是在开花坐果期、初果期、盛果期进行亏水的处理,随着氮肥施用量的增加,其总根长均呈现先增大后减小的趋势,表现为 $N_2 > N_1 > N_3$ 。

不同生育期水分亏缺和施氮对总根干质量的影响与对总根长的影响相似,尤其以盛果期水分亏缺对总根干质量的影响最为显著,其次是初果期和开花坐果期水分亏缺的处理。与对照相比,盛果期水分亏缺的 N_1 、 N_2 和 N_3 处理,总根干质量分别下降了 42.31%,33.46%和 25.42%。随着施氮量的增加,总根干质量也呈先增大后减小的趋势。

与总根长和总根干质量不同的是,不同生育期水分亏缺和施氮对总根鲜质量均有一定影响。与对照相比,开花坐果期、初果期、盛果期水分亏缺处理茄子的总根鲜质量均有不同程度下降, N_1 处理分别降低了 21.86%,9.35%和 39.03%; N_2 处理分别降低了 2.7%,14.99%和 48.23%; N_3 处理分别降低了 41.1%,3.7%和 35.07%,可知盛果期水分亏缺处理的降低幅度最大。施氮对总根鲜质量的影响与对总根长和总根干质量的影响类似,也表现为 $N_2 > N_1 > N_3$ 。

表 1 不同生育期水分亏缺和施氮处理对茄子根系生长的影响

Table 1 Effect of water deficit at different growth stages and nitrogen fertilizer on root parameters of eggplant				
水分处理 Water deficit treatment	施氮水平 Nitrogen fertilizer level	总根长/cm Total root length	总根鲜质量/g Total root fresh weight	总根干质量/g Total root dry weight
全生育期不亏水 CK	N ₁	4 163.32 b	82.70 b	9.95 ab
	N ₂	5 136.35 a	107.06 a	10.37 a
	N ₃	2 490.17 ef	57.37 d	5.90 e
开花坐果期亏水(T ₁) Deficit at blossom and fruit-set period	N ₁	3 719.76 bc	64.62 cd	7.01 de
	N ₂	5 573.86 a	104.17 a	11.04 a
	N ₃	2 866.31 de	33.79 e	4.44 f
初果期亏水(T ₂) Deficit at the first fruit period	N ₁	4 149.45 b	74.97 bc	7.65 cd
	N ₂	4 898.07 a	91.01 ab	8.94 bc
	N ₃	3 390.22 cd	55.25 d	6.41 de
盛果期亏水(T ₃) Deficit at blooming fruit period	N ₁	3 647.55 bc	50.42 de	5.74 ef
	N ₂	4 169.70 b	55.43 d	6.90 de
	N ₃	2 109.31 f	35.95 e	4.40 f

注:同列数据后标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。表 3 同。

Note: Different small letters in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level. The same as table 3.

从表 2 的显著性检验结果可知,水分和施氮处理对生育期结束时总根长和总根鲜质量的影响均达到了极显著水平,水氮互作的影响达到了显著水平;施氮处理对生育期结束时总根干质量的影响达到极显著水平,水分处理和水氮互作对其影响不显著。

表 2 不同生育期水分亏缺和施氮处理对茄子根系生长影响的显著性检验

Table 2 Significance test for root parameters of eggplant under water deficit at different growth stages and nitrogen fertilizer applications			
方差来源 Source	总根长 Total root length	总根鲜质量 Total root fresh weight	总根干质量 Total root dry weight
水分亏缺 Water deficit	8.156**	23.235**	3.294
施氮水平 Nitrogen level	95.065**	67.764**	24.768**
水分亏缺×氮肥 Water deficit×Nitrogen level	2.779*	4.462*	2.271

注:*表示影响显著($P<0.05$);**表示影响极显著($P<0.01$)。表 4 同。

Note:* Means $P<0.05$; ** Means $P<0.01$. The same as table 4.

2.2 不同生育期水分亏缺和施氮量对茄子根系质量空间分布的影响

图 1 结果表明,无论是全生育期正常灌水处理还是在开花坐果期、初果期、盛果期进行水分亏缺的处理,随着土壤垂直深度的增加,茄子根系质量均呈现对数递减分布,各处理的相关系数 R^2 均达到了 0.92 以上。根系主要分布在 0~20 cm 土层,其根干质量占总根干质量的 81.7%~98.74%,而在 20 cm 以下的土层中,根干质量迅速减小。

由图 1 还可以看出,在同一施氮条件下,与全生育期正常供水相比,生育期内的水分亏缺对各土层根干质量分布均有一定的影响,其中以盛果期水分亏缺处理的影响最为明显,其各土层根干质量均低于对照处理。进一步分析可知,在低氮和中氮条件下,水分亏缺的时间越早,20 cm 以下土层根干质量占总根干质量的比例越大;在高氮条件下,水分亏缺进行得越早,20 cm 以下土层的根干质量占总根干质量的比例越小。随着施氮量的增加,所有处理 0~20 cm 土层根干质量占总根干质量的比例均显著提

高,20 cm 以下土层中的根干质量占总根干质量的比例均显著下降,出现高氮营养浅根化的趋势。CKN₃、T₁N₃、T₂N₃、T₃N₃ 处理在 25~30 cm 处几乎观察不到根系的存在。

2.3 不同生育期水分亏缺和施氮量对茄子产量及水分利用效率的影响

由表 3 可知,在同一施氮水平下,与对照相比,开花坐果期、初果期、盛果期水分亏缺处理茄子的产量均有不同程度减少,N₁ 处理分别下降了 6.13%,10.84%和 14.64%;N₂ 处理分别下降了 3.94%,5.62%和 11.6%,N₃ 处理分别下降了 11.35%,4.23%和 16.14%,其中以盛果期水分亏缺处理的产量降幅最大,其次是初果期和开花坐果期。CKN₂ 的平均产量最高,达 73.65 t/hm²。另外,在 3 种水分亏缺处理中,开花坐果期水分亏缺处理的产量也较高,其中 N₂ 处理的平均产量最高,达到 70.75 t/hm²。在低氮和中氮条件下,水分亏缺的时期越早,对产量的影响越小;在高氮条件下,盛果期水分亏缺处理的产量最低。随着施氮量的增加,无论是

生育期正常灌水还是水分亏缺的处理,茄子的产量均表现出先上升后下降的趋势。

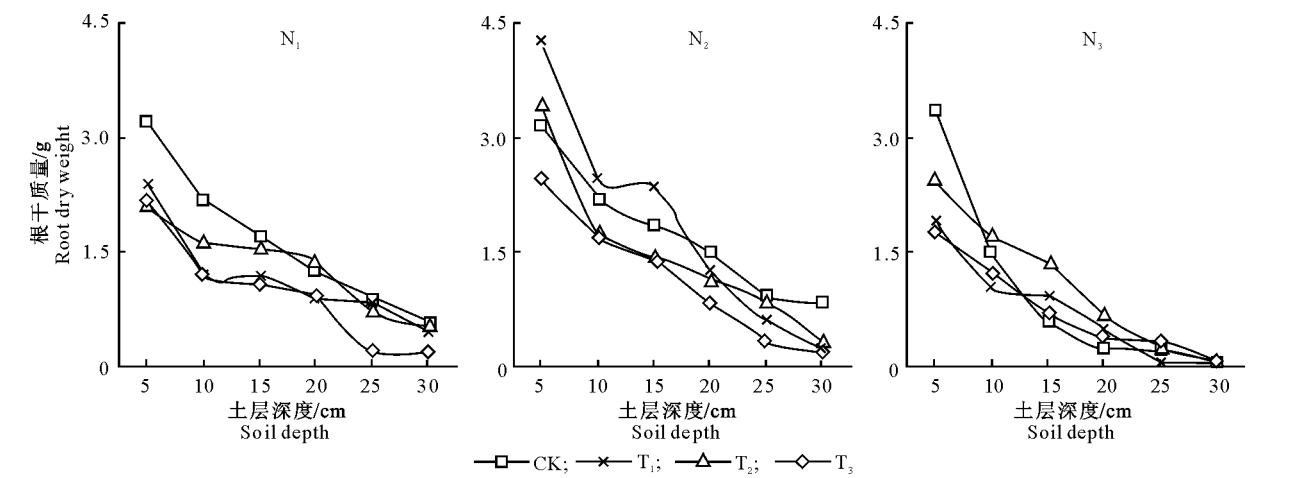


图 1 不同施氮条件下各生育期水分亏缺对茄子根系质量空间分布的影响

Fig. 1 Effect of water deficit at different growth stages and different nitrogen applications on root dry weight spatial distribution of eggplant

表 3 不同生育期水分亏缺和施氮量对茄子产量及水分利用效率的影响

水分处理 Water deficit treatment	施氮水平 Nitrogen fertilizer level	全生育期耗水量/(m ³ ·hm ⁻²) Water consumption	产量/(t·hm ⁻²) Yield	水分利用效率/(kg·m ⁻³) Water use efficiency
全生育期不亏水 CK	N ₁	2 922.86	70.29 ab	24.05 abc
	N ₂	2 947.71	73.65 a	24.99 a
	N ₃	3 014.14	64.24 de	21.31 d
开花坐果期亏水(T ₁) Deficit at blossom and fruit-set period	N ₁	2 827.71	65.98 bcd	23.33 bc
	N ₂	2 863.86	70.75 ab	24.70 ab
	N ₃	2 940.00	56.95 gh	19.37 e
初果期亏水(T ₂) Deficit at the first fruit period	N ₁	2 724.57	62.67 def	23.00 c
	N ₂	2 824.00	69.51 bc	24.61 ab
	N ₃	2 853.71	61.52 ef	21.56 d
盛果期亏水(T ₃) Deficit at blooming fruit period	N ₁	2 608.86	60.00 fg	23.00 c
	N ₂	2 654.71	65.11 de	24.53 ab
	N ₃	2 656.00	53.87 h	20.28 de

从表 3 还可以看出,不同生育期水分亏缺和不同施氮处理对茄子的水分利用效率均有一定的影响。在 N₁ 和 N₂ 条件下,开花坐果期水分亏缺处理与对照(CK)相比,茄子的水分利用效率有所下降,但差异不显著,说明开花坐果期水分亏缺处理不仅减少了茄子的耗水量,而且在获得较高产量的同时也实现了较高的水分利用效率;在 N₃ 条件下,开花坐果期水分亏缺处理,茄子的水分利用效率较对照显著下降。初果期和盛果期进行水分亏缺的处理与对照(CK)相比,茄子的水分利用效率均有不同程度的下降,但差异不显著,这是因为茄子耗水量减少的同时其产量也减少的缘故。无论是全生育期内不亏水的处理,还是开花坐果期、初果期、盛果期亏水的处理,随着氮肥施用量的增加,水分利用效率均呈现先升高后降低的趋势,表现为 N₂>N₁>N₃。

从表 4 的显著性检验结果可知,施氮处理对产

量的影响达到极显著水平,水分处理和水氮互作对产量的影响达显著水平;施氮对茄子水分利用效率的影响达极显著水平,而水分处理和水氮互作对水分利用效率的影响不显著。

表 4 不同生育期水分亏缺和施氮处理对茄子产量及水分利用效率影响的显著性检验

方差来源 Source	产量 Yield	水分利用效率 Water use efficiency
水分亏缺 Water deficit	29.381 *	2.794
施氮水平 Nitrogen level	39.586 **	30.348 *
水分亏缺×氮肥 Water deficit×Nitrogen level	1.950 *	1.399

2.4 温室茄子水分生产函数的建立

作物水分生产函数是作物产量与水之间的数量关系。了解作物不同生育期对水分的敏感程度,有

助于认识作物的需水规律,知道哪个生育期需要控水,哪个生育期需要大量供水,从而可以将有限的水量合理地分配到各个生育期,以获得较高的经济效益。

作物水分生产函数包括 2 种:一种是用于描述整个生育期耗水量与产量之间关系的函数;另一种是考虑灌水时间和灌水量与产量之间关系的函数,也称为分阶段考虑的水分生产函数。本试验在考虑灌水时间和灌水量与产量之间关系的基础上,研究了不同施氮量条件下温室茄子的水分生产函数。近年来,在水分生产函数的研究中,应用最普遍的是詹森(Jensen)连乘模型^[13],即:

$$\frac{y}{y_m} = \prod_{i=1}^n \left[\frac{ET_i}{ET_{mi}} \right]^{\lambda_i}。$$

式中: y 为水分亏缺条件下作物的产量; y_m 为不受水分胁迫或足量供水条件下作物的产量; n 为作物生育期的阶段数; i 为阶段序号; ET_i 为第 i 阶段水分亏缺条件下作物的实际需水量; ET_{mi} 为第 i 阶段足量供水条件下作物的需水量; λ_i 为第 i 生育期作物的水分敏感指数,表示水分亏缺对产量的影响程度,其值越大表示该阶段缺水作物的减产率越大,其值越小表示该阶段缺水作物的减产率越小。

根据试验结果,利用最小二乘法将上述模型转化为线性方程组,求解茄子的水分敏感指数 λ_i ,从而可以得到低氮、中氮、高氮条件下温室茄子的水分生产函数模型。

低氮条件下温室茄子的水分生产函数模型为:

$$\frac{y_a}{y_m} = \left[\frac{ET_1}{ET_{m1}} \right]^{0.233} \cdot \left[\frac{ET_2}{ET_{m2}} \right]^{0.442} \cdot \left[\frac{ET_3}{ET_{m3}} \right]^{0.791}。$$

中氮条件下温室茄子的水分生产函数模型为:

$$\frac{y_b}{y_m} = \left[\frac{ET_1}{ET_{m1}} \right]^{0.158} \cdot \left[\frac{ET_2}{ET_{m2}} \right]^{0.342} \cdot \left[\frac{ET_3}{ET_{m3}} \right]^{0.668}。$$

高氮条件下温室茄子的水分生产函数模型为:

$$\frac{y_c}{y_m} = \left[\frac{ET_1}{ET_{m1}} \right]^{0.628} \cdot \left[\frac{ET_2}{ET_{m2}} \right]^{0.229} \cdot \left[\frac{ET_3}{ET_{m3}} \right]^{0.778}。$$

式中: y_a 、 y_b 、 y_c 分别为低氮、中氮、高氮条件下开花坐果期、初果期、盛果期水分亏缺处理后的实际茄子产量; ET_1 、 ET_2 、 ET_3 分别为开花坐果期、初果期、盛果期水分亏缺处理茄子的耗水量; ET_{m1} 、 ET_{m2} 、 ET_{m3} 分别为开花坐果期、初果期、盛果期未进行水分亏缺处理茄子的耗水量。

从构建的 3 种施氮条件下的水分生产函数中可以看出,低氮和中氮条件下,水分敏感指数在盛果期最大,其次是初果期和开花坐果期;高氮处理条件下,水分敏感指数的大小顺序依次为盛果期>开花

坐果期>初果期。随着施氮量的增加,盛果期的水分敏感指数变化不明显,开花坐果期的水分敏感指数呈先减小后增大的趋势,而初果期的水分敏感指数则呈逐渐减小的趋势。

3 讨 论

水分和养分对作物生长的影响不是孤立的,而是相互作用、相互影响的。根系吸水和吸收养分是 2 个独立的过程,但水分的有效性影响着整个土壤的微生物群落、物理性质及其生理生化过程,使得土壤水分和养分密切而复杂地联系在一起。在有限灌溉的条件下,将水分合理地分配到各个生育期,并配合适量的养分,有利于提高水分和肥料的利用效率^[14-15]。本试验结果表明,不同生育期水分亏缺和施氮对茄子根系的生长状况、空间分布以及茄子最终的产量和水分利用效率均有一定影响。在施氮量相同的情况下,与对照处理相比,开花坐果期和初果期一定的水分亏缺对根系生长影响较小,而盛果期水分亏缺对根系生长的影响最为显著,这可能是因为前期茄子根系需水量不大,同时亏水后的复水也起到一定的补偿作用,而盛果期茄子需水量较大,此时的水分亏缺严重地影响了根系的生长。与根的总量相比,根的分布在确定水分吸收模式中起着重要的作用^[16]。本试验发现,茄子根系主要分布在 0~20 cm 土层,20 cm 以下土层根质量迅速减小,并且在垂直方向上呈对数递减趋势,这与张凤祥等^[17]的研究结论并不一致,可能是因为试验所选栽培容器和水肥设置不同的缘故。在施氮量相同的情况下,与全生育期正常供水相比,盛果期水分亏缺处理对各层根系的影响最为明显。进一步分析可知,在低氮和中氮条件下,水分亏缺的时间越早,20 cm 以下土层根干质量占总根干质量的比例越大,这可能是因为茄子生育前期对水分的需求不是很大,且在复水后出现不同程度的补偿效应,而盛果期进行水分亏缺的处理由于水分无法渗透到深层土壤,且没有进行复水处理,所以 20 cm 以下土层根系分布最少。在高氮条件下,水分亏缺的时间越早,20 cm 以下土层的根干质量占总根干质量的比例越小,这可能是因为高氮和早期的亏水处理对根系生长产生了很大的影响,使得复水后产生的补偿效应不足以弥补亏水对根系生长产生的影响。随着施氮量的增加,分布在 20 cm 以下土层的根干质量占总根干质量的比例显著下降,出现高氮营养浅根化趋势,这与张凤祥等^[17]的研究结论相一致,出现这种现象的原因很大

程度上是因为,低氮能够促进根系的伸长,而高氮则抑制了根系的伸长和扎深^[18]。

在同一施氮水平下,与全生育期正常灌水相比,任何生育期的水分亏缺均会对最终产量产生抑制作用,其中以盛果期产量下降幅度最大,这与李波等^[19]的研究结果一致。这是因为盛果期是产量形成的重要时期,这个时期水分亏缺会对产量的形成造成较大影响。在低氮和中氮水平下,水分亏缺的时期越早,对产量的影响越小;在高氮水平下,开花坐果期亏水处理产量较低,说明这一时期的高氮和水分亏缺严重影响了茄子的生长发育,对茄子最终产量的形成产生了较大影响。随着施氮量的增加,茄子的产量表现出先上升后下降的趋势,这与李文霞^[20]的研究结果一致。

在同一施氮条件下,初果期、盛果期水分亏缺处理茄子的水分利用效率虽然与对照差异不显著,但这是建立在牺牲产量的基础上;而在中氮、低氮条件下,开花坐果期水分亏缺处理既获得了较高的产量,同时也实现了较高的水分利用效率。随着氮肥施用量的增加,所有处理水分利用效率均呈现先增大后减小的趋势,这说明合理的水肥配合可提高水分利用效率。因为适当的施肥量提高了土壤水势,从而提高了土壤水分的有效性,使得植物能吸收利用更多的土壤水分,进而有利于水分有效利用率的提高;而过多施用氮肥会造成叶面积过大、植株间通风透光不良,从而使水分利用效率降低^[20]。本研究分析了不同生育期水分亏缺和施氮条件下茄子开花坐果期、初果期和盛果期的水分敏感指数,结果表明,在低氮和中氮水平下,水分敏感指数在盛果期最大,其次是初果期和开花坐果期,这与翟盛等^[21]和郑健等^[22]的研究结果一致;在高氮条件下,开花坐果期的水分敏感指数显著增大,这是因为在此期进行高氮和水分亏缺处理严重影响了茄子的生长发育,从而对茄子的最终产量产生了较大影响。

[参考文献]

- [1] 任华中. 水氮供应对日光温室番茄生育、品质及土壤环境的影响 [D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- Ren H Z. Coupling effects of water and nitrogen fertilizer application on the growth, quality of greenhouse tomato and the greenhouse soil environment [D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- [2] 米国全, 袁丽萍. 不同水氮供应对日光温室番茄土壤酶活性及生物环境影响的研究 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 124-127.

- Mi G Q, Yuan L P. Influences of different water and nitrogen supplies on soil biological environment in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(7): 124-127. (in Chinese)
- [3] 王培新, 盛平, 洪嘉琰. 大棚蔬菜滴灌试验与耗水量估算 [J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2003, 21(1): 64-69.
- Wang P X, Sheng P, Hong J L. Trickle irrigation experiment and water consumption estimation on greenhouse vegetable [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science Edition, 2003, 21(1): 64-69. (in Chinese)
- [4] Chartzoulakis K, Drosos N. Water use and yield of greenhouse grown eggplant under drip irrigation [J]. Agricultural Water Management, 1995, 28: 113-120.
- [5] 杜社妮, 梁丽丽, 翟胜, 等. 不同灌溉方式对茄子生长发育的影响 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(6): 430-432.
- Du S N, Liang Y L, Zhai S, et al. Effect of irrigation style on eggplant growth [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(6): 430-432. (in Chinese)
- [6] 杨月英, 张福漫. 不同形态氮素对基质培番茄生育、产量及品质的影响 [J]. 华北农学报, 2003, 18(1): 86-89.
- Yang Y Y, Zhang F M. Effect of nitrogen forms on growth development, yield and fruit quality of tomato in media culture [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2003, 18(1): 86-89. (in Chinese)
- [7] Aujla M S, Thind H S, Buttar G S. Fruit yield and water use efficiency of eggplant (*Solanum melongena* L.) as influenced by different quantities of nitrogen and water applied through drip and furrow irrigation [J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112: 142-148.
- [8] 张恩平, 张淑红, 葛晓光. 土壤有效养分含量对保护地茄子产量及品质影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 75-77.
- Zhang E P, Zhang S H, Ge X G. Effects of soil available nutrition on the yield and quality of greenhouse eggplant [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2000, 31(1): 75-77. (in Chinese)
- [9] 张国红, 袁丽萍, 郭英华, 等. 不同施肥水平对日光温室番茄生长发育的影响 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊): 151-154.
- Zhang G H, Yuan L P, Guo Y H, et al. Effects of fertilization levels on the growth and development of tomato in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(Suppl.): 151-154. (in Chinese)
- [10] 陈修斌, 邹志荣, 熊汉琴. 温室茄子水肥耦合数学模型及其优化方案研究 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 201-203.
- Chen X B, Zou Z R, Xiong H Q. Effect of water-fertilizer coupling on maths model and optimized scheme of eggplant in greenhouse [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(3): 201-203. (in Chinese)
- [11] 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.
- Cai H J, Kang S Z, Zhang Z H, et al. Proper growth stages and deficit degree of crop regulated deficit irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,

2000,16(3):24-27. (in Chinese)

[12] 祁有玲,张富仓,李开封. 水分亏缺和施氮对冬小麦生长及氮素吸收的影响 [J]. 应用生态学报,2009,20(10):2399-2405.
Qi Y L,Zhang F C,Li K F. Effects of water deficit and nitrogen fertilization on winter wheat growth and nitrogen uptake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2009,20(10):2399-2405. (in Chinese)

[13] 沈荣开,张瑜芳. 作物水分生产函数与农田非充分灌溉研究述评 [J]. 水科学进展,1995,6(3):248-254.
Shen R K,Zhang Y F. A review of crop-water production functions and problem of irrigation with inadequate water supply [J]. Advances in Water Science,1995,6(3):248-254. (in Chinese)

[14] Singh K P,Kumar V. Water use and water-use efficiency of wheat and barely in relation to seeding dates,levels of irrigation and nitrogen fertilization [J]. Agriculture Water Management,1981,3(4):305-316.

[15] 董先旺,刘树堂,陶世荣. 不同肥水组合对夏玉米水分利用效率经济效益的影响 [J]. 华北农学报,2000,15(1):81-85.
Dong X W,Liu S T,Tao S R. The effects of water use efficiency and economic benefit in summer corn under different water coordinating fertilizer [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2000,15(1):81-85. (in Chinese)

[16] Ray S S. 小麦根重分布模式的定量研究 [J]. 国外农学-麦类作物,1994,1:25-27 .
Ray S S. Quantitative research on weight spatial distribution pattern of wheat [J]. Foreign agronomy-Triticeae Crops, 1994,1:25-27. (in Chinese)

[17] 张凤祥,周明耀,周春林,等. 水肥耦合对水稻根系形态与活力的影响 [J]. 农业工程学报,2006,22(5):197-200.
Zhang F X,Zhou M Y,Zhou C L,et al. Effects of water and fertilizer coupling on root morphological characteristics and activities of rice [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2006,22(5):197-200. (in Chinese)

[18] 杨洪强,束怀瑞. 苹果根系研究 [M]. 北京:科学出版社,2007.
Yang H Q,Shu H R. Research on apple root system [M]. Beijing:Science Press,2007. (in Chinese)

[19] 李 波,任树梅,杨培岭,等. 供水条件对温室番茄根系分布及产量影响 [J]. 农业工程学报,2007,23(9):39-44.
Li B,Ren S M,Yang P L,et al. Impacts of different water supply on tomato root distribution and yield in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2007,23(9):39-44. (in Chinese)

[20] 李文霞. 大田滴灌不同水肥处理对茄子生长和产量的影响 [D]. 北京:中国农业大学,2007.
Li W X. Effects of water-and-nitrogen allocation on growth and yield of eggplant under drip irrigation [D]. Beijing:China Agricultural University,2007. (in Chinese)

[21] 翟 盛,梁银丽,王巨媛,等. 干旱半干旱地区温室黄瓜水分生产函数的研究 [J]. 农业工程学报,2005,21(4):136-139.
Zhai S,Liang Y L,Wang J Y,et al. Water production function of cucumber in Chinese solar greenhouse in arid and semiarid region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2005,21(4):136-139. (in Chinese)

[22] 郑 健,蔡焕杰,王 健,等. 日光温室西瓜产量影响因素通径分析及水分生产函数 [J]. 农业工程学报,2009,25(10):30-34.
Zheng J,Cai H J,Wang J,et al. Path analysis of yield components and water production function of watermelon in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009,25(10):30-34. (in Chinese)