

膜下滴灌水氮对棉花根系构型的影响

谢志良^{1,2,3}, 田长彦^{1,3*}, 卞卫国^{1,3}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 中国科学院绿洲生态与荒漠重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘要:通过分层挖掘法,研究了膜下滴灌棉花根系构型对水氮的响应。结果表明:灌水量增加,根干重增加,根长、根表面积降低。表土层根干重、根长下降,深土层增加,各土层根表面积下降。高氮对根系具有明显的抑制作用,各土层根干重、根长、根表面积下降。水氮交互对根干重、平均根长、亚表土层根干重、表土层和深土层根长、根表面积影响明显。灌水 300 mm,根干重及根干重在亚土层中的分布以 276 kg·hm⁻²最高。施氮对平均根长密度的影响差异不明显。低氮和高氮促进深土层根长、根表面积增加。灌水 600 mm,深土层根长以 276 kg·hm⁻²最高,各土层根表面积随供氮水平的增加下降。水分是影响皮棉产量的主要因子,水分胁迫降低了氮肥的增产效应,氮肥促进了灌水的增产效果,但过多的氮肥供应降低增产效果。

关键词:水氮互作;根系构型;棉花

中图分类号:S562 **文献标识码:**A

文章编号:1002-7807(2009)06-0508-07

Effects of Water and Nitrogen on Cotton Root Architecture under Film Drip Irrigation

XIE Zhi-liang^{1,2,3}, TIAN Chang-yan^{1,3*}, BIAN Wei-guo^{1,3}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China)

Abstract: Responses of nitrogen and water on root architecture were investigated by layered digging. The results indicated that: with the increasing of irrigation amount, root dry weight increased, root length and root surface area reduced. Root dry weight and root length decreased in top soil layers and increased in deep soil layers. Root surface area decreased in whole soil layers. High nitrogen supply had obvious inhibitory effects, manifested as the decreasing of root dry weight and root length and root surface. Water and nitrogen interaction had significant influences on root dry weight, average root length density, root dry weight of subsurface layers, root length and root surface area of top soil layers and deep soil layers. When irrigation amount was 300 mm, root dry weight and the distribution of root dry weight in subsurface layers reached the maximum at 276 kg·hm⁻² nitrogen supply. Nitrogen supply had no effect on average root length density. Low nitrogen and high nitrogen had promoting effect on the increasing of root length and root surface area. When irrigation amount was 600 mm, root length of deep soil layers reached the maximum at 276 kg·hm⁻² nitrogen supply. With nitrogen supply increased, root surface area of whole soil layers increased. Water is the main factor of effect yield. Water stress weakened the yield increasing effect of nitrogen. Nitrogen promoted the yield increasing effect of water, but too much nitrogen supply decreased this effect.

收稿日期: 2009-03-11 **作者简介:** 谢志良(1980-),男,在读硕士研究生, xiezhi-liang03@sohu.com; * 通讯作者, tianchy@ms.xjb.ac.cn

基金项目: 中国科学院知识创新工程(KZCX2-XB2-03-2)和中国科学院农业项目(KSCX2-YW-N-41)

Key words: water and nitrogen interaction; root architecture; cotton

作物根系在空间的分布和形态,即根系构型,与环境因子有密切的关系^[1]。在影响作物根系生长的多种环境因素中,最主要的是土壤水分状况^[2]和养分状况。矿质养分中以氮素的供应对根系的生长、形态、以及根系在介质中的分布影响最为明显^[3]。膜下滴灌是覆膜栽培和滴灌相结合的节水灌溉技术,它能根据作物的根系分布进行局部灌溉,并有效地保持土壤团粒结构,防止水分深层渗漏和地表流失,同时又具有保温、保墒及减少地表蒸发,提高水分利用效率的作用^[4]。探讨灌水和施氮对棉花根系构型的影响,量化根系构型特征参数,分析经济产量与根系构型之间的关系,对于作物养分和水分管理具有重要的意义。本文以膜下滴灌条件下棉花根系为对象,探索不同水氮耦合对棉花根系构型的影响,为根系构型调控和棉花水肥管理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验地点位于策勒国家野外观测站(80°43'E, 37°01'N),地处塔克拉玛干沙漠南缘,昆仑山北麓。策勒年均气温 11.9℃; $\geq 5^\circ\text{C}$ 积温为 4640.4℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温为 4340.0℃, $\geq 15^\circ\text{C}$ 积温为 3677.5℃;无霜期 196 d;年均日照时数 2697.5 h,日照率 61%;年太阳总辐射能达 604.6 kJ·m⁻²,为全国高值区。年降水量极低,多年平均值为 34.0 mm,2008 年降水仅为 28.6 mm,且主要集中在 5—8 月,棉花生长完全依靠灌溉。蒸发量 2570 mm,干燥度 20.8。

试验地土壤为典型的风沙土,土壤保水保肥能力差,土壤通透性能好。土壤养分状况见表 1。

表 1 土壤养分状况

Table 1 The characters of nutrients in experimental soil

土层/cm	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	全量/(g·kg ⁻¹)			速效/(mg·kg ⁻¹)		
			N	P	K	N	P	K
0~20	7.89	4.02	0.19	0.39	0.33	58.12	13.70	156.7
20~40	7.73	3.76	0.22	0.68	0.30	51.54	28.05	150.2
40~60	7.96	2.46	0.12	0.37	0.26	27.85	29.05	139.8

1.2 试验设计与方法

试验采取两因素随机区组设计,3 个施氮水平,2 个灌溉水平,共 6 个处理,每处理重复 3 次,共计 18 个小区。小区面积 54 m²。施氮水平①低氮, N₁₃₈: 138 kg·hm⁻²;②中氮, N₂₇₆: 276 kg·hm⁻²;③高氮, N₄₁₄: 414 kg·hm⁻²。施基肥为总施肥量的 75%,剩下的在第二次灌水时随水滴施。

灌水方式,采用膜下滴灌方式,灌溉量采用水表控制。①胁迫灌水 W₃₀₀,每次滴灌水量 30 mm,全生育期滴灌水量 300 mm;②正常灌水 W₆₀₀,每次滴灌水量 60 mm,全生育期滴灌水量 600 mm。

试验供试棉花品种为新陆早 13 号,于 2008 年 5 月 7 日播种。地膜宽为 1.2 m,一膜四行棉花,行距(75+30+45+30)cm,株距 12 cm。分别在两行棉花中间铺设一条滴灌带,一膜 2 条滴灌软管。滴灌软管为迷宫式滴灌带,滴头间距为 30 cm。试验地于 5 月 28 日定苗,6 月 15 日开始滴灌,7 天灌水 1 次,全生育期灌水 10 次。

2008 年 9 月 11—21 日,采用分层挖掘法,采样方法参考陆地生态系统生物观测规范^[5]。如图 1 所示。

分别在外行和内行以棉花单株所占的面积每 10 cm 一层进行挖掘,外行和内行各挖取 2 株。即以膜间和宽行中间为界,挖取 90 cm×24 cm×10 cm 的土柱,挖取的土壤放在 0.25 mm 的纱网中冲洗,将棉花根系检出。获取根系时,将取样区域的地上部分全部采集后,按不同组织分装。将各层根系放在扫描仪上扫描成 TIF 文件,将扫描好的 TIF 文件用 Delta~T scan 2.04 版软件分析根长、根表面积等形态指标。最后按不同组织,在 80℃ 烘干恒重后称重量。

产量的测定:在棉花吐絮后进行实测产量。

2 数据分析方法

将试验所获得的数据用 Excel 做处理后进行图表的制作,数据处理用 Spss 13.0 软件分析。分析参数如下:

根表面积指数(RAI)为单位土体面积上根表面积。根长密度(RLD)为单位土壤体积内的根系长度,单位 mm·cm⁻³。根冠比为根干重/地上部干重。

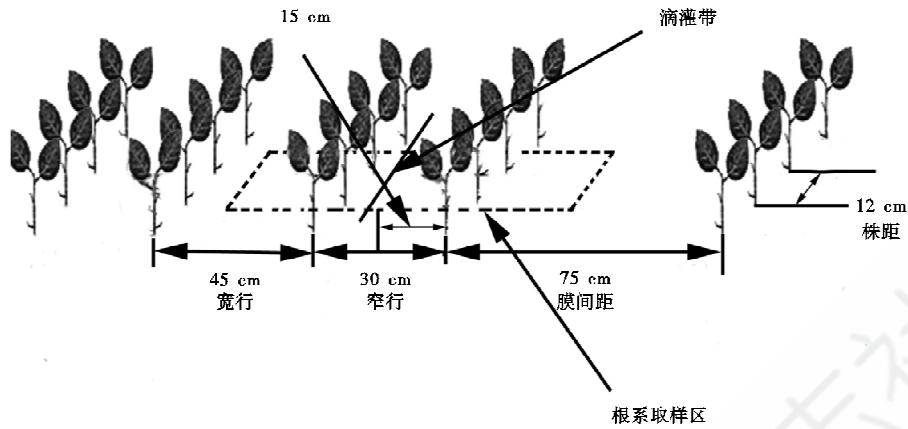


图1 棉花根系取样图

Fig.1 Sketch map of cotton root sampling

3 结果与分析

3.1 水氮对根系形态的影响

从表2可以看出, N_{138} 水平下, 与正常灌水相比, 水分胁迫根干重显著降低, 根表面积差异不大, 平均根长密度明显增加。 N_{276} , N_{414} 水平下, 与水分胁迫比较, 正常灌水根干重差异不大, 根长、根表面积明显下降。氮对根系的生长影响取决于土壤水分状况。水分胁迫条件下, N_{276} 的根干重比 N_{138} 增加了11.92%, N_{414} 与 N_{138} 差异不大。增加氮肥的供应对平均根长密度差异不显著, 根表面积指数下降。正常灌水条件下, 增加氮肥的供应, 根干重、根表面积指数、平均根长密度显著下降。水氮对根干重和平均根长密度有交互效应, 灌水300 mm, 根干重以 N_{276} 最高, 显著高于 N_{138} 、

N_{414} 。水氮交互对平均根长密度效应不大。灌水600 mm, 水氮交互对根干重、根长表现为负效应。无论灌水水平如何, 高氮水平抑制了根系的生长, 表现为根干重、根表面积指数、平均根长密度的降低, 但增加灌水量加强了抑制作用。水分对根系形态的影响大于氮素。水分胁迫降低了土壤中养分的可利用性。根系通过增加根长、根表面积来缓解水分和养分胁迫。充分灌水时, 根系获得养分和水分的能力增加, 特别是在吐絮期, 根系对养分和水分的需求降低, 根长、根表面积下降, 这种下降趋势随养分的增加而降低, 表明只要养分和水分充足, 根系并不会通过增加根长、根表面积来吸收更多的养分。

表2 水氮对根系形态的影响

Table 2 Effects of water and nitrogen on root morphology

处理		根系形态特征		
氮	水分	根干重/(g · m ⁻²)	根表面积指数	平均根长密度/(mm · cm ⁻³)
N_{138}	W_{300}	77.64 ± 1.72cd	0.365 ± 0.009a	0.710 ± 0.003a
	W_{600}	89.70 ± 2.03a	0.333 ± 0.011ab	0.635 ± 0.007b
N_{276}	W_{300}	86.90 ± 1.50ab	0.351 ± 0.002ab	0.692 ± 0.007a
	W_{600}	82.45 ± 2.58bc	0.294 ± 0.016c	0.569 ± 0.028c
N_{414}	W_{300}	72.49 ± 0.75d	0.322 ± 0.012bc	0.666 ± 0.009ab
	W_{600}	78.25 ± 0.96cd	0.252 ± 0.002d	0.510 ± 0.014d
方差分析 (f 值)				
N		23.01*	17.60**	35.31**
W		135.64**	39.21**	20.16**
N*W		5.16*	1.64 NS	23.49**

3.2 水氮对根系构型的影响

3.2.1 水氮对根系生物量垂直分布的影响。

从图2可以看出, 根干重在土壤中的分布随土层深度的增加逐渐降低。在 N_{138} , N_{414} 水平下, 正常灌水10~20 cm 土层的根干重显著增加, 20~40 cm 各土层的根干重有增加的趋势, 40~60 cm 土层

根干重有减小的趋势。 N_{276} 水平下, 正常灌水10~20 cm, 40~60 cm 土层的根干重有下降的趋势, 20~40 cm 土层的根干重显著增加。水分胁迫时, 中氮水平促进了根干重的增加。10~40 cm 各土层, N_{276} 的根干重明显高于 N_{138} , N_{414} 。40~70 cm 各土层, N_{276} 与 N_{138} , N_{414} 比较有增加的趋

势。正常灌水时,表层0~10 cm 的根干重差异不明显,10~20 cm 土层的根干重随施氮量增加明显下降。20~30 cm 土层,施 N_{414} , N_{138} 根干重显著高于 N_{414} 。30~70 cm 各土层根干重随施氮量增加有降低的趋势。灌水和施氮对10~40 cm 各土层根干重存在交互作用。灌水 300 mm,根干

重以 N_{276} 最高,并与 N_{138} , N_{414} 有显著差异。灌水 600 mm,施氮与灌水对10~20 cm 土层根干重有明显的负效应,随施氮量增加,根干重下降。20~30 cm 土层,根干重以 N_{276} 最小,显著低于 N_{138} , N_{414} 。施氮与灌水对30~40 cm 土层根干重互作效应不大。

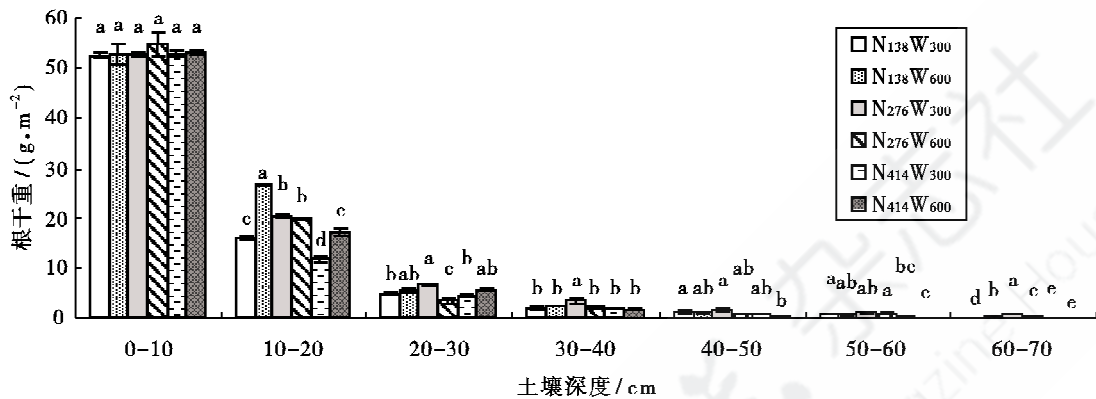


图2 水氮对根系生物量分布的影响

Fig. 2 Effects of different water and nitrogen on distribution of root dry biomass in soil layer

3.2.2 水氮对根表面积分布的影响。图3可以看出,根表面积指数(Root area index, RAI)在0~20 cm 土层内随土层的加深增大,20 cm 以下随土层的加深逐渐递减。 N_{138} 水平下,正常灌水10~20 cm 土层根表面积增加,其它各土层根表面积明显下降。 N_{276} 水平下,正常灌水30~40 cm 土层根表面积显著增加,其它各土层根表面积下降。 N_{414} 水平下,正常灌水,各土层根系表面积下降。水分胁迫条件下,0~30 cm 土层的根表面积随施氮量的增加明显下降。40~50 cm 土层中 N_{276} 的根表面积明显低于 N_{138} , N_{414} 。60~70 cm 土层中,根表面积差异不明显。正常灌水条件下,各土层根表面积随施氮量增加下降。灌水和施氮对10~20 cm,30~60 cm 各土层根表面积指数有明显的互作效应。灌水 300 mm,水氮互作对10~20 cm 土层根表面积指数效应不大或负效应,根表面积以 N_{276} 最高, N_{414} 最小,它们之间的差异明显。30~50 cm,根表面积以 N_{276} 最小,显著低于 N_{138} , N_{414} 。水氮互作50~60 cm 土层根表面积指数效应不大。灌水 600 mm,水氮互作对30~40 cm 土层根表面积指数互作效应不大,10~20 cm,40~60 cm 土层根表面积有明显的负效应。

3.2.3 水氮对根长密度分布的影响。图4可以看出,根长密度在土壤中的分布与水分状况有关。在水分胁迫下,根长密度随土层的深度呈下降的趋势。正常灌水条件下,根长密度在0~20 cm 土

层内随土层的加深增大,20 cm 以下随土层的加深逐渐递减。 N_{138} 条件下,与水分胁迫比较,正常灌水0~30 cm 各土层中根长密度下降,30~70 cm 各土层中根长增加。 N_{276} 条件下,正常灌水0~20 cm 土层的根长密度明显下降,20~40 cm 土层的根长有下降的趋势,40~70 cm 土层的根长密度明显增加。 N_{414} 条件下,正常灌水与水分胁迫比较,0~20 cm 土层的根长显著下降,20~30 cm 土层根长密度明显增加,30~40 cm 土层的根长密度下降。水分胁迫时,增加氮肥供应,0~30 cm 土层根长密度下降,30~40 cm 土层根长密度有下降的趋势。40~60 cm 土层中, N_{138} 、 N_{414} 的根长密度显著高于 N_{276} 。正常灌水时,0~20 cm 土层中根长下降,20~30 cm,施 N_{138} 、 N_{414} 的根长密度与 N_{276} 比较增加。30~60 cm 土层,施氮水平增加,根长密度下降。

灌水和施氮对0~30 cm,40~60 cm 各土层根长密度有明显的互作效应。灌水 300 mm,水氮互作对0~10 cm 根长密度效应不大。10~20 cm 以 N_{276} 最高,并与 N_{138} , N_{414} 差异明显。水氮互作对20~30 cm 根长密度有负效应。40~60 cm 以 N_{276} 最低,并与 N_{138} , N_{414} 差异明显。灌水 600 mm,水氮互作对0~20 cm 根长密度有负效应。20~30 cm 土层,根长密度以 N_{414} 最高,显著高于 N_{138} , N_{276} 。40~60 cm 土层根长密度以 N_{276} 最高, N_{138} 次之, N_{414} 最低。

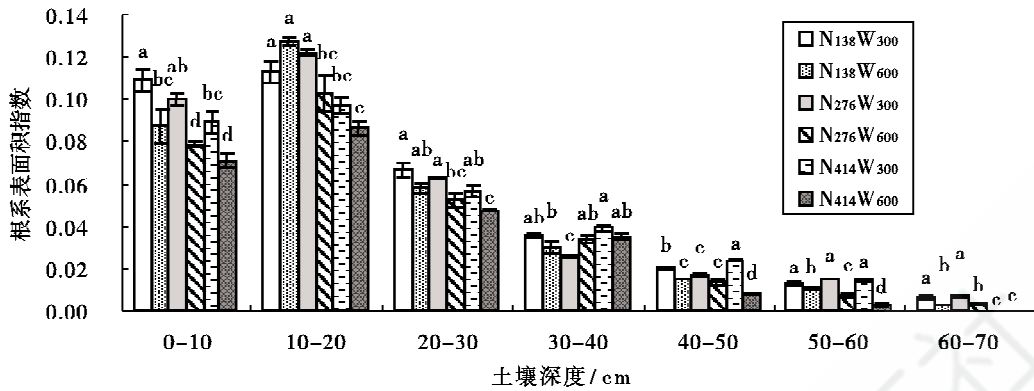


图3 水氮对根表面积垂直分布的影响

Fig.3 Effects of different water and nitrogen on distribution of root surface area in soil layer

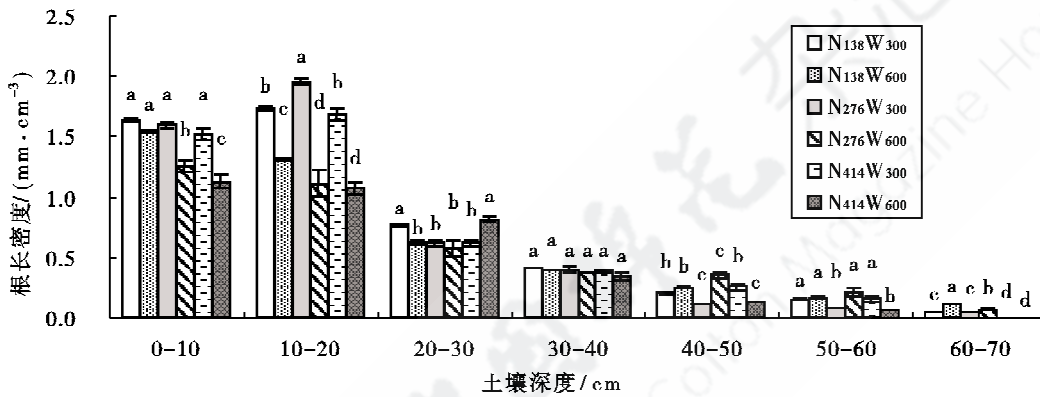


图4 水氮对根长密度垂直分布的影响

Fig.4 Effects of different water and nitrogen on distribution of root length density in soil layer

3.3 水氮对皮棉产量和根冠比的影响

由图5可以看出,相同的氮素水平下,正常灌水的皮棉产量显著高于水分胁迫,根冠比显著低于水分胁迫。相同的灌水条件下,增加氮肥的供应,皮棉产量增加,根冠比下降。水氮耦合处理,灌水600 mm,施氮276 kg·hm⁻²获得最高的皮棉产量,根冠比最小。水分胁迫时,施氮与灌水交互作用不大,增加氮肥供应皮棉产量增加,但差异不显著。正常灌水时,施氮与灌水对皮棉产量有

正交互效应,根冠比有负交互效应。皮棉产量N₂₇₆比N₁₃₈增加52.01%,N₄₁₄比N₁₃₈增加25.91%。根冠比N₂₇₆比N₁₃₈下降了0.022,N₄₁₄比N₁₃₈下降了0.014。增加灌水量,皮棉产量显著增加,N₁₃₈水平增加了63.04%,N₂₇₆水平增加了117.92%,N₄₁₄水平增加了117.92%,但达到最高产量的施氮量下降。根冠比下降,N₁₃₈水平下降0.029,N₂₇₆水平下降0.053,N₄₁₄水平下降0.031。

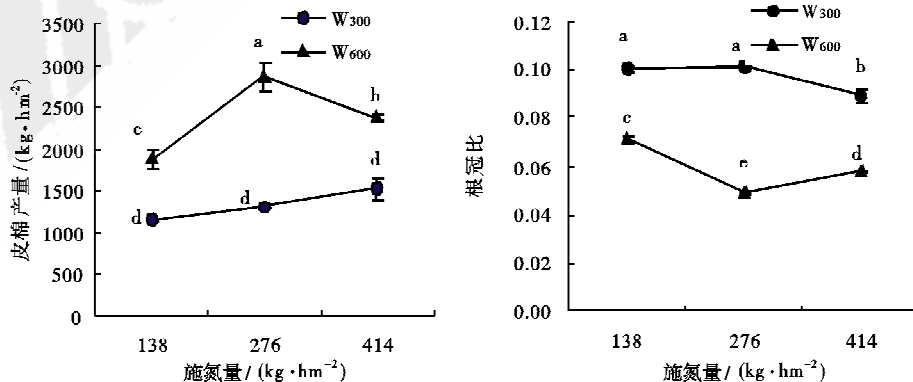


图5 水氮对皮棉产量、根冠比的影响

Fig.5 Effects of water and nitrogen on lint yield and root shoot ratio

4 讨论

水分是矿质养分溶解的介质和矿质养分迁移的载体^[6],对促进土壤中有有机物的矿化、养分的质流和扩散过程、增加根系和土壤颗粒之间的接触有着重要作用。王艳等研究玉米指出,高氮对根系生长的抑制作用表现为平均根长及根系生物量的降低^[7]。张凤翔指出,在低土壤水分条件下增加氮素供应水平能够显著增加水稻根干重、根体积和促进水稻根系的扎深^[8]。李秧秧等表明施 N 肥可增加玉米总根长和表层根长^[9]。水分胁迫,土壤含水率下降,根系总生物量明显降低。梁银丽等研究结果表明:随着土壤干旱程度的增加,小麦根长、根干重显著降低^[10]。柏彦超指出,水分胁迫促进水稻根系发育,使水稻根系变的细长,总根长、表面积、体积均增加,平均直径降低^[11]。本试验结果表明,水分是影响总根干重、总根表面积的主要因子,氮素是影响总根长的主要因子。水分胁迫促进了根表面积、根长的增加。氮肥对根系形态的影响受水分状况的限制。水分胁迫时,中氮有利于根系生物量的积累,根表面积随施氮量增加逐渐降低,而氮肥供应对平均根长密度没有影响。水分充足时,养分的有效性增加,增加氮肥的供应,根干重、根长、根表面积显著下降。高氮抑制了根系的生长,表现为根系生物量、根长、根表面积降低。

根系构型是根系在土壤中的分布格局。随着土层深度增加,棉花根系生物量逐渐减少,但随着滴灌量减少,土壤深层根系生物量有增加趋势^[12]。闫映宇研究表明胁迫灌水处理深层土壤中根长密度增大^[13]。大田作物根系浅层减少、下层根系多是作物对水分胁迫的响应。本文中水分胁迫下层根系生物量、根长增加,浅层根系生物量、根长降低。养分对深层根系生物量没有影响,各土层根长、根面积降低。根干重、根长和根表面积对水氮的响应并不表现相同的规律。水氮对亚表层根系生物量、下层根表面积及整个土层根长的影响有交互效应。水氮交互对根系的影响主要是负效应。

在作物的生长发育过程中,根、冠二者间是在功能平衡原理的作用下,以互利互制的方式完成对不同环境的适应^[14]。根冠之间的关系表现为既相互依赖、互相促进,又互相竞争、互相制约的时间演进进程。根冠比反映植物根系与地上部分的生长协调性。生长在不同立地条件下的植物,

为适应其环境条件的变化,会导致光合产物在不同器官之间的分配发生相应变化而导致根冠比不同^[15]。水分、氮素对地上部的影响远大于地下部,增加水氮的供应根冠比下降。土壤干旱胁迫时,施肥有利于增产,但限制产量进一步提高的主导因素是水分,过高水分也不利于产量的提高^[16]。试验结果表明,水分是限制地上部生长和产量形成的关键因子。水分胁迫,棉花生长受到严重胁迫,表现为根冠比增加,产量下降。水分胁迫降低了氮素的增产效果。正常灌水,增加氮素供应,有利于增产,但施氮量过多,氮素的增产效果下降。干旱区,特别是水资源缺乏时,增加施氮量是弥补灌水不足的重要措施,但限制产量的主导因素是水分。改善水肥条件是促进根系与地上部分均衡生长、获得高产的有力措施^[17]。

Brouwer^[18]提出,作物根、冠之间存在着一种动态功能平衡关系。当根系生长所具备功能可使冠生长良好并使其功能得以充分发挥,同样,冠层生长与功能也不限制根系生长和功能时,即认为作物处于最佳生长状态。试验发现,在地上部产量最大的水氮耦合灌水 300 mm,施氮 276 kg·hm⁻²处理根系生物量、平均根长密度、根表面积指数处于水氮耦合处理峰值中间,但根长在深层的分布最高,根表面积,根干重在深层分布较高。大的地上部不一定要大的根系来支撑,而是只要满足地上部的生长即可。新疆棉区棉花早衰现象严重,已成为影响进一步增产的突出原因。棉根生长早于地上部达到高峰,也早于地上部进入衰老可能是引起棉花后期地上部早衰的根本内在原因。而且因新疆棉花的根系负载大,栽培密度高,极易引起根机能的提前衰退而导致早衰的发生。水分和养分充足条件下,深土层高的根系分布是作物后期养分和水分吸收的重要保证,这对于防止早衰具有重要的意义。

参考文献:

- [1] BONSER A M, Lynch J P, Snapp S. Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *phaseolus vulgaris*[J]. *New Phytol*, 1996, 132: 281-288.
- [2] BURGESS S, Adams M A, Turner N C, et al. The distribution of soil water by tree root systems[J]. *Oecologia*, 1998, 115, 306-311.
- [3] MARSCHNER H, Kirkby E A, Cakma K T. Effect of

- mineral nutritional status on shoot root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients[J]. *J Exp Bot*, 1996, 47:1255-1263.
- [4] 马富裕, 严以绥. 棉花膜下滴灌技术理论与实践[M]. 乌鲁木齐:新疆大学出版社, 2002:174-811.
MA Fu-yu, Yan Yi-sui. The theories and practices of cotton with film drip irrigation[M]. Urumqi, Xinjiang University Press, 2002:174-811.
- [5] 吴冬秀, 韦文珊, 张淑敏. 陆地生态系统生物观测规范[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2007:191-193.
WU Dong-xiu, Wei Wen-shan, Zhang Shu-min. Protocol for standard biological observation and measurement in terrestrial ecosystem[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007:191-193.
- [6] MENGE L K, Kirby F A. Principles of plants nutrition[M]. Bern, Switzer Land: International Potash Institute, 1987:25-112.
- [7] 王艳, 米国华, 张福锁. 氮对不同基因型玉米根系形态变化的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 11(3):69-71.
WANG Yan, Mi Guo-hua, Zhang Fu-suo. Effects of nitrate levels on dynamic changes of root morphology in different maize in bredlines[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 11(3):69-71.
- [8] 张凤翔, 周明耀, 周春林. 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 Feng-xiang, Zhou Ming-yao, Zhou Chun-lin. Effects of water and fertilizer coupling on root morphological characteristics and activities of rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(5):197-200.
- [9] 李秧秧, 刘文兆. 土壤水分与氮肥对玉米根系生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1):13-15.
LI Yang-yang, Liu Wen-zhao. Effects of soil moisture and nitrogen fertilizer root growth of corn[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(1):13-15.
- [10] 梁银丽, 陈培元. 水分胁迫和氮素营养对小麦根苗生长及水分利用效率的效应[J]. 西北植物学报, 1995, 15(1):21-25.
LIANG Yin-li, Chen Pei-yuan. Effects of water stress and nitrogen nutrition on root and seedling growth and water use efficiency of wheat[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1995, 15(1):21-25.
- [11] 柏彦超, 沈淮东, 薛巧云. 不同水、氮对不同基因型水稻根系生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(6):69-72.
BAI Yan-chao, Shen Huai-dong, Xue Qiao-yun. Effect of root growth of different genotype rice under the condition of different water and nitrogen forms[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(6):69-72.
- [12] 方恰向, 赵成义, 申志强, 等. 膜下滴灌条件下水分对棉花根系分布特征的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5):98-100.
FANG Yi-xiang, Zhao Cheng-yi, Chuan Zhi-qiang, et al. Root distribution characteristics of cotton in different drip Irrigation amounts irrigation under mulched[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5):98-100.
- [13] 闫映宇, 盛钰, 冯省利, 等. 膜下滴灌的土壤水分对棉花根长密度分布及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5):46-47.
YAN Ying-yu, Sheng Yu, Feng Sheng-li, et al. Effects of soil moisture on the distribution of root length density and yield of cotton under drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(5):46-47.
- [14] LORET F, Casanovas C, Penuelas J. Seedling survival of Mediterranean shrub land species in relation to root: shoot ratio, seed size and water and nitrogen use[J]. *Functional Ecology*, 1999, 13:210-216.
- [15] BROUWER R. Some aspects of the equilibrium between over ground and under ground plant parts[J]. *Jaarboek IBS Wageningen*, 1963, 213:31-39.
- [16] 郑重, 马富裕, 慕自新, 等. 膜下滴灌棉水肥耦合效应及其模式研究[J]. 棉花学报, 2000, 12(4):198-201.
ZHENG Zhong, Ma Fu-yu, Mu Zi-xin, et al. Study of coupling effects and water-fertilizer model on mulched cotton by drip irrigation[J]. *Acta Gossypii Sinica*, 2000, 12(4):198-201.
- [17] 李永山, 冯利平, 郭美丽, 等. 生长特性及其与栽培措施和产量关系的研究[J]. 棉花学报, 1992, 4(2):59-66.
LI Yong-shan, Feng Li-ping, Guo Mei-li, et al. Studies on the growth characteristics of root system and its system and its relation with cultral practices and yield in cotton[J]. *Acta Gossypii Sinica*, 1992, 4(2):59-66.
- [18] BROUWER R. Nutritive influences on the distribution of dry matter[J]. *Plant and Soil*, 1962, 32:424-438. ●