植物营养与肥料学报 2016, 22(5): 1384–1392
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.15321
http://www.plantnutrifert.org

新疆膜下滴灌棉花早衰的根系生长发育特征

杨 荣[1]，田长彦[2]，买文选[2]*
（1 新疆农业大学草业与环境科学学院，新疆乌鲁木齐 830052；
2 中国科学院新疆生态与地理研究所国家绿洲生态与荒漠环境重点实验室，新疆乌鲁木齐 830011）

摘要:【**目的**】膜下滴灌 (drip irrigation under mulch film, DI) 技术由于其高效节水的特点在新疆大面积推广使用，然而近期发现应用滴灌技术进行灌溉的作物根系出现了早衰，影响了地上部生长及产量的形成。本研究探讨了目前膜下滴灌技术体系棉花根系生长发育、空间分布的动态变化规律及地上部响应。【**方法**】采用田间试验方法，设置膜下滴灌、漫灌 (flood irrigation under mulch film, FI，对照) 两处理，采用 Monolith 法分 7 次采集根系，DT-Scan 软件测定根系长度，分析不同生育时期棉花根系在土壤空间中的变化特征，同时采集地上部样品并分器官测定干物质量。【**结果**】滴灌棉花根系表现出明显的浅层分布趋势：从播种后 96 d 开始，距地表 10 cm 范围内的根系长度明显大于漫灌处理，而 30—60 cm 土层则正好相反；在播种后 65～96 d 内，滴灌棉花根长增加速率明显低于漫灌；棉花生长发育后期 (播种后 125～160 d)，滴灌处理棉花根系显著衰退，且主要集中在 0—40 cm 深度、距滴灌带 30—70 cm 土体范围内，播种后 160 d 与 125 d 相比，0—10 cm 土层下降了 13.8%，而 10—40 cm 衰退幅度更大 (22%)，与此同时，漫灌处理除 0—10 cm 土层根长有所下降外 (7.7%)，10 cm 以下依然保持增长状态 (10—40 cm 及 40—60 cm 层分别增加了 5.5% 与 10.2%)；播种后 125 d，滴灌棉花地上部生长量明显高于漫灌，而根系正好相反，其冠根比较漫灌高，而在播种后 160 d 剧烈下降 (地上部叶片及蕾、铃的大量脱落所致)。【**结论**】膜下滴灌棉花根系由于浅层分布，根系体积小，而地上部生物量过大，导致其在生长发育后期快速衰退。今后应研究适宜的水肥调控措施，以构建更早、更深的根系系统，控制生殖生长期内棉花的营养生长，实现膜下滴灌棉花的高产稳产。

关键词: 棉花早衰；膜下滴灌；根系构型

中图分类号: S562.07　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)05–1384–09

Characteristics of root development in cotton suffering presenility under drip irrigation and film mulch in Xinjiang Autonomous Region

YANG Rong[1], TIAN Chang-yan[2], MAI Wen-xuan[2]*
(*1 College of Pratacultural and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052; 2 Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

Abstract:【**Objectives**】Xinjiang is a typical arid area worldwide and cotton crops are mainly watered by drip irrigation under mulch film (DI). Roots are in direct contact with the soil and thus are the first plant organ to be affected by the water and fertilizer application strategy. Many studies have proved that long-term use of drip irrigation technology can have negative impacts on crop root systems. Restriction of root growth under drip irrigation reduces the soil volume that can be explored by the root system and hence the availability and uptake of essential minerals, and finally affects shoot growth and yield. The main objective of the present study is to explore the growth and dynamic changes in the spatial distribution of cotton roots and aboveground growth in response to DI in a field trial.【**Methods**】A field experiment that included two treatments consisting of drip irrigation under

收稿日期: 2015–07–20　　**接受日期:** 2016–01–25
基金项目: 新疆自治区青年科技创新人才培养工程–青年博士科技人才培养项目(2014731024)资助。
作者简介: 杨荣 (1990—)，女，新疆鄯善人，硕士研究生，主要从事旱地土壤生态方面的研究。E-mail：1534463768@qq.com
* 通信作者 E-mail：maiwenxuan@sohu.com

mulch film (DI) and flood irrigation under mulch film (FI) was conducted. The monolith method was used to harvest roots at seven time points in the growth periods, and the root length, and shoot and root dry weight were measured.【**Results**】The total root length per plant in the 0–10 cm soil layer was higher under DI, whereas in the 30–60 cm soil layer roots were longer under FI. From 65 to 96 days after sowing (DAS), the rate of increase in root length was lower under DI than FI. Total root length decreased after 125 DAS under DI, and was mainly centered in the 0–40 cm soil layer and at distances of 30–70 cm from drip-lines. The shoot: root ratio at 125 DAS was higher under DI than FI, but at 160 DAS the shoot: root ratio abruptly declined under DI. The decline in root length under DI during advanced growth stages may be attributable to the higher root density in shallow soil layers and the increase in the shoot: root ratio.【**Conclusions**】For the cotton cultivated in the drip irrigation under mulching system, the cotton roots are mainly distributed in 0–40 cm of soil, which is significantly shallower and the total volume of roots is less than those grown under flooding system. After flowering stage, the shoot to root ratio become larger, which will exaggerate the presenility of roots. So it is necessary to study scientific water and fertilizer procedure that is good for building up reasonable root architecture, and regulate the vegetative growth of aboveground parts of cotton.

Key words: cotton presenility; drip irrigation under mulch film; root architecture

水分不足是全世界农业生产中普遍存在的问题，并已经成为限制作物生产力提高的最主要生态因子，由此，包括滴灌在内的各种节水农业措施应运而生[1]。在中国，干旱半干旱地区面积约占全国土地总面积的 52.5%[2]，而新疆则属于典型的干旱灌区，从上世纪 90 年代初开始，滴灌技术在该地区大面积推广应用，并在此基础上通过长期实践形成了独特的膜下滴灌技术[3]，一方面，膜下滴灌由于“少量多次”的水肥供应特点及覆膜的增温作用在节水节肥方面显现出非常好的效果，以棉田为例，与漫灌相比其灌水量及氮肥施用量分别减少了大约 1/3～1/5[4]；而且该技术的应用也在很大程度上提高了棉花的产量水平[5]，然而膜下滴灌棉田高产不稳产，有些年份产量甚至低于漫灌田块，表现为膜下滴灌棉花植株早衰的发生机率明显较漫灌高[6]。已经有研究证实，长期应用滴灌技术进行灌溉可能会改变作物根系在土壤中的分布[1, 7–8]，如主根变短、贴近地表生长等[9–10]。这种根系缺乏快速生长和深扎的能力，对环境的改变十分敏感。根际环境是多变的，即使在高投入条件下，在不同发育时期或不同的土壤微域，随时可能发生这样或那样的水分、养分胁迫，比如，短期的水分供应不足可能使硝酸盐的质流受到很大影响，类似情况下，单一根系系统将可能不足以应对多种潜在的胁迫[11]。植物根系与地上部是一个统一整体[12]，深入研究膜下滴灌棉花根系在土层中的分布变化，对建立合理的水肥调控体系意义重大。

长期以来，大量研究主要围绕产量形成，就作物地上部结构与功能关系[13]，而作物地下部分虽已为人们所注意，由于田间条件下观测植物根系困难，研究远不如地上部深入。本文通过田间试验深入探讨膜下滴灌棉花根系生长发育、空间分布的动态变化规律及地上部响应。

1 材料与方法

试验于 2010 年 4 月至 11 月在库尔勒市包头湖农场进行，该地属典型的干旱气候区，年平均降雨量 56 mm，蒸发量 2497 mm，年均日照时数 2878 h，≥10℃ 的积温 4252℃，无霜期 205 d。土壤为沙壤土，耕层(0—20 cm)基本理化性状为：EC 2.38 mS/cm (水土比 1∶1)、有机质含量 7.65 g/kg、NO_3^--N 36.54 mg/kg、NH_4^+-N 6.53 mg/kg、速效磷 12.88 mg/kg、速效钾 187.2 mg/kg。

1.1 试验方案

试验设两个处理：膜下滴灌 (以下简称为滴灌，DI)、漫灌 (FI)；随机区组设计，重复 3 次，共 6 个小区，各小区小区面积 120 m^2 (10 m × 12 m)。

试验用棉花品种为新陆中 9 号，于 4 月 25 日播种，采用一膜四行种植模式，行距 20、50、20 cm，一膜铺设一条滴灌带，每小区 24 行棉花。膜宽 1.2 m，膜间宽 0.5 m，株距 10 cm，种植密度 $22.2\times10^4/hm^2$ (图 1)。

滴灌和漫灌的灌水量分别为：4000 m^3/hm^2、6000 m^3/hm^2。水肥管理及农艺措施与新疆普遍采用的生产管理模式保持一致。从 6 月 12 日开始，滴灌分 10 次进行，漫灌分 4 次进行。

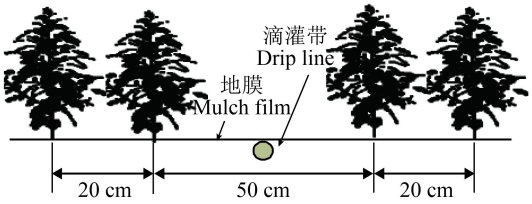

图 1 栽培模式示意图

Fig. 1 Plant spacing and irrigation system used in the experiment

肥料管理方案如下：磷肥 (P_2O_5 150 kg/hm^2) 和钾肥 (K_2O 150 kg/hm^2) 全部做基肥，在播种时一次性施入。滴灌处理氮肥总量 N 350 kg/hm^2，其中 20% 作为基肥在播前施入土壤，280 kg/hm^2 随水追施；漫灌氮肥用量 N 400 kg/hm^2，50% 做基肥，50% 做追肥，追肥次数 3 次，第一次在头水期，用量 12% 左右；第二次在盛花期，用量 25% 左右，第三次在结铃期，用量 13%。氮肥品种为尿素，随水施入土壤，具体灌水与追肥管理措施见表 1。

1.2 样品采集

采样时间：苗期 (播种后 40 d)、蕾期 (播种后 65 d)、初花期 (播种后 82 d)、盛花期 (播种后 96 d)、结铃盛期 (播种后 110 d)、结铃后期(播种后 125 d) 和吐絮期 (播种后 160 d)。

采样方法：首先以滴灌带为中心选取一半地膜内长势大小一致的 4 株棉花，齐根剪断，分为茎、叶及生殖器官3部分，90℃ 杀青，70℃ 烘干并称重。

表 1 灌溉追肥时期及用量

Table 1 Dates of irrigation and N applications in the two treatments

处理 Treatment	灌溉方式 Irrigation method	总量 Total	播种后天数 Days after sowing (d)									
			49	56	63	70	77	84	91	99	105	113
灌水量(m^3/hm^2) Irrigation	DI	4000	260	300	420	500	500	500	500	400	340	280
	FI	6000		1200			1800		1800		1200	
追氮量 (kg/hm^2) N topdressing	DI	280		10	20	30	40	40	40	40	30	30
	FI	200		48					100		52	

注（Note）：DI—膜下滴灌 Drip irrigation below mulch film; FI—漫灌 Flooding irrigation.

根系采用 Monolith 法采集(图 2) [14]，具体是在已经采集地上部样品后的棉花根系所在的区域，从滴灌带正下方到膜间正中共 70 cm 宽范围内挖取面积 70 cm × 20 cm、深 60 cm 的土体，并切割成宽为 10 cm 的立方块 (每块体积 1000 cm^3)，其中 4 株棉花主根正好分别位于其中一块的正中间位置，共 84 块。挖出的每一块土体全部收集，用直径 1 mm 不锈钢网筛选根系，捡去新生体、侵入体及非棉根物质，用清水冲洗干净后待测。

1.3 测定方法

根样用扫描仪(Epson V700)在 200 dpi 象素下扫描成黑白对照的 TIF 图像文件，用 DT-SCAN 图像分析软件 (英国 Delta 公司，1.0 版) 计算根系长度。根系扫描后 70℃ 烘干并称重。

1.4 数据处理

每株棉花的平均根长 (m/plant) 由 84 块土体中的根长之和除以 4 得到 (4 株棉花)。

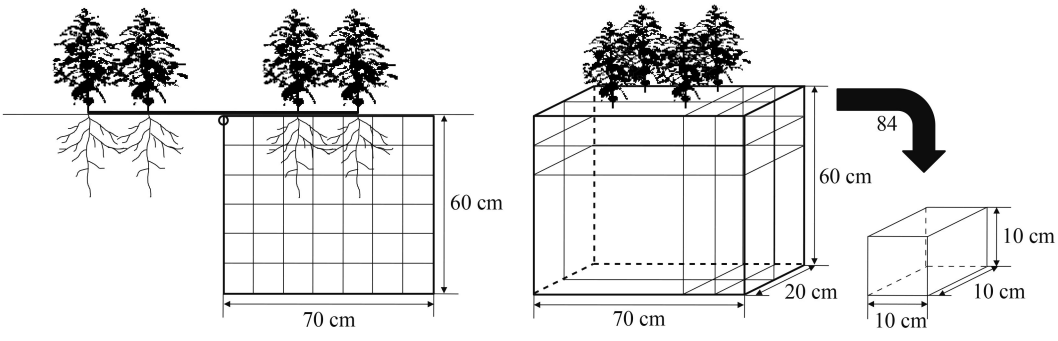

图 2 根系采集方法

Fig. 2 Methods of root collection

根长密度、土壤电导值以及土壤速效养分采用 Surfer 7.0 软件以等高线形成呈现 (Golden Software, Golden, CA, USA)。

2　结果与分析

2.1　不同处理条件下棉花根长的变化

2.1.1 不同生育时期的棉花根长变化　图 3 为不同处理条件下棉花根长在整个生育期的变化情况，根据不同时期的结果可将其划分为初始生长期、快速增长期、稳定期及衰退期等 4 个阶段。在快速增长期，漫灌处理棉花根系生长明显快于滴灌，致使漫灌棉花根长达到峰值的时间较滴灌提前了大约 15 d；而且滴灌处理棉花根长在播种后 96 d 达到峰值后随即开始衰退，特别是从播种后 125 d 开始，根长呈明显下降趋势，但漫灌处理始终保持在最高水平。

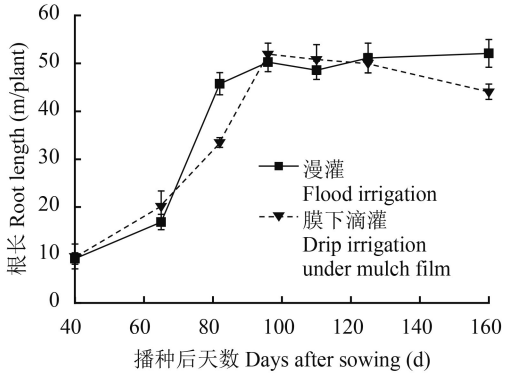

图 3　棉花根长在整个生育期的变化趋势

Fig. 3　Total root length per cotton plant in different growth days under flooding and drip irrigation

2.1.2 不同生育时期棉花根长在不同深度土壤的分布　根系的分布以每 10 cm 土层中的总长度表示，其随生育期变化见图 4。在播种后 60 天内，两种灌溉处理棉花根系在各个层次的差异不显著；至 82 d，漫灌处理根系长度在整个 0—60 cm 范围内均高于滴灌，30 cm 以下尤为明显；播种后 96 d 开始，滴灌处理 0—10 cm 土层棉花根系长度显著高于漫灌，30—60 cm 反之，滴灌棉花根系相比于漫灌表现出明显的浅层分布趋势。在播种后 125～160 d，无论是漫灌还是滴灌处理，0—10 cm 土层根系长度均下降，与播种后 125 d 相比，漫灌处理下降了 7.7%，而滴灌更是下降了 13.8%。10—40 cm 土层漫灌根长有所上升 (5.6%)，而滴灌显著降低了 22%。

2.1.3 滴灌棉花根系在土层横向的分布　从根系的横向分布看，播种后 125 d 至 160 d，在距滴灌带 10—70 cm 范围内，滴灌棉花根系长度均有所降低，但最显著的区域是主根所在区域及靠近膜间的位置 (图 5)。主根所在位置的降低主要归因于其根系长度的基数大，而在膜外侧靠近膜间的位置的快速衰退可能与膜下滴灌土壤水盐运移的规律有关：土壤盐分主要向滴灌带两侧运移并积累在作物行间的土壤表层，最终对根系造成不利影响。而漫灌不存在这一现象。

2.1.4 根长密度在土壤空间 xz 平面上的投影　图 6 是滴灌及漫灌处理条件下棉花不同生育期根长密度在土体中的分布情况，颜色越深，表示根长越大。由图 6 可知，滴灌处理棉花根系在土壤上层更大，且从播种后 125～160 d，在 20 及 30 cm 土层靠近膜间位置 (图中右侧) 的颜色明显变浅，说明这一区域根系存在较大程度的衰退，印证了前面的结论。

2.2　棉花生长量及产量对不同处理的反应

滴灌与漫灌棉花地上部及根系生长量在播种后 110 d 之前差别不大，但到播种后 125 d，滴灌棉花地上部生长量明显高于漫灌，根系正好相反，也就是说与漫灌相比，滴灌棉花更小的根系承担了更大的地上部对水分养分的需求，此时滴灌棉花冠根比明显高于漫灌 (图 7)。

而从播种后 125～160 d，滴灌棉花地上部生长量突然下降，田间观测发现，其原因主要是叶片及蕾铃的大量脱落造成的，同时滴灌棉花冠根比也快速下降至和漫灌基本一致的水平。而在同一时期，漫灌处理棉花地上部生长量及冠根比始终保持增加状态。这些结果说明，对棉花而言，一定量的根系只能承担与之相匹配的地上部需求，当地上部生长量远高于根系所能承担的范围时，地上部正常的生长发育必将受到影响。

漫灌棉花产量明显高于滴灌，其产量差距达每公顷 490.5 kg，高出约 9.2%。具体分析其产量构成因素，发现无论单铃重还是有效桃数漫灌均高于滴灌。其中单铃重漫灌处理棉花为 5.36 g，滴灌 4.84 g；有效桃数差异更大，分别为 6.1 和 4.8 个，差异达到了显著水平(图 8)。

3　讨论

3.1　生长环境对棉花根系生长的影响

植物根长呈现“S”形变化的实质是“新根不断形成”和“老根不断死亡”两个过程相互作用结果的体

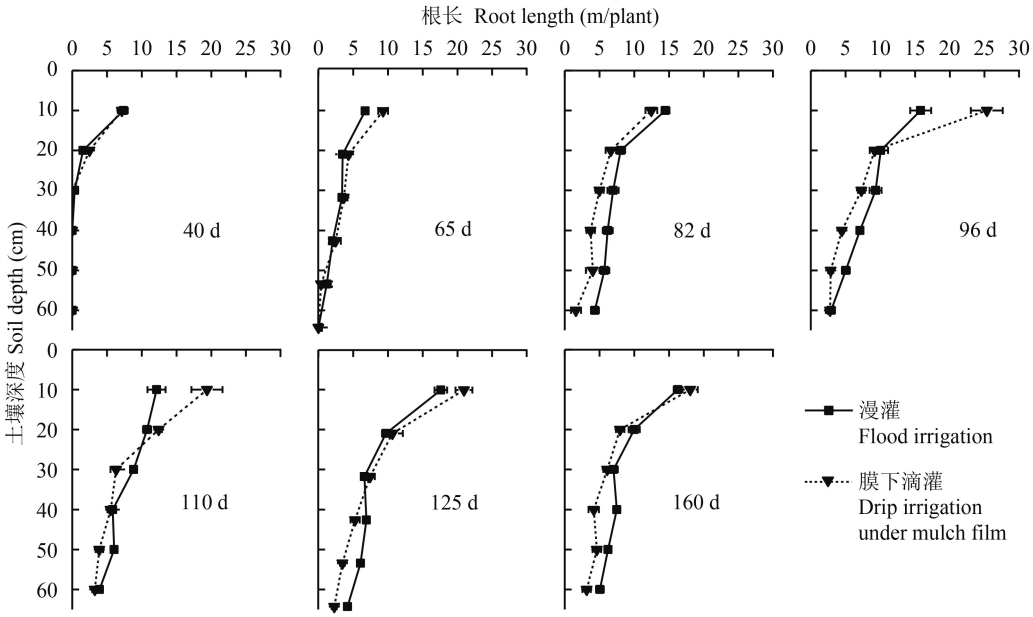

图 4 棉花根长在不同土壤深度的分布状况

Fig. 4 Total root length in different soil depths at different days after sowing of cotton under flood and drip irrigation

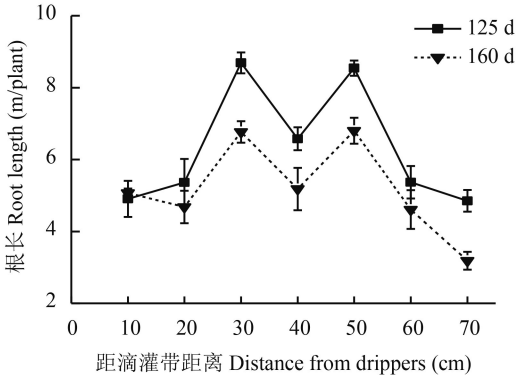

图 5 播种后 125 d 和 160 d 棉花距滴灌带不同位置 0—40 cm 土层根长

Fig. 5 Single plant root length within 0–40 cm soil depth in different distance from the drip-line at 125 and 160 days after sowing

现，只是在不同的发育阶段新根形成和老根死亡的比例不同[13]。然而根系的变化并不像一年生植物的叶片衰老那样完全受控于植物本身的基因表达，因此也不属于程序化死亡过程[14–15]，而是与生长环境密切联系，比如在石英砂培养条件下，玉米根长在整个生育期内即使在缺氮条件下进入生殖生长阶段后植株总根长也不断增加，直至成熟[16]，在田间，一旦进入生殖生长阶段，玉米根长随即下降。这是因为根系的死亡是通过根际土壤中远高于非根际土的微生物以及大量的土壤动物、食植性昆虫和寄生生物对根系降解完成的[17]，而石英砂中不具备这一条件。

大量研究证明，生长环境 (包括土壤环境、气候等) 对根系的发育有明显影响。Welbank 等[17]在英国的砂质壤土上对大麦的根系生长状况进行了 4 年以上的对比研究，结果显示，尽管在不同年份间大麦根系发育早期的生长速率有差异，然而年际间根系最大干物质累积量的差异却很小 (第一年为 95 g/m^2，在随后的第二年为 80 g/m^2)。相对的，Barraclough 等[18]在两种理化性质差异很大的土壤上种植冬小麦，发现其根系干物质量明显不同。一般情况下，作物总根长大小顺序为豆科牧草 > 小麦 > 羽扇豆和豌豆[20]，然而在一些特定条件下，由于生长环境对根系统的大小和比根长两方面的影响，谷类作物根干质量反而有可能低于豆科植物[10]。Gregory[21]在叙利亚北部对几种谷类作物根系进行的为期 6 年的研究表明，在土壤性质一致的条件下，不同年份内降雨的季节性变化对根系生长量影响显著，在雨量最多的生育季节作物的根系生长量也最大，反之则小。在叙利亚北部布雷达地区进行的研究也发现大麦根系生长量在不同的生长季节存在明显的差异[22]，在 5 年的结果中，根系生长量及根系长度变化范围分别是 42.5～90.6 g/m^2 和 3.2～13.9 km/m^2。以上研究结果说明，生长环境对植物根系的生长发育有巨大的影响力，即使相同的植物，生长环境不同，根系发育状况也会表现出非常大的差异。

由于漫灌与滴灌最明显的区别是水肥管理方式不同，而最先受到影响的是根系。膜下滴灌棉花根

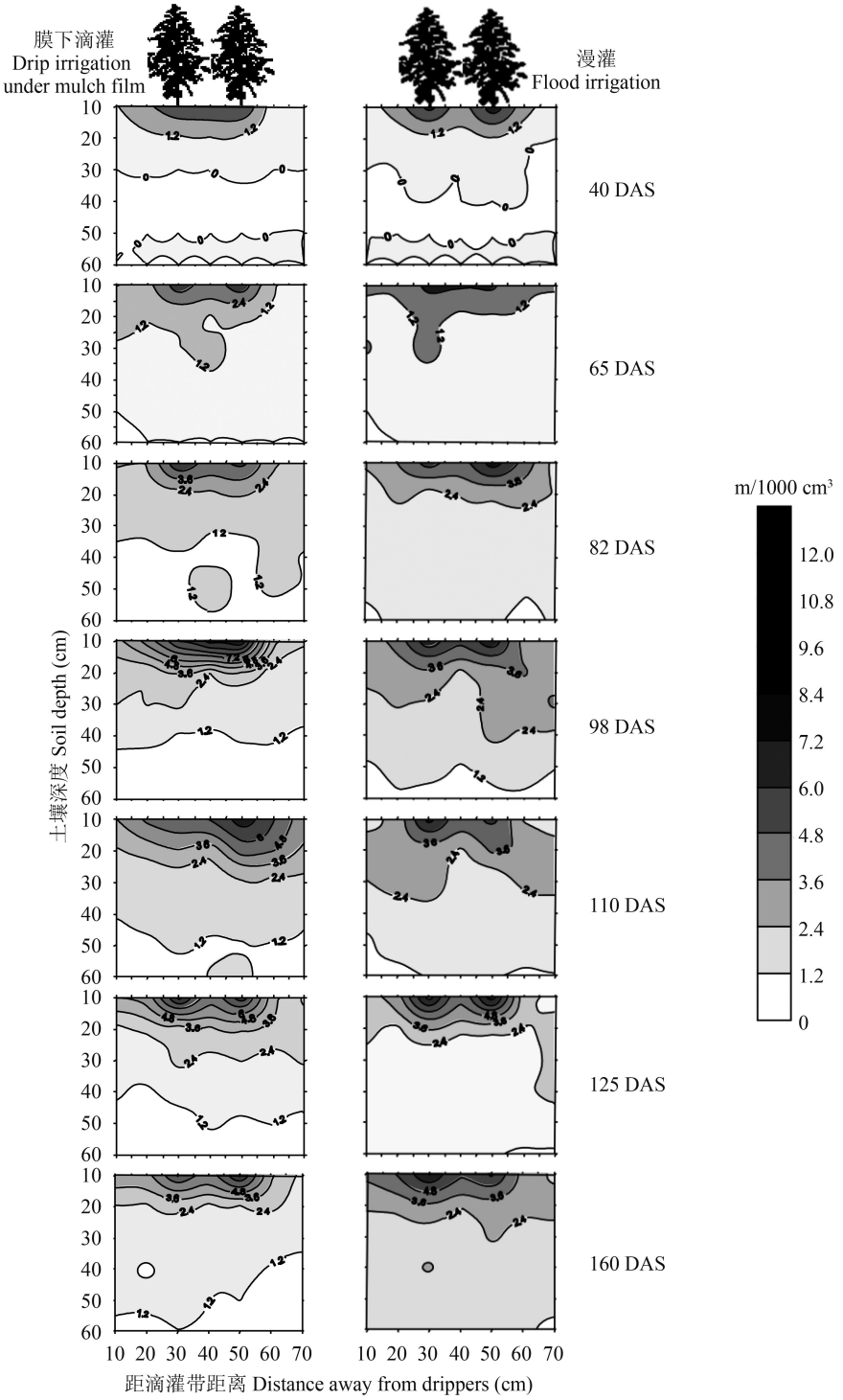

图 6　根长密度在土壤空间 xz 平面上的投影

Fig. 6　Projection of root length density in the soil depths xz horizontal

系贴近地表生长、下扎不深，并且朝滴灌带和膜内侧方向密集分布[23]，降低了其对不良环境条件的抗性。在本试验中，水肥供应在播种后 110 d 左右停止，滴灌棉花根系从播种后 125～160 d 出现显著衰退，而漫灌无此现象。滴灌最大的特点是水肥供应的“少量多次”，水分和养分均分布在一定的浅层土体内，滴灌棉花根系发育受控于水分和养分的供应，表现出分布浅，在深层土壤根量少的特点。随着环境的改变迫使滴灌棉花根系形成更多的细根（播种后 125 d 根系生长量明显小于漫灌，但根长几乎没有差别），与地上部争夺养分。同时，由于比漫灌结铃多（数据未列出），大量的养分及光合产

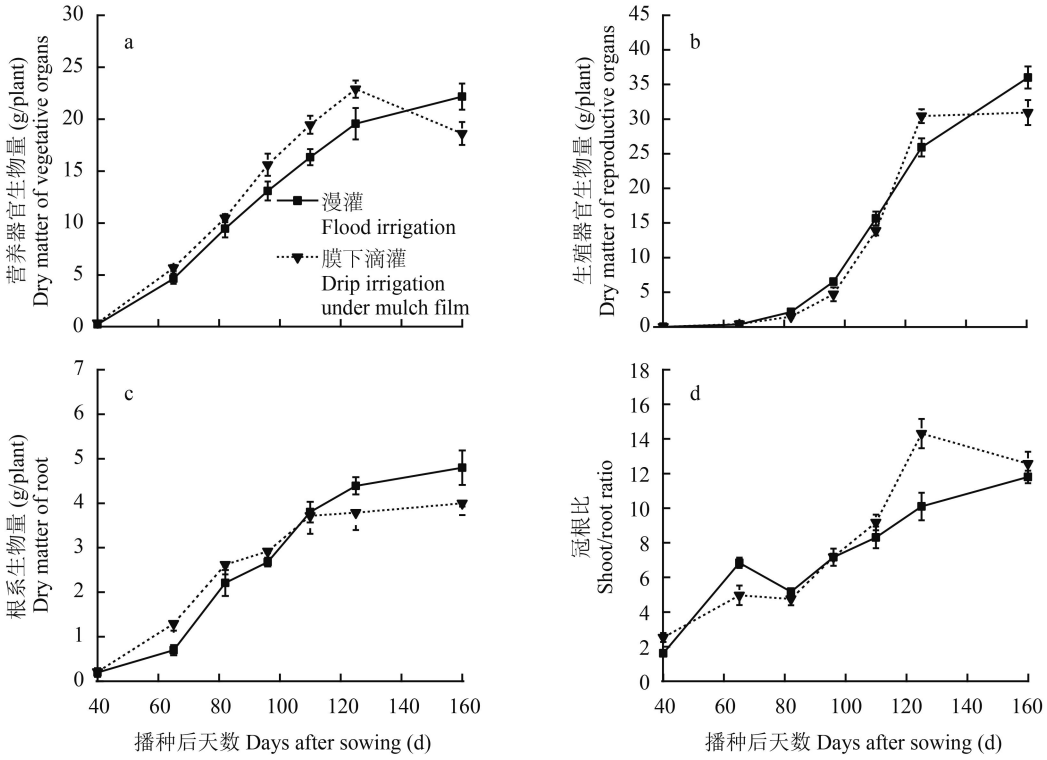

图 7 棉花地上部及根系随生育期的积累量及根冠比

Fig. 7 Cumulative biomass in different parts of cotton and corresponding shoot to root ratio along with growing days

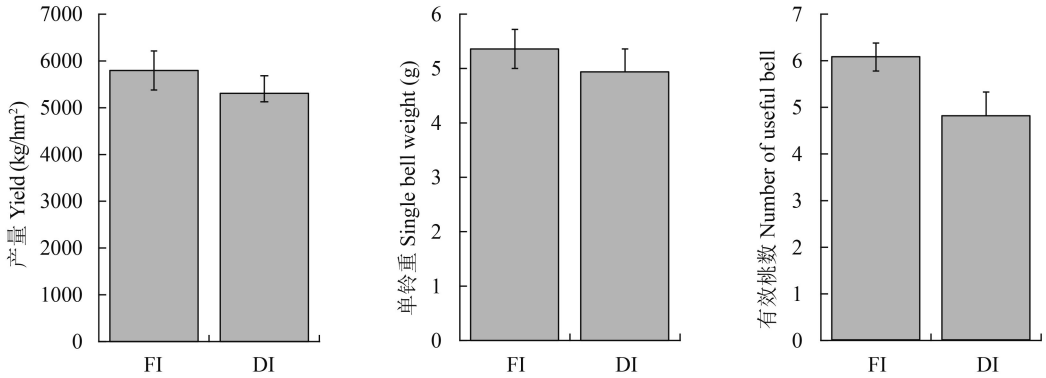

图 8 膜下滴灌与漫灌条件下棉花产量

Fig. 8 Cotton yield under flooding and drip irrigation

[注 (Note)：FI—漫灌 Flood irrigation; DI—膜下滴灌 Drip irrigation under mulch film.]

物在后期被转运至生殖器官，向根系输送的碳水化合物减少，根际中的食植性昆虫和寄生生物降解根系的速率加快[24–25]，而更多的细根会加速这一进程。

造成后期滴灌棉花根系衰退的原因还有可能与盐分局部聚积有关。这是因为试验所在地土壤盐分含量本身较高 (EC 2.38 mS/cm，水土比 1∶1)，采用膜下滴灌技术，在滴头垂直方向土壤湿度常保持湿润状态，土壤盐分向耕作层以下运移并发生聚积[26–27]，在水平方向上朝滴灌带两侧运移并累积在膜间的土壤表层。一旦停止水分供应，由于作物的蒸腾作用，土壤中的盐分会随水分向上运移至耕层 (浅层)，根系有可能受到盐分胁迫而死亡。因此，在新疆土壤条件下，滴灌频率以及停止灌溉的时间还需要更进一步的探讨。

3.2 膜下滴灌棉花根系分布特征对棉花生长造成的不利影响

从本研究结果可以看出，与漫灌相比，滴灌条件下棉花在生长方式上有三点不同，首先，滴灌棉

花在其生长发育后期具有更大的地上部生长量，但根系生长量却较漫灌小，这意味着滴灌棉花有限的根系需要承担很大的地上部对水分及养分的要求。其次，在滴灌条件下，表层土壤 (0—10 cm) 的根系分布比漫灌更加密集，这可能会导致不易移动的养分在表层土壤中的耗竭。对于膜下滴灌棉花而言，最容易出现的养分胁迫很可能是钾素的亏缺，这是由棉花的养分需求规律和滴灌棉花生长发育特点以及钾素在土壤中的移动特性共同决定的。与其他作物相比，棉花对钾的需求不但多，而且需求强度很大，主要集中在生长发育中后期较短的时间内，特别在花铃期，对钾的吸收比例可达到一生吸收总量的 60% 以上，而相同时期对氮与磷的吸收总量明显少于钾，分别占棉株一生总吸收量的 36.7%、38.2%[28]。因此，在新疆棉花种植中普遍将钾肥作为基肥施用的条件下，即使土壤钾素含量本身普遍较高，仍有可能发生缺钾性早衰问题。最后，滴灌棉花根系在生长发育后期明显衰退，减弱了对养分、水分的吸收能力。这些因素的综合作用使膜下滴灌棉花的养分、水分共需处于一种非常脆弱的平衡状态，一旦外界环境变差，这种供需平衡就很容易被打破，最终导致滴灌棉花地上部的需求大于根系的供给，对产量的形成产生不利影响，在本试验条件下滴灌棉花在生长发育后期叶片及蕾铃大量脱落以致棉花地上部生长量突然下降很好的证明了这一点。因此，如何通过合理的水肥管理促进根系形成良好构型，提高棉花的抗逆性，是实现膜下滴灌技术节水节肥且同时保证高产稳产的关键。

3.3　膜下滴灌棉花合理根系系统的构建

据观察，膜下滴灌棉花根系的衰老由表层开始，然后逐渐向深层蔓延。健康棉花根系的构建应该将以下两个方面作为重点：1) 在进入生殖生长阶段之前适当控制地上部长势，以便尽早建立强大完整的根系系统；2) 从根系分布来说，促进根系适当向土壤深层分布，有利于提高根系抵御不良环境条件的能力，保持整个棉花根系后期的活力以满足地上部对水分养分的需求。从本试验对根系分布的调查结果可以看出，漫灌处理棉花根系在生育后期除表层有明显衰退以外，10 cm 以下的根系始终处于生长状态，而且其增长量完全能弥补表层衰退的影响。滴灌处理棉花根系虽然中上层均处于衰退的状况，但在 40 cm 以下却依然保持着较强的活力。所以，通过合理的水肥供应，促进深层次的根系系统的合理构建，不仅可以有效防止前期大量消耗养分及水分，形成过于庞大的地上部，而且在中后期有利于保持土壤深层根系的活力，保证产量的形成。

4　结论

1) 膜下滴灌棉花根系表现出明显的浅层分布趋势。从播种后 96 d 开始，距地表10 cm 范围内的根系长度明显大于漫灌处理，而 30—60 cm 土层则正好相反。

2) 膜下滴灌棉花根系在其生长发育后期明显衰退，且主要集中在 0—40 cm 深度、距滴灌带 30—70 cm 土体范围内。

3) 采用目前膜下滴灌技术规程，会增加棉花从结铃后期至吐絮期叶片及蕾铃脱落的可能性，影响棉花产量的形成，需要继续研究改进该技术规程以发挥其应有的效益。

参 考 文 献：

[1] Bhattarai S P, Midmore D J, Pendergast L. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygation treatments in vertisols[J]. Irrigation Science, 2008, 26: 439–450.

[2] 张岁岐, 徐炳成. 根系与植物高效用水[M]. 北京: 科学出版社, 2011, 45–46.
Zhang S Q, Xu B C. Roots and high efficient water use of plants[M]. Beijing: Science Press, 2011, 45–46.

[3] 胡晓棠, 李明思. 膜下滴灌对棉花根际土壤环境的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 121–123.
Hu X T, Li M S. Effect of trickle irrigation under sub-film on the soil conditions of rhizosphere in cotton[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(3): 121–123.

[4] 张旺锋, 王振林, 余松烈, 等. 膜下滴灌对新疆高产棉花群体光合作用冠层结构和产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(6): 632–637.
Zhang W F, Wang Z L, Yu S L, et al. Effect of under-mulch-drip irrigation on canopy apparent photosynthesis, canopy structure and yield formation in high-yield cotton of Xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(6): 632–637.

[5] 简桂良, 张永军, 卢美光, 齐放军. 吨棉–我国棉花超高产的新思维[J]. 高科技与产业化, 2007, 11: 90–91.
Jian G L, Zhang Y J, Lu M G, Qi F J. Tons of cotton—a new thought of super high yield of cotton in China[J]. High-Technology and Industrialization, 2007, 11: 90–91.

[6] 高有伟. 棉花发生早衰的原因及防止对策[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(13): 88–89.
Gao Y W. The reasons and countermeasures of preventing the occurrence of premature senescence of cotton[J]. Auhui Agricultural Science Bulletin, 2008, 14(13): 88–89.

[7] Carmi A, Plaut Z, Heuer B, Grava A. Establishment of shallow and restricted root systems in cotton and its impact on plant response to irrigation[J]. Irrigation Science, 1992, 13: 87–91.

[8] Carmi A, Plaut Z, Sinai M. Cotton root growth as affected by changes in soil water distribution and their impact on plant tolerance to drought[J]. Irrigation Science, 1993, 13: 177–182.

[9] Klepper B. Cotton root system responses to irrigation[J]. Irrigation Science, 1991, 12: 105–108.

[10] 危常州, 马富裕, 雷咏雯, 等. 棉花膜下滴灌根系发育规律的研究[J]. 棉花学报, 2002, 14(4): 209–214.
Wei C Z, Ma F Y, Lei Y W, *et al*. Study on cotton root development and spatial distribution under film mulch and drip irrigation[J]. Cotton Science, 2002, 14(4): 209–214.

[11] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009. 87–88.
Zhang F S, Chen X P, Chen Q. The guidelines of fertilization in China's major crops[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009. 87–88.

[12] Gregory P J, Eastham J. Growth of shoots and roots, and interception of radiation by wheat and lupin crops on a shallow, duplex soil in response to time of sowing[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1996, 47: 427–447.

[13] Gan S S. Senescence processes in plant-Annual plant[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2007, 45–47.

[14] Kim H J, Lim P O, Nam H G. Molecular regulation of leaf senescence[A]. Gan S S. Senescence processed in plants[C]. Oxford: Blackwell Publishing, 2007. 78–88.

[15] Niu J F, Peng Y F, Li C J. Difference changes in root length at the reproductive stage in maize plants grown in the field and quartz sand[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 173(2): 306–314.

[16] Watt M, Hugenholtz P, White R. Numbers and locations of native bacteria on field grown wheat roots quantified by fluorescence in situ hybridization[J]. Environmental Microbiology, 2006, 8: 871–884.

[17] Welbank P J, Gibb M J, Taylor P J, Williams E D. Root growth of cereal crops[A]. Report for Rothamsted Experimental Station for 1973[C]. Harpenden, 1974, 26–66.

[18] Barraclough P B, Leigh R A. The growth and activity of winter wheat roots in the field: the effect of sowing date and soil type on root growth of high-yielding crops[J]. Journal of Agricultural Science, 1984, 103, 59–74.

[19] Hamblin A P, Hamblin J. Root characteristics of some temperate legume species and varieties on deep, free-draining Entisols[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1985, 36: 63–72.

[20] Gregory P J, Palta J A, Batts G R. Root systems and root: mass ratio-carbon allocation under current and projected atmospheric conditions in arable crops[J]. Plant and Soil, 1997, 187: 221–228.

[21] Gregory P J. Resource capture by root networks[A]. Monteith J L, Scott R K, Unsworth M H. Resource capture by crops, Proceedings of the 52nd Easter School[C]. Nottingham: Nottingham University Press, 1998. 77–97.

[22] 姜益娟, 郑德明, 翟云龙. 不同灌溉方式的棉花根系在土壤中的分布特征[J]. 塔里木大学学报, 2008, 20(1): 1–5.
Jiang Y J, Zheng D M, Zhai Y L. Distribution characteristics of cotton root system in different irrigation ways[J]. Journal of Tarim University, 2008, 20(1): 1–5.

[23] Eissenstat D M, Wells C E, Yanai R D. Building roots in a changing environment: implications for root longevity[J]. New Phytologist, 2000, 147: 33–42.

[24] Wiesler F, Horst W J. Differences among maize cultivars in the utilization of soil nitrate and the related losses of nitrate through leaching[J]. Plant and Soil, 1993, 151: 193–203.

[25] Malash N M, Flowers T J, Ragab R. Effect of irrigation methods, management and salinity of irrigation water on tomato yield, soil moisture and salinity distribution[J]. Irrigation Science, 2008, 26: 313–323.

[26] 周和平, 徐小波, 兰玉军. 膜下滴灌条件下土壤水盐运移研究综述[J]. 节水灌溉, 2006, 4: 8–10, 13.
Zhou H P, Xu X B, Lan Y J. Review of research on soil water and salt transportation under the condition of drip irrigation under film in Xinjiang area[J]. Water Saving Irrigation, 2006, 4: 8–10, 13.

[27] Abaye A O. Potassium fertilization of cotton[J]. Viginia Cooperative Extension, 2009, 418–025: 1–4.