棉花根系生长和空间分布特征

张立桢^{1,2} 曹卫星^{1*} 张思平² 周治国¹

(1 南京农业大学农业部作物生长调控重点开放实验室, 南京 210095)

(2 中国农业科学院棉花研究所农业部棉花遗传改良重点实验室, 河南安阳 455112)

摘要 结合田间根钻取样和图像扫描分析方法, 研究了不同棉花品种根系的长度、直径和表面积动态及 0~100 cm 深和 0~40 cm 宽土壤范围内的空间分布特征。该方法与常规直尺测量结果相比相关系数 R^2 达到 0.899 ($n = 1\ 318$), 显示了较好的可靠性。研究结果表明, 棉花平均根长密度 (RLD) 在花铃期为 $1.21 \sim 1.27 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 吐絮后降至 $1.04 \sim 1.12 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 收花时为 $0.76 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。棉花根平均直径在不同基因型间存在显著差异, 抗虫杂交棉的根直径最粗, 平均为 0.52 mm; 早熟类型品种根直径较细, 平均为 0.36 mm。在土壤深度上根直径的差异不显著, 但距棉行距离越远, 根的平均直径越小。在明确根系长度和直径动态规律的基础上, 提出了根表面积指数 (RAI) 的概念, 与地上部叶面积指数具有相似的含义和生物学意义, 且呈较好的指数相关关系 ($R^2 = 0.779$)。 RAI 在生理发育时间 (PDT) 小于等于 40 前, 其增长动态符合 LOGISTIC 生长规律 ($R^2 = 0.849$), 在 PDT 大于 40 后, 呈线性递减趋势 ($R^2 = 0.570 \sim 0.895$), 且杂交抗虫棉的 RAI 在全生育期内均明显高于其它类型品种, 而早熟类型品种相对略低。 RAI 空间分布特征表现为, 开花前在浅根层内 (0~30 cm) 分布最多, 花铃期以中层根系 (40~60 cm) 为主, 吐絮后主要以深层 (70~100 cm) 和距棉行较远的行间较多。研究结果为制定合理的施肥、灌溉措施提供了理论依据, 并量化了棉花根系的时空变化, 为进一步提高生长发育模拟模型的精度奠定了基础。

关键词 棉花 根系生长 根系空间分布 根表面积指数

CHARACTERIZING ROOT GROWTH AND SPATIAL DISTRIBUTION IN COTTON

ZHANG Li-Zhen^{1,2} CAO Wei-Xing^{1*} ZHANG Si-Ping² and ZHOU Zhi-Guo¹

(1 MOA Key Laboratory of Crop Growth Regulation, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 MOA Key Laboratory of Cotton Genetic Improvement, Cotton Research Institute, CAAS, Anyang 455112, China)

Abstract By combining root auger and image analysis methods for root sampling and measurement, this study investigated the dynamic characteristics of cotton plant root growth and the spatial distribution of root length, diameter and area. The experiment was conducted during 2001 and 2002 at an experiment station located in Anyang city, Henan Province. A root performance experiment of different genotypes was conducted in 2001 using 4 cotton cultivars: middle season hybrid 'CRI29' with *Bt*, middle season variety 'CRI35' without *Bt*, middle season variety 'CRI32' with *Bt* and early season variety 'CRI37' with *Bt*. Plant density was 60 000 plants per hectare. In 2002, the American middle season variety '33B' with *Bt* was included and measured in 40 cm × 40 cm × 100 cm deep soil pits. The soil was loam. Climate data from a nearby weather station were used to calculate the cotton physiological development time (PDT). Computation of PDT also integrated thermal effectiveness, photoperiod effectiveness, genetic effectiveness and its interactions. Root samples were collected at four distances from the cotton row: 0, 15, 25 and 35 cm. Root samples were collected from 40 cm × 40 cm × 100 cm deep soil pits and sampled every 10 cm from 0 to 100 cm soil depth at each location. The roots were sampled using a root auger that had a volume of 316.73 cm^3 . The roots were washed from the soil core with all cotton roots collected in the samples. Cleaned roots were scanned to a black and white image at a resolution of 200 dpi. DT-SCAN software was used to calculate root length, root diameter and root surface area. Compared to the ruler measurement method to estimate root length density (RLD), the image analysis method using DT-SCAN for estimating RLD gave similar results ($R^2 = 0.899$, $n = 1\ 318$). The results indicated that the RLD of cotton averaged $1.21 \sim 1.27 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3}$ during flowering and boll stage, $1.04 \sim 1.12 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3}$ after boll opening, and $0.76 \text{ mm} \cdot \text{cm}^{-3}$ during the harvest period. Root diameter was significantly

收稿日期: 2003-09-22 接受日期: 2004-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30030090; 30170545) 及国家 863 计划项目 (2003AA209030; 2002AA2Z4021)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: caow@njau.edu.cn

E-mail of the first author: zhanglizhen@371.net

different among genotypes ($p = 0.022$), with the thickest root diameter of 0.52 mm in an insect resistant hybrid cultivar and the thinnest root diameter of 0.36 mm in the early maturation cultivar. Root diameters were not significantly different between soil layers but were significantly thinner with increasing distance from the cotton row. Because of the significant differences observed in root length and diameter among soil layers, distance from plant and genotypes, we developed a root area index (RAI) that has similar biological meaning as the leaf area index. The RAI and LAI were exponentially related ($R^2 = 0.799$). The dynamic time course of RAI fit a logistic growth pattern ($R^2 = 0.849$) with physiological development time (PDT) when the PDT was smaller than 40, and exhibited a linear decreasing pattern ($R^2 = 0.570 - 0.895$) when PDT was greater than 40. The highest RAI calculated was in the insect-resistant hybrid cultivar and the lowest in early maturation cultivar. The vertical and temporal changes in RAI were as follows: RAI was the greatest in the topsoil layer (0–30 cm) before flowering, in the mid soil layer (40–60 cm) during flowering and boll stage, and in the deep layer (70–100 cm) and at locations away from the cotton row after boll opening.

Key words Cotton, Root growth, Root spatial distribution, Root area index

棉花是直根系深根作物,由入土很深的主根、分布较广的侧根和众多的根毛组成发达的根系网,其吸收区域仅限于各级侧根和主根的根尖部分。棉花根系在土壤中的时空分布直接影响其对水分、养分的吸收,量化其时间、空间上的动态关系对提高施肥和灌水的准确性和产量品质有着重要意义。对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(Burgess *et al.*, 1998; Stirzaker & Passioura, 1996)和土壤温度(Burke & Upchurch, 1995; McMichael *et al.*, 1996)。植物根系的干物重与地上部干物重之间存在明显的相关关系(Russell, 1977)。常见描述根系生长和分布的指标为根长密度,即单位体积土壤所含根系的长度($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$)。McMichael等(1996)利用盆栽法根据土壤温度的变化预测根长密度动态规律及其在深度层次上的分布,但认为在大田情况下测定根系能更好地评价根系的生长发育动态。棉花根系平均直径的大小是反映棉花根系组成和功能活力的重要指标,但研究根系平均直径相对较少。因为根系吸收水分和养分的多少与根系吸收表面积的关系最为密切,而根系直径可能存在一定的差异,因此需要更完整的指标来描述根系活动。常规根系研究方法容易获得根长密度,但难以测定根表面积指数,所以对根系吸水函数的描述多数以根长密度作为因子(龚元石和李保国, 1996),因此,应用图像分析方法测定和研究根表面积指数建立根系的养分和水分吸收模型更为准确。

本研究综合运用根钻法取样和计算机图像分析技术(李亚兵和张立桢, 1999),量化棉花根系生长的动态及其空间分布。明确棉花根系不同生育时期和基因型间的差异,不但可解释不同品种肥水利用效率的差异,而且也将为棉花灌溉、施肥提供科学依据。还将为准确模拟棉花的生长发育和水分、养分

吸收过程奠定基础。

1 材料和方法

1.1 试验与材料

分别于 2001 年和 2002 年在河南省安阳市中国农业科学院棉花研究所进行了两季试验。2001 年的试验内容为不同基因型棉花根系试验。品种分别为抗虫杂交棉‘中棉所 29’(中熟)、常规中熟棉‘中棉所 35’、中熟抗虫棉‘中棉所 32’和早熟抗虫棉‘中棉所 37’。试验小区面积为 $6.3 \text{ m} \times 14.5 \text{ m}$, 9 行区, 行距 0.7 m, 株距 0.2 m, 试验设计密度 60 000 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$, 3 次重复, 完全随机区组设计。除早熟品种‘中棉所 37’为 5 月 16 日播种外, 其它品种均在 4 月 19 日播种。2002 年试验采用美国抗虫棉‘33B’为参试品种, 采用池栽法种植, 3 次重复。池区面积为 1.3 m (长) $\times 2.3 \text{ m}$ (宽), 池深 2 m, 行距 0.8 m, 株距 0.17 m, 4 月 15 日播种。

试验地位于 $116^{\circ}22' \text{ E}$, $36^{\circ}07' \text{ N}$; 海拔高度为 76.4 m。多年平均降水量为 570.1 mm; 年平均温度 13.8°C ; 0°C 以上的积温为 $5\ 100^{\circ} \text{C}$; 5°C 以上的积温 $5\ 127^{\circ} \text{C}$, 大于 10°C 的积温为 $4\ 450^{\circ} \text{C}$; 试验年份大气平均相对湿度 78.6%, 太阳辐射强度 $1.16 \times 10^7 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

试验地土壤为粘垆土, 洪积母质, 深度在 1 m 以上, pH 值在 7.5 ~ 8.5, 容重 $1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 土壤密度 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 有机质含量在 1.06% ~ 1.53%; 全 N、全 P、全 K 含量分别为 0.102%、0.052%、1.73%。播种前施 N、P、K 含量分别为 12%、18%、15% 的复合肥 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 初花期和花铃期分别追肥尿素各 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 蕾期、初花期和打顶后分别使用缩节安 15.0、22.5 和 $30 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其它生产管理措施同常规大田生产。在两年试验的棉花全生育期内, 均

无明显水分胁迫发生。

在试验期间,对各处理棉株的基本生育特征进行了观察测定,采用叶片长宽法测定了叶面积指数,每次测定取 10 株单株,计算系数为 0.75。利用从中国农业科学院棉花研究所气象观测站获得的当年气象资料及品种特有的遗传性状,计算出随作物生育进程而变的生理发育时间(*PDT*)。*PDT* 综合考虑了热效应、光周期效应、品种遗传效应的互作。因为 *PDT* 指标不受年份、生态区和基因型的影响,得出的结论有较强的稳定性,其算法见张立桢等(2003)建立的棉花生育期模型。

1.2 根系研究方法

1.2.1 测点位置

在试验小区内,分别在距棉行不同水平距离上设置 3~4 个测点,2001 年不同品种大田试验设 4 个测点,分别距棉行 0、15、25、35 cm;2002 年池栽试验设 3 个测点,分别距棉行 0、15、35 cm。每个测点在 0~100 cm 土壤深度范围内,每 10 cm 层次的深度取一个土样。

1.2.2 取样方法

试验用根钻法取样,每处理分别取 3 个重复,每重复按不同水平位置取 4 钻,每钻按深度取 10 个样本。根钻内径 6.35 cm,样室高 10 cm,内体积为 316.73 cm³。取出的带根土壤样品用冲根器冲洗分离,冲根器为中国农业科学院棉花研究所生理生态课题组自行设计,用于分离根系的网筛为 50 目细铁网,保证冲根过程中水和土粒可自由通过,但包括细小新根在内的所有根系均不能通过,一次可同时冲洗 4 个样品,冲洗时间为 20 min 左右。分离出来的根系,人工用镊子仔细定位排放到玻璃板上,供测量用。

1.2.3 根系扫描和分析

用普通手持扫描仪将排放在玻璃板上的根样在 200 dpi 像素下,扫描成黑白对照的 TIF 图像文件。扫描时,在玻璃板下加铺一层蓝色的背景布,以增加图像的对比度。扫描好的 TIF 文件用 DT-SCAN 图像分析软件(英国 Delta 公司,1.0 版)计算根系的长度、平均直径和根表面积等形态特征指标。

1.3 根系特征指标

1.3.1 根长密度

根长密度(*RLD*)为单位土壤体积内的根系长度,文中 *RLD* 为图像分析得到的根系长度与根钻内体积之比,单位为 mm·cm⁻³。

1.3.2 平均直径

常规方法很难准确测定根系的直径,特别是吸收功能较强的新根,本文采用图像分析方法可以计算出棉花主根和各级侧根的平均值。

1.3.3 根表面积指数

同一根长条件下,根系的吸收表面积随根系直径不同而变化,而吸收表面积是反映根系吸收作用最直接的指标。为此,本研究提出根表面积指数(*Root area index, RAI*)作为量化根系表面积大小的指标,定义为单位土地面积上根系吸收表面积的大小,单位为 cm²·cm⁻²。计算公式如下:

$$RAI = \sum_{i=1}^N S/V \times H/100$$

式中 *S* 代表根钻法测得根系样品的表面积(mm²),*V* 代表根钻的内体积(cm³),*H* 代表根钻样室的高度(cm),*N* 为取样层次数。可以看出,根表面积指数具有与地上部叶面积指数相对应的内涵,因而具有较好的生物学意义。

采用图像分析方法可直接得到根表面积 *S*,*RAI* 根据上式计算。

1.4 数据分析工具

应用 EXCEL5.0 软件对试验数据进行统计计算,SPSS11.5 统计分析软件对试验数据进行 *t* 检验、方差和回归分析。

2 结果与分析

2.1 图像分析法测定根系的准确性检验

分别在 2001 和 2002 年应用根钻取样后人工直尺测量根系长度,并与根钻取样和图像分析方法测定的根长密度进行了比较(图 1)。对以两种方法测定的 1 318 组数据进行 *t* 检验的结果表明,二者相关

图 1 实测法与图像分析法测定棉花根长密度的结果比较
Fig.1 The comparison of root length density(*RLD*) measurements by ruler measurement method with image analysis method

系数 $R^2 = 0.899$, 达到了极高的显著水平 ($p < 0.0001$)。结果显示图像分析方法具有较高的准确性。

2.2 根长密度生长动态和空间分布

2.2.1 水平位置上的根长密度动态

2001 年棉花的根长密度在水平方向上随生育期变化的规律如表 1 所示。方差分析结果表明, 棉行上的根长密度明显大于距棉行 15、25、35 cm 位置, 与距棉行 15 cm 达到 0.05 水平上的显著差异 ($p = 0.044$), 与其它位置均达到极显著差异 ($p < 0.01$)。距棉行 15、25、35 cm 3 个位置上的根长密度虽然有递减趋势, 但差异不显著。

2.2.2 深度层次上的根长密度动态

表 2 为棉花根长密度在土壤深度层次上随生育进程的变化动态。可以看出, 花铃期根系在 0 ~ 30 cm (浅根层) 土壤范围内的分布最大, 其次是 40 ~ 60 cm (中根层), 70 ~ 90 cm (深根层) 的根系分布相对较小, 且以浅根层变化较大, 下降较快, 而中根层以下的根长密度变化较小。随着棉花接近吐絮期, 浅层

根减少, 深层根系却有所增加。因而可以认为, 开花后棉花根系的活动主要包括两个内容, 一是根系自然衰老死亡, 浅层根发育较早, 故死亡速率大。

2.3 根系直径的变化特征

对 2001 年 4 个不同类型棉花品种在不同深度、广度下根系平均直径的方差分析表明, 不同时期取样(7 月 15 日至 10 月 8 日, 共 7 次), 根系平均直径差异不显著 ($p = 0.443$), 说明 7 月棉花开花以后根系的平均直径变化不大。不同深度层次棉花根系的平均直径也没有显著差异 ($p = 0.869$); 而距棉行不同水平距离上的根系平均直径差异极显著 ($p = 0.000$), 距棉行越远, 直径越小, 但在距棉行 15、25、35 cm 3 个位置上, 棉花根系的差异未达到显著水平。不同棉花品种的平均根系直径在 0.05 水平上差异显著 ($p = 0.022$), 两个中熟抗虫棉品种‘中棉所 35’和‘中棉所 32’的根系直径差异不显著, 但与抗虫杂交棉‘中棉所 29’和短季棉‘中棉所 37’的差异极显著(表 3)。

表 1 根长密度在水平位置上的变化动态(mm·cm⁻³)
Table 1 Dynamic changes of *RLD* at different horizontal placements (mm·cm⁻³)

水平位置 Placement	日/月 Day/month						
	15/7	29/7	13/8	27/8	10/9	24/9	8/10
D ₀	1.67	1.86	2.07	1.84	1.07	1.32	0.96 ^a
D ₁₅	1.19	1.23	1.03	0.99	0.88	1.30	0.80 ^b
D ₂₅	1.34	0.86	0.97	0.87	1.09	0.99	0.61 ^b
D ₃₅	0.84	1.01	1.03	1.13	1.12	0.86	0.65 ^b

D₀、D₁₅、D₂₅、D₃₅ 分别为距棉行 0、15、25、35 cm; 所有数据均为 2001 年 4 个品种(‘中棉所 29’、‘中棉所 32’、‘中棉所 35’、‘中棉所 37’)和 0 ~ 100 cm 土壤深度范围的平均值 D₀, D₁₅, D₂₅, D₃₅ refer to the distance away from cotton row of 0, 15, 25, 35 cm respectively; data are averaged from 4 varieties (‘CRI29’, ‘CRI32’, ‘CRI35’, ‘CRI37’) in 2001 and 0 – 100 cm soil depth

表 2 根长密度在深度层次上的变化动态(mm·cm⁻³)
Table 2 Dynamic changes of *RLD* at different soil layers (mm·cm⁻³)

土层深度 Depth (cm)	日/月 Day/month						
	15/7	29/7	13/8	27/8	10/9	24/9	8/10
10	2.99	3.50	3.25	2.72	1.70	1.08	0.89
20	4.93	2.38	3.24	2.20	1.91	1.94	0.95
30	2.73	1.36	1.57	1.39	1.33	1.50	0.78
40	0.93	0.97	0.94	1.10	1.13	0.54	0.58
50	0.38	1.11	1.18	0.81	0.71	1.00	1.07
60	0.14	0.61	1.03	0.57	1.12	1.59	0.69
70	0.13	0.64	0.23	0.88	0.71	0.87	0.96
80	0.28	0.63	0.12	0.65	0.52	0.82	0.66
90	0.06	0.53	0.25	0.90	0.53	0.90	0.60
100	0.07	0.69	0.97	0.87	0.75	0.93	0.40

所有数据均为 2001 年 4 个品种(‘中棉所 29’、‘中棉所 32’、‘中棉所 35’、‘中棉所 37’)和距棉行 0 ~ 35 cm 水平范围的平均值 Data are averaged from 4 varieties (‘CRI29’, ‘CRI32’, ‘CRI35’, ‘CRI37’) in 2001 and 0 ~ 35 cm horizontal distance away from cotton row

表3 不同基因型和水平位置上棉花根系直径的变化(mm)
Table 3 The changes of root diameter with different cotton genotypes and horizontal placements (mm)

品种 Cultivar	距棉行的水平距离 Placement from cotton row				平均 Mean *
	0 cm	15 cm	25 cm	35 cm	
‘中棉所 29’ ‘CRI29’	0.56	0.52	0.49	0.49	0.52 ^a
‘中棉所 32’ ‘CRI32’	0.51	0.44	0.41	0.41	0.44 ^b
‘中棉所 35’ ‘CRI35’	0.48	0.44	0.40	0.39	0.43 ^b
‘中棉所 37’ ‘CRI37’	0.45	0.37	0.34	0.32	0.36 ^c
平均 Mean **	0.50 ^d	0.44 ^e	0.41 ^e	0.40 ^e	0.43

* : 表示达到 $p=0.05$ 水平上的显著差异 Indicates significant at $p=0.05$ * * : 表示达到 $p=0.01$ 水平上的显著差异 Indicates significant at $p=0.01$
所有数据均为 2001 年不同时期取样及在 0~100 cm 土壤深度范围内的平均值 Data are averaged from different sample time and 0-100 cm soil depth
a~e 表示方差分析 LSD 显著差异 a-e indicate significant different of LSD test

2.4 根表面积指数的变化及空间分布

2.4.1 根表面积指数与叶面积指数的相关性

对 2001 年‘中棉所 29’和‘中棉所 37’两个不同类型棉花品种全生育期 LAI 和 RAI 的回归分析,发现 LAI 和 RAI 之间存在较好的相关性。RAI 与 LAI 之间的关系如图 2 所示,采用指数方程拟合($R^2=0.779$)较好。结果说明,根表面积指数和叶面积指数不但有相近的生物学意义,而且具有密切的相关性。在生育后期根系总量相对稳定,防止早衰的重点应该是通过叶面补肥或其它途径维持相对较高的叶面积指数。

图2 棉花根表面积指数与叶面积指数的关系
Fig.2 The relationship of root area index to leaf area index in cotton

2.4.2 根表面积指数随生理发育时间的变化

如图 3 所示,根表面积指数 RAI 随着生理发育时间 PDT 由小到大、再由大到小地动态变化。对 2001 和 2002 年两年试验资料的分析表明,在开花前,RAI 的增长基本符合 LOGISTIC 生长曲线;开花至收获期主要受自然死亡因素的影响,根系生长相对比较复杂,其基本规律呈线性递减趋势。另外,不同基因型棉花的 RAI 明显不同,抗虫杂交棉‘中棉所 29’明显高于非杂交类型棉花品种‘中棉所 35’、‘中棉所 32’、‘33B’和‘中棉所 37’。早熟类型棉花

品种‘中棉所 37’的 RAI 明显小于其它品种。类型相似的 3 个品种‘中棉所 35’、‘中棉所 32’和美国抗虫棉‘33B’的 RAI 没有太大差异。由于生理发育时间综合了热效应、品种遗传参数和光周期效应等(张立桢等, 2003),所以不同品种和年度间到达某一生育时期的生理发育时间恒定,使不同年份和不同地点的资料具有较好的可比性。

根表面积指数 RAI 随 PDT 的动态变化规律可用下列公式表示为:

$$RAI = \begin{cases} RAI_{\max}/(1 + K \times \exp(-R_m \times PDT)) & PDT \leq 40 \\ a + b \times PDT & PDT > 40 \end{cases}$$

上式中,RAI 为根表面积指数($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$); PDT 为生理发育时间; $RAI_{\max}$ 为最大根表面积指数($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$); K 为中间变量; R_m 为 RAI 随 PDT 的相对增长速率(PDT^{-1})。在 PDT 小于 40 前,RAI 随 PDT 的 LOGISTIC 增长函数的吻合度达到显著水平($R^2=0.849$)。在 PDT 大于 40 后,a 和 b 分别为直线的截距($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}$)和斜率(PDT^{-1})。不同基因型间存在差异。棉花生育前期($PDT \leq 40$),杂交棉品种‘中棉所 29’根表面积增长相对较快,表现为最大根表面积指数和相对增长速率都较高,这一结果较好地解释了杂交棉为什么生长较常规棉旺盛,产量较高的原因,因为杂交棉前期根系量大,所以需要更多的肥水供应,这与杂交高肥水特性相吻合;早熟品种‘中棉所 37’的最大根表面积指数和相对增长速率都最小,这与早熟棉播种晚有关,表明早熟品种要提高生物产量,必须增加前期根系总量,相应也提高了地上部生长量,主要措施应是增加种植密度;中熟品种‘33B’和‘中棉所 35’、‘中棉所 32’根表面积增长的趋势相近,低于杂交棉,高于早熟品种。在生育后期($PDT > 40$),杂交棉根面积指数降低的幅度最大,早熟品种最小,这与生长上杂交棉容易早衰,早熟品种吐絮时仍能维持一定的叶面积指数相吻合。

表 4 不同基因型棉花根表面积指数随 PDT 计算公式参数表
Table 4 The parameters of formula of RAI to PDT for different cotton genotypes

品种	Cultivar	RAI_{max} ($cm^2 \cdot cm^{-2}$)	K	R_m PDT^{-1}	a ($cm^2 \cdot cm^{-2}$)	b PDT^{-1}	R^{2*}	R^{2**}
‘33B’								
‘中棉所 35’ ‘CRI35’		0.621 5	2.033	0.085 5	0.993 0	-0.008 0	0.849	0.570 0
‘中棉所 32’ ‘CRI32’								
‘中棉所 29’ ‘CRI29’		0.900 0	2.110	0.121 1	1.288 0	-0.013 0	0.901	0.895 0
‘中棉所 37’ ‘CRI37’		0.501 2	1.980	0.063 4	0.657 6	-0.004 4	0.764	0.760 5

* 和 ** 分别为 $PDT \leq 40$ 和 $PDT > 40$ 各品种根表面积指数随 PDT 变化规律的相关系数 * and ** indicate the coefficients between RAI and PDT for each cultivar at $PDT \leq 40$ and $PDT > 40$ respectively
 RAI_{max} : 最大根表面积指数 Maximum root area index K : 中间变量 Interim parameter R_m : RAI 随 PDT 的相对增长速率 The relative growth rate of RAI against PDT a 和 b 分别为直线的截距 a and b indicate intercept and slope of linear relationship

图 3 不同基因型不同年份下棉花根表面积指数随生育进程的变化动态
Fig.3 The dynamic changes of root area index over physiological development time (PDT) in different cotton genotypes and growing years

2.4.3 根表面积指数的空间分布特征

2002 年 6 月中旬 ($PDT < 17.5$), 棉花没现蕾前, 根系处于生长旺盛时期, 浅根层 (0 ~ 30 cm) 根系生长较快, 距棉行越远, 分布较少。7 月 12 日 ($PDT = 25.39$), 接近开花期 ($PDT = 27.5$) 时, 根系形态基本建成, 所以此时 RAI 的分布特征具有代表性, 由浅入深, 根表面积指数呈指数递减 (相对速率为 $-0.057 2 cm^{-1}$, $R^2 = 0.817$), 由近而远, 距棉行 0 ~ 15 cm 范围内呈递减趋势, 距棉行 15 ~ 35 cm 范围内递减缓慢。9 月 5 日, 在棉花吐絮前后, 根系主要集中在中层 (50 ~ 80 cm), 距棉行较远的行间分布较多。不同基因型间差异不明显。

3 小结与讨论

结合较简便的田间根钻取样和先进的图像扫描与分析方法, 可以较容易地获取大量田间状态下的作物根系数据。通过 1 300 多组试验数据的 t 检验, 图像法与常规直尺测定根长方法相比, 相关性达到极显著水平 ($R^2 = 0.899$), 具有较强可靠性。

棉花根系在土壤中的根长密度 RLD 在花铃期

为 $1.21 \sim 1.27 mm \cdot cm^{-3}$, 吐絮后降至 $1.04 \sim 1.12 mm \cdot cm^{-3}$, 收花时为 $0.76 mm \cdot cm^{-3}$ 。 RLD 的空间分布与品种关系不大, 但在深度与广度上存在显著差异, 且在不同时期根系活动的中心有所改变, 在花铃期主要以中、浅层范围的根长密度较高, 吐絮后则主要是以深层根和距棉行较远的行间分布较多。

不同基因型间不但根系长度存在显著差异, 而且直径也存在显著差异, 抗虫杂交棉的根系直径最粗, 平均为 $0.52 mm$, 早熟品种根系直径较细, 平均只为 $0.36 mm$, 中熟抗虫棉的根系直径平均在 $0.43 mm$ 左右。根系直径在土壤深度上的差异不显著, 但距棉行距离越远, 根系的平均直径越小。由于棉花根系直径在不同基因型间和分布广度上存在显著性差异, 所以在研究根系对水分与养分的吸收和竞争时, 要注意基因型和分布广度的影响。因为根长密度指标忽略了根系直径的差异, 虽然是一项较易获得的根系参数, 但在某些情况下, 难以确切反映根系活动的差异, 因此采用与根系直径有关的根表面积指数来描述根系的功能更为准确。

对棉花 RAI 的分析表明, 棉花苗期的 RAI 约为

0.24; 初花期达到 0.5 左右; 棉花封行时达到最大值, 约为 0.6~0.9 左右; 之后 *RAI* 逐渐减小, 到吐絮前后, 为 0.4~0.5; 至收获时, *RAI* 仍然维持在 0.3 左右。不同基因型 *RAI* 有显著差异, 杂交抗虫棉的 *RAI* 在全生育时期都明显高于其它品种, 而早熟品种相对略低。对 *RAI* 随 *PDT* 增长动态的定量分析表明, 棉花在 *PDT* 小于或等于 40 时, 其增长动态符合 LOGISTIC 生长规律 ($R^2 = 0.849$), *PDT* 大于 40 时, 呈线性递减趋势 ($R^2 = 0.570 \sim 0.895$)。 *RAI* 空间分布开花前在浅根层, 花铃期在中层, 吐絮后主要在深层和距棉行较远的行间。

研究作物根长的生长规律, 对制定适宜的施肥、灌溉方案等有着重要意义。张立桢等(1998)利用玻璃箱法研究棉花的根系生长发育, 测定了土壤剖面的根长密度, 常规整枝棉花的剖面根长密度在花铃期(8 月 1 日)达到最大值, 与本研究结果相近。早期的研究认为棉花总根长在植株高度达到最大值时最大, 然后降低(Taylor & Klepper, 1974, 1978), 但数值随研究单株不同变化较大, 这主要是研究方法的局限性。Kramer(1989)在植物的水分关系一书中综合了 Mengel 和 Taylor 等人的观点, 认为玉米从抽雄到成熟期间, 根系密度降低 40%~50%。并且 $0.2 \sim 0.3 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的根密度便能满足棉花和大豆生长要求。本研究根系在达到高峰时期(花铃期)浅层土壤(0~20 cm)根密度在 $0.22 \sim 0.49 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 数值比较接近, 全根层平均根密度为 $0.12 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右, 要小于这一数值, 这与棉花直根系特性和取样时间与水平位置关系较大。

根系在水平位置上和深度层次上的分布特征, 是确定分层描述土壤水分变化和养分吸收的基础, 明确作物根系的空間还可有效指导作物种植密度和肥水管理等。Kramer(1989)还综述了不同植物根系的深度和空间分布, 多数的研究是利用放射性元素标记的方法进行的, 不同的土壤质地和物种根系的深度和分布有很大差异。玉米在播种 7 个星期后, 在距植株 37.5 cm 的土壤内根系分布比例为 88%, 14 个星期后分布比例减少到 59%, 相反, 距植株较远的位置(37.5~67.5 cm)根系分布的比例大大增加, 这与本研究棉花根系分布的规律一致, 但因为本研究采用了大田群体取样的方法, 所以相邻棉行棉花根系在生育中后期在行间重叠, 从研究结果也可看出, 在棉花根系发育高峰的花铃期, 两行棉花的中间位置根系的分布反而有所增加。

棉花根系生长发育与遗传的关系研究较早。

Taylor 和 Klepper(1978)就对遗传在棉花根系发育中的作用进行了研究和评价, 但多年来对不同基因型间根系的差异研究却依然很少。利用盆栽法对不同遗传材料根系长度、主根和侧根发育等的比较(McMicheal & Quisenberry, 1991; McMicheal *et al.*, 1992), 表明不同遗传材料的根系长度存在明显差异。耐旱材料根系发育相对要发达, 深度和分布的广度也较大。遗憾的是对棉花根系发育与遗传关系的研究并不是很多, 量化研究仍然不足。

地上部和地下部关系研究较多, McMicheal(1980)研究认为在结铃前根系和地上部器官的发育呈线性相关, 但结铃后的情况则不同。本研究认为 *RAI* 与叶面积指数呈较好的指数相关, 较好地量化了这一复杂关系。植株是否能良好地进行生长取决于根系与地上部的生长和功能方面能否维持平衡, 因此, 特别强调的常常是地下地上比率, 该比率可作为根部与地上部之间是否维持良好平衡的指标。但是, 要获得这一比率并非易事, 因此在生产上应用这一比率进行农事管理的实例很少。研究相对较易测定的叶面积指数和根表面积指数之间的关系, 为量化这一比率指标可能会提供一种较好的方法。

参 考 文 献

- Burgess SSO, Adams MA, Turner NC, Ong CK(1998). The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*, 115, 306~311.
- Burke JJ, Upchurch DR(1995). Cotton rooting patterns in relation to soil temperatures and thermal kinetic windows. *Agronomy Journal*, 87, 1210~1216.
- Gong YS(龚元石), Li BG(李保国)(1996). Sensibility of the field water budget model to water extraction function by roots and evapotranspiration form. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 3, 1~7. (in Chinese with English abstract)
- Kramer PJ(Translated by Xu XD(许旭旦), Tang ZC(汤章城), Wang WL(王万里), Lu XH(陆宪辉))(1989). *Water Relations of Plants* (植物水分关系). Science Press, Beijing, 169~175. (in Chinese)
- Li YB(李亚兵), Zhang LZ(张立桢)(1999). The application of DT-SCAN in study of cotton roots. *Chinese Cotton* (中国棉花), 26, 37~38. (in Chinese)
- McMichael BL(1980). Water stress adaptation. In: Hesketh JD, Jones JD eds. *Predicting Photosynthesis for Ecosystem Models*. CRC Press, USA, 183~204.
- McMichael BL, Upchurch DR, Burke JJ(1996). Soil temperature derived prediction of root density in cotton. *Environmental Experiment Botany*, 36, 303~312.
- McMichael BL, Quisenberry JE(1991). Genetic variation for root-shoot relationships among cotton germplasm. *Environmental Experiment Botany*, 31, 461~470.
- McMichael BL, Upchurch DR, Taylor HM(1992). Transparent wall techniques for studying root growth and function in soil. *Journal*

of *Plant Nutrition*, 15,753 – 762.

Russell RS(1977). *Plant Root Systems: Their Functions and Interaction with Soil*. The English Language Book Society and McGraw-Hill Book Company (UK) Limited (ELBS) Press, Maidenhead, Berkshire, England, 9 – 27.

Stirzaker RJ, Passioura JB(1996). The water relations of the root-soil interface. *Plant, Cell and Environment*, 19,201 – 208.

Taylor HM, Klepper B(1978). The role of rooting characteristic in the supply of water to plants. *Advances in Agronomy*, 30,99 – 128.

Taylor HM, Upchurch DR, McMichael BL(1991). Application and limitation of rhizotrons and minirhizotrons for root studies. In: Keister DL, Cregan PB eds. *The Rhizosphere and Plant Growth*. Kluwer Academic Publishers, UK, 91 – 97.

Taylor HM, Klepper B(1974). Water relations of cotton. I. Root growth and water use as related to top growth and soil water content. *Agronomy Journal*, 66,584 – 588.

Zhang LZ(张立桢), Cao WX(曹卫星), Zhang SP(张思平)(2003). Simulation model for cotton development stages based on physiological development time. *Cotton Science*(棉花学报),15, 97 – 103. (in Chinese with English abstract)

Zhang LZ(张立桢), Li YB(李亚兵), Wang GP(王桂平), Zhu QL(朱巧玲)(1998). The root growth, development and distribution of cotton with vegetative branches. *Acta Gossypii Sinica*(棉花学报), 6,322 – 328. (in Chinese with English abstract)

责任编辑：王政权 责任编辑：张丽赫