

氮肥和土壤质地对滴灌棉花根系分布及产量的影响^①

张 泽，马革新，海兴岩，张东明，张国龙，王 飞，张 强，吕 新*

(石河子大学农学院，新疆石河子 832003)

摘要：通过大田二因素随机区组试验，研究了滴灌条件下不同质地棉田土壤棉花根长密度和根表面积的垂直分布特征及其对产量的影响。结果表明：施肥、灌水都可以显著降低棉花根长密度和根表面积，其关系表现为显著负相关；花期之前棉花在0~20 cm土层根长密度表现为砂土>黏土>壤土，花期之后表现为砂土>壤土>黏土；在20~40 cm土层表现为壤土>黏土>砂土，且深层土壤砂土中棉花根长密度下降势显著高于壤土、黏土；在不同质地土壤中，粗根表面积均表现为N2(施氮量360 kg/hm²)>N3(施氮量480 kg/hm²)>N1(施氮量240 kg/hm²)>CK(不施氮处理)；根系分布特征参数与籽棉产量相关性分析结果显示，根长密度、根表面积对籽棉产量的形成均有显著影响，棉花籽棉产量的有效提高手段之一是在某些特定生育期适度地降低根系特征参数。

关键词：氮肥；土壤质地；滴灌；根系特性；产量；棉花

中图分类号：S562 **文献标识码：**A

土壤质地是土壤重要的物理性状之一，对作物的根系生长及分布有重要影响。贾丽华等^[1]研究了土壤类型与花生根系生长和产量的关系，结果表明砂土和壤土中花生根干物质量各时期均显著高于黏土，但生育后期黏土中花生根系干物质量比砂土和壤土下降相对较慢；李潮海等^[2]通过池栽的方式对不同质地玉米根系状况进行了研究，结果表明玉米根系弯曲度、平均根径大小表现为轻黏土>中壤土>轻壤土，各质地土壤中随着物理性黏粒的增加，根量在上层土壤中所占的比例增大；曾艳^[3]研究结果表明，引起茶树根系氮浓度差异的原因可能是不同土壤质地造成茶苗根系构型的不同进而影响根系氮浓度，根长较长、体积较大的根系更容易对养分吸收利用；王聪和章建新^[4]研究了滴水量对超高产大豆根系生长的影响，随着滴水量的增加，0~20 cm土层根干重密度和侧根长密度增幅最大；闵伟等^[5]通过研究灌溉水盐度和施氮量对棉花根系分布的影响，发现施氮量可显著增加棉花根的质量，使85%以上的棉花根系主要分布在0~20 cm土层，并且淡水灌溉的情况下，棉花根表面积、根体积和平均直径均随着施氮量的增加而显著降低。闫映宇等^[6]研究表明不同灌水处理间棉花根长密度空间分布总特

征一致，宽、窄行间根长密度基本相同，但明显大于膜间；花铃期、吐絮期各土层棉花根长密度与产量呈显著的二次相关关系。余炳凤等^[7]通过微根管技术研究了棉花根系与产量的关系，结果表明棉花根长密度与根表面积指数随生育期的推进表现出先增后降的趋势，籽粒产量与根长密度和根表面积指数呈显著负相关。齐广平和张恩和^[8]研究了灌水量对番茄根系分布和产量的关系，结果表明番茄根系生物量、根长、根表面积在土壤中的垂直分布都呈“单峰型”曲线变化规律；方怡向等^[9]通过分层土柱挖掘法研究了水分对棉花根系分布特征的影响，表明不同灌溉处理的根系生物量的分布与土层深度呈显著的负指数关系。漆栋良等^[10]研究了施氮方式对玉米根系生长和氮素利用的影响，玉米根系主要集中在0~40 cm土层，随着土层深度的增加，根长密度呈递减趋势；陈东等^[11]研究了水分胁迫及土壤质地对新银合欢幼苗根系生长的影响，结果显示在相同的土壤质地条件下，水分胁迫程度与根系长度、表面积呈显著负相关，而在相同水分条件下，土壤黏粒含量越低，对根系特征参数的促进作用越明显。

目前，大多数国内外学者对滴灌条件下(包括室内土柱模拟法)氮肥的施用量、施用频率以及水肥耦

基金项目：国家自然科学基金项目(31360301)资助。

* 通讯作者(lxshz@126.com)

作者简介：张泽(1983—)，男，河北廊坊人，博士，副教授，主要从事农业信息化与精准农业研究。E-mail：zhangze1227@163.com

合效应等对肥料利用率的影响做了较多研究,但其中大部分是在单一土壤质地条件下进行的研究,对于滴灌施肥后不同质地土壤的棉花栽培技术却鲜有报道。为此,通过滴灌大田试验,研究氮肥和土壤质地对滴灌棉花根系分布特征参数及产量的影响,可在确保高产的情况下对不同质地棉田的灌溉施肥技术进行进一步优化。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2016年4~10月在新疆维吾尔自治区玛纳斯县六户地镇创田地($86^{\circ}07'36''E$, $44^{\circ}39'15''N$)进行。试验地位于新疆古尔班通古特沙漠的南部边缘地带,

日照时长为2 800~3 000 h, 年平均气温5℃, 10℃有效积温为3 500~4 100℃, 无霜期180 d。试验区土壤质地(按国际分类制分类)分别为砂土、壤土、黏土。供试棉花品种为新陆早45号。土壤颗粒组成及肥力状况如表1所示。

1.2 试验设计

1.2.1 试验方案 试验为二因素试验, 分别为土壤质地和氮素水平。其中土壤质地因素设置3个水平, 即砂土、壤土、黏土; 施氮量设置4个氮素(纯氮)水平, 即0、240、360、480 kg/hm², 并分别以CK、N1、N2、N3表示。试验采用全组合设计, 共12个处理, 其中每处理设置3个重复, 共计36个小区, 小区规划如图1所示。

表1 供试土壤颗粒组成及养分状况

土壤质地	颗粒组成(g/kg)			有机质 (g/kg)	速效氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
	< 0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm				
砂土	122.1	21.7.6	660.3	11.30	80.20	9.10	194
壤土	134.2	444.0	421.8	19.90	60.88	17.95	134
黏土	423.3	361.5	215.2	21.32	92.11	15.31	185

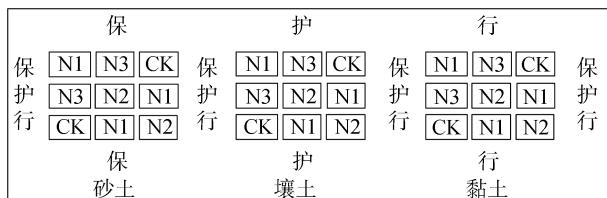


图1 小区规划

试验小区设计为一膜6行, 种植行距配置模式为66 cm + 10 cm(机采模式), 膜宽2.05 m, 膜间距0.5 m, 整个生育期滴灌设计灌溉量5 400 m³/hm², 各质地处理均实行等额灌水。施肥量为钾肥(K₂O)95 kg/hm²、磷肥(P₂O₅)105 kg/hm², 均作为基肥一次性施入; 氮肥(尿素)中基肥占30%, 其余部分作追肥随水每10 d

灌溉1次, 各批次滴灌水量和氮肥用量占总用水量和追肥总量的比例例如表2所示。

1.2.2 微根管埋设 本试验采用微根管技术对棉花根系分布特征进行研究。在棉花幼苗期安装CI-600根系监测系统(CID Bio-science,Camas,WA,USA), 使用底部密封的透明塑料根管(与CI-600配套, 内径64 mm, 长度1 000 mm)用于监测棉花根系。微根管埋设夹角与地面呈45°, 埋设好的微根管中心线的水平投影正好位于棉花行的纵切面上。根管密封的一端插入到土壤中, 另一端的盖子可以拿掉, 管子需露出地面10 cm左右。不测时盖上黑色塑料盖子以防止其他杂物落入管中, 并在外管壁包被黑色胶带以阻止光线透过根管传播而影响棉花根系生长。微根管理设示意图如图2所示。

表2 水氮分配表

滴灌批次	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次	第7次	第8次	第9次	第10次	第11次
水量占比(%)	4	6	10	12	15	20	12	6	6	5	4
追肥占比(%)	0	0	10	10	20	30	20	10	0	0	0

在每次滴灌施肥后5 d, 用CI-600根系监测系统配备的扫描仪在棉花盛蕾期、盛花期、盛铃期、吐絮期伸入每个根管内部, 从上往下每20 cm扫描一次, 获取0~20、20~40、40~60 cm三个垂直深度土层的根系图片。每次获取的图片面积为21.60 cm×15.60

cm, 像素密度为300 dpi, 以bmp格式保存在便携式电脑上, 然后在实验室利用系统配备的WINRHIZOTRON 2013c图像分析系统获取相关根系参数。

1.2.3 数据测定及处理 为了与根钻法等传统研究方法所获取的细根数据进行比较, 本研究以棉花细

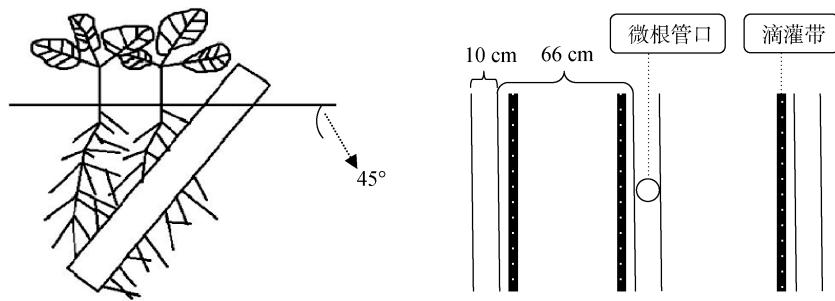


图 2 微根管布设示意图

根的体积根长密度 (root length density per unit volume, RLD_V, mm/cm³) 和根表面积 (root Surface Area, RSA, cm²) 作为基本参数。用公式(1)计算棉花细根的体积根长密度; 公式(2)计算每个土层根的表面积。

$$RLD_V = [RL / (W \times H \times D)] \times \sin 45^\circ \quad (1)$$

式中: RL(mm) 为观测界面内的细根根长 (fine-root length); W(cm) 和 H(cm) 分别为 CI-600 所拍摄图片的宽度 (width) 和总高度 (total height); D(cm) 为观测界面的土壤厚度 (取 D=0.2 cm)。由于微根管理设夹角与地面成 45°, 所以根据公式(1)得出的是垂直分布的棉花细根体积根长密度。

$$A = C \times L \times D^2 / 4 \quad (2)$$

式中 A 表示根表面积 (cm²); C 为细根横切面周长 (cm); L 为每条细根长度 (cm); D 为土层厚度 (取 D=0.2 cm)。

产量测定: 棉花吐絮期测定籽棉产量及产量构成因素, 最后实收计产。

采用 Microsoft Excel 2007 和 IBM Statistics SPSS17.0 软件进行数据处理和统计分析, Origin8.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同质地条件下棉花根长密度垂直分布

从图 3 可以看出, 棉花根系的根长密度呈“单峰型”变化曲线。在 0~20 cm 土层棉花根长密度随着生育期的推进表现为先降低后升高, 砂土、壤土中根长密度最小值出现在出苗后 70 d 左右, 而黏土中则出现在出苗后 85 d 左右; 棉花平均根长密度在花期以后表现为砂土>壤土>黏土, 花期之前表现为砂土>黏土>壤土。在 20~40 cm 土层, 随着生育期的推进以及灌水施肥频次的增加棉花平均根长密度表现为壤土>黏土>砂土, 较 0~20 cm 土层各质地土壤中棉花根长密度都显著地降低, 砂土、壤土、黏土分别降低了 58.66%、15.75%、21.61%; 其根长密度的最大值都出现在盛花期左右, 并且随着生育期的推进, 壤土、黏土根长密度不再发生显著性变化, 但砂土根长密度在花期到铃期降低了 19.72%。在 40~60 cm 土层, 棉花根长密度总体表现为砂土>壤土>黏土, 其最大值都出现在盛铃期左右, 但壤土和黏土根长密度较 20~40 cm 土层有显著性降低。砂土在铃期到吐絮期之间根长密度的下降势大于壤、黏土, 这主要是由于随着土层深度的增加壤土与黏土根系在深层的分布

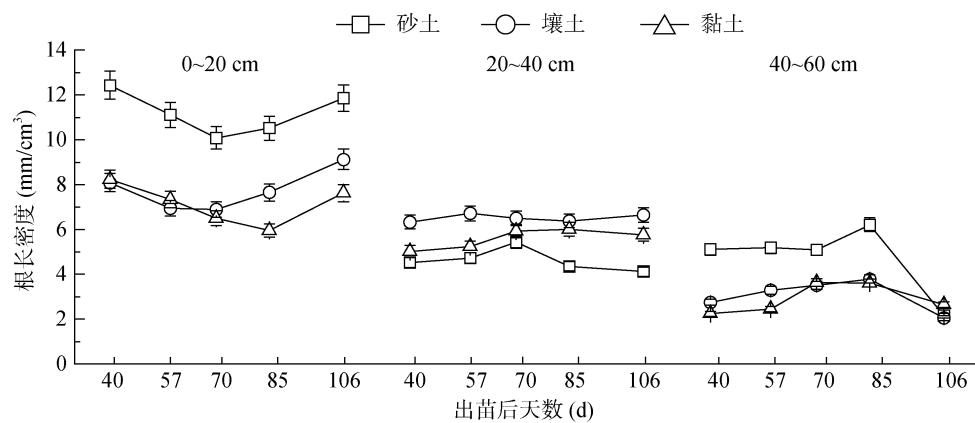


图 3 常规滴灌下不同质地土壤棉花根系根长密度垂直分布

急剧降低，而砂土土壤孔隙较大且砂土的保水保肥性较低而使水肥下渗速率增大所致。

2.2 不同质地条件下棉花根表面积的垂直分布

从图4可以看出，棉花粗根表面积较细根而言都处在较低水平，这在砂土、壤土、黏土中表现是一致的，粗根表面积在整个土壤剖面上表现为黏土>壤土>砂土；随着土层深度的增加，粗根在总根表面积中所占的比例明显下降。在不同质地土壤中，粗根表面积均表现为N2>N3>N1>CK，对于N2处理，又表现为砂土>黏土>壤土。

对细根表面积，壤土在不同土层上表现为先增后

降的趋势，细根表面积在20 cm处最高，其次为30 cm，而10 cm处细根表面积较20 cm处降低20.59%，对于不同施氮处理，N2处理最高，较CK增加24.23%。砂土N2处理在20 cm处根表面积较壤土高2.97%，砂土N3处理在50 cm处细根表面积较壤土下降幅度很大，达到了67.05%。黏土20 cm处细根表面积表现为逐渐增加，N3处理最大，为572.13 cm²，其余土层均为先增加后降低，其中N2处理最大，黏土50 cm和60 cm处细根表面积较砂、壤土显著降低，分别降低了44.03%、51.16%和54.59%、61.48%，说明黏土不利于棉花根系生长，其分布这要集中在0~20 cm土层。

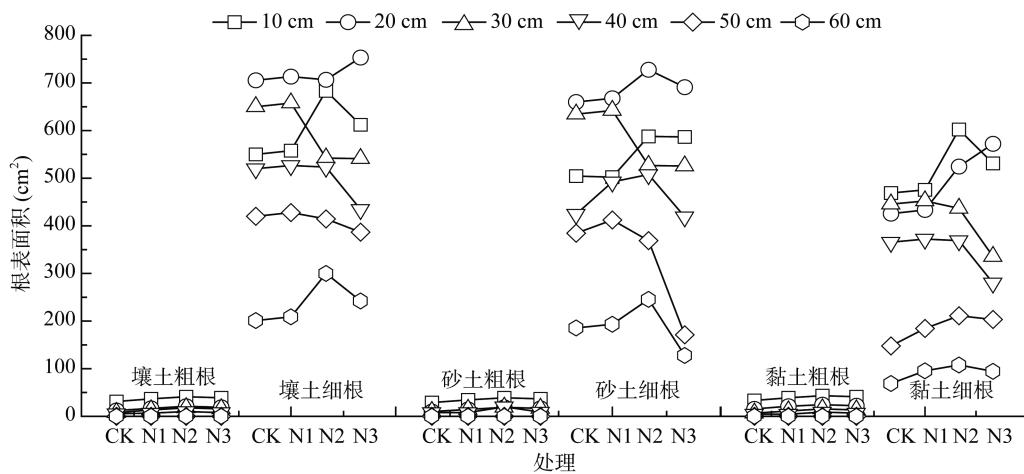


图4 施氮对不同质地滴灌棉田棉花根表面积的影响

2.3 土壤质地对滴灌棉花籽棉产量的影响

由表3可以看出，3种土壤质地地下籽棉产量均表现出N2>N1>N3>CK，N2处理下砂土、壤土、黏土棉花产量均达到最大值分别为6 428.70、6 869.70、5 647.69 kg/hm²，较CK处理分别增产41.49%、41.51%、82.86%。施氮处理的单株铃数和单铃重几乎都高于CK处理；就株数而言，砂土N2、N3处理

差异不显著；壤土N1、N3处理间差异不显著。单株铃数砂土N2、N3处理和黏土N1、N3处理间差异不显著，而壤土各处理间差异显著。单铃重壤土N1、N3处理差异不显著。总体来说，壤土N2处理平均籽棉产量为6 869.70 kg/hm²，较相同栽培条件下砂土和黏土分别增产6.86%和21.64%，这进一步说明相同栽培条件下壤土较砂、黏土增产效果明显。

表3 不同质地土壤棉花产量

处理	株数(株/hm ²)			单株铃数		
	砂土	壤土	黏土	砂土	壤土	黏土
CK	1.44×10 ⁵ e	1.77×10 ⁵ b	1.92×10 ⁵ a	5.86 f	7.38 c	6.68 e
N1	1.35×10 ⁵ f	1.65×10 ⁵ d	1.75×10 ⁵ b	8.36 a	6.90 d	6.90 d
N2	1.53×10 ⁵ c	1.50×10 ⁵ c	1.80×10 ⁵ b	7.43 c	7.58 b	7.48 bc
N3	1.48×10 ⁵ c	1.63×10 ⁵ d	1.72×10 ⁵ b	7.40 c	6.60 e	6.80 d
处理	单铃重(g)			籽棉产量(kg/hm ²)		
	砂土	壤土	黏土	砂土	壤土	黏土
CK	5.63 a	5.31 b	4.90 ef	4 543.27 f	4 854.53 f	3 088.46 g
N1	5.29 bc	5.13 cd	4.73 f	6 131.00 c	6 569.30 b	5 151.92 e
N2	5.61 a	4.87 ef	5.18 bc	6 428.70 b	6 869.70 b	5 647.69 d
N3	5.62 a	5.13 cd	5.00 de	5 405.50 d	5 152.00 e	5 266.36 e

注：同列不同小写字母表示处理间差异在P<0.05水平显著。

2.4 根系性状与籽粒产量的相关性分析

由表 4 可以看出, 棉花籽棉产量和根长密度、根表面积显著负相关, 砂土、壤土、黏土棉花根长密度最大相关系数分别出现在蕾期、盛花期、盛铃期; 根表面积最大相关系数分别出现在盛花期、盛铃期、盛花期。

说明棉花根长密度、根表面积对产量的形成均有显著影响, 所以在棉花不同生育期优化根系性状(具体表现为适当减小砂土蕾期根长密度、盛花期根表面积; 壤土盛花期根长密度、盛铃期根表面积; 黏土盛花期根长密度和根表面积), 是棉花高产的有效栽培措施。

表 4 棉花籽棉产量与根系性状相关性分析

处理	根系参数	蕾期	盛花期	盛铃期	吐絮期
砂土	平均根长密度	-0.762	-0.733*	-0.728**	-0.716**
	平均根表面积	-0.805	-0.831*	-0.829**	-0.763**
壤土	平均根长密度	-0.764	-0.785*	-0.760**	-0.683*
	平均根表面积	-0.734	-0.790*	-0.803**	-0.771*
黏土	平均根长密度	-0.695*	-0.722*	-0.708**	-0.653
	平均根表面积	-0.762*	-0.699*	-0.631**	-0.628

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平显著相关; ** 表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关。

3 讨论

3.1 不同质地滴灌棉田棉花根系分布的特征参数

目前新疆生产建设兵团棉花生产过程中粗犷式的施肥过程, 导致了肥料的当季利用率低和化肥带来的环境污染。所以施肥过程前一定要针对土壤质地类型、土壤中各营养元素的存在形态等进行研究^[12]。有研究指出, 棉花平均根长密度在 0~20 cm 土层上表现为先减小后增加, 根长密度随施氮量的增加显著降低; 氮肥能提高玉米根系活力^[13]。本研究中滴灌棉花根系在 0~20 cm 土层上同样表现出以上趋势, 随着生育期的推进, 砂、壤土中根长密度最小值出现在出苗后 70 d 左右, 而黏土则出现在出苗后 85 d 左右, 这主要是由于黏土中微团聚体和大团聚体较多, 毛管水移动困难, 灌溉肥液难以下渗而使犁底层或黏粒积聚层形成上层滞水而影响棉花根系的细根生长, 而在生育后期随着灌溉施肥比例的下降以及土壤胶体对营养元素离子的吸附性降低, 使得棉花细根数量及活性得到提升。

粗根表面积在整个土壤剖面上表现为黏土>壤土>砂土, 这表明随着土壤中黏粒含量的增加, 土壤孔隙往往被水占据而影响土壤通气, 好气微生物活动受到抑制而影响棉花根系下扎及侧根生长。砂土 N2 处理在 20 cm 处根表面积较壤土高 2.97%, 砂土 N3 处理在 50 cm 处细根表面积较壤土下降幅度很大, 达到了 67.05%, 这表明随着施氮量的增加, 砂土浅层根系对氮素的吸收优于深层根系, 同时也表明灌水量相同的条件下砂土更有利于根系下扎, 从而抑制了侧根生长。

3.2 不同质地滴灌棉田的棉花产量

通过不同质地滴灌棉田上的氮肥梯度试验, 回归分析结果表明, 砂土、壤土、黏土分别以 256.00、287.34、374.12 kg/hm² 的施氮量能够达到最高目标产量。砂、壤、黏土最高理论经济产量分别为 6 341.12、6 846.42、5 512.39 kg/hm²。

本研究只在棉花单一品种下进行了研究, 且只研究了棉花根系分布情况与产量的关系, 而没有考虑有关土壤质地引起的生物与化学性质差异对棉花氮素吸收和产量形成的影响, 这些方面还有待进一步加强。要提高试验结论的说服力, 需要进行跨区域、跨年际大田试验验证数据的可靠性。

4 结论

1) 壤土棉花根系分布均匀度优于砂、黏土; 随施氮量的增加, 砂土浅层根系对氮素的吸收优于深层根系; 黏土不利于棉花根系生长, 分布主要集中在 0~20 cm 土层。

2) 棉花籽棉产量和根长密度、根表面积显著负相关, 在一些特定(负相关系数较大的)生育期适当优化棉花根系结构, 有助于增产。

3) 在本研究条件下, 追求砂、壤、黏土最高理论经济产量的最优施氮量分别为 256.00、287.34、374.12 kg/hm², 该施氮量可作为研究区不同质地土壤棉花栽培过程中氮素投入量的参考值。

参考文献:

- [1] 贾丽华, 赵长星, 王月福, 等. 不同质地土壤对花生根系生长、分布和产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(7): 684~690

- [2] 李潮海, 李胜利, 王群, 等. 不同质地土壤对玉米根系生长动态的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(9): 1334–1340
- [3] 曾艳. 氮肥、土壤质地对茶树根系生长特性影响的研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2014
- [4] 王聪, 章建新. 滴水量对新大豆27号根系生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 169–174
- [5] 阎伟, 侯振安, 冶军, 等. 灌溉水盐度和施氮量对棉花根系分布影响研究[J]. 棉花学报, 2014, 26(1): 58–65
- [6] 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): 45–47
- [7] 余炳凤, 王海江, 侯振安, 等. 膜下滴灌水氮对不同生育期棉花根系与产量的影响[J]. 石河子大学学报, 2015, 33(3): 265–269
- [8] 齐广平, 张恩和. 膜下滴灌条件下不同灌溉量对番茄根系分布和产量的影响[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 463–467
- [9] 方怡向, 赵成义, 串志强, 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): 96–100
- [10] 漆栋梁, 吴雪, 胡田田. 施氮方式对玉米根系生长、产量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(14): 2804–2813
- [11] 陈东, 王道杰, 郭灵辉, 等. 水分胁迫对新银合欢幼苗根系生长的影响[J]. 中国水土保持, 2012(6): 34–38
- [12] 谭勇, 张炎, 李磐, 等. 土壤对养分离子吸附特性初步研究. 土壤通报, 2006, 37(3): 465–469
- [13] 杜红霞, 冯浩, 吴普特, 等. 水、氮调控对夏玉米根系特性的影响. 干旱地区农业研究, 2013, 1(31): 89–100

Effect of Nitrogen Fertilization and Soil Texture on Cotton Root Traits and Yields Under Conventional Drip Irrigation

ZHANG Ze, MA Gexin, HAI Xingyan, ZHANG Dongming, ZHANG Guolong,
WAN Fei, ZHANG Qiang, LV Xin*

(College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of N fertilization and soil textures on cotton root characteristics and yield under conventional drop irrigation by using the method of minirhizotron technique and randomized field plots. The results showed that N fertilization and drop irrigation significantly reduced cotton length density and surface area, a significant negative correlation existed between fertigation and the two root parameters. Cotton root length densities in 0–20 cm were in an order of sand soil > clay soil > loam soil before flowering stage, but in an order of sand soil > loam soil > clay soil after flowering stage; Cotton length densities in 20–40 cm were in an order of loam soil > clay soil > sand soil, and it decreased significantly in sand soil than in other soil textures. The surface areas of coarse roots were in order of N2 (N 360 kg/hm²) > N3 (N 480 kg/hm²) > N1 (N 240 kg/hm²) > CK (no nitrogen). Correlation analyses showed that cotton root length density and surface area significantly influenced cotton yield, which indicates that decreasing cotton root length density and surface area is conducive to promoting cotton yield.

Key words: Nitrogen fertilizer; Soil texture; Drop irrigation; Root trait; Yield; Cotton