

不同连作年限对棉花根系形态和产量的影响

叶祖鹏,白旭明,陈波浪

(农业部西北绿洲农业环境重点实验室,新疆农业大学草业与环境科学学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要:以新疆典型棉区(玛纳斯县棉花种植地区)连作 5、10 a 和 20 a 的棉花为研究对象,利用田间根钻取样结合图像扫描分析方法,研究了不同连作年限棉田花铃期根系分布状况与形态特征。结果表明:根系集中分布于表层,即分布在 0~10 cm 土层的根质量约占总根质量的 74.38%~87.08%;连作促使根干重增加,连作 10 a 和连作 20 a 处理的根干重较连作 5 a 处理分别提高了 57.16%和 50.80%;连作明显提高了棉花的根长密度和根表面积指数,连作 10、20 a 处理 0~0.4 mm 直径范围内的总根长较连作 5 a 处理的分别显著提高了约 0.79~2.76 倍和 0.07~1.46 倍;连作 10 a 处理的产量(平均产量为 5 633.90 kg·hm⁻²)显著高于连作 20 a 处理和连作 5 a 处理($P<0.05$),较其平均分别提高了 14.96%和 26.53%。因此新疆棉花连作年限控制在一定域内(连作 10 a)并不会抑制棉花根系的生长,反而能够提高根长密度和根表面积指数,进而促使棉花产量提升,但棉花连作超过一定年限(10~20 a)后可能出现连作障碍,影响根系生长和产量的提高。

关键词:棉花;连作年限;根系生长;产量;新疆棉区

中图分类号:S562;S344.4 **文献标志码:**A

Effects of different years of continuous cropping on cotton root morphology and yield

YE Zupeng, BAI Xuming, CHEN Bolang

(Key Laboratory of Northwest Oasis Agriculture Environment, Ministry of Agriculture, College of Pratacultural and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: Continuous cropping is an important obstacle factor for cotton growth, and exploring the response characteristics of cotton roots to continuous cropping length will be conducive to improve the adaptability of cotton to soil. In this paper, cotton with continuous cropping for 5, 10 and 20 years as the research object in typical cotton areas of Xinjiang (cotton planting areas in Manas County) was studied. The root distribution and morphological characteristics of cotton in different planting years were researched by means of field root drill sampling and image scanning. The results showed that the roots were concentrated in the surface layer, and the root mass accounted for 74.38%~87.08% of the total root mass in 0~10 cm soil layer. Continuous cropping promoted dry root weight, which increased by 57.16% and 50.80%, respectively, after 10 years and 20 years continuous cropping compared with the 5 years. Continuous cropping significantly increased the root length density and root surface area index of cotton. The total root length in the 0~0.4 mm diameter range of continuous cropping for 10 years and 20 years was significantly increased by about 0.79~2.76 times and 0.07~1.46 times compared with that of continuous cropping for 5 years, respectively. The yield of 10 year continuous cropping (average yield was 5 633.90 kg·hm⁻²) was significantly higher than that of 20 years and 5 years continuous cropping ($P<0.05$), which increased by 14.96% and 26.53%, respectively. Controlling continuous cropping years (10 years) in Xinjiang did not inhibit the growth of

收稿日期:2019-04-11 修回日期:2020-01-10

基金项目:国家自然科学基金(31260499);新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(2016B01001-2-3);新疆维吾尔自治区科技人才培养项目(qn2015yx011);农业部西北绿洲农业环境重点实验室开放基金资助课题(NYBXBLZ-201702);新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAUGRI2018-012)

作者简介:叶祖鹏(1993-),男,江西铜鼓人,硕士研究生,研究方向为养分资源高效利用。E-mail:zupengye1003@163.com

通信作者:陈波浪(1979-),男,湖南汨罗人,博士,教授,主要从事养分资源高效利用与作物营养生理研究。E-mail:chenwang200910@sina.com

cotton root system in a certain time domain, but improved root length density and root surface area index, and then promoted cotton yield. However, after cotton cultivation exceeded a certain period of time (10~20 years), continuous cropping obstacles occurred, which might affect the growth and yield of cotton root system. However, continuous cropping obstacles might occur after cotton planting for more than a certain period of time (10~20 years), which might affect root growth and yield.

Keywords: cotton; continuous cropping years; root growth; yield; Xinjiang cotton areas

新疆是我国最早植棉的地区之一,从 1950 年兵团开始大面积种植棉花以来,通过引进棉花新品种和提高棉花种植技术,新疆棉花的种植面积和产量不断增加。矮化、密植和膜下滴灌等技术的推广,使得新疆在 2016 年的棉花种植面积达到了 215.49 万 hm^2 , 占新疆农作物种植面积的 34.66%, 产量约为 420 万 t, 平均单产为 $4\,879\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ [1]。棉花已经成为新疆不可替代的支柱产业,是农民增收的主要来源之一,但受限于新疆地质特点、气候条件、种植习惯及经济利益驱动等因素,使得新疆棉花种植不可避免地选择了连作模式,并且连作时间极长。棉田长期连作易导致土壤养分失调、理化性质恶化以及病虫害增多,使得棉花早衰、减产和品质下降等连作障碍凸显,严重制约着新疆棉花产业的可持续发展 [2-3]。

根系不仅对作物起固定、支持和吸收养分的作用,更是作物与土壤直接接触的器官,连作导致的土壤环境变化将直接或间接作用于根系,进而影响作物的生长发育。作物根系生长受环境尤其是土壤环境中许多因素的限制,包括养分、水分以及土壤物理特性等因素 [4-7], 氮磷钾养分供应不足会抑制根系的生长,适宜的水分供给有利于根系的生长,过高或者过低的土壤容重都会造成根长、根体积的减少。张文明等 [8] 的研究发现,马铃薯受到连作障碍时可以通过刺激根系的生长、提高根长以及根表面积等方式适应连作带来的环境胁迫。根长密度与根表面积指数是根系吸收养分能力的重要指标,研究表明,根长密度与根表面积指数越大,根系吸收养分的能力就越强 [9]。覆膜植棉长期连作后造成大量不易分解的地膜残留在棉田土壤中,残膜改变土壤理化性质,增加了土壤容重,阻碍了棉花根系生长,使棉花根系呈现丛生型和鸡爪型等畸变根型 [10-11]。

目前,有关连作的研究大多集中在马铃薯 [8,12]、大豆 [13]、玉米 [14] 等农作物上,并取得了很多研究成果。有关棉花连作的研究主要集中在土壤理化性质 [15-16]、肥力演变 [17-18]、微生态环境 [19-20] 以及化感物质 [21] 等方面。根系作为作物与土壤之间的纽带,

是作物吸收养分,水分和感知环境的重要器官。连作是否影响棉花根系形态? 不同直径范围内根系形态如何响应连作? 这些科学与生产问题还有待研究。因此,本文通过空间网格取样法,精确定量田间棉花根系的土壤空间分布,探讨不同连作年限对棉花根系形态变化特征的影响,为生产上减轻连作障碍,建立科学的栽培制度,实现新疆棉花高产优质和持续化生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在新疆北部典型棉区玛纳斯县新湖农场 ($44^{\circ}79'E, 86^{\circ}44'N$) 进行,该地区属于温带大陆性气候,气温温差较大,年平均气温 7.2°C , 气温最高月 (7 月) 平均气温 24.4°C , 气温最低月 (1 月) 平均气温 -18.4°C , 极端最高气温 39.6°C , 极端最低气温 -37.4°C 。年日照时间可达 $2\,500\sim3\,000\text{ h}$, 气候较为干燥,年降水量较低,无霜期为 $160\sim180\text{ d}$ 。2016 年棉花生育期月平均气温与月平均降水量状况见图 1。

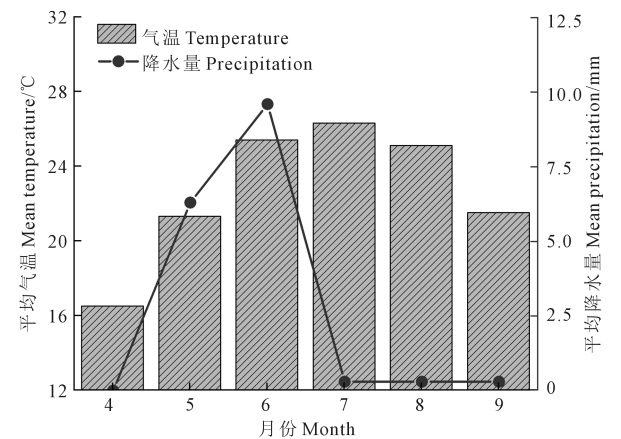


图 1 棉花月平均气温和月降水量

Fig.1 Average monthly temperature and precipitation in the cotton growing area

1.2 试验设计

在新湖农场一连四队棉花种植区域内选取土壤质地和种植管理模式相近的不同连作年限棉田进行田间试验,其处理依次为连作 5 a (A1、A2)、连作 10 a (B1、B2)、连作 20 a (C1、C2)。供试土壤类

型为灰漠土,棉田土壤基本理化性质见表 1。棉花品种为新陆早 45,种植模式采用 1 膜 6 行的膜下滴灌模式,膜宽 2.2 m,膜间宽 0.5 m,宽窄行(66 cm+10 cm),株距 10 cm,理论株数为 27 万株·hm⁻²,一膜三管,灌溉统一为 6 000 m³·hm⁻²。氮肥用尿素,用氮量按 N 300 kg·hm⁻²,40%作为基肥在播前施入,60%分 8~10 次随水滴施,磷肥用量为 P₂O₅ 150 kg·hm⁻²,钾肥用量为 K₂O 75 kg·hm⁻²,磷、钾肥作为基肥施入,水肥管理及农艺措施与农场的生产管理模式保持一致。

1.3 样品采集与测定

在棉花根系生长和养分吸收的关键时期——花铃期(8 月 20 日)采集植物样品,每个地块选取长势相近的棉株随机采集 3 个点,利用直径为 8 cm 的根钻,以两株棉株为中心(采取土样前先将地上部分剪除),分别在左(2 钻)、中(1 钻)、右(2 钻)取不同层次(0~5、5~10、10~20、20~40 cm)的根和土壤,装入自封袋中。后将每个自封袋中肉眼可见的根系挑出,用去离子水冲洗,采用 WinRHIZOron MF 2011 年软件分析、扫描,获得数据化图像,得到根长、根表面积以及直径分级为≤0.4 mm(细根)、0.4~1.2 mm(中根)、≥1.2 mm(粗根)范围内的根系长

度、表面积等根系参数^[22]。根系样品扫描后放入纸袋中,在 105℃杀青 30 min,然后 70℃烘干至恒重,称量根系干物质质量(g·株⁻¹),并计算每株棉花的根系平均质量。在吐絮期后进行测产,测产方法为各个年限地块随机选择棉花植株长势均匀的 3 个小区(面积为 22 m²)进行计数,获得每个小区内的全区株数、单株结铃数。每个小区分 3 次采收每株上、中、下部共 90 朵完全吐絮棉桃,测定平均单铃重。皮棉产量根据每公顷棉株数、单株的平均结铃数和平均单铃重计算各小区产量,折算出单位面积产量。

1.4 数据处理

用 Excel 2013 进行数据整理,用 SPSS 13.0 进行单因素分析(LSD 法),用 Orgin 18.0 软件作图。根长密度(RLD)和根表面积指数(RAI)用 Surfer 8.0 软件以等高线形式呈现。根长密度为单位土壤体积内的根系长度^[22],单位为 cm·cm⁻³;根表面积指数为单位土体面积上根表面积^[23],单位为 cm²·cm⁻³。

2 结果与分析

2.1 不同连作年限对棉花单株根干重的影响

图 2 显示,棉花根干重随着连作年限的增加而增加,连作 10 a 处理和连作 20 a 处理的平均根干重

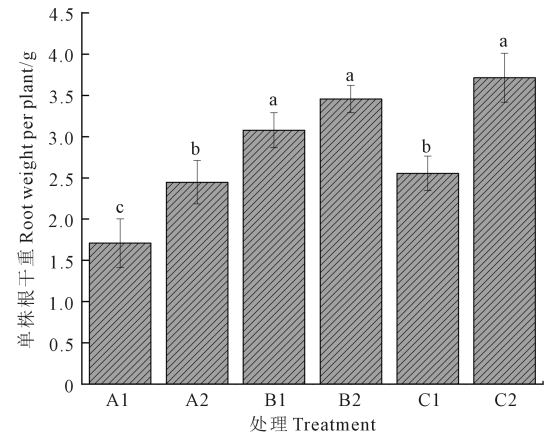
表 1 供试区域土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of soils in the study area

处理 Treatment	土层深度 Soil depth/cm	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)
A1	0~5	7.29	11.96	11.05	350.9	1.496
	5~10	6.52	12.50	9.28	291.3	1.464
	10~20	5.84	19.55	5.55	320.7	1.486
	20~40	6.25	16.29	4.39	301.7	1.548
A2	0~5	6.62	12.76	9.82	311.0	1.531
	5~10	5.55	11.22	8.41	248.0	1.493
	10~20	6.08	14.69	5.87	246.9	1.584
	20~40	6.29	16.90	2.72	250.0	1.601
B1	0~5	9.27	22.96	11.39	358.7	1.381
	5~10	8.46	24.61	8.27	349.0	1.449
	10~20	9.86	26.08	7.97	381.4	1.397
	20~40	8.75	25.30	7.45	385.1	1.540
B2	0~5	9.45	17.64	11.41	270.3	1.358
	5~10	9.10	26.52	9.44	309.1	1.438
	10~20	8.75	24.64	10.67	299.4	1.462
	20~40	8.14	24.93	7.00	361.4	1.509
C1	0~5	8.99	27.56	15.57	264.0	1.404
	5~10	9.00	35.40	14.13	242.7	1.434
	10~20	8.75	32.19	13.22	268.2	1.484
	20~40	8.71	35.66	11.04	296.5	1.314
C2	0~5	8.54	26.17	22.19	290.7	1.431
	5~10	8.57	29.94	16.79	286.9	1.492
	10~20	8.45	30.29	15.95	302.0	1.453
	20~40	8.65	30.89	13.62	296.5	1.596

较连作 5 a 处理分别增加了 57.16% 和 50.80%。表 2 结果进一步显示,0~5 cm 土层中连作 10 a 处理的根干重显著高于连作 5 a 处理,平均增加了 46.90%; 5~10 cm 土层中平均根干重表现为连作 20 a 处理>连作 10 a 处理>连作 5 a 处理;10~20 cm 土层中根干重无明显差异;20~40 cm 土层根干重与 0~5 cm 土层一致,即连作 10 a 处理的根干重显著高于连作 5 a 处理。根干重随着土壤深度的增加而下降,主要分布在 0~10 cm 土层,约占总根质量的 74.38%~87.83%。

2.2 不同连作年限对棉花根长密度的影响

从图 3 可知,随着连作年限的增加,棉花根长密度呈先增加后减少的趋势。在 0~5 cm 土层中连作 10 a 处理与连作 20 a 处理棉花的平均根长密度分别是连作 5 a 处理的 3.90 倍和 2.82 倍;在 5~10 cm



注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$),下同。
Note:The different lowercase letters indicate the significant difference ($P<0.05$), the same below.

图 2 不同连作年限对棉花单株根干重的影响
Fig.2 Effects of different continuous cropping years on dry root weight of cotton root per plant

表 2 不同深度土层下棉花根干重的分布特征

处理 Treatment	0~5 cm		5~10 cm		10~20 cm		20~40 cm	
	单株根干重/g	占株总根干重比/%	单株根干重/g	占株总根干重比/%	单株根干重/g	占株总根干重比/%	单株根干重/g	占株总根干重比/%
	Root weigh per plant	Proportion	Root weigh per plant	Proportion	Root weigh per plant	Proportion	Root weigh per plant	Proportion
A1	1.01c	59.09	0.40c	23.11	0.20a	11.70	0.10b	6.10
A1	1.25bc	51.08	0.70bc	28.74	0.33a	13.30	0.17b	6.88
B1	1.68a	54.68	0.70bc	22.66	0.36a	11.59	0.34ab	11.07
B2	1.63ab	47.29	0.94ab	27.09	0.44a	12.76	0.44a	12.87
C1	1.28bc	50.21	0.96ab	37.61	0.18a	7.14	0.13b	5.04
C2	1.75a	47.21	1.16a	31.32	0.47a	12.61	0.33ab	8.86

注:不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$),下同。
Note: The different lowercase letters indicate the significant difference ($P<0.05$), the same below.

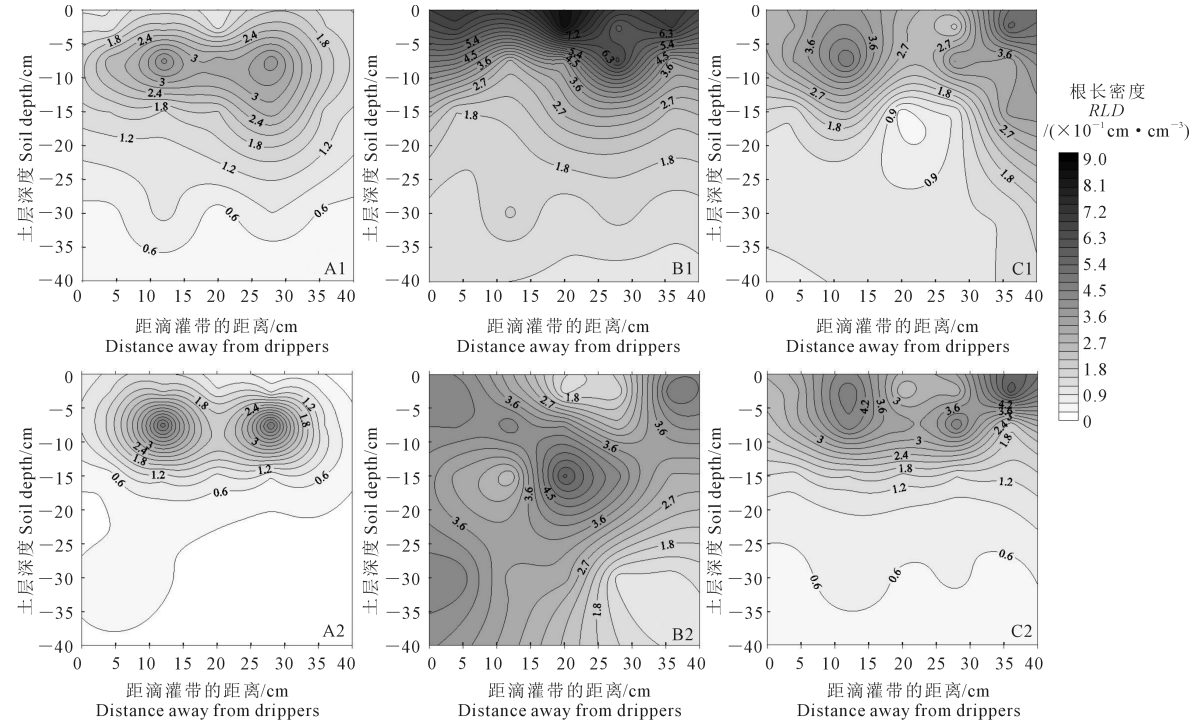


图 3 不同连作年限对棉花根长密度的影响
Fig.3 Effect of different continuous cropping years on cotton root length density (RLD)

土层中连作 10 a 处理与连作 20 a 处理的根长密度分别是连作 5 a 处理的 1.34 倍和 1.15 倍;在 10~20 cm 和 20~40 cm 土层中连作 5、10、20 a 的棉田根长密度分别为 0.125、0.307、0.149、0.049、0.203、0.085 cm·cm⁻³。根系在水平方向以棉株为原点逐渐向两边递减分布,垂直方向根系随着土层深度的增加而减少,根系主要分布于 0~10 cm 土层。

由表 3 可知,棉花以直径为 0~0.4 mm 的根系最多,约占棉花根长的 54.66%~64.16%。连作年限对棉花 0~0.4 mm 和 0.4~1.2 mm 根系根长影响显著,但对不同直径根系分配比例无显著影响,其中连作 10 a 的处理 0~0.4 mm 根系根长最多,达 611.28~684.69 cm·株⁻¹。

2.3 不同连作年限对棉花根表面积指数的影响

由图 4 可知,连作对棉花根系总表面积指数的影响显著,0~40 cm 土层连作 10 a 处理的根表面积

指数最大,分别比连作 5 a 和连作 20 a 处理提高 130.93%和 50.52%。0~5 cm、5~10 cm 土层中连作 10 a 与连作 20 a 的处理分别较连作 5 a 处理根表面积提高了 163.39%、81.85%和 50.97%、11.09%;在 10~20 cm 和 20~40 cm 土层中,连作 5、10、20 a 处理的表面积指数分别为 0.009、0.019、0.011 cm²·cm⁻³和 0.004、0.014、0.007 cm²·cm⁻³。随着土壤深度的增加,土壤根表面积指数逐渐下降,连作 5、10、20 a 处理 0~5 cm 土层根表面积指数分别是 20~40 cm 土层的 3.2~7.1、1.8~11.8 倍和 3.5~5.4 倍。

2.4 不同连作年限对产量的影响

图 5 显示,棉花产量随着连作年限的增加呈现先增加后降低的趋势,连作 10 a 处理的产量(平均产量为 5 633.90 kg·hm⁻²)显著高于连作 20 a 处理和连作 5 a 处理($P<0.05$),较其平均值分别提高了 14.96%和 26.53%。

表 3 不同连作年限对不同直径棉花根系的影响

处理 Treatment	细根 Fine root		中根 Middle root		粗根 Coarse root	
	单株根长/cm Root length per plant	占株总根长比/% Proportion	单株根长/cm Root length per plant	占株总根长比/% Proportion	单株根长/cm Root length per plant	占株总根长比/% Proportion
A1	342.40bc	64.16	146.83bc	27.51	44.45bc	8.33
A2	181.99c	58.44	100.40c	32.24	29.00c	9.31
B1	611.28a	58.65	370.41a	35.54	60.55ab	5.81
B2	684.69a	57.52	449.96a	37.80	55.73ab	4.68
C1	447.83b	63.26	197.07b	27.84	63.00ab	8.90
C2	319.41bc	54.66	195.14b	33.40	69.80a	11.94

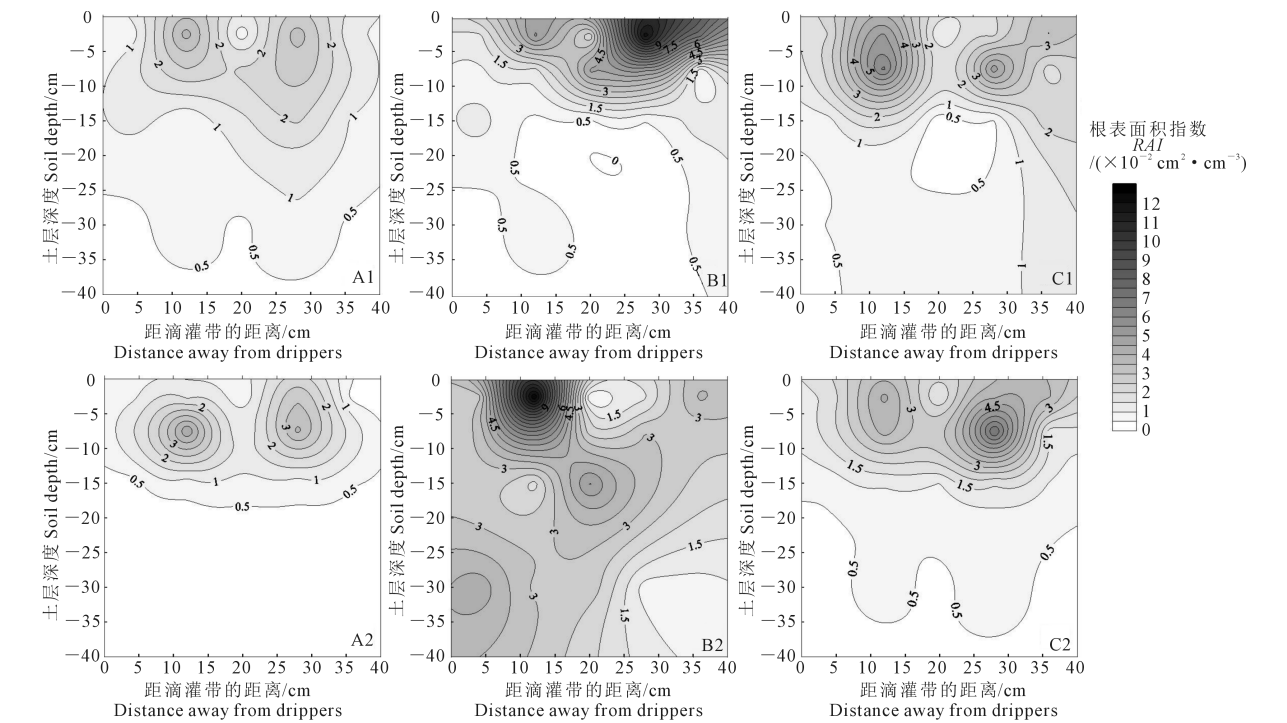


图 4 不同连作年限对棉花根表面积指数的影响

Fig.4 Effects of different continuous cropping years on root surface area index (RAI) of cotton

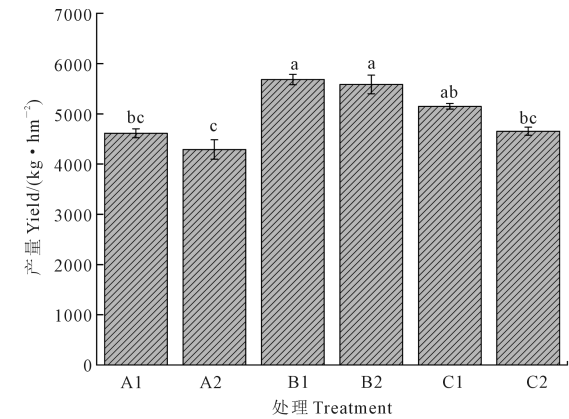


图 5 不同连作年限对棉花产量的影响

Fig.5 Effects of different continuous cropping years on cotton yield

表 4 棉花根系形态与产量的相关系数

Table 4 Correlation of yield with cotton root morphological characteristics

	根干重 Root weigh	根长密度 RLD	根表面积指数 ARI	细根长 Fine root length	中根长 Middle root length	粗根长 Coarse root length
产量 Yield	0.377	0.827 * *	0.773 * *	0.863 * *	0.686 *	-0.037

注：* 表示相关性显著 ($P<0.05$)；* * 表示相关性极显著 ($P<0.01$)。
Note: * indicates the significant correlation ($P<0.05$)；* * indicates the extremely significant correlation ($P<0.01$) .

及最终产量的形成。作物根系形态反映根系生长发育的基本状况,根干重、根长密度和根表面积作为根系形态的主要指标,是最常用的估计参数^[25]。本研究发现,不同连作年限处理间棉花根系干重有显著性差异,随着连作年限的增加棉花根干重呈增加趋势,连作 10 a 和连作 20 a 地块较连作 5 a 地块根系干重平均增加了 57.16% 和 50.80%,0~10 cm 土层中连作 10 a 处理的根干重显著大于连作 5 a 处理;随着连作年限增加棉花根长密度和根系表面积表现为先增加后减少,连作 10 a 处理的根长密度和根表面积指数较连作 5 a 处理和连作 20 a 处理分别平均增加了 134.23%、48.67% 和 130.93%、50.52%;棉花根系主要集中在 0~10 cm 土层,连作 10 a 处理在 0~10 cm 土层中的平均根长密度分别是连作 20 a 处理与连作 5 a 处理的 2.10 倍和 1.27 倍,平均根表面积指数分别是 1.87 倍和 1.15 倍。这些结果表明棉花根系形态对连作的响应存在一个年限阈值,这与张文明等^[8]在马铃薯上报道相似(马铃薯连作阈值为 2 a),产生这一结果原因可能与棉花连作在土壤肥力特征^[26-27]、土壤物理组成^[28-29]、土壤物理特性^[15,30]等方面存在年限阈值并间接影响根系形态有关。如玉苏甫·买买提等^[16]的研究,连作棉花土壤肥力特征的年限阈值约为 10~15 a,其有机质含量较连作 5 a 和连作 20 a 分别增加了 4.04 g · kg⁻¹ 和 3.28 g · kg⁻¹;土壤全氮含量较

2.5 皮棉产量和根系性状相关性分析

表 4 显示,棉花产量和根长密度、根表面积密度以及细根长呈极显著正相关,与中根长显著相关,与根干重和粗根长无显著相关性。由此表明,棉花根系,尤其是细根长对棉花产量贡献最大。

3 讨 论

长期连作会导致植棉土壤理化性质改变、养分严重失衡、自毒有害物质积累等土壤微环境的变化。这些变化会不同程度地限制根系生长并使之处于胁迫环境中^[24]。根系作为植物重要的代谢器官,根系生长的好坏将直接影响作物的生长状况以

连作 5 a 和连作 20 a 分别增加了 1.41 g · kg⁻¹ 和 0.044 g · kg⁻¹;土壤速效磷含量较连作 5 a 和连作 20 a 分别增加了 1.09 mg · kg⁻¹ 和 8.31 mg · kg⁻¹。买合皮热提·吾拉木等^[29]的研究发现,连作 10~15 a 棉田表层土壤的粘粒和粉粒含量最高,沙粒含量最低。徐文修等^[31]的研究发现,连作 12 a 的棉田土壤容重最低,其土壤容重值比连作 5 a 降低 4.4%,较连作 15 a 土壤容重值降低了 6.4%;万素梅等^[30]的研究也发现,连作 10 a 的土壤容重较连作 3 a 和 15 a 的降低了 0.022 g · cm⁻³ 和 0.192 g · cm⁻³。另外,根系的调节受土壤供肥能力和土壤理化性质调控,据崔佩佩等^[4]的研究发现,适宜的 N、P、K 配施能够显著提高根系的生物量、根长和根表面积;孙玉莲^[32]和宋家祥^[33]等的研究发现在 1.1~1.5 g · cm⁻³ 容重范围内,棉花根系总根长呈现先升高后降低的趋势,适宜的土壤容重有利于棉花根系生长,过高或过低的容重会阻碍根系的生长和分布^[34]。

不同直径范围根系的养分吸收能力存在着差异,普遍认为细根的养分吸收能力强于中根和粗根。本研究发现,连作 10 a 处理的细根长和中根长显著高于连作 5 a 处理和 20 a 处理。但各处理的细根长和中根长占总根长的比例无明显变化,连作 10 a 处理的粗根长占总根长比例显著低于连作 5 a 处理和连作 20 a 处理。这可能是由于连作导致了土壤肥力、土壤物理组成、土壤物理特性等环境的改

变,作物为适应这些变化,通过调节根系构型(如根直径的大小和比例)来获取更多的养分和水分来满足植株的生长需求。据崔佩佩等^[4]的研究发现,与只施用 NP、NK 肥的处理相比,NPK 配施处理显著提高了高粱细根根长;王德玉等^[35]的研究发现,机械压实土壤,增大土壤容重能够显著抑制黄瓜根系的伸长生长和侧根的发生,并且土壤紧实胁迫可促进根系的加粗生长,使黄瓜的根平均直径增大。本试验结合棉花根系分布(图 3、图 4)以及根直径大小和比例(表 3)的结果发现,连作 10 a 地块的棉花根系形态较优。另外,通过对棉花根系形态参数与产量的相关分析进一步表明,良好的根系系统(如根长密度、根表面积指数、细根长等)是作物高产、高效的必要保障^[36]。本研究发现,棉花产量与根系形态参数变化趋势一致,均在连作 10 a 达最大值。

参 考 文 献:

[1] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2017:338-357.

[2] 范君华,龚明福,刘明,等.棉花连作对土壤养分、微生物及酶活性的影响[J].塔里木大学学报,2008,20(3):72-76.

[3] 蒋旭平.新疆棉花长期连作对棉区生态环境的影响与棉花轮作可选择空间的思考[J].农业现代化研究,2009,30(5):599-602.

[4] 崔佩佩,刘鹏,刘佳琪,等.不同养分配比对高粱根系生长及养分吸收的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(11):1643-1652.

[5] 胡晓棠,陈虎,王静,等.不同土壤湿度对膜下滴灌棉花根系生长和分布的影响[J].中国农业科学,2009,42(5):1682-1689.

[6] 邹晓霞,张晓军,王铭伦,等.土壤容重对花生根系生长性状和内源激素含量的影响[J].植物生理学报,2018,54(6):1130-1136.

[7] 丁祎,张昊,王季春,等.下层土壤厚度及容重对甘薯根系和块根质量的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2018,40(5):1-7.

[8] 张文明,邱慧珍,刘星,等.连作对马铃薯根系形态及吸收能力的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(1):34-37,46.

[9] 谢志良,田长彦.膜下滴灌水氮对棉花根系形态和生物量分配变化的影响[J].干旱区资源与环境,2010,24(4):138-143.

[10] 祖米来提·吐尔干,林涛,王亮,等.地膜残留对连作棉田土壤氮素、根系形态及产量形成的影响[J].棉花学报,2017,29(4):374-384.

[11] 刘建国,李彦斌,张伟,等.绿洲棉田长期连作下残膜分布及对棉花生长的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(2):246-250.

[12] 焦润安,徐雪风,杨宏伟,等.连作对马铃薯生长和土壤健康的影响及机制研究[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):94-100.

[13] 王笃超,吴景贵,李建明.不同有机物料对连作大豆根际土壤线虫的影响[J].土壤学报,2018,55(2):491-502.

[14] 柴强,冯福学.玉米根系分泌物的分离鉴定及典型分泌物的化感效应[J].甘肃农业大学学报,2007,42(5):43-48.

[15] 柴仲平,梁智,王雪梅,等.连作对棉田土壤物理性质的影响[J].中国农学通报,2008,24(8):192-195.

[16] 玉苏甫·买买提,满苏尔·沙比提,阿曼古丽·艾孜子.棉花连作对渭干河-库车河三角洲绿洲土壤理化性质的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):117-121.

[17] 景峰,郭成藏,谈建鑫,等.新疆绿洲长期连作棉田土壤氮储量及其垂直分布特征[J].农业资源与环境学报,2015,32(6):545-551.

[18] 韩春丽.新疆棉花长期连作土壤养分时空变化及可持续利用研究[D].石河子:石河子大学,2010.

[19] 顾美英,徐万里,茆军,等.新疆绿洲农田不同连作年限棉花根际土壤微生物群落多样性[J].生态学报,2012,32(10):3031-3040.

[20] 单鸿宾,梁智,王纯利,等.棉田连作对土壤微生物及酶活性的影响[J].中国农业科技导报,2009,11(1):113-117.

[21] 李彦斌,刘建国,程相儒,等.秸秆还田对棉花生长的化感效应[J].生态学报,2009,29(9):4942-4948.

[22] 罗佳,候银莹,程军回,等.低磷胁迫下不同磷效率基因型棉花的根系形态特征[J].中国农业科学,2016,49(12):2280-2289.

[23] 张立桢,曹卫星,张思平,等.棉花根系生长和空间分布特征[J].植物生态学报,2005,29(2):266-273.

[24] 李锐,刘瑜,褚贵新,等.棉花连作对北疆土壤酶活性、致病菌及拮抗菌多样性的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(4):432-440.

[25] 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影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2015,33(3):265-269.

[26] 郑德明,姜益娟,吕双庆,等.棉花连作对土壤肥力的影响[J].塔里木农垦大学学报,1997,9(1):41-44.

[27] 刘建国,张伟,李彦斌,等.新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J].中国农业科学,2009,42(2):725-733.

[28] 闫靖华,张风华,谭斌,等.不同恢复年限对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J].土壤学报,2013,50(6):1180-1190.

[29] 买合皮热提·吾拉木,满苏尔·沙比提,阿依图尔荪·哈力穆拉提.渭干河-库车河三角洲绿洲农田表层土壤粒度特征分析[J].农业现代化研究,2015,36(2):291-296.

[30] 万素梅,吴先民,刘晓红,等.长期连作对南疆棉田土壤物理性质影响的研究[J].中国农学通报,2012,28(12):48-53.

[31] 徐文修,罗明,李大平,等.不同连作年限棉田土壤理化性质及微生物区系变化规律研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(3):134-138.

[32] 孙玉莲,戈振扬,于英杰,等.土壤容重对棉花根系作用模拟的知识管理研究[J].计算机工程与应用,2013,49(11):216-219.

[33] 宋家祥,庄恒扬,陈后庆,等.不同土壤紧实度对棉花根系生长的影响[J].作物学报,1997,23(6):719-726.

[34] 王玉萍,周晓洁,卢潇,等.土壤紧实度对马铃薯根系、匍匐茎、产量和品质的影响[J].中国沙漠,2016,36(6):1590-1596.

[35] 王德玉,孙艳,郑俊鸢,等.土壤紧实胁迫对黄瓜根系生长及氮代谢的影响[J].应用生态学报,2013,24(5):1394-1400.

[36] 丁红,张智猛,戴良香,等.不同水分条件下氮肥对花生根系生长及产量的影响[J].花生学报,2016,45(1):8-14.