

地膜残留量对棉田土壤水分分布及棉花根系构型的影响

林涛^{1,3}, 汤秋香², 郝卫平¹, 吴凤全², 雷蕾²,
严昌荣¹, 何文清¹, 梅旭荣^{1*}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

2. 新疆农业大学农学院, 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆农业科学院经济作物研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要:根系是获取水分和养分的重要器官, 并通过根区环境的相互作用影响作物的生产效率, 分析地膜残留量对土壤水分及根系构型的影响对认识、分析和评价残膜污染, 发展残膜防控技术具有重要意义。该文通过 2 a 田间模拟试验, 设置了 0 (A)、225 (B)、450 (C)、675 (D) 和 900 kg/hm² (E) 5 个地膜残留量处理, 分析了地膜残留量对土壤水分分布及根系构型的影响。结果表明, 残膜量对土壤水分、根系形态、产量及水分利用效率均有一定影响。根系生物量的 80%~95% 分布于 0~30 cm 的土层范围, 该区域是土壤水分分布及棉花根系构型受地膜残留量影响较显著的区域。无残膜(0 kg/hm²)处理的土壤水分状况、根系构型显著优于高残膜量(900 kg/hm²)处理。随着残膜量的增加, 生育期内 0~50 cm 土壤平均含水率逐渐降低, 各土层出现不同程度的水分亏缺, 并产生水分优势流或水分阻隔效益。残膜量的增加显著降低了根系生物量、根质量密度、根长密度、根表面积密度、根系体积和根系平均直径。残膜含量的增加显著降低了产量和水分利用效率。2 a 数据表明, 与 A 处理相比, E 处理生育期土壤含水率平均降低了 37.36%, 根质量密度平均降低了 70.73%, 根长密度平均降低了 61.35%、根表面积密度平均降低了 216.50%、根系体积平均降低了 47.39%、根系平均直径平均降低了 82.65%。籽棉产量和水分利用效率平均降低了 18.50% 和 13.69%。因此建议采取合理的棉田净土措施, 降低残膜污染对土壤水分及根系构型的影响, 有利于提升产量和水分利用效率。

关键词: 土壤水分; 根系; 棉花; 地膜残留量; 产量及产量构成

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.014

中图分类号: S275 文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2019)-19-0117-09

林涛, 汤秋香, 郝卫平, 吴凤全, 雷蕾, 严昌荣, 何文清, 梅旭荣. 地膜残留量对棉田土壤水分分布及棉花根系构型的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 117—125. doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.014 <http://www.tcsae.org>
Lin Tao, Tang Qiuxiang, Hao Weiping, Wu Fengquan, Lei Lei, Yan Changrong, He Wenqing, Mei Xurong. Effects of plastic film residue rate on root zone water environment and root distribution of cotton under drip irrigation condition [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 117—125. (in Chinese with English abstract) doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.014 <http://www.tcsae.org>

0 引言

塑料地膜覆盖是水资源短缺地区促进农业增产、增收的一项关键性措施。以缺水为农业主要限制因素的西北干旱地区表现出更高的增产和节水效益^[1]。研究表明地膜覆盖技术对中国国农作物增产和水分利用效率提升的贡献率已达 24.32% 和 27.63%^[2]。该技术已被证实能够短期内有效的提高地表温度, 减少土壤水分蒸发从而改善了土壤的水热状态^[3], 抑制杂草生长^[4], 从而极大地促进了作物的生长和产量形成。中国是世界上使用地膜

最多的国家, 近 30 a 来所有的省份和地区地膜覆盖强度均呈上升趋势, 1991 年到 2017 年, 中国地膜用量从 3×10^5 t 急剧增加到 14.7×10^5 t, 覆盖面积 184×10^5 hm², 用量占世界需求的 60% 以上^[2]。未来 10 a 中国的地膜的用量预计还将以每年 7% 的速度保持高速增长^[5]。因此地膜覆盖技术在保障中国粮棉安全方面发挥着举足轻重的作用。

然而聚乙烯(polyethylene, PE)地膜在土壤中极难分解, 又缺乏有效回收措施, 造成了一系列残膜污染危害^[6], 且持续多年^[7]。前人研究表明新疆残膜总量为 3.43×10^5 t, 占覆盖总量的 15.3%, 其中棉花田地膜残留量最大, 达 158.4 kg/hm², 且以每年 15.69 kg/hm² 的速度累积^[8]。其中石河子, 塑料薄膜残留量在 121.85~352.38 kg/hm²^[9], 吐鲁番地区最大残留量达 502.2 kg/hm², 超过半数棉田地膜残留量高于国家标准(75 kg/hm²)^[8]。残膜污染可能对作物生产产生一系列负面影响, 包括: 1) 降低了土壤孔隙度, 中断土壤结构, 阻碍了水肥运动。随着残膜量的增加表土层的初始含水率、容重、总孔隙度等方面存在显著差异^[4]。

收稿日期: 2019-03-12 修订日期: 2019-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(31460143; 31370522); 新疆维吾尔自治区科技支疆项目(2016E02078)

作者简介: 林涛, 副研究员, 博士, 研究方向为农业水土工程。Email: 27427732@qq.com

*通信作者: 梅旭荣, 研究员, 博士生导师, 研究方向为旱作节水农业。Email: meixurong@caas.cn

土壤容重下降,孔隙度上升^[4,10],排大孔隙土壤水的当量孔径体积占比增大,从而降低了土壤保水能力^[11-12];清除残膜后,0~20 cm 土层水分平衡时间减少了 45%~50%^[4,13]。2)降低播种质量。残膜污染棉田,烂种率达 6.92%,烂芽率达 5.17%,棉苗侧根比正常减少 4.8~7.6 条^[14]。3)抑制了根系的扩展和分布,最终导致减产^[4,14-15]。研究表明^[2],残膜量为>240 kg/hm²时,对玉米、马铃薯和棉花平均减产率为 16.10%。Xie 等认为^[10],当残膜量>720 kg/hm²时,玉米根系生长受阻明显,产量明显下降。Zou 等研究认为^[16],当残膜量>80 kg/hm²,西北地区大棚番茄产量将会急剧下降。颜林等研究表明^[17],棉花重茬 12~15 a,残膜量为 283.65~283.80 kg/hm²,减产 25.3%~47.87%。毕继业等^[18]通过评价模型分析认为当使用地膜覆盖技术 36 a 后,地膜覆盖的增产率将小于地膜残留造成的减产率。4)残膜污染降低了土壤酶活性和微生物的多样性,从而抑制了土壤肥力^[4,19-20],不仅会增加温室气体的排放^[21-22],还会增加农药的吸附量,导致食品安全风险^[23]。此外残膜阈值与减产幅度的关系因作物、种植管理技术和生态区域而产生较大的差异^[2,8,24]。

根系是获取水分和养分的重要器官,并通过根区环境的相互作用,影响作物的生产效率^[25-26]。根系生长发育受土壤结构与水肥等条件的强烈影响,残膜的含量和分布状况导致土壤结构、通气状况、水肥环境等要素发生改变,因而影响作物根系的正常生长^[9]。有关根系功能的有用信息可以通过研究不同残膜含量条件下,根长密度、根质量密度、表面积密度等参数的动态变化来获得,或者通过土壤含水率和养分吸收的监测来简介评估根系在不同土壤深度的活力来获得^[25-28]。因此,建立土壤水分和根系构型的关系是预测不同残膜含量条件下,作物水分和养分吸收的必要手段。尽管残膜污染破坏土壤结构,降低水肥运移速率,阻碍根系生长,已经得到广泛认同,但是,以往的许多研究都集中残膜含量与产量之间的关系上,由于技术和经济的限制,残膜污染对根区水分及根系生长发育的综合研究较少,改变水分分布和根系构型的过程仍然缺少量化研究。因此,本研究的目标是深入了解不同残膜含量条件下水分的有效性对棉花根系生长发育的影响,及整个根系在收获时的分布状态。本研究对提高绿洲棉田残膜污染认识、开展风险预警评估、发展残膜防控技术等均具有重要的科学意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2014—2015 年在新疆阿瓦提县新疆农科院棉花综合试验基地(40°06' N、80°44' E,海拔 1 025 m)进行。试验区位于塔里木盆地西北缘阿克苏灌溉绿洲,属于典型的温带大陆性干旱气候,年平均降水量 46.7 mm,蒸发量 2 900 mm,蒸发降水比>50,日照时数 2 679 h,年均气温 10.4 ℃,≥10 ℃年积温为 3 988 ℃,无霜期 211 d。

试验区土壤(0~40 cm)采用 Malvern Mastersizer

2000 激光粒度分析仪(Malvern Instruments Ltd., UK)测得,粉粒、砂粒、黏粒质量分数分别为 36.42%、60.72%、2.86%,查美国农业部质地三角形图,供试土壤质地为粉砂壤土^[20]。土壤平均干容重为 1.48 g/cm³,田间持水率(质量分数)为 22.5%,凋萎系数 7.3%,土壤有效水 15.2%。土壤中有有机质 10.6 g/kg,全氮 1.79 g/kg,碱解氮 43.80 mg/kg,速效磷 21.4 mg/kg,速效钾 207.47 mg/kg,总盐分 1.02%。地下水位 40~50 m,地下水不能补给到作物根系分布层,向上补给量忽略不计。

1.2 试验设计及过程

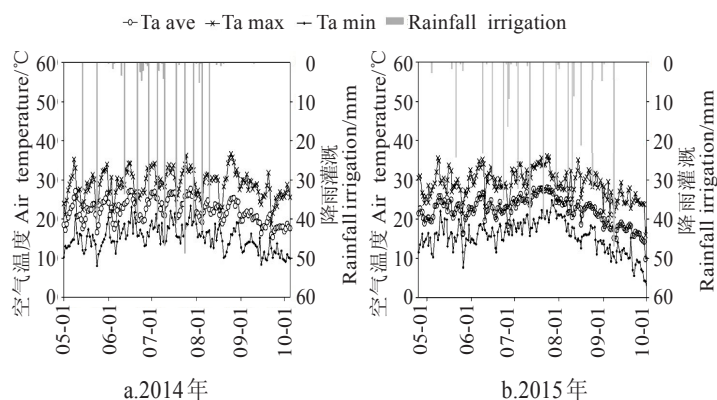
试验采用随机区组设计,设置 5 个残膜水平:0(A)、225(B)、450(C)、675(D)和 900 kg/hm²(E),采用直径 30 cm,高 50 cm,体积 0.035 m³的播种桶,模拟棉田地膜残留及分布状态,对应的残留地膜量分别为 0、1.6、3.2、4.8 和 6.4 g/筒。供试棉花品种为新陆中 47 号,生育时期划分如表 1 所示,采用 1 膜 2 管 6 行机采棉种植模式,滴灌带间距 76 cm,滴头间距 25 cm,滴头流量 2.1 L/h。株行配置 ((10+66+10)+66)×11 cm。PE(polyethylene, PE)地膜宽 2.05 m,每个处理重复 4 次,共 20 桶,每桶 9 穴,每穴点播 3 粒种子,待出苗后保留 1 株。桶内土壤取自农田,采用土壤紧实度仪(SC900, USA)控制容重分层回填。

为确保模拟参数的准确性,播前按照五点取样法选取 1 m×1 m×1 m 样方,每层 10 cm 进行取样,测定容重、残膜含量和分布等级。经过实地调查,本研究区残膜自然分布状态下有 3 个尺寸等级,其中小膜面积<4 cm²,中膜面积 4~25 cm²,大膜面积>25 cm²,分配比例为 7:2:1,平均残膜量为 225 kg/hm²,主要分布于 0~30 cm 的土壤中。桶四周为同期播种的大田,为减小筒栽与大田环境间的差异,填埋前先去桶底和 3/4 面积的桶壁,用孔径 18 μm 尼龙网袋套在整个桶上,再将桶埋于预先挖好的沟槽中。参照王亮^[29]的方法进行残膜回填和分布状态控制。具体做法是按各层拟定残膜量在 30 cm 土壤深处均匀铺 1 层,上面覆土 10 cm,于 20 cm 深处铺设 1 层残膜,继续覆土 10 cm,最后于 10 cm 深处撒上残膜后回填土壤,保持桶口与地面相平,人工铺设残膜与自然分布状态相接近。

表 1 2014 和 2015 年棉花生育期划分
Table 1 Division of growth period for cotton in 2014 and 2015

年份 Years	苗期 Seedling	蕾期 Bud stage	Bud stage 花铃期	吐絮期 Boll opening
2014	05-10—06-05	06-06—07-09	07-10—08-20	08-21—09-25
2015	04-25—05-25	05-26—06-24	06-25—08-14	08-15—09-21

参照当地传统经验,生育期灌溉 8~10 次,6 月下旬开始,8 月中旬结束,灌溉定额 400 mm 左右,灌溉间隔 7~8 d,灌水定额 30~45 mm(空气温度及灌溉降水情况见图 1)。底肥一次性投入磷酸二铵(P₂O₅ 53.8%,N 21.2%)450 kg/hm²,硫酸钾(K₂O 51%) 225 kg/hm²,尿素 300 kg/hm²(N 46.4%)。生育期采用“一水一肥”的方式追施尿素 600 kg/hm²,其他管理同大田。



注: Ta 为气温, ave, max, min 为平均、最大、最小。

Note: Ta is air temperature, ave, max and min are average, maximum, minimum.

图1 2014和2015年棉田空气温度及灌溉降水情况

Fig.1 Air temperature, rainfall and irrigation of cotton field in 2014 and 2015

1.3 测试项目及方法

1.3.1 棉花干质量测定和根系扫描分析及经济性状的测定

于吐絮期,将盆栽筒连同根袋一起取出,分成地上部与根系部分,清水冲洗根系,自然晾干后用扫描仪在300 dpi 像素下扫描成黑白 TIF 图像,用 DT-SCAN 2.04 图像分析软件(Delta-T, Co., Ltd. UK)计算出根长、根体积、根表面积、根直径、根长密度和根表面积密度等形态特征指标。扫描后的根系,85 °C 烘干至恒质量计算根质量密度。同时,在棉花吐絮后,取长势均匀植株3株,采收中部棉铃,进行单铃质量和衣分测定。

1.3.2 土壤体积含水率的测定

观测时期位于开花期至吐絮期(6月25日—9月2日),采用时域反射仪 MinTrus(SEC, Co., Ltd. USA)进行土壤体积含水率的无损监测。探头预先埋于桶中,每天14:00,采集相同剖面10、20、30、40和50 cm 土层的体积含量数据,重复3次,仪器自动计算各位点体积含水率的平均值。

1.3.3 水分利用效率

棉田水分利用效率(water use efficiency, WUE)的计算方法如下^[20-21]:

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (1)$$

$$W = \sum_{i=1}^n h_i \rho_i b_i / 100 \quad (2)$$

$$ET = (W_{i1} - W_{i2}) + M + P_0 + KDR \\ = (W_{i1} - W_{i2}) + M + P_0 + K \quad (3)$$

式中 WUE 为水分利用效率, kg/(hm²·m³); Y 为籽棉产量, kg/hm²; ET 为阶段耗水量, mm; W 为土壤储水量, mm; h_i 为土壤深度, cm; ρ_i 为土壤容重, g/cm³; b_i 为土壤水分质量分数; n 为土层序号, i=10, 20, 30, ..., 60。M 为时段内灌溉量, mm; P₀ 为时段内的有效降雨量, mm; K 为时段内的地下水补给量, mm, 当地下水埋深大于 2.5 m 时可以不计(本试验地下水埋深在 5 m 以下, 无地下水补给)。D 为深层渗漏量, mm; R 为地表径流量, mm。D、R 均忽略不计。

1.3.4 数据分析工具

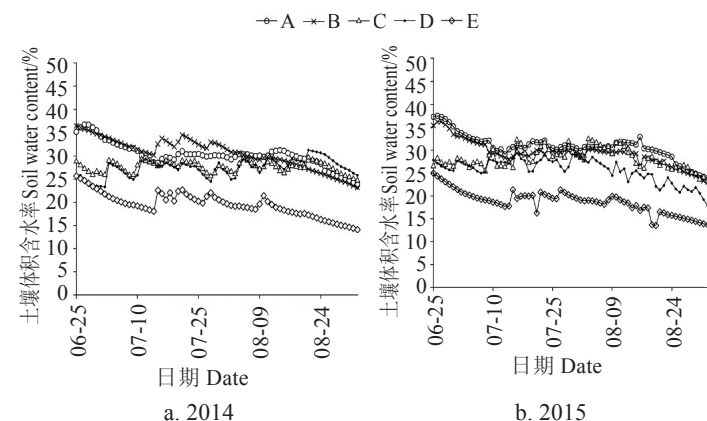
使用 Microsoft Excel 2017 和 SigmaPlot Version 12.5

(Systat Software, Inc. USA) 进行计算并编制图表。采用 SPSS 19.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 残膜对土壤含水率的影响

不同残膜处理下棉田生育期 0~50 cm 土层日平均体积含水率(SWC)如图2所示。随着残膜量的增加 SWC 逐渐降低。2014 年 A、B、C、D 和 E 处理的平均 SWC 分别为 30.59%、30.19%、27.54%、27.45% 和 19.50%。2015 年与之对应的平均 SWC 分别为 30.74%、29.34%、28.05%、25.64% 和 18.66%。与 A 处理相比 2014 年 B、C、D 和 E 处理的平均 SWC 依次降低 1.32%、8.77%、9.04% 和 35.41%, 2015 年依次降低 4.54%、8.74%、16.60% 和 39.31%。其中开花前 A、B 处理的 SWC 明显高于其他处理, 开花后在灌溉的补给作用下, 上述指标与 C、D 处理的差距减小, 但仍明显高于 E 处理。上述分析表明, 随着



注: A、B、C、D、E 分别表示残膜量为 0、225、450、675、900 kg·hm⁻², 下同。
Note: Residual content in A, B, C, D and E is 0, 225, 450, 675 and 900 kg·hm⁻², respectively. Same as below.

图2 2014和2015年不同残膜处理下棉田日平均体积含水率
Fig.2 Dynamics of daily average soil volumetric water content (SWC) of cotton field at different residual plastic treatments in 2014 and 2015

残膜量的增加 SWC 逐渐降低, 其中开花前土壤阶段耗水量受残膜影响大于花铃期。

不同土层 SWC 的日变化动态如图3所示。A 处理耗水层主要集中在 20~40 cm。蕾期、花铃期, 0~10 cm 和 40~50 cm 土层的 SWC 较高, 而 10~40 cm 土层 SWC 较低, 但不同土层的 SWC 变化平稳, 未出现较大的波动。吐絮期由于停止灌溉整个土壤剖面 SWC 开始降低。与 A 处理相比, E 处理各土层 SWC 显著低于 A 处理。表层(0~20cm)SWC 低于土壤有效水, 亏缺明显。深层(40~50 cm)SWC 最高, 但仍显著低于 A 处理, 地下深层水消耗明显。上述分析表明, 随着残膜含量的增加表层和深层 SWC 逐渐降低, 接近或低于土壤有效水, 各土层出现不同程度的水分亏缺。此外, 2 a 的数据还表明, 在灌溉措施下由于残膜量的增加导致土壤孔隙分布不均, 造成土壤剖面产生水分优势流或水分阻隔效益, SWC 的空间分布随着灌溉而产生明显的不连续现象。

2.2 残膜对棉花根构型的影响

2.2.1 残膜对根系质量和分布的影响

2 a 的研究结果表明, 随着残膜量的增加, 根系质量

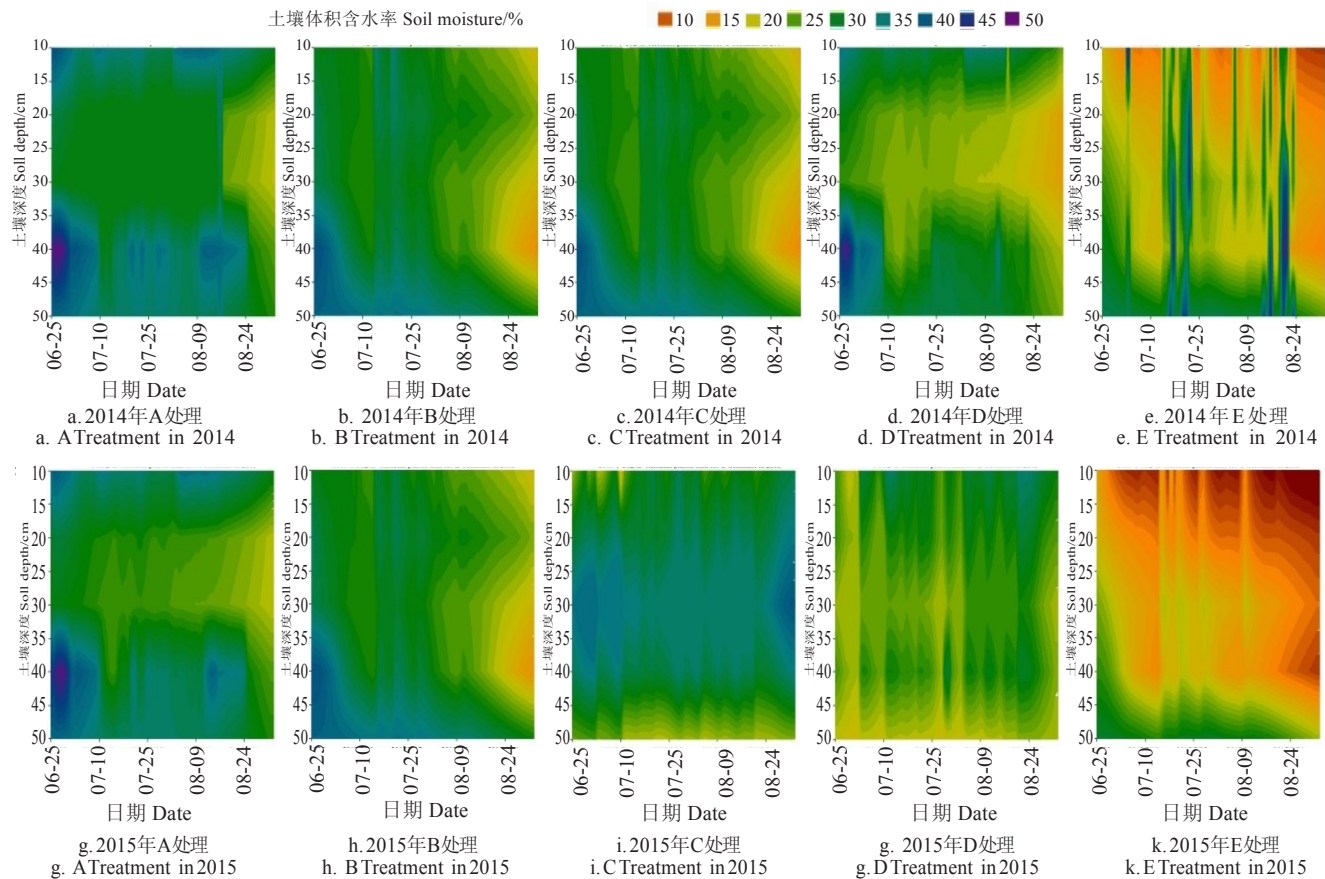


图3 2014和2015年不同残膜量处理下各土层体积含水率的日变化动态

Fig.3 Dynamic of daily soil volumetric water content (SWC) changes under different soil layers of cotton at different residual plastic treatments in 2014 and 2015

呈下降趋势(图4)。2014年和2015年,A处理根系总质量分别为1 869和2 008 kg/hm²,而E处理对应的根系总质量分别为855和887 kg/hm²,A处理较E处理根系总生物量分别增加119%和126%。方差分析表明,A与B处理,C与D处理间无明显差异($P>0.05$),但A、B处理与C、D处理及E处理间表现出显著的差异性($P<0.05$),表明土壤中的残膜含量的变化对根系的总质量具有显著的影响。

根质量密度(root weight density, RWD)在土壤剖面的分布情况如图4所示,RWD在土壤中的分布显著受残膜的影响。其中63%~84% RWD分布于0~20 cm土层,80%~95%分布于0~30 cm的土层范围。各土层范围内

的RWD,通常均随残膜含量的增加而降低。其中,2014年A处理RWD高于E处理75.68%,而2015年则高于E处理65.77%。不同土层RWD处理间差异表明,0~10 cm土层,2014年A、B、C处理与D、E处理间具有显著的差异,2015年各处理间无显著差异。10~20 cm土层,2014年无显著差异。2015年A、B、C处理与D、E处理间具有显著差异。20~30 cm土层,2014年RWD无显著差异,2015年A、B、C处理与D、E处理间具有显著差异。上述分析表明通过5个残膜处理RWD的分布来看,残膜主要降低0~30 cm土层范围内的RWD,且较高的残膜量(D和E处理)与其他处理间表现出差异的显著性。

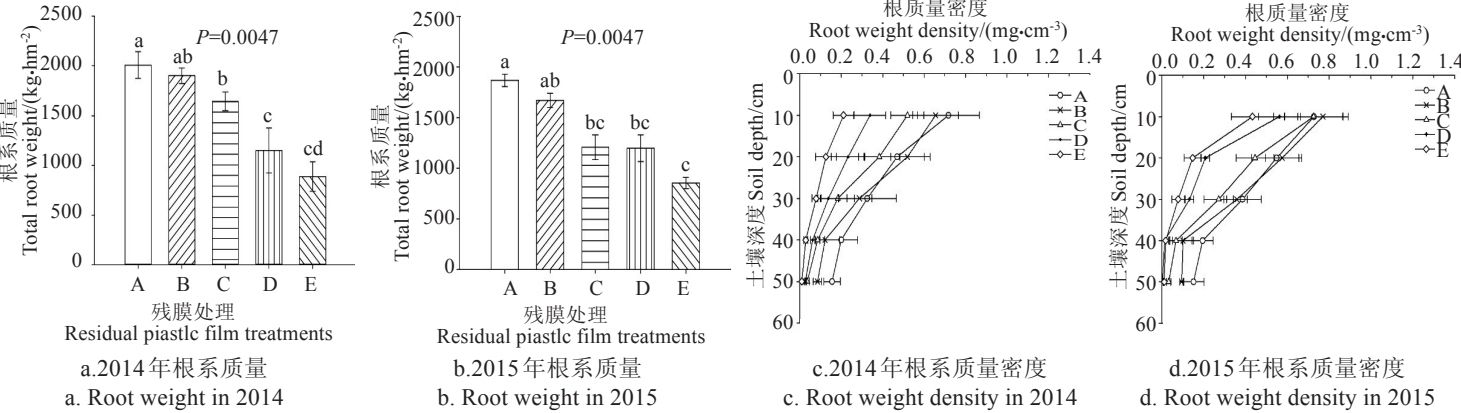


图4 2014和2015年不同残膜处理下棉花根质量及其密度比较

Fig.4 Effects of residual plastic on cotton root weight density and its distribution at different soil depths in 2014 and 2015

2.2.2 残膜对根长密度和分布的影响

根系的根长密度(root length density, RLD)决定植物吸收土壤水分或养分的能力,相比根系质量等指标,在

反映根系生理生态功能方面更有意义。如图5所示A、B、C处理间无显著差异,2014年A处理与D处理和E处理具有显著的差异性,E处理与A、B、C处理均具有显著

性差异。2015年A、B、C处理与和E处理间具有显著差异,D处理与A处理和E处理有显著性差异。其中,2014年A处理RDL高于E处理51.9%,而2015年则高于E处理70.8%。上述分析表明平均RDL受残膜含量的影响显著,随着残膜含量的增加而下降。

RDL在0~50 cm土壤垂直剖面的分布情况如图5所示。大部分的RDL(62%~68%)存在于0~30 cm的土层深度。随着土层深度的增加RDL逐渐降低。5个残膜处理中,RDL的降低趋势随着随残膜含量的增加而增大,其中0~10 cm土层范围的RDL受残膜影响最小,20~30 cm

土层范围RDL受残膜影响最大。

2.2.3 残膜对根表面积密度和分布的影响

残膜含量对平均根表面积密度(average root surface area density, ARSAD)的影响如图6所示,随着地膜含量的增加ARSAD迅速降低。A处理ARSAD数值最大,而E处理数值最小。A处理ARSAD分别为0.39 cm²/cm³(2014年)和0.44 cm²/cm³(2015年),较对应的E处理高195%(2014年)和238%(2015年)。(P<0.05)方差分析表明,相邻2个残膜量处理间无显著差异,其余处理间则具有显著差异。

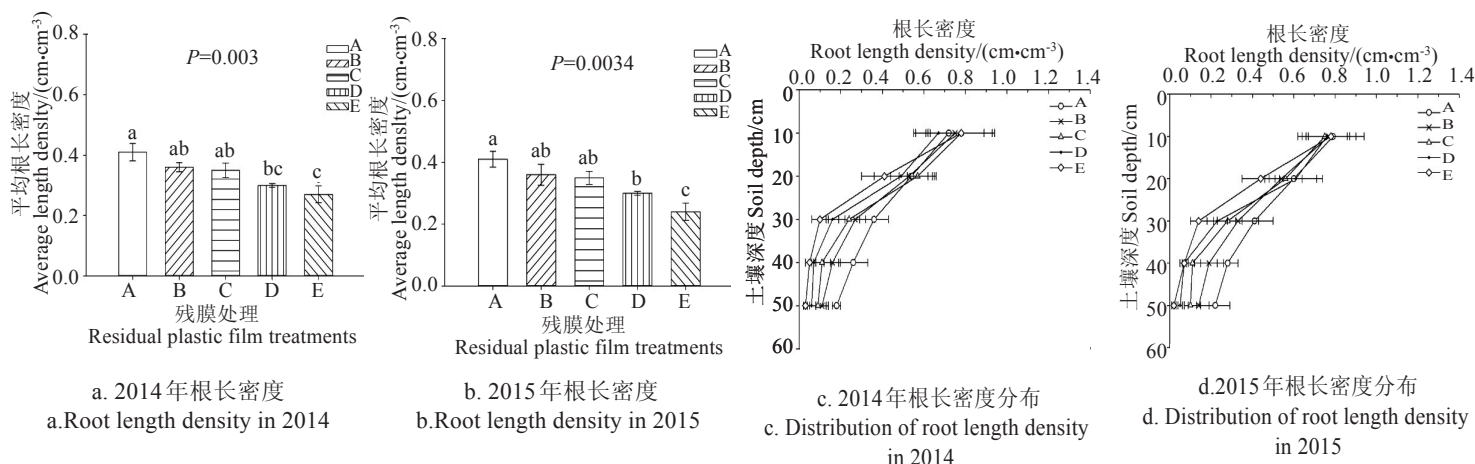


图5 2014和2015年不同残膜处理下棉花平均根长密度及其分布的影响

Fig.5 Effects of plastic film residues on cotton root length density and its distribution at different soil depths in 2014 and 2015

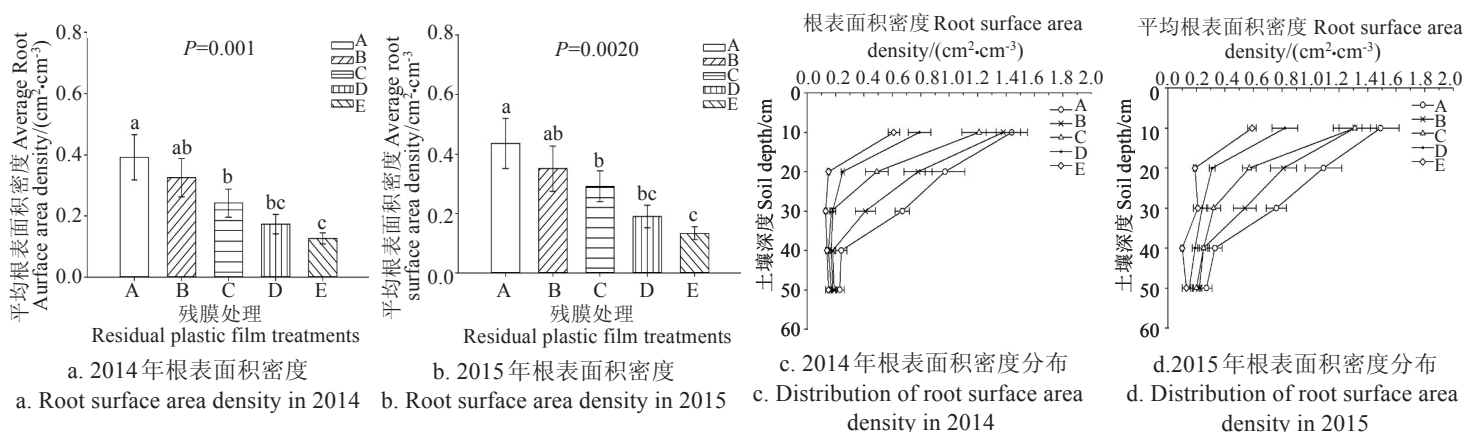


图6 2014和2015年残膜处理对棉花根表面积密度及其分布的影响

Fig.6 Effects of plastic film residues on cotton surface area density and its distribution at different soil depths in 2014 and 2015

ARSAD在0~50 cm土壤垂直剖面的分布情况如图6所示。残膜影响ARSAD在不同土层的分布,总体上表现为ARSAD随着土层深度和残膜含量的增加而下降,0~30 cm土层受影响较大,而30~50 cm土层范围影响较小。其中10 cm土层,A、B、C处理与D处理和E处理间具有显著的差异性。20 cm土层变化幅度最大,除2014年A与B处理无显著差异外,其余处理间均具有显著的差异性。20~30 cm土层A和B处理间差异显著,而C、D与E处理间无显著的差异。30~50 cm土层,各处理ARSAD的变化较小,数值趋于稳定。

2.2.4 残膜对根体积的影响

残膜对根系体积(root volume, RV)的影响如图7所示。残膜对RV存在一定的影响。2014年A、B处理间无显著差异,A处理与C、D、E处理间具有显著的差异。2015年RV随着残膜含量的增多而降低。其中,A、B处理

间无显著差异,C、D处理间无显著差异,A、B与C及E处理间差异显著。其中,2014和2015年A处理RV最高分别为13.11和12.80 cm³(P<0.05),较E处理高4.51和7.05 cm³,增幅达34.62%和60.16%。

2.2.5 残膜对根系平均直径的影响

根系平均直径(root average diameter, RAD)受残膜影响显著(图8)。总体上RAD随残膜量的增加而逐渐下降,2014和2015年A处理RAD最高分别为1.3和1.45 mm,较E处理高0.58和0.65 mm,增幅达81.3%和84%。其中,A和B处理间无显著性差异,C和D处理间无显著性差异,但2014年,A和B处理与C处理和E处理差异显著,D处理与E处理差异显著。2015年,A和B处理间无显著性差异,A处理和B处理与E处理间差异显著,C处理与A处理和E处理差异显著,D处理与A处理、E处理差异显著。

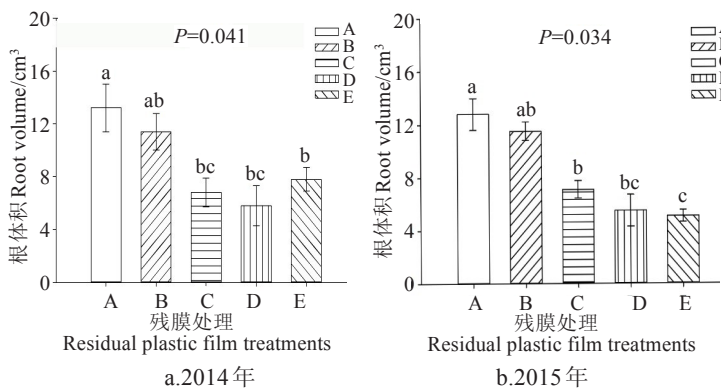


图7 2014和2015年残膜处理对棉花根体积的影响
Fig.7 Effects of plastic film residues on root volume of cotton and its distribution in 2014 and 2015

2.3 残膜对棉花产量及水分利用效率的影响

不同残膜量对产量的影响如表2。2014年C、D、E处理的平均果枝数与A处理差异显著,果枝数平均减少0.5左右。虽然果枝数下降,但是果节数无明显变化,因此单株成铃数之间没有显著差异。2a数据表明,E处理单铃质量与A处理相比平均下降0.72 g,残膜对衣分影响不

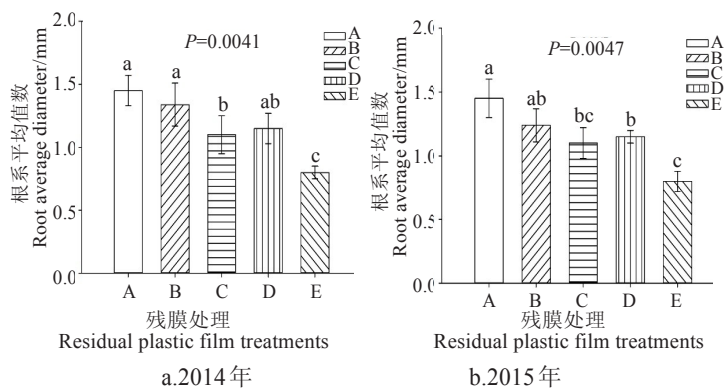


图8 2014和2015年不同残膜处理对棉花根平均直径的影响
Fig.8 Effects of plastic film residues on root average diameter of cotton in 2014 and 2015

大。对于单株籽棉产量和单株皮棉产量而言,A处理与B处理在产量上差异不显著,但C、D和E处理与A处理相比籽棉产量分别平均下降了21.6%、19.9.0%和30.5%($P<0.05$),皮棉产量分别平均下降了21.8%、19.7%和31.1% ($P<0.05$)。水分利用效率随着残膜量而逐渐下降,与A处理相比,E处理水分利用效率平均降低13.69% ($P<0.05$)。

表2 不同残膜处理对棉花产量构成因素的影响

Table 2 Effects of different film residue treatment cotton yield and its components

年份 Year	处理 Treatments	果枝数 Fruit branch number per plant	单株成铃数 Boll per plant	单铃质量 Boll weight/g	衣分 Lint percent- age/%	单株籽棉产量 Seed cotton yield per plant/g	单株皮棉产量 Lint yield per plant/g	水分利用效率 Water use efficiency/ (kg·hm ⁻² ·m ⁻³)
2014	A	6.0b	5.3ab	5.87a	42.4a	31.1a	13.2a	8.3ab
	B	7.1a	5.6a	5.79ab	42.38a	32.4a	13.7a	8.0ab
	C	5.5c	4.1b	5.77ab	42.5a	23.2c	9.8c	7.7bc
	D	5.5c	4.8ab	5.65ab	42.46a	27.7b	11.8b	7.8bc
	E	5.6c	4.5b	5.63b	42.39a	25.3c	10.7c	7.2d
2015	A	6.8 a	5.3a	5.4a	41.6a	28.4a	11.8a	8.5a
	B	6.2 ab	4.7 a	5.2a	43.2a	24.6a	10.6a	8.1b
	C	6.7 a	4.4ab	5.1 a	42.0 a	23.3b	9.7b	8.3ab
	D	5.8 ab	4.2 b	4.8ab	41.2 a	20.2b	8.4b	7.5bc
	E	5.1b	4.0 b	4.2 b	41.5 a	16.4c	6.7c	7.3c

注:同列不同字母表示在5%水平下差异显著。
Note: Different letters in a column mean significant at 5%.

2a数据表明,与A处理相比,E处理生育期土壤含水率平均降低了37.36%,根质量密度平均降低了70.73%,根长密度平均降低了61.35%、根表面积密度平均降了216.50%、根系体积平均降低了47.39%、根系平均直径平均降低了82.65%。籽棉产量和水分利用效率平均降低了18.50%和13.69%。

3 讨论

3.1 残膜对土壤水分分布的影响

地膜覆盖技术具有增温、保墒、抑盐、防草的突出功效,在干旱半干旱地区控制根区土壤盐分累积和水分亏缺的过程中扮演重要的角色,对粮食和经济作物增产的贡献分别为20%~35%和20%~60%^[20]。但随着地膜的长期使用,残膜污染也日益严重,残膜量的存在阻碍土壤水分下渗,使表层土壤的含水率明显高于深层土壤^[10];李仙岳等^[30]研究发现,增加残膜量,土壤湿润体减小,入渗的阻滞作用增强,残膜量过大时,会引起优势流反而

使得湿润面积增大,水分在垂直和水平方向的运移速度加快。本研究发现,在棉花生长期0~50 cm土壤剖面平均土壤体积含水率(SWC)随着残膜含量的增加而下降,土壤蓄水能力逐渐降低。而当残膜在0~225 kg/hm²时,在棉花开花前土壤体积含水率较高,开花后由于受到灌溉的补给,残膜量在225~900 kg/hm²的土壤体积含水率有略微的上升,但依然小于残膜量225 kg/hm²。而在不同土层的土壤体积含水率动态变化上,随着残膜含量的增加,土壤表层和深层SWC逐渐降低,接近或低于土壤有效水,各土层出现不同程度的水分亏缺,土壤深层水消耗逐渐增加。出现该结果过的原因有可能是残膜破坏了土壤结构残膜量的增加导致土壤空隙分布不均,造成土壤剖面产生水分优势流或水分阻隔效益,SWC的空间分布随着灌溉而产生明显的不连续现象。使表层土壤的含水率明显低于深层土壤,造成深层土壤水分消耗增加,降低了植株对表土层土壤水分的吸收。

3.2 残膜对根系构型的影响

根系是作物最活跃的养分和水分吸收器官,在作物的生长发育和产量形成过程中起着非常重要的作用。残留地膜对作物根系生长的影响研究较多^[31-33],李青军等^[34]研究发现,适量的残膜能够刺激根系的生长,残膜量超过180 kg/hm²,棉花根系生长指标随残膜量的增加逐渐降低。而本研究发现,残膜的增加,导致根的质量减少,降低了0~30 cm土层的根质量密度。根长密度的降低趋势随着随残膜含量的增加而增大,其中0~10 cm土层受残膜影响最小,20~30 cm土层受残膜影响最大。这与赵素荣^[35]等研究地膜残留阻碍根系的生长,根长和根质量随地膜残留量的增加而减少结果一致。此外,也有研究认为随着残膜量增加,棉花根系表面积和总长度增加,根系直径和体积减小^[36]。本研究的试验结果表明,平均根表面积密度和根系平均直径,随着土层深度和残膜含量的增加而下降,0~30 cm土层受影响较大,而30~50 cm土层范围影响较小。

3.3 残膜对产量和WUE的影响

土壤中存在大量残膜会影响作物生长环境和自身的生长发育,进而影响到作物产量和水分利用效率^[38]。许多学者研究认为^[10,33,36],地膜残留可使棉花收获株数、单株成铃数及单铃质量呈下降趋势,最终导致棉花减产,一般减幅为1%~23%。本研究通过2 a的数据分析结果表明,残膜量的增加虽然减少了果枝台数,但使果节数增加,因此各处理对单株成铃数影响不大。当残膜量到900 kg/hm²时,单铃质量与无残膜相比下降0.24 g,对衣分影响不大,最终导致棉花产量的降低。其水分利用效率的变化趋势与产量基本一致,出现该结果的原因可能是残膜使得土壤水分运移受阻,影响了对水分的吸收,致使残膜量越大导致棉花产量和水分利用效率越低,同时,残膜降低了农田耗水量,增加了土壤表层无效蒸发,不利于水分的有效利用^[29]。

4 结论

地膜残留量对棉田土壤水分分布、根系构型有重要影响,并影响棉花产量和水分利用。本研究发现,80%~95%的根系质量分布于0~30 cm土壤剖面上,该区域是土壤水分分布及根系构型受残膜污染影响最显著的区域。随着残膜含量的增加,土壤平均含水率逐渐降低,各土层出现不同程度的水分亏缺,干燥化程度加剧。2 a数据表明,与A处理相比,E处理生育期土壤含水率平均降低了37.36%,根质量密度平均降低了70.73%,根长密度平均降低了61.35%、根表面积密度平均降了216.50%、根系体积平均降低了47.39%、根系平均直径平均降低了82.65%。籽棉产量和水分利用效率平均降低了18.50%和13.69%。残膜增加阻碍了土壤水分和作物根系的分布,影响了棉花根系对土壤水分的充分吸收,降低了单株成铃数和单铃质量,导致棉花产量和水分利用效率显著下降。因此在水资源短缺的西北内陆棉区采取合理的棉田净土措施,能够降低残膜污染对土壤水分及根系构型

的影响,利于棉花产量和水分利用效率的提升。

[参考文献]

- [1] 薛颖昊,曹肆林,徐志宇,等.地膜残留污染防治技术现状及发展趋势[J].农业环境科学学报,2017,36(8):1595—1600.
Xue Yinhao, Cao Silin, Xu Zhiyu, et al. Status and trends in application of technology to prevent plastic film residual pollution[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(8): 1595—1600. (in Chinese with English abstract)
- [2] Gao H, Yan C, Liu Q, et al. Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: A meta-analysis[J]. Science of The Total Environment, 2019, 651: 484492.
- [3] Liang H, Hu K, Qin W, et al. Modelling the effect of mulching on soil heat transfer, water movement and crop growth for ground cover rice production system[J]. Field Crops Research, 2017, 201: 97—107.
- [4] Jiang X J, Liu W, Wang, E., et al. Residual plastic mulch fragments effects on soil physical properties and water flow behavior in the Minqin Oasis, northwestern China[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 166: 100—107.
- [5] Sintim H Y, Flury M. Is biodegradable plastic mulch the solution to agriculture's plastic problem? [J]. Environ. Sci. Technol, 2017, 51(3):1068—1069.
- [6] 严昌荣,刘恩科,舒帆,等.中国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J].农业环境科学学报,2014,31(2):95—102.
Yan, Changrong, Liu, Enke, Shu Fan, et al. Review of agricultural plastic mulching and its residual pollution and prevention measures in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 31 (2): 95—102. (in Chinese with English abstract)
- [7] Kyrikou I, Briassoulis D, Hiskakik M, et al. Analysis of photochemical degradation behaviour of polyethylene mulching film with pro-oxidants[J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96 (12): 2237—2252.
- [8] Zhang D, Liu H, Hu W, et al. The status and distribution characteristics of residual mulching film in Xinjiang, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(11): 2639—2646.
- [9] He H, Wang Z, Guo L, et al. Distribution characteristics of residual film over a cotton field under long-term film mulching and drip irrigation in an oasis agroecosystem[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 180(3): 194—203.
- [10] 解红娥,李永山,杨淑巧,等.农田残膜对土壤环境及作物生长发育的影响研究[J].农业环境科学学报,2007(增刊):153—156.
Xie Honge, Li Yongshan, Yang Shuqiao, et al. Influence of residual plastic film on soil structure, crop growth and development in fields[J]. Journal of Agro - Environment Science. 2007(S): 153—156. (in Chinese with English abstract)
- [11] 牛文全,邹小阳,刘晶晶,等.残膜对土壤水分入渗和蒸发的影响及不确定性分析[J].农业工程学报,2016,32(14):110—119.
Niu Wenquan, Zou Xiaoyang, Liu Jingjing et al. Effects of residual plastic film mixed in soil on water infiltration, evaporation and its uncertainty analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32 (14): 110—119. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王志超,李仙岳,史海滨,等.含残膜土壤水分特征曲线模型构建[J].农业工程学报,2016,32(14):103—109.

- Wang Zhichao, Li Xianye, Shi Haibin, et al. Water characteristic curve model for soil with residual plastic film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32 (14): 103—109. (in Chinese with English abstract)
- [13] Yin M, Li Y, Fang H, et al. Biodegradable mulching film with an optimum degradation rate improves soil environment and enhances maize growth[J]. Agricultural Water Management, 2019, 216 (2): 127—137.
- [14] 刘志峰. 浅谈残膜污染对棉花生长的影响及应对措施[J]. 石河子科技, 2009(6): 21—22.
- Liu Zhifeng. Introduction the pollution of the residue film impact on cotton growth and response[J]. Shihezi Science and Technology, 2009(6): 21—22. (in Chinese with English abstract)
- [15] 董合干, 刘彤, 李勇冠. 新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 2(8): 91—99.
- Dong Hegan, Liu Tong, Li Yongguan. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 2(8): 91—99. (in Chinese with English abstract)
- [16] Zou X, Niu W, Liu J et al. Effects of residual mulch film on the growth and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) [J]. Water Air Soil Poll, 2017, 228: 71.
- [17] 颜林, 罗巨海, 刘兆晨, 等. 浅析棉田残膜对棉花生产的影响及对策[J]. 石河子科技, 2007(1): 21—22.
- Yan Lin, Luo Juhai, Liu Zhaochen, et al. Introduction the pollution of the residue film impact on cotton growth and measures [J]. Shihezi Science and Technology, 2009(1): 21—22. (in Chinese with English abstract)
- [18] 毕继业, 王秀芬, 朱道林. 地膜覆盖对农作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 172—175.
- Bi Jiye, Wang Xiufen, Zhu Daolin. Effect of plastic film mulch on crop yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE) 2008, 24(11): 172—175. (in Chinese with English abstract)
- [19] Ibarra-Jiménez, Luis., Hugolira-Saldivar, et al. Colored plastic mulches affect soil temperature and tuber production of potato[J]. Acta Agric. Scand, 2011, 61: 365—371.
- [20] Liu E K, He W Q, Yan C R. 'White revolution' to 'white pollution': Agricultural plastic film mulch in China[J]. Environ Res Lett, 2014, 9(9): 091001.
- [21] Bai J, Wang J, Chen X, et al. Seasonal and inter-annual variations in carbon fluxes and evapotranspiration over cotton field under drip irrigation with plastic mulch in an arid region of Northwest China[J]. J. Arid Land, 2015(7): 272—284.
- [22] Kim Y, Berger S, Kettering J, et al. Simulation of N_2O emissions and nitrate leaching from plastic mulch radish cultivation with Landscape DNDC[J]. Ecol. Res. 2014, 29: 441—454.
- [23] Yang X, Zhang L J, Li Z, et al. Ecological thought of prevention and cure of agricultural tri-dimension pollution[J]. Acta Ecol Sin, 2005, 25: 904—909.
- [24] Li Q, Li H, Zhang L, et al. Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2018, 221, 50—60
- [25] Xu C, Tao H, Tian B, et al. Limited-irrigation improves water use efficiency and soil reservoir capacity through regulating root and canopy growth of winter wheat[J]. Field Crops Research, 2016, 196: 268—275.
- [26] Ali S, Xu Y, Ahmad I, et al. Tillage and deficit irrigation strategies to improve winter wheat production through regulating root development under simulated rainfall conditions[J]. Agricultural Water Management, 2018, 209(7): 44—54.
- [27] Battie Laclau P, Laclau J P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil[J]. Field Crops Research, 2009, 114(3): 351—360.
- [28] Ahmadi S H, Sepaskhah A R, Zarei M.. Specific root length, soil water status, and grain yields of irrigated and rainfed winter barley in the raised bed and flat planting systems[J]. Agricultural Water Management, 2018, 210(1): 304—315.
- [29] 王亮, 林涛, 汤秋香, 等. 地膜残留量对新疆棉田蒸散及棵间蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 120—128.
- Wang Liang, Lin Tao, Yan Changrong, et al. Effects of plastic film residue on evapotranspiration and soil evaporation in cotton field of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(14): 120—128. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李仙岳, 史海滨, 吕烨, 等. 土壤中不同残膜量对滴灌入渗的影响及不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 84—90.
- Li Xianye, Shi Haibin, Lü Ye, et al. Effects of different residual plastic film quantities in soil on drip infiltration and its uncertainty analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 84—90. (in Chinese with English abstract)
- [31] 高青海, 陆晓民. 残留地膜对番茄幼苗形态和生理特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(5): 425—429.
- Gao Qinghai, Lu Xiaomin. Effects of plastic film residue on morphology and physiological characteristics of tomato seedlings[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2011, 19(5): 425—429. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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.
- Zumilaiti · Tuergan, Lin Tao, Wang Liang et al. Effects of plastic film residues on soil nitrogen content, root distribution, and cotton yield during the long-term continuous cropping of cotton[J]. Cotton Science, 2017, 29(4): 374—384. (in Chinese with English abstract)
- [33] 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, (2): 246—250.
- Liu Jianguo, Li Yanbin, Zhang Wei, et al. The distributing of the residue film and influence on cotton growth under continuous cropping in oasis of Xinjiang[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, (2): 246—250. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李青军, 危常州, 雷咏雯, 等. 白色污染对棉花根系生长发育的影响[J]. 新疆农业科学, 2008(5): 769—775.
- Li Qingjun, Wei Changzhou, Lei Yongwen, et al. Influence of white pollution on root growth of cotton[J]. Xin Jiang Agricultural Science, 2008(5): 769—775. (in Chinese with English abstract)
- [35] 赵素荣, 张书荣, 徐霞, 等. 农膜残留污染研究[J]. 农业环境与发

展, 1998, 15(3): 7—10.

Zhao Surong, Zhang Shurong, Xu Xia, et al. Study on the situation of residue pollution of mulching plastic film[J]. *Agricultural Environment and Development*, 1998, 15(3): 7—10. (in Chinese with English abstract)

[36] 何文清, 严昌荣, 刘爽, 等. 典型棉区地膜应用及污染现状的研

究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(8): 1618—1622.

He Wenqing, Yan Changrong, Liu Shuang, et al. The use of plastic mulch film in typical cotton planting regions and the associated environmental pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8): 1618—1622. (in Chinese with English abstract)

Effects of plastic film residue rate on root zone water environment and root distribution of cotton under drip irrigation condition

Lin Tao^{1,3}, Tang Qiuxiang², Hao Weiping¹, Wu Fengquan², Lei Lei²,
Yan Changrong¹, He Wenqing¹, Mei Xurong^{1*}

(1. *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China*; 3. *Institute of Industrial Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China*)

Abstract: Plastic film is a key technology of improving agricultural yield in water-shortage area. Root system is an important organ to obtain water and nutrients, and it affects production efficiency of crops through the interaction of root zone environment. The objective of this study was to explore the effects of plastic film residue rate on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) field water environment and root configuration under drip irrigation condition. A field experiment was established with a single factor experiment, completely randomized block design: i.e. 5 levels of plastic film residue rate 0 (A), 225 (B), 450 (C), 675 (D) and 900 kg/hm² (E) application. The experiment was carried out in Southern Xinjiang in 2014 and 2015. In this area, the groundwater depth was 40-50 m. The soil was silt sand. The cotton variety used in this experiment was Xinluzhong 47. During the experiment, the soil water content was periodically measured. Cotton seed yield was measured. Water use efficiency was calculated based on the evapotranspiration. The cotton root diameter, length, volume and surface area were also determined. The results showed that soil moisture and root distribution were affected by plastic film residue rate. Between 80% and 95% of the root biomass was in the 0 to 30 cm soil depth, which was the area most significantly affected by plastic mulch residue for water distribution and cotton root configuration. The average water content of 0-50 cm soil gradually decreased with the increase of plastic film residue rate, and water dominant flow or water barrier benefit was generated, resulting in different degrees of water deficit appeared in each soil layer during the growth period. The average root biomass, root weight density, root length density, root surface area density, root volume and average root diameter were significantly reduced with increased of plastic film residue rate. The yield and water use efficiency were significantly decreased with the increase in plastic residual film rate. Compared to E, the root biomass of treatment A increased by 119% and 126% in 2014 and 2015, respectively, while the root weight density of A increased by 75.68% and 65.77% in 2014 and 2015, respectively. The root length density of A was 51.9% and 70.8% higher than that of E in 2014 and 2015, respectively while the average root surface area of A was 195% and 238% higher than that of E. The root volume of A was 34.62% and 60.16% higher than that of E in 2014 and 2015, respectively while the root average diameter of A was 81.3% and 84% higher than that of E. The 2-year average of the cotton seed yield and water use efficiency of treatment E was decreased by 18.50% and 13.69% compared with treatment A, respectively. Therefore, reasonable measures should be taken to remove plastic film residue and alleviate the negative influence of residual film pollution, which will be conducive to improving yield and water use efficiency in water limiting region.

Keywords: soil moisture; roots; cotton; plastic film residue content; yield and water use efficiency