

# 膜下滴灌滴水流量对棉花根系分布的影响

王立志<sup>1,2,3</sup>, 何帅<sup>1,2</sup>, 李东伟<sup>1,2</sup>

(1.新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所,新疆 石河子 832000; 2.农业农村部西北绿洲节水农业重点实验室,新疆 石河子 832000; 3.鲁东大学水利环境海洋学部,山东 烟台 264025)

**摘要:**为探明膜下滴灌条件下滴水流量对棉花根系分布的影响,采用田间定位试验,设置 3 组滴水流量,分别为 1.69 L · h<sup>-1</sup> (W169)、3.46 L · h<sup>-1</sup> (W346) 和 6.33 L · h<sup>-1</sup> (W633),分析膜下滴灌土壤水吸力对棉花根系空间分布特征的影响。结果表明:滴水流量越大,膜外裸地和膜内土壤的基质吸力越小,边行棉花根系吸水受到的胁迫程度也越小,W633 处理膜下根区土壤水吸力分布均匀且适合棉花生长,棉花根长密度水平分布不论是初期还是后期均呈双峰抛物线分布;棉花根重密度呈现出相同的变化规律,内、边行棉花根重密度在花期、铃期、吐絮期的差值分别为 42.26、-0.22、97.40 g · m<sup>-3</sup>。当滴水流量越小时,膜外裸地的基质吸力大于膜内土壤的基质吸力,致使边行棉花的根系吸水受到较大胁迫,W169 处理棉花根长密度水平分布由生育初期的双峰抛物线分布变为后期的单峰抛物线分布;内、边行棉花根重密度在花期、铃期、吐絮期的差值分别为 299.70、304.86、369.84 g · m<sup>-3</sup>。表明随着滴水流量的增加,膜下滴灌行间棉花根系生长更加均匀,研究结果可为棉花膜下滴灌系统设计提供技术参考。

**关键词:**滴水流量;土壤湿润区;土壤水吸力;根系分布函数;棉花

**中图分类号:**S275 **文献标志码:**A

## Effects of drip flow rate of mulched drip irrigation on root distribution of cotton

WANG Lizhi<sup>1,2,3</sup>, HE Shuai<sup>1,2</sup>, LI Dongwei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Farmland Irrigation and Soil Fertility, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2. Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Northwest Oasis, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 3. Faculty of Hydraulic Engineering, Environment and Oceanography, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China)

**Abstract:** The purpose of this study to conduct field location experiments with three emitter flows of 1.69 L · h<sup>-1</sup> (W169), 3.46 L · h<sup>-1</sup> (W346) and 6.33 L · h<sup>-1</sup> (W633) to explore the effects of soil water suction on the spatial distribution characteristics of cotton roots under mulched drip irrigation. The results showed that the larger the drip irrigation flow, the smaller the matrix suction of the bare land outside the film and the soil within the film, and the smaller the water stress of lateral cotton roots. The soil water suction in the root area of W633 was uniformly distributed, suitable for cotton growth, and the long density horizontal distribution of cotton roots showed a bimodal parabola in the early and late stages. The root weight density also showed the same change trend, and the difference values of root weight density between the inner cotton roots and lateral cotton roots at the flowering, boll formation and boll opening stages were 42.26 g · m<sup>-3</sup>, -0.22 g · m<sup>-3</sup> and 97.40 g · m<sup>-3</sup>, respectively. When the drip irrigation flow was small, the matrix suction of the bare land under the film was greater than that of the soil under the film, resulting in the increase of water stress of lateral cotton roots. The long density horizontal distribution of cotton roots treated with W169 changed from a bimodal parabola in the early stage of growth to a unimodal parabola in the late stage, and the difference values of root weight density between the inner cotton roots and lateral cotton roots at

the flowering, boll formation and boll opening stages were  $299.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $304.86 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  and  $369.84 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectively. The results indicated that with the increase of drip irrigation flow, the growth of cotton row roots under mulched drip irrigation became more uniform. The results can provide technical references for the design of mulched drip irrigation system.

**Keywords:** emitter flow; soil wetting zone; soil water suction; root distribution function; cotton

滴灌技术是一种投资成本较高的局部灌溉技术,为了减少田间滴灌带使用量,膜下滴灌棉花种植多采用一根滴灌带控制多行棉花的布置模式,导致膜下土壤水分分布和根系分布差异明显,最终影响棉花的均匀性生长和产量<sup>[1-2]</sup>。有研究发现,增大滴水流量可以明显扩大土壤湿润区范围<sup>[3-4]</sup>,有利于远离滴灌带的棉花根系吸水,并提出减少田间滴灌带用量(扩大滴灌带间距)应该与增大滴水流量成为同步措施<sup>[1]</sup>。

关于土壤水分环境对作物根系分布的影响研究,国内外已有诸多成果<sup>[5-7]</sup>。有研究表明,根系的向水性在根系发育中起着主导作用<sup>[8-10]</sup>,而侧根是根系中水分吸收最为活跃的部分<sup>[11]</sup>,具有分辨湿润区域的能力,不仅可引导侧根朝向湿润部分生长<sup>[12]</sup>,甚至可以探测潜在的干旱威胁,进而改变生长方向<sup>[13]</sup>。王允喜等<sup>[1]</sup>在滴灌条件下通过控制滴水流量得到不同形状的土壤湿润区,研究发现宽浅型土壤湿润区中的棉花根系能够分布在植株的下方;而窄深型土壤湿润区中的棉花根系则主要分布在滴灌带的下方,水平方向分布差异明显<sup>[14-15]</sup>,主要是因为根系的发育和形态结构受到水源位置的强烈影响,有限的滴水湿润区难以有效包含各行棉花的根系空间,致使不同行间棉花根系的水分环境以及水分胁迫程度存在较大差异<sup>[16-17]</sup>。当边行棉花受到轻度水分亏缺时,0~30 cm 土层根系活力下降,重度水分亏缺则会显著降低作物的根系活力<sup>[18]</sup>,直接限制养分和水分的吸收,从而对地上部植株的生长及最终产量造成影响<sup>[19-20]</sup>。

上述研究成果证明了土壤湿润区有效水分(或土壤水吸力)分布对作物根系生长和分布的均匀性至关重要。但是如何通过技术手段调控两者之间的关系,以达到作物均匀生长的目标,仍需要诸多研究,特别是涉及到技术设计方面的基本理论还有待进一步探明和完善。本研究采用不同数量的滴灌带组合,获得滴水点上不同的滴水流量,研究和揭示土壤湿润区水分状况对行间棉花根系分布的影响特点,其成果可为棉花膜下滴灌系统设计提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2011 年 4—10 月在石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室进行( $85^{\circ}59'E$ ;  $44^{\circ}19'N$ ; 海拔 415 m)。试验小区面积为  $0.053 \text{ hm}^2$ ,土壤为轻壤土,物理粘粒含量(粒径  $<0.01 \text{ mm}$ )大于 20%,土壤干容重为  $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,平均孔隙率为 35.57%,平均田间持水率为 31.52%(体积含水率),播前土壤初始含盐量为  $1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验地地下水埋深大于 8 m。全生育期降雨总量为 122.4 mm,单次大于 10 mm 的降雨主要集中在 5 月和 8 月,分别占生育期降雨总量的 38.7%和 22.0%,如图 1 所示。

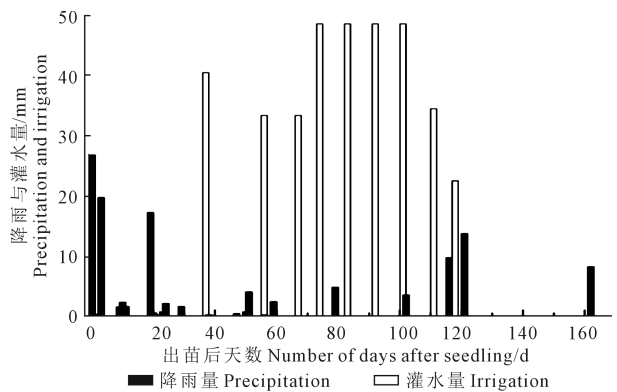


图 1 2011 年降雨量和灌水量

Fig.1 Rainfall and irrigation in 2011

### 1.2 试验设计

试验于 4 月 17 日进行播种,供试棉花品种为‘惠远 710’,行距为 30 cm+60 cm+30 cm 的宽、窄行配置,平均株距为 11 cm(如图 2 所示)。采用新疆天业塑化集团生产的迷宫式薄壁滴灌带进行滴水,滴头间距为 30 cm,最大滴水流量为  $2.8 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ,相应的滴头工作压力约为 101.3 kPa。为获得不同形状的土壤湿润区,试验布置均采用文献[1]的处理方法,将若干条滴灌带合并放置在膜下宽行中心处(如图 2 所示),各条滴灌带上的滴头相互对应,使膜下各滴水点上的滴头数增加,相当于获得大的组合滴水流量。本试验分别布置 1、2 和 3 条滴灌带,各试验处理通过分水阀门调控压力,得到相应的组合滴水流量分别为  $1.69$ 、 $3.46$ 、 $6.33 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ,获得 3

种土壤湿润区类型,分别标注为 W169 处理、W346 处理和 W633 处理,其中,W169 处理产生窄深型土壤湿润区,W633 处理产生宽浅型土壤湿润区,而 W346 处理土壤湿润特点介于两者之间<sup>[10]</sup>。

各处理的灌水量以及施肥方案完全相同,仅是

滴水点上的组合滴水流量不同。棉花生育期灌水定额和次数如图 1 所示,灌水主要集中在棉花的花铃期,每次灌水历时为 5~12 h,棉花生育期内共施尿素 780 kg·hm<sup>-2</sup>、磷酸二氢钾 311.25 kg·hm<sup>-2</sup>,采用随水施肥方式分 9 次施入。

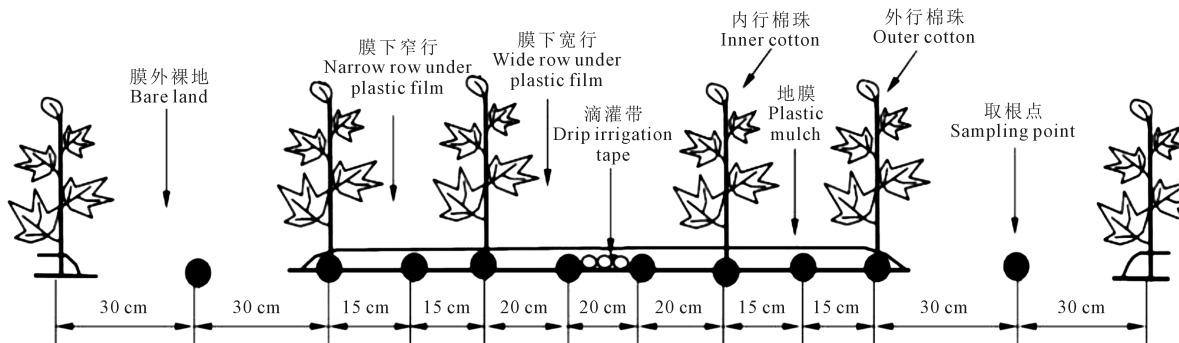


图2 膜下滴灌棉花种植模式

Fig.2 Cotton cultivation mode under mulched drip irrigation

### 1.3 测试项目与方法

定苗以前采用烘干法测土壤含水率,每 10 cm 土层取样一次,测定深度为 60 cm,每隔 6 d 测定一次。定苗后,0~30 cm 深度土壤水分采用烘干法测定,30 cm 以下土壤水分采用美国 CPN 公司生产 503DR.9 中子水分探测仪测定;每个处理埋设 5 根中子铝管,分别布置在膜下宽、窄行中心和膜外裸地中心;每 10 cm 土层读数一次,测定深度为 130 cm,每 3 d 观测一次。

棉花根系采用根钻法取样。分别在棉花苗期(取根深度 28 cm)、蕾期(42 cm)、花铃前期(56 cm)、花铃后期(70 cm)和吐絮期(84 cm)取样。取样点位置如图 2 所示。各处理取样重复 3 次。土层深度方向上每 14 cm(钻孔深度)取样一次。棉花根样在水中浸泡 24 h 后,用孔径 0.5 mm 筛子捞出棉根,在 65℃烘箱里烘干至恒重,再将根系铺在有对照长度的白纸上拍照,用 R2v 和 photoshop 软件得到根长,除以各层土样体积,得到根长密度。

生育期结束后,取原状土,采用 1500F1 压力膜仪测定土壤水分与基质吸力的关系,拟合出土壤水分特性曲线(式 1)。以滴灌带铺设位置为对称轴,将两边各对应测点数据求平均值,分析土壤基质吸力和根系分布特征,采用 SPSS 进行数据分析。

$$S = 635915.76 \times e^{-36.812456 \times \theta_v} \quad (R^2 = 0.99992) \quad (1)$$

式中,  $S$  为土壤基质吸力(kPa);  $\theta_v$  为土壤体积含水率(%)。

## 2 结果与分析

### 2.1 滴水流量对土壤水吸力分布的影响

不同滴水流量产生不同的土壤湿润区,同时也导致膜下土壤水吸力的空间分布差异。结果表明,3 种处理膜外裸地 0 cm 土壤基质吸力都较高(图 3a、b、c),而膜下土壤水吸力则随着滴水流量的增加而减小。随着土层深度的增加,3 种处理的膜外土壤基质吸力仍高于膜内的相应值,而在膜内土壤水吸力的对比中,膜内宽行土壤基质吸力与窄行基质吸力之间的差值均有所减小;当土层深度为 40~60 cm 时,W633 处理的膜外土壤基质吸力较小,而且明显低于 W169 处理的膜内土壤基质吸力。对土壤水吸力水平分布特征进行分析发现,当土层深度为 20、40、60 cm 时,W169 处理膜内宽行中心与膜内窄行中心和膜外裸地中心土壤基质吸力的平均差值分别为 -0.28、-0.74 Mpa, -0.22、-1.25 Mpa 和 -0.04、-1.92 Mpa,不同测点间的土壤水吸力分布差异较大;而 W633 处理膜内宽行中心与膜内窄行中心和膜外裸地中心土壤基质吸力平均差值则分别为 -0.69、-0.25 Mpa, -0.01、0.09 Mpa 和 0.06、0.002 Mpa,不同测点间的土壤基质吸力分布无明显差异,W346 处理的土壤基质吸力分布状况介于 W169 和 W633 处理之间。

### 2.2 滴水流量对根系分布的影响

在各取样点之间,将棉花根系有效深度(能够取到可识别根系的深度)内的根长总密度连成线,

得到根长密度包络线,它反映出棉花不同生育阶段总根长密度的分布变化过程(如图 4 所示)。其中,6月8日、7月1日、7月22日、8月12日和9月2日分别是棉花的苗期、蕾期、花铃前期、花铃后期和吐絮期。随着生育阶段的推进,3种处理的各行棉花根系的生长深度随之增加;除了花铃前期(7月22日)以外,其他时段的棉花根长密度基本均随着生育阶段进程而增大。W169和W633处理在吐絮期(9月2日)的根长密度有所减小。由根长密度包络线分布可知,生育阶段前期(从苗期至花铃前期),3种处理的棉花根长密度峰值均出现在根轴处,内行和边行各出现一个根长密度峰值。说明这一阶段棉花根系分布没有受到较严重的水分胁迫,不过内行的根长密度峰值略大于边行的根长密度峰值,W169、W346、W633处理内行棉花根长密度分

别比边行增加了 183.6、201.8、127.7  $\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

生育阶段后期(从花铃后期到吐絮期),W169处理的棉花边行根系分布出现较严重的胁迫,开始向着内行方向生长,使得内行棉花根长密度峰值增加,膜下内、边行棉花根长密度的平均差值分别为 321.20、387.00、478.89  $\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$ ,行间棉花根系分布差异明显。而 W633 处理内、边行棉花的根长密度仍然保持各自的峰值,膜下内、边行棉花根长密度平均差值分别为 243.03、329.00、338.06  $\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$ ,虽然膜下内行的根长密度值最大,但 W633 处理内、边行棉花根长密度平均差值比 W169 处理同类指标小很多。W633 处理棉花根长密度水平分布不论是生育初期还是后期都呈双峰抛物线分布。说明增加滴水流量可减小行间棉花根系的竞争生长,利于各行棉花生长均匀。

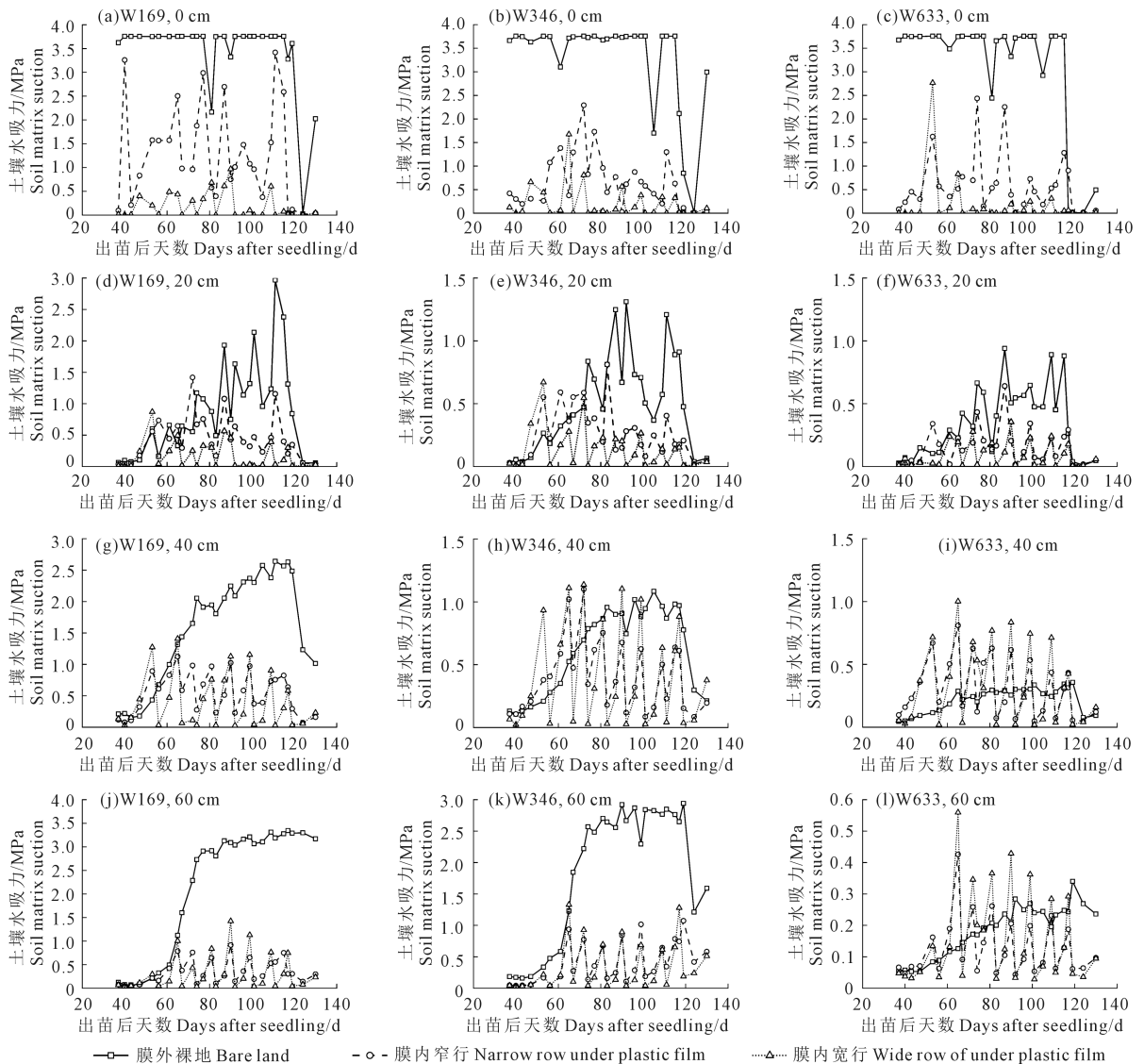


图 3 不同土壤湿润模式下土壤水吸力分布

Fig.3 Distribution of soil water suction under different soil wetting patterns

### 2.3 滴水流量对棉花根重密度水平分布的影响

不同滴头流量条件下根重密度水平分布如图 5 所示。以 7 月 22 日(花期)、8 月 12 日(花铃期)和 9 月 2 日(吐絮期)为例,3 个处理的棉花根重密度水平分布趋势基本一直,呈双峰抛物线型分布,两个峰值均出现在膜下内、边行棉株的根轴处。

受到不同土壤水分条件的影响,膜下内、边行根轴处的棉花根重密度分布变化也呈现不同的变化趋势。与膜下边行相比,W169 处理的内行棉花根重密度在花期、铃期、吐絮期分别增加了 299.70、

304.86、369.84  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。W346 处理的内行棉花根重密度在花期、铃期、吐絮期与边行根重密度的差值分别为 -109.38、262.43、28.40  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。而 W633 处理的内行棉花根重密度在花期、铃期、吐絮期与边行根重密度的差值则分别为 42.26、-0.22、97.40  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。W633 处理在花期和铃期形成宽浅型湿润区,膜下土壤水分含量都最高,促使根重密度基本没有明显差异,甚至出现边行根重密度大于内行根重密度的情况。进入吐絮期后,由于灌水次数减少,土壤水分胁迫明显变大,边行棉株根重密度开始衰减。

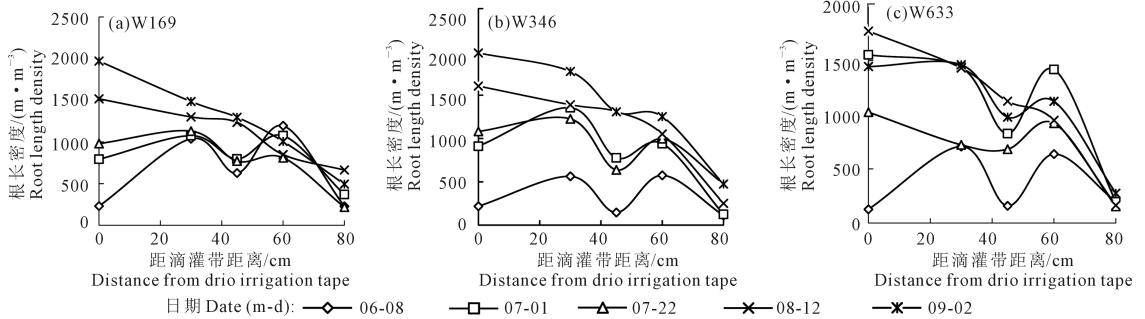


图 4 不同土壤湿润模式下棉花根长密度包络线

Fig.4 Envelope of root length density under different soil wetting patterns

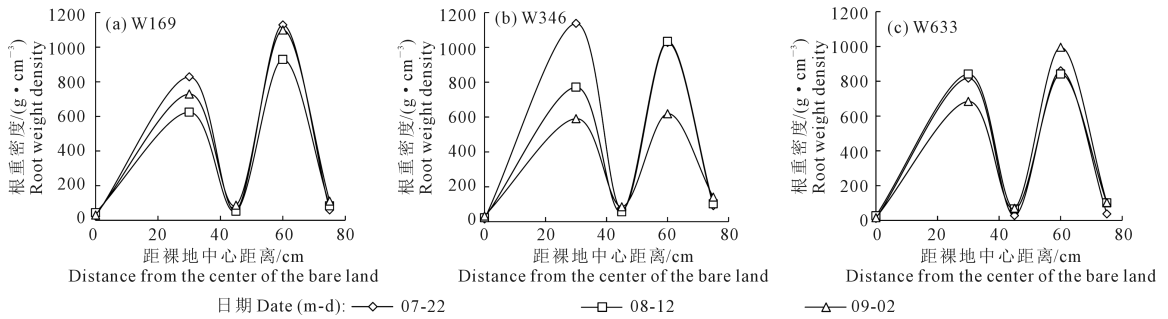


图 5 不同滴头流量条件下根重密度水平分布

Fig.5 Horizontal distribution of cotton root weight density under different drip emitter flow rate

### 2.4 滴水流量对棉花根重密度垂直分布的影响

不同滴水流量处理下根重密度垂直分布趋势基本一致,如图 6 所示,均呈负指数函数分布(表 1),随着土层深度的增加,根重密度逐渐减小,所有处理的根重密度最大值出现在 0~10 cm 土层内。W169 和 W346 处理棉花根重密度的峰值无明显差异,随着生育进程的增加,根重密度在吐絮期出现下降趋势,主要因为吐絮期灌水次数减少,根系受土壤水分胁迫的影响开始衰减;而 W633 处理的根重密度最大,随着生育进程的进行,根重密度最大值也随之增加。

### 2.5 滴水流量对根系分布函数的影响

根据文献[21]的研究结果,土壤水分空间分布较均匀的棉株根系构型基本呈现“伞状”对称分布。

表 1 不同滴水流量条件下根重密度垂直分布回归分析

Table 1 Regression analysis of the vertical distribution of cotton root weight density under different drip emitter flow rate

处理 Treatment	测定日期 Test date	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient
W169	07-22	$y = 39.682e^{-0.0014x}$	$R^2 = 0.9127$
	08-12	$y = 47.803e^{-0.0016x}$	$R^2 = 0.8643$
	09-02	$y = 59.898e^{-0.0019x}$	$R^2 = 0.8732$
W346	07-22	$y = 40.346e^{-0.0014x}$	$R^2 = 0.9217$
	08-12	$y = 50.024e^{-0.0016x}$	$R^2 = 0.9088$
	09-02	$y = 66.063e^{-0.0022x}$	$R^2 = 0.9272$
W633	07-22	$y = 38.857e^{-0.0014x}$	$R^2 = 0.9051$
	08-12	$y = 46.968e^{-0.0014x}$	$R^2 = 0.8774$
	09-02	$y = 53.433e^{-0.0014x}$	$R^2 = 0.8364$

注:y:根重密度( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),x:土层深度(cm)。

Note:y: root weight density ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), x: soil depth (cm).

因此,本文假定单株棉花根系构型的角度保持不变,根据各处理中棉花内、边行根长密度随生育阶段的变化特征(图 4)建立根长密度分布函数(图 7),探求土壤湿润区对田间棉花根系分布的影响,以期在滴灌技术设计时,能够根据棉花根系的分布特点合理设计土壤湿润区,使内、外行棉花均匀生长。分别将距离滴灌带 0 cm(膜内宽行中心)、30 cm(内行棉花)、45 cm(膜内窄行中心)、60 cm(边行棉花)和 90 cm(膜外裸地中心)处总根长密度记为  $R_0$ 、 $R_{30}$ 、 $R_{45}$ 、 $R_{60}$  和  $R_{90}$ 。由于相邻棉行的根系存在竞争生长现象,宽、窄行存在根系重叠。因此,单个内行棉株在距离滴灌带 0 cm 处的根长密度  $R_{00} = R_0/2$ ;距离滴灌带 45 cm 处同样存在内、边行棉花根长密度的重叠部分,按内、边行棉花的根长密度分

别与内、外行棉花根长密度之和的比值对距离滴灌带 45 cm 处根长密度进行分配,即内行棉花距离滴灌带 45 cm 处的根长密度  $R_{45内} = [R_{30}:(R_{30} + R_{60})] \times R_{45}$ ,外行棉株在距离滴灌带 45 cm 处的根长密度  $R_{45外} = R_{45} - R_{45内}$ 。得到由  $R_{00}$ 、 $R_{30}$ 、 $R_{45内}$  和  $R_{45外}$ 、 $R_{60}$ 、 $R_{90}$  形成的顶角角度  $\theta_{内}$  和  $\theta_{外}$ ,其中,  $\theta_{内} = \theta_1 + \theta_2$ ,  $\theta_{外} = \theta_3 + \theta_4$ 。顶点高度  $R_{30}$  为内行棉花根长密度;  $R_{60}$  为边行棉花根长密度。对各处理棉花根长密度水平分布函数的参数进行计算,如表 2 所示,可认为所有处理的不同生育阶段内,  $\theta_{内} = \theta_{外}$ ,基于此结果,得到棉花根长密度水平分布函数:

$$\text{内行棉株: } R_1 = \begin{cases} K_1(X - 30) + R_{内} & X < 30 \\ K_2(X - 30) + R_{内} & X > 30 \end{cases}$$

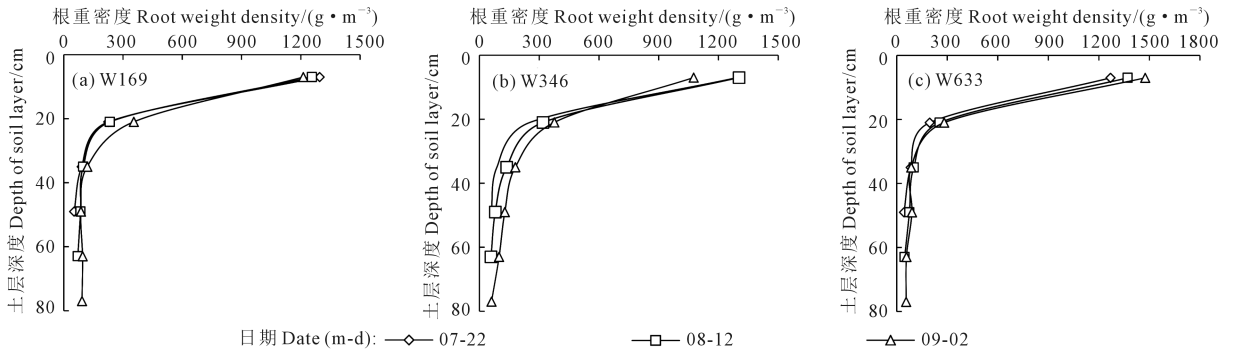


图 6 不同滴头流量条件下根重密度垂直分布

Fig.6 Vertical distribution of cotton root weight density under different drip emitter flow rate

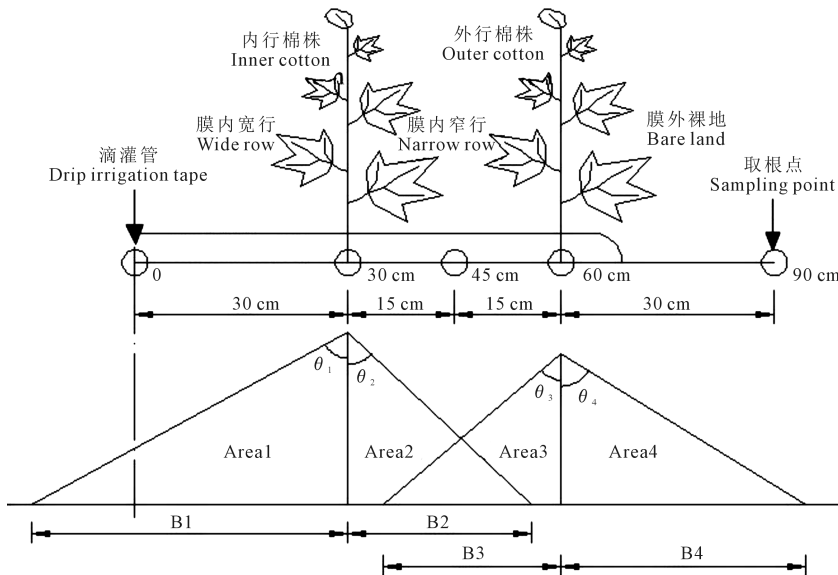


图 7 棉花根长密度数据分析示意图

Fig.7 Schematic diagram of cotton root length density data analysis

表2 根长密度行间分布函数参数

Table 2 Parameters of root length density inter row distribution function

处理 Treatment	日期 Date	$R_{内}$ $R_{Inner}$ /( $m \cdot m^{-3}$ )	$R_{外}$ $R_{Outer}$ /( $m \cdot m^{-3}$ )	$\theta_1/(^\circ)$	$\theta_2/(^\circ)$	$\theta_3/(^\circ)$	$\theta_4/(^\circ)$	$\theta_{内}$ $\theta_{Inner}/(^\circ)$	$\theta_{外}$ $\theta_{Outer}/(^\circ)$
W169	06-08	1038.8	1194.5	39.1	26.6	23.6	37.8	65.7	61.4
	07-01	1598.3	1075.4	37.9	18.5	26.4	42.9	56.4	69.3
	07-22	1130.2	809.3	49.5	28.8	37.6	51.7	78.3	89.3
	08-12	1300.8	1066.5	54.2	31.1	36.3	61.0	85.3	97.3
	09-02	1485.9	1007.0	56.3	27.7	37.8	55.6	84.0	93.4
W346	06-08	562.9	574.8	58.8	37.4	36.8	58.2	96.2	95.0
	07-01	1355.9	940.5	39.8	22.7	31.1	42.5	62.5	73.6
	07-22	1226.8	997.3	51.1	23.2	27.8	55.2	74.3	83.0
	08-12	1389.6	1052.4	51.9	30.2	37.5	43.1	82.1	80.6
	09-02	1774.0	1252.8	43.9	20.4	27.8	43.9	64.3	71.7
W633	06-08	706.8	785.4	54.6	30.7	28.1	51.9	85.3	80.0
	07-01	1752.5	1418.5	37.6	16.1	19.7	31.5	53.7	51.2
	07-22	1165.1	922.1	49.0	25.6	31.1	44.3	74.6	75.4
	08-12	1330.2	1001.5	59.4	26.2	33.2	41.8	85.6	75.0
	09-02	1462.5	1124.4	45.4	22.4	28.2	41.5	67.8	69.7

$$\text{外行棉株: } R_2 = \begin{cases} K_3(X - 60) + R_{外} & X < 60 \\ K_4(X - 60) + R_{外} & X > 60 \end{cases}$$

式中,  $K_1 = \text{ctg}(\theta_1)$ ,  $K_2 = -\text{ctg}(\theta_2)$ ,  $K_3 = \text{ctg}(\theta_3)$ ,  $K_4 = -\text{ctg}(\theta_4)$ ,  $R_1$ 、 $R_2$ 分别为内行、边行棉株根长密度水平方向最大值( $m \cdot m^{-3}$ );  $R_{内}$ 、 $R_{外}$ 分别为内行、边行棉株根长密度( $m \cdot m^{-3}$ );  $\theta_{内}$ 、 $\theta_{外}$ 分别为内行、边行棉株根系顶角角度( $^\circ$ )。

### 3 讨论

不同灌溉模式导致土壤环境中水分分布存在差异,土壤湿润区有效水分分布的均匀性直接影响作物根系生长和分布。因此,本文对膜下滴灌条件下土壤基质吸力分布状况对行间棉花根系分布的影响特点进行研究。研究表明,在膜下滴灌条件下,小的滴水流量( $1.69 L \cdot h^{-1}$ )形成窄深型土壤湿润区;大的滴水流量( $6.33 L \cdot h^{-1}$ )形成宽浅型土壤湿润区,此结论与前人研究成果一致<sup>[1,4,6]</sup>。研究发现,宽浅型湿润区不仅仅在土壤水吸力的均匀性分布方面较好,而且土壤水吸力还普遍小于窄深型土壤湿润区的同类指标,说明膜下内、边行棉花的根区水土环境无差异;此外,沿着土层深度方向对土壤基质吸力的分布进行分析可以发现,当滴水流量较大时,土壤湿润区呈现“梨”形分布,即土壤表层以下的湿润区逐步变宽,而且含水率较高。故W633处理膜外裸地40 cm土层以下的土壤基质吸力出现小于其膜内土壤基质吸力的情况,有利于棉花根系向膜外土壤中生长,减小各棉株之间的根系吸水竞争性。当滴水流量较小时,土壤湿润区被限定在膜内土壤范围内,膜外土壤的基质吸力始终很

大,将对边行棉花根系吸水产生水分胁迫。另外,3种处理膜内40 cm土层处的基质吸力升高,这是由于该层是棉花根系主要吸水层,耗水速度较快。

前人对水分状况与根系分布之间的关系进行了大量研究<sup>[22-24]</sup>,但以往研究大多认为作物根长密度分布函数只是土壤深度的函数,与水平空间无关,并阐明了根系生长的向水性和垂直分布的负指数函数规律。但是这样的根系分布函数只适合应用于类似漫灌的整体灌溉条件,而针对膜下滴灌的局部灌溉特点,窄深型土壤湿润区的土壤水分和作物根系在行间上分布都是不均匀的<sup>[1]</sup>,会导致生长在土壤湿润区边缘的作物受到水分胁迫而减产<sup>[2]</sup>。孙浩等<sup>[4,25]</sup>通过桶栽试验表明,小滴头流量下棉花根系分布范围窄而深,根系结构紧凑;而大滴头流量下棉花根系分布范围宽而浅,根系结构稀松,并且随着滴头流量由小变大,土层内根长集中点向浅层上移;水平方向上,棉花根长密度由根轴向两边逐渐减小,而且根轴处的根长占总根长比率随滴头流量的增大而变小;王秀康等<sup>[26]</sup>指出滴头流量越大,玉米的最长根越短,根系呈宽浅式分布。因此,本研究对棉花不同生育阶段的根长总密度包络线进行分析,目的是评价土壤湿润区对行间棉花根系分布均匀性的影响。研究表明窄深型土壤湿润区(W169处理)棉花根长密度水平分布由生育初期的双峰抛物线分布变为后期的单峰抛物线分布,而到了生育中后期阶段,窄深型土壤湿润区(W169处理)的边行棉花受到持续水分胁迫的影响,最终形成只有内行棉株处一个峰值的根长密度水平分布,此结果与王允喜等<sup>[14]</sup>所得结论类似,区别只是在于

获得土壤湿润区的灌水器(滴头或滴灌带)布置方式不同;而宽浅型土壤湿润区的膜下根区土壤水吸力在全生育期分布均匀,所以棉花根长密度水平分布不论是初期还是后期都是双峰抛物线分布,并提出了不同生育阶段基于土壤湿润区的棉花根长密度水平分布函数。有别于虎胆<sup>[27]</sup>和 Tsutsumi<sup>[8,28]</sup>采用的根系密度分布模型,本研究中的根长密度水平分布函数考虑了各行间的水分分布差异,可充分说明滴水流量对棉花根系空间分布的影响。

## 4 结 论

1)膜下滴灌滴水流量越大,膜外裸地和膜内土壤的基质吸力越小,边行棉花的根系吸水胁迫程度也越小;而滴水流量越小,膜外裸地的基质吸力大于膜内土壤的基质吸力,使边行棉花的根系吸水受到水分胁迫的影响。

2)膜下滴灌滴水流量增大利于行间棉花根系均匀生长,W169 处理棉花根长密度水平分布由生育初期的双峰抛物线分布变为后期的单峰抛物线分布,而 W633 处理膜下根区土壤水吸力分布均匀,棉花根长密度水平分布不论是初期还是后期均呈双峰抛物线分布。

3)不同滴水流量条件下,膜下滴灌棉花根重密度分布差异明显,与边行棉花根重密度相比,W169 处理内行棉花根重密度在花期、铃期、吐絮期分别增加了 299.70、304.86、369.84  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,而 W633 处理的内、边行棉花根重密度在花期、铃期、吐絮期的差值分别为 42.26、-0.22、97.40  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。说明随着滴水流量的增加,膜下滴灌行间棉花根系生长更加均匀。

## 参 考 文 献:

[1] 王允喜,李明思,蓝明菊.膜下滴灌土壤湿润区对田间棉花根系分布及植株生长的影响[J].农业工程学报,2011,27(8):31-38.  
WANG Y X, LI M S, LAN M J. Effect of soil wetting pattern on cotton-root distribution and plant growth under plastic mulched drip irrigation in field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(8): 31-38.

[2] COLOMBO A, OR D. Plant water accessibility function: a design and management tool for trickle irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2006, 82: 45-62.

[3] Ould Mohamed El-Hafedh A V, Daghari H, Maalej M. Analysis of several discharges rate-spacing-duration combination in drip irrigation system[J]. Agricultural Water Management, 2001, 52(1): 33-52.

[4] 孙浩,李明思,丁浩,等.滴头流量对棉花根系分布影响的试验[J].农业工程学报,2009,25(11):13-18.  
SUN H, LI M S, DING H, et al. Experiments on effect of dripper discharge on cotton-root distribution[J]. Transactions of the Chinese So-

ciety of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 13-18.

[5] NING S, SHI J, ZUO Q, et al. Generalization of the root length density distribution of cotton under film mulched drip irrigation[J]. Field Crops Research, 2015, 177: 125-136.

[6] ZUO Q, ZHANG R D, SHI J C. Characterization of the root length density distribution of wheat using a generalized function [M]// DENNIS T, LAJ R. AHUJA. Soil Health and Sustainable Agriculture in Brazil. Hoboken: Wiley, 2013.

[7] KALOGIROS D I, ADU M O, WHITE P J, et al. Analysis of root growth from a phenotyping data set using a density-based model[J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(4): 1045-1058.

[8] TSUTSUMI D, KOSUGI K, MIZUYAMA T. Effect of hydrotropism on root system development in soybean (*Glycinemax*): growth experiments and a model simulation[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2003, 21: 441-458.

[9] IWATA S, MIYAZAWA Y, TAKAHASHI H. MIZU-KUSSEI plays an essential role in the hydrotropism of lateral roots in *Arabidopsis thaliana* [J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 75: 167-172.

[10] MORIWAKI T, MIYAZAWA Y, KOBAYASHI A, et al. Molecular mechanisms of hydrotropism in seedling Roots of *Arabidopsis thaliana* (Brassicaceae) [J]. American Journal of Botany, 2013, 100(1): 25-34.

[11] REWALD B, EPHRATH J E, RACHMILEVITCH S. A root is a root is a root? Water uptake rates of citrus root orders[J]. Plant, Cell & Environment, 2011, 34(1): 33-42.

[12] BAO Y, AGGARWAL P, ROBBINS 2ND N E, et al. Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(25): 9319-9324.

[13] HAWES M C, GUNAWARDENA U, MIYASAKA S, et al. The role of root border cells in plant defense[J]. Trends Plant Science, 2000, 5(3): 128-133.

[14] 王允喜,李明思,魏闯,等.毛管间距对膜下滴灌棉花根系及植株生长的影响[J].灌溉排水学报,2010,29(1):68-73.  
WANG Y X, LI M S, WEI C, et al. Effect of drip-lines space on cotton root and plant growing under plastic mulched drip irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 68-73.

[15] 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):96-100,200.  
FANG Y X, ZHAO C Y, CHUAN Z Q, et al. Root distribution characteristics of cotton in different drip irrigation amounts irrigation under mulched[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(5): 96-100, 200.

[16] 李明思,康绍忠,孙海燕.点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J].农业工程学报,2006,22(4):32-35.  
LI M S, KANG S Z, SUN H Y. Relationships between dripper discharge and soil wetting pattern for drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(4): 32-35.

[17] 雷廷武.滴灌湿润比的解析设计[J].水利学报,1994,(1):1-9,37.  
LEI T W. Analytical design of drip irrigation moisture ratio[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994,(1): 1-9, 37.



- [18] PETTOGREW W T. Physiological consequences of moisture deficit stress in cotton[J]. *Crop Science*, 2004, 44: 1265-1272.
- [19] SEBASTIAN J, YEE M C, GOUDINHO VIANA W G, et al. Grasses suppress shoot-borne roots to conserve water during drought[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(31): 8861-8866.
- [20] PAEZ-GARCIA A, MOTES C M, SCHEIBLE W R, et al. Root traits and phenotyping strategies for plant improvement[J]. *Plants*, 2015, 4: 334-355.
- [21] 高超. 土壤局部湿润条件下棉花群株间距对根系构型的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2016.  
GAO C. Study on the influence of spacing between cotton plants on root system configuration under local soil moisture conditions[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016.
- [22] 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.
- [23] 陈四龙, 裴冬, 王振华, 等. 华北平原膜下滴灌棉花水分利用效率及产量对供水方式响应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(6): 26-31.  
CHEN S L, PEI D, WANG Z H, et al. Influence of irrigation modes on water consumption and yield of cotton with drip irrigation under plastic mulch in North China Plain[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(6): 26-31.
- [24] LI M. Root architecture and water uptake for cotton under furrow and mulched trickle irrigation [C]//Proceedings of international conference on water-saving agriculture and sustainable use of water and land resources. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003: 484-490.
- [25] 孙浩, 李明思, 李金山, 等. 滴头流量对桶栽棉花根系分布与耗水的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(10): 906-913.  
SUN H, LI M S, LI J S, et al. Influence of dripper discharge on cotton root distribution and water consumption under pot cultivation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(10): 906-913.
- [26] 王秀康, 李援农, 邢英英, 等. 滴头流量对夏玉米根系的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2010, (11): 66-68.  
WANG X K, LI Y N, XING Y Y, et al. Effect of dripper discharge on summer maize-root distribution[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010, (11): 66-68.
- [27] 虎胆·吐玛尔白, 王一民, 牟洪臣, 等. 膜下滴灌棉花根系吸水模型研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(1): 66-70.  
TU MA ER BAI H D, WANG Y M, MU H C, et al. Root water uptake model in drip irrigation under mulched film[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 66-70.
- [28] TSUTSUMI D, KOSUGI K, MIZUYAMA T. Root-system development and water-extraction model considering hydrotropism[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67: 387-401.

(上接第106页)

- [27] CORMIER F, FOULKES J, HIREL B, et al. Breeding for increased nitrogen-use efficiency: a review for wheat (*T. aestivum* L.) [J]. *Plant Breeding*, 2016, 135(3): 255-278.
- [28] CHEN Z W, LI L L, HALFORD N G, et al. Advances in barley breeding for improving nitrogen use efficiency[J]. *Agronomy*, 2022, 12(7): 1682.
- [29] 石瑛, 邓斌, 魏峭嵘, 等. 两个马铃薯品种在氮调控下生长及氮素利用特征研究[J]. *东北农业大学学报*, 2023, 54(1): 1-11.  
SHI Y, DENG B, WEI Q R, et al. Study on growth and nitrogen utilization characteristics of two potato varieties under nitrogen regulation [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2023, 54(1): 1-11.
- [30] BOHMAN B J, ROSEN C J, MULLA D J. Relating nitrogen use efficiency to nitrogen nutrition index for evaluation of agronomic and environmental outcomes in potato [J]. *Field Crops Research*, 2021, 262: 108041.
- [31] WANG N, REIDSMA P, ITTERSUM M K. Scope and strategies for sustainable intensification of potato production in Northern China[J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(5): 3591-3604.
- [32] 任冬雪, 张立峰, 刘玉华, 等. 华北寒旱区不同品种马铃薯的氮效率评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(6): 13-21.  
REN D X, ZHANG L F, LIU Y H, et al. Evaluation of nitrogen efficiency on potatoes with different genotypes in cold and arid regions of Northern China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(6): 13-21.
- [33] 程红, 郑顺林, 马海艳, 等. 马铃薯氮高效基因型品种筛选及指标评价[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(10): 2292-2298.  
CHENG H, ZHENG S L, MA H Y, et al. Screening and evaluation of nitrogen use efficiency index in potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(10): 2292-2298.
- [34] 王克秀, 汪翠存, 唐铭霞, 等. 氮素水平对雾培马铃薯氮磷钾吸收、积累和分配规律的影响[J]. *西南农业学报*, 2020, 33(12): 2852-2861.  
WANG K X, WANG C C, TANG M X, et al. Effects of nitrogen levels on N, P and K uptake, accumulation and distribution of potato by aeroponics [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(12): 2852-2861.
- [35] 尹娟, 张海军, 王顺, 等. 不同水氮处理对马铃薯光合特性和产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2020, (6): 8-13.  
YIN J, ZHANG H J, WANG S, et al. Effects of different water and nitrogen treatments on photosynthetic characteristics and yield of potato [J]. *Water Saving Irrigation*, 2020, (6): 8-13.