

网络出版时间:2018-09-27 09:46 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.04.009
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180927.0945.018.html

施肥深度对不同水分条件下冬小麦根系特征及提水作用的影响

沈玉芳,李世清

(1 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2 中国科学院 水利部 水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】研究施肥深度对不同水分条件下 2 个不同品种冬小麦根系提水作用的影响,为制定旱地作物水分管理策略提供科学依据。【方法】以抗旱型长武 134(CW134,R)和水分敏感型西农 979(XN979,S)冬小麦为试验材料,采用自行设计的上下分层隔离式土培箱装置(分为上室(0~20 cm)和下室(20~60 cm)),设 2 个水分处理,分别为上层中度水分胁迫(M,上室土壤水分含量为田间持水量的 55%~60%,下室为 70%~75%)和上层重度水分胁迫(D,上室为田间持水量的 35%~40%,下室为 70%~75%);对 CW134 设不施肥(N)、上层施肥(U)、下层施肥(L)3 个施肥处理,对 XN979 仅设上层施肥(U)1 个施肥处理,通过时域反射计(TDR)对不同处理的土壤含水量进行控制和观测。研究不同水分条件下,施肥深度对不同品种冬小麦根系提水作用、土壤体积含水量、耗水量、籽粒产量、水分利用效率的影响。【结果】品种和施肥深度显著影响不同水分条件下冬小麦根系长度(RL)、根系表面积(RSA)和根系体积(RV)($P < 0.05$)。M 和 D 条件下,上层施肥处理冬小麦 CW134 的 RL、RSA 和 RV 分别较 XN979 显著增加。2 个冬小麦整个生育期提水量变化均呈单峰状,除不施肥处理根系提水量在灌浆期达到最大外,其余施肥处理提水量均在扬花期达到最大。M 条件下上层处理冬小麦 CW134 的土壤体积含水量在 23:00 左右开始上升,至第 2 日凌晨 01:00—05:00 均保持高水平,随后又开始迅速下降;而 XN979 土壤体积含水量只在 01:00—03:00 出现峰值,随后也迅速下降。D 条件下上层施肥处理 CW134 和 XN979 土壤体积含水量变化与 M 条件下类似,只是 CW134 的土壤体积含水量在 03:00—05:00 出现峰值。冬小麦全生育期根系提水总量及作物水分利用效率受作物品种、水分处理和施肥深度共同影响,表现出一定的显著性差异。与 M 相比,D 条件下 CW134 和 XN979 的全生育期提水总量均降低,但相同水肥条件下 CW134 生育期根系提水总量、水分利用效率高于 XN979。【结论】在旱作农业中可利用抗旱型冬小麦品种较发达的根系和较高的生育期提水作用来充分发掘深层土壤水分;施肥深度也可以调节作物根系分布特征及提水作用,能进一步促进作物对有限水分的高效利用。

【关键词】 根系提水;水分利用效率;水势梯度;施肥深度;作物品种

【中图分类号】 S143.7⁺2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2019)04-0065-09

Effect of fertilization depth on root characteristics and hydraulic lift of winter wheat under different water treatments

SHEN Yufang, LI Shiqing

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

【收稿日期】 2018-01-17

【基金项目】 国家自然科学基金项目(41671307,50809068);国家重点研发计划项目(2017YFD0201807);陕西省自然科学基金项目(2017JM3011)

【作者简介】 沈玉芳(1975—),女,江苏建湖人,副研究员,博士,博士生导师,主要从事旱作农业水分养分运移与利用研究。
E-mail:shenyufang@nwsuaf.edu.cn

【通信作者】 李世清(1963—),男,甘肃秦安人,教授,博士,博士生导师,主要从事植物营养与旱地农业研究。
E-mail:sqlq@ms.iswc.ac.cn

Abstract:【Objective】 This study investigated the effect of fertilization depths on root morphological characteristics and hydraulic lift of two wheat varieties under different water treatments to provide basis for design water management strategies for dryland crops. **【Method】** Three fertilization depths of upper layer (U), lower layer (L) and no fertilizer (N) were set with two crop varieties of Changwu 134 (CW134) and Xinong 979 (XN979). Root systems were grown in two soil compartments including a drier upper layer and a wetter lower layer, and moderate water stress (M) and severe water stress (D) were set in the upper layer. The soil volumetric water content was measured in the upper soil layer by a time domain reflectometer (TDR). **【Result】** Varieties and fertilization depths had significant effects on root length (RL), root surface area (RSA) and root volume (RV) under different water conditions ($P < 0.05$). Under M and D treatments, CW134 had significantly higher RL, RSA and RL than XN979. The soil volumetric water content was maximal during the blooming stage under U and L treatments, but it peaked during the grain-filling stage under N treatment. Under M treatment, for CW134, water content in the upper layer increased from 23:00, reached and kept the peak from 01:00 to 05:00 the next day, and declined rapidly. For XN979, it peaked only from 01:00 to 03:00 the next day before decrease. Under D treatment, water content in the upper layer had the same trend for CW134 and XN979, except it peaked only from 03:00 to 05:00 the next day for CW134. The total amount of hydraulic lift and water use efficiency varied significantly for different varieties, water potential gradients and fertilization depths. The hydraulically lift of CW134 and XN979 under D treatment was lower than under M treatment. But under U treatment, CW134 had higher total amount of hydraulic lift and water use efficiency than XN979 under M and D treatments. **【Conclusion】** Drought-resistant varieties with more developed roots and higher hydraulic lift are better for fully excavating deep soil moisture in rained agriculture. The regulation of fertilization depth would further improve water use efficiency.

Key words: root hydraulic lift; water use efficiency; water potential gradients; fertilization depth; crop varieties

水资源不足是制约和影响干旱半干旱地区植物生长和植被分布的主要环境因素。为了更好地适应干旱环境,植物发展了不同的水分利用策略。根系是植物吸收水分的主要部位,在不断变化的环境下,对维持植株的水分状况起到关键作用^[1]。在正常生理状况下,根-土界面的水分传输是从土壤流向根系;但在某些特定的情况下也会发生从根系流向土壤的水分再分配。根系水分再分配作为植物抵御干旱的一种重要生理机制^[2],对植物碳同化过程、土壤微生物过程、土壤养分的吸收以及保持群落多样性和稳定等都有重要的作用^[3]。在干旱半干旱地区,由于受根系分布特征及蒸发影响,土壤剖面上层大部分时间处于水分胁迫状态。夜晚低蒸腾条件下,根系将从相对湿润的深层土壤吸收水分,然后以被动方式输送到相对干旱的上层土壤暂时贮存,以满足白天蒸腾需要,从而减轻因气孔关闭导致同化能力下降,水分的这种传输一般称为根系提水作用^[4]。

不同研究者采用不同的测定方法,发现根系提水作用具有普遍性。目前已在不同生态系统发现超

过 100 种植物存在根系提水过程,主要集中在乔木和灌木方面^[5-7],也有关于草本植物和农作物提水作用的报道^[8-10]。在实验室或者温室条件下,大部分研究者采用分根法,即将土壤分为水分状况不同的两个室,部分根系在相对湿润室,部分根系在相对干旱室,研究不同植物根系提水过程。Hirota 等^[11]采用分根法,将马卡姆树栽培在直径为 0.5 m、高为 0.2 m 的容器中,让其主根通过容器底部小孔进入湿润土壤,在马卡姆树两侧栽培浅根植物水稻。结果发现,马卡姆树根系具有从湿润土壤吸收水分、向干旱土层释放水分的根系提水作用,使浅根植物保持较高的蒸腾、气孔导度及生物量。Hultine 等^[12]采用茎流计测定根系茎流发现,根区不同土层水势差下大核桃树根系在水分重新分配方面具有重要作用,是补充干土层水分的主要通道。同位素测定也被用来严格证明植物根系提水作用。Brooks 等^[13]利用氙标记法,通过微区试验发现,根系可在垂直和水平方向上传输并释放水分,供相邻植物吸收。Durand 等^[14]通过测定 $\delta^{18}\text{O}$,发现牧草植物黑麦草

和高羊茅具有明显的根系提水作用。随着研究方法和涉及植物种类的增加,研究者发现浅根系和深根系植物均具有显著的提水作用^[15]。然而,因测定方法等差异,不同植物根系提水量大小较难比较。

土壤水势梯度是决定根系提升作用的重要因子,但究竟土壤基质势低于多少,植物根系才会有提水作用,目前尚无一致结论。根系提水作用的大小与植物蒸腾、根系分布等也密切相关。Moroke等^[16]研究发现,根系密度和分布特征显著影响植物对土壤水分的耗竭以及对深层水分的利用。作物根系的生长发育随生育期变化,同时根系形态建成和空间分布受不同土层水分养分供应的调控。过去对根系提水与养分关系的研究,主要集中在根系提水对耕层养分有效性的影响方面,而养分供应对根系提水作用有何影响,同种作物不同品种全生育期的提水作用是否存在差别等,定量的研究报道较少。本研究针对以上问题,通过设计较有新意的试验方法,研究不同水势差下黄土区旱地不同品种冬小麦不同生育期根系特征、根系提水作用及其大小,分析

不同土层深度养分供应对根系提水作用及水分利用效率的影响,以期为进一步理解黄土区旱地主要栽培作物冬小麦,利用土壤剖面深层水分而维持上层根系生存和活性策略提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行。采用自制的上下分层隔离式土培装置(图1)。土培箱规格为60 cm×20 cm×30 cm,分为上室和下室,上室(0~20 cm)包括A室和B室两部分,A室和B室大小相同,规格均为20 cm×20 cm×10 cm;下室(20~60 cm;C室)规格为40 cm×20 cm×30 cm。为了保证根系顺利进入下层土壤,同时切断上下两层之间的土壤水分通过毛细管传输,将A、B、C室间用尼龙网及2 cm厚的砂砾过渡层分开。C室水分通过气态扩散方式进入A室的误差可以用B室予以校正。

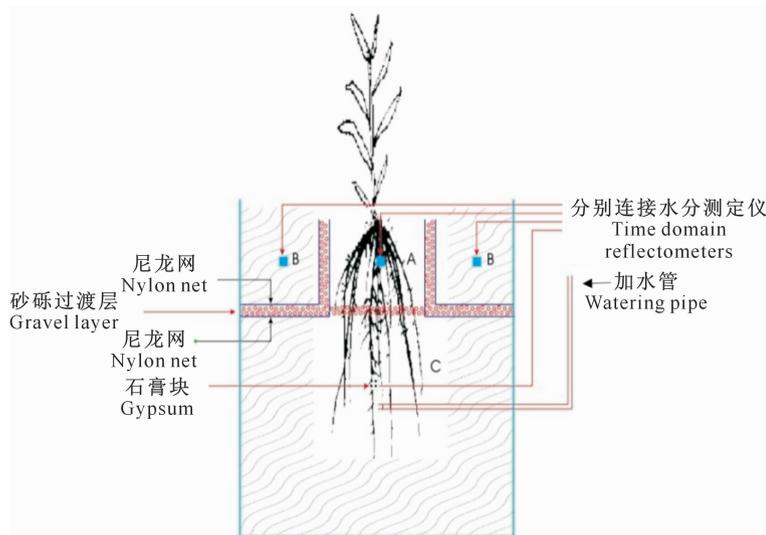


图1 隔离式土培装置

Fig. 1 Isolated soil culture box

供试冬小麦(*Triticum aestivum* L.)品种分别为抗旱型长武134(CW134,R)和水分敏感型西农979(XN979,S)。设2个水分处理,上层中度水分胁迫(M,上室土壤水分含量为田间持水量的55%~60%,下室为70%~75%);上层重度水分胁迫(D,上室土壤水分含量为田间持水量的35%~40%,下室为70%~75%)。对CW134,设3个施肥处理,不施肥(N)、上层施肥(U,肥料施于上室)、下层施肥(L,肥料施于下室);对XN979,设上层施肥(U,肥料施于上室);进行完全组合设计,共计8个处理组

合,分别为RMU、RDU、RML、RDL、RMN、RDN、SMU、SDU,6次重复,共48箱,随机排列。各水分条件下每柱施肥量根据土层的质量确定,具体施肥量为氮(N)0.2 g/kg,磷(P_2O_5)0.15 g/kg。装土柱前将氮肥和磷肥与所施层次土壤均匀混合。

小麦进入返青期后进行控水处理。试验期间,A室、B室和C室水分含量分别通过时域反射仪(TDR)监测进行调控,控制A室和B室的土壤含水量相同,为相对干旱层;C室土壤含水量较高,为相对湿润层。供试土壤为肥熟土垫旱耕人为土,0~20

和 20~60 cm 分层采集,经风干过筛后备用。供试 0~20 cm 土层土壤养分含量为:有机质 13.58 g/kg,全氮 0.86 g/kg,有效磷 7.21 mg/kg,硝态氮 8.43 mg/kg,铵态氮 5.35 mg/kg。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 冬小麦根系特征参数 于冬小麦收获期分别挑出上层(0~20 cm)、下层(20~60 cm)土壤中的小麦根系,冲洗干净后低温保存。用 EPSON Perfection V700 扫描仪扫描,采用 WinRHIZO 根系分析系统分析得到根系的长度、表面积和体积。

1.2.2 冬小麦根系提水量 在冬小麦的整个生育期,用时域反射仪(MODEL CS630, Campbell 公司生产)于每天凌晨和傍晚分 2 次测定土壤体积含水量,计算冬小麦每天的根系提水量 Q_0 (g):

$$Q_0 = M \cdot (\theta_{AM} - \theta_{PM}) / \rho + m。$$

式中: M 为上层根箱土壤干土质量; θ_{AM} 为当天凌晨(05:00—06:00)上层根箱测定的土壤体积含水量; θ_{PM} 为前一天傍晚(19:00—20:00)上层根箱测定的土壤体积含水量; ρ 为上层根箱土壤体积质量(M/V , V 为实际装在盆中土壤所占的体积); m 为上层根箱夜间蒸发量, $m = M \cdot \theta_{PM} / \rho - M \cdot \theta_{AM} / \rho$, 由

不种植冬小麦上层根箱前一天傍晚测定土壤水分质量减去当天早晨测定的土壤水分质量。

1.2.3 土壤体积含水量的日变化 试验选取了提水作用较强的冬小麦扬花期,测定了扬花期试验根箱上层土壤体积含水量的日变化,从 4 月 27 日 19:00 至 4 月 28 日 19:00,每 2 h 测定 1 次。

1.2.4 籽粒产量、耗水量与水分利用效率 于冬小麦成熟期按根箱收获测定籽粒产量。根据时域反射仪的测定结果和设计水分要求进行水分补给,并计算灌溉耗水量。水分利用效率(WUE, mg/cm^3)为冬小麦籽粒产量和耗水量的比值。

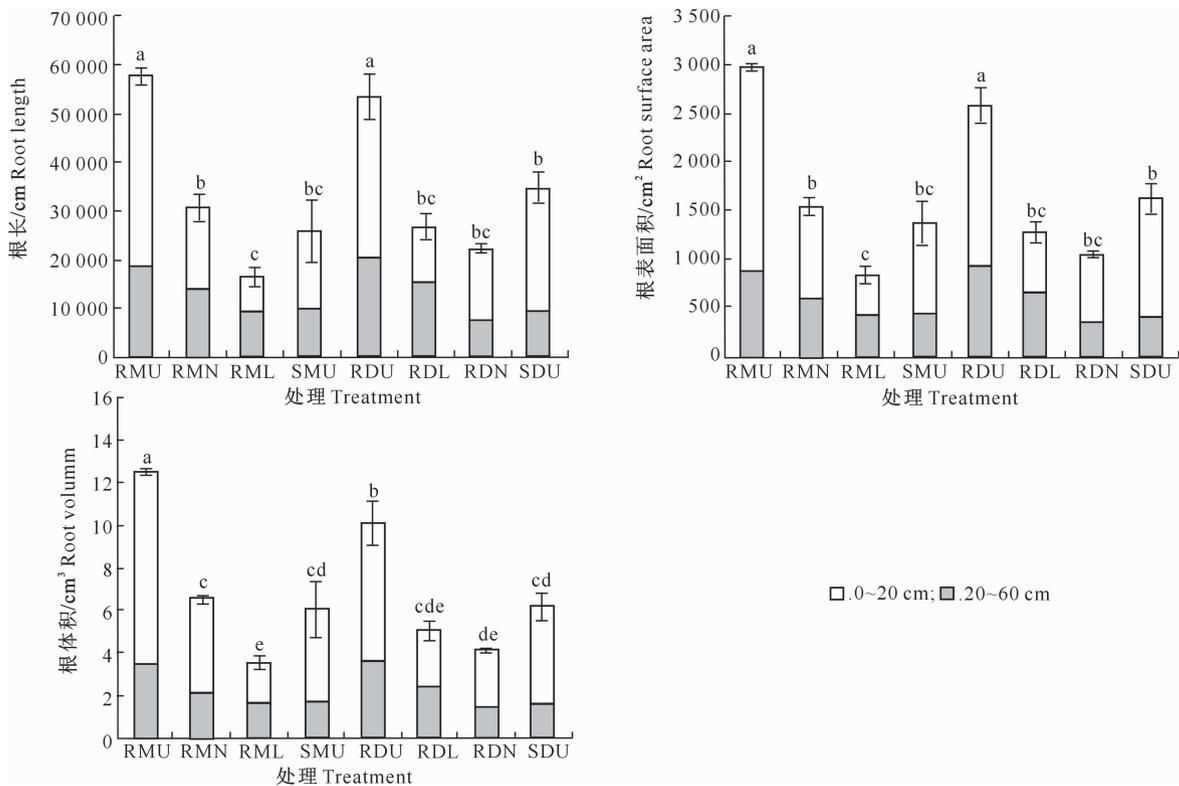
1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 数据分析软件进行统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 施肥深度对不同水分条件下冬小麦根系特征的影响

施肥深度对不同水分条件下冬小麦根系特征的影响如图 2 所示。



不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平($P < 0.05$)

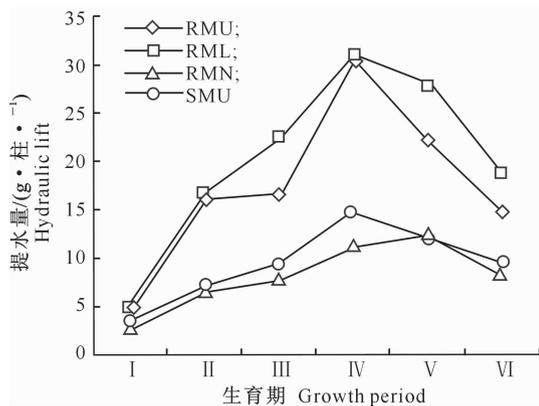
Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$) between treatments

图 2 施肥深度对不同水分条件下冬小麦根系特征参数的影响

Fig. 2 Effects of fertilizer application at different soil depths on root morphological characteristics of winter wheat grown under different water conditions

图2显示,品种和施肥深度显著影响了不同水分条件下冬小麦根系长度(RL)、根系表面积(RSA)和根系体积(RV)($P < 0.05$)。中度水分胁迫(M)和重度水分胁迫(D)条件下,上层施肥处理抗旱型冬小麦CW134的RL、RSA和RV分别较敏感型冬小麦XN979显著增加123.1%和54.3%,115.1%和58.4%,107.2%和62.9%。由此可以发现,抗旱型品种可能具有较强的通过增加根系同化物分配来缓解因水分缺乏对其自身生长影响的能力。施肥显著增加了M处理下CW134的RL、RSA和RV($P < 0.05$)。与不施肥处理相比,上层施肥和下层施肥处理CW134的RL分别增加250.2%和85.6%,RSA分别增加251.3%和83.1%,RV分别增加254.4%和84.4%。D处理下,与不施肥相比,上层施肥和下层施肥处理CW134的RL分别增加141.1%和20.4%,RSA分别增加143.1%和20.5%,RV分别增加146.9%和22.8%,其中下层施肥处理的影响均不显著。上层施肥时,与D条件相比,M条件下CW134的RL、RSA和RV分别增加7.9%,15.3%和24.0%,其中对RV的影响达显著水平($P < 0.05$);而XN979的RL、RSA和RV则分别减少25.4%,15.2%和2.5%,但差异均不显著。下层施肥和不施肥条件下,M与D处理CW134的RL、RSA和RV差异均不显著。

不同土层施肥显著增加了施肥土层根系特征参



I. 拔节期 Jointing stage; II. 孕穗期 Booting stage; III. 抽穗期 Heading stage;

IV. 扬花期 Blooming stage; V. 灌浆期 Grain-filling stage; VI. 成熟期 Maturing stage

图3 不同水分和施肥条件下冬小麦根系提水量随生育期的变化

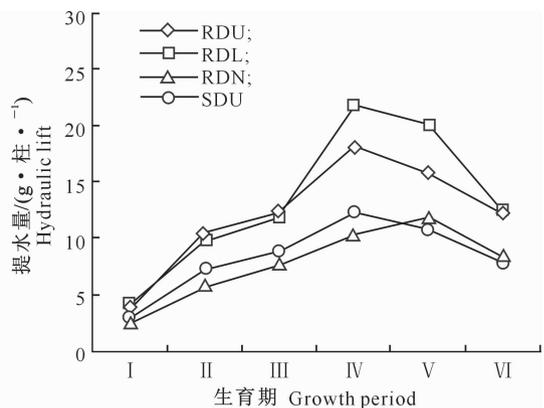
Fig. 3 Changes in hydraulic lift over the growth period of wheat grown under water and fertilizer treatments

2.2.2.2 土壤体积含水量日变化趋势 本试验选取提水作用较强的冬小麦扬花期,测定了上层(0~20 cm)土壤体积含水量的日变化,结果见图4。图4显示,M和D条件下,11:00之前上层和下层施肥处理土壤体积含水量明显高于不施肥处理,说明施肥

数的分配比例。上层施肥时,0~20 cm土层的RL、RSA和RV所占比例较高,分别为65.1%,66.8%和73.1%;下层施肥时,20~60 cm土层的RL、RSA和RV所占比例增加,分别较上层施肥处理增加16.7%,21.0%和25.7%。

2.2 施肥深度对不同水分条件下冬小麦根系提水作用的影响

2.2.1 冬小麦根系提水作用的生育期特征 图3显示,在低蒸腾土壤剖面水势差下,冬小麦从拔节期开始可以测定到明显的夜间提水量,且冬小麦各生育期提水量变化呈单峰状,根系提水量随着冬小麦生长的推进先逐渐增加后降低。随生育期推进,M和D条件下,上层施肥、下层施肥处理CW134以及上层施肥处理XN979根系提水量均呈增大趋势,在扬花期达到顶峰,之后提水量又迅速下降。在M和D条件下,随生育期推进,不施肥处理CW134根系提水量呈增加趋势,并在灌浆期最高,之后迅速下降,这与冬小麦整个生育期需水规律基本相符。总体来看,下层施肥处理提水作用在作物生长后期较强,且峰值维持时间较长,上层施肥处理次之,不施肥处理最弱。与M条件相比,D条件下2个品种冬小麦的根系提水作用均降低,且施肥处理显著降低($P < 0.05$)。M和D条件下,上层施肥处理XN979各生育期提水量显著低于CW134($P < 0.05$),这可能是冬小麦品种本身基因特性差异所致。



促进了根系夜间的提水作用。上层施肥处理冬小麦上层土壤体积含水量低于下层施肥处理。M条件下,上层施肥处理CW134的上层土壤体积含水量在23:00开始上升,至第2天凌晨01:00-05:00均保持高水平,随后又开始迅速下降;而XN979的土壤

体积含水量只在 01:00—03:00 出现峰值,随后开始迅速下降。D 条件下,上层施肥处理 CW134 和 XN979 土壤体积含水量变化与 M 条件下类似,只是 CW134 的土壤体积含水量在 03:00—05:00 出现峰值。D 条件下,各施肥处理土壤体积含水量均在

15:00 左右出现短暂的水分上升状况,可能与作物的蒸腾作用有关,14:00 后作物的蒸腾作用有所减弱,而此时根系信号接收之后,吸水作用仍未降低,导致少量的水分释放上层土壤所致。

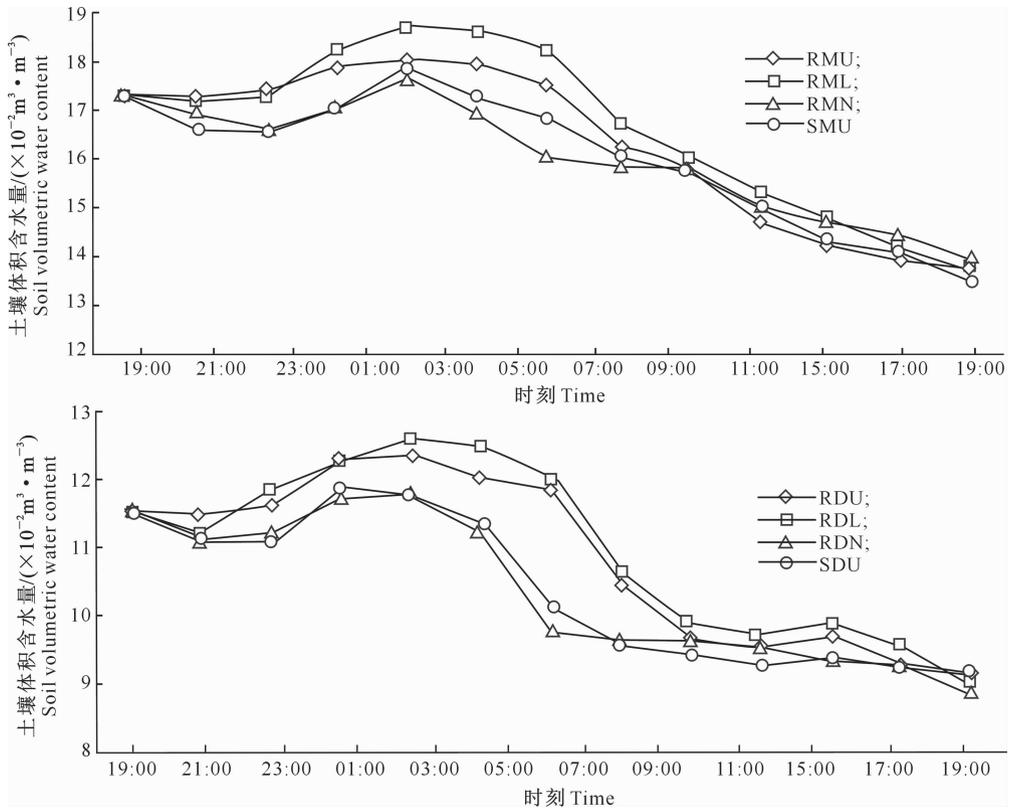


图 4 不同水分和施肥条件下扬花期冬小麦上层(0~20 cm)土壤体积含水量的日变化

Fig. 4 Diurnal changes in water contents of upper soil during blooming stage of winter wheat under different water and fertilizer treatments

2.2.3 冬小麦全生育期根系提水总量 分析表 2 结果发现,冬小麦根系提水作用受作物品种、水势差和施肥深度共同影响,表现出一定的规律性。与 M 相比,D 条件下 CW134 和 XN979 的全生育期提水总量均有所降低,且不同施肥条件下差异均显著。M 条件下,与不施肥处理相比,施肥显著增加了 CW134 全生育期根系提水总量,且下层施肥处理 CW134 全生育期的根系提水总量达 1 137.6 g/箱,显著高于上层施肥处理。D 条件下,不同施肥处理全生育期根系提水总量表现为 RDL > RDU > RDN,且三者差异显著($P < 0.05$)。相同水肥条件下,CW134 全生育期提水总量显著高于 XN979 ($P < 0.05$)。品种、施肥深度、水分处理、施肥深度与水分互作对小麦全生育期根系提水总量的影响达极显著水平($P < 0.001$),品种与水分互作对小麦全生育期根系提水总量的影响达显著水平($P <$

0.01)。

2.3 施肥深度对不同水分条件下冬小麦籽粒产量、耗水量及水分利用效率的影响

由于试验冬小麦全生育期生长在控制降雨的条件下进行,故其灌水量近似等于耗水量。从表 2 可以看出,M 条件下的耗水量高于 D 条件下,且不同施肥条件下差异显著。M 和 D 条件下耗水量均表现为上层施肥处理 > 下层施肥处理 > 不施肥处理,但 D 条件下三者差异均不显著。M 和 D 条件下,CW134 的耗水量平均值较 XN979 高 31.6%。品种、水分处理和施肥深度显著影响了冬小麦的耗水量($P < 0.01$),而品种与水分互作、施肥深度与水分互作对冬小麦总耗水量无显著影响($P > 0.05$)。

分析表 2 结果还发现,相同施肥和水分条件下,CW134 籽粒产量均显著高于 XN979;与 M 处理相比,D 处理 CW134 籽粒产量降低,但二者差异不显

著。品种、施肥深度、品种型与施肥深度交互显著或极显著影响冬小麦籽粒产量。

表2 施肥深度对不同水分条件下冬小麦根系提水总量和水分利用效率的影响

Table 2 Effects of fertilizer application at different soil depths on hydraulic lift and water use efficiency of winter wheat grown under different water conditions

品种 Variety	施肥深度 Fertilization depth	水分处理 Water treatment	全生育期根系 提水总量/(g·箱 ⁻¹) Total amount of hydraulic lift	耗水量/ (×10 ³ cm ³) Water consumption	籽粒产量/ (g·箱 ⁻¹) Yield	水分利用效率/ (mg·cm ⁻³) Water use efficiency
CW134 (R)	U	M	963.2±42.9 b	20.05±2.38 a	24.53±5.62 a	1.21±0.13 bc
		D	685.3±17.5 d	14.12±1.17 bcd	20.25±3.86 ab	1.43±0.15 a
	L	M	1 137.6±34.6 a	17.10±2.16 ab	24.03±3.20 a	1.41±0.08 a
		D	763.5±32.2 c	13.66±1.72 cd	20.95±4.90 ab	1.52±0.18 a
	N	M	468.8±30.3 f	13.05±0.07 cd	12.41±0.64 c	0.95±0.04 d
		D	452.1±29.8 f	11.78±1.05 cd	12.43±1.04 c	1.08±0.04 cd
XN979 (S)	U	M	532.9±31.8 e	15.11±3.43 bc	16.08±4.69 bc	1.05±0.10 cd
		D	472.3±30.3 f	10.82±1.29 d	13.51±2.44 c	1.24±0.08 b
变异来源 Source of variation						
品种 Variety (V)			** *	**	** *	*
施肥深度 Fertilization depth(F)			** *	**	**	** *
水分处理 Water treatment(W)			** *	**	n. s.	**
品种×水分处理 Variety×Water treatment			**	n. s.	**	n. s.
施肥深度×水分处理 Fertilization depth×Water treatment			** *	n. s.	n. s.	n. s.

注:同列数据后标不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P<0.05$)。***代表在 $P<0.001$ 水平差异显著,**代表在 $P<0.01$ 水平差异显著,*代表在 $P<0.05$ 水平差异显著,n. s.代表在 $P>0.05$ 水平差异不显著。

Note: Different lowercase letters in indicate significant difference between varieties at the $P<0.05$ level; *** represents significant at the $P<0.001$ probability level, ** represents significant at the $P<0.01$ probability level, * represents significant at the $P<0.05$ probability level, while ns represents no significant at the $P<0.05$ probability level.

水分利用效率(WUE)是用来衡量作物产量与水分消耗的重要生理指标。表2表明,与耗水量相反,不同施肥条件下,不同品种试验冬小麦水分利用效率均是D处理高于M处理;但只有上层施肥条件下,M处理与D处理2个冬小麦品种水分利用效率差异显著($P<0.05$)。同一施肥条件下,M和D处理CW134的水分利用效率表现为下层施肥处理>上层施肥处理>不施肥处理。相同水分和施肥条件下,XN979的水分利用效率均低于CW134,这可能与品种本身对于旱适应性弱有关。品种、水分处理和施肥深度显著或极显著影响冬小麦水分利用效率,而品种与水分交互、施肥深度与水分交互对冬小麦水分利用效率无显著影响($P>0.05$)。

3 讨论

Wang等^[17]利用分层土柱试验研究表明,深层施磷作物可以吸收湿润深层土壤水分,然后再释放到干旱的表层土壤,但提水作用的大小和周期因土壤质地而异,黏土的提水作用持续7d,而砂土仅有1d就可测到明显的提水作用。土壤水势梯度也是影响植物提水作用发生的重要条件之一。Shen等^[18]利用本研究上下分层试验装置研究发现,水势

差是作物根系产生提水作用的前提条件;一定水势差下,上层不同氮磷养分可显著调控作物根系的提水作用。本研究结果也表明,不同的土壤水势差也显著影响作物的提水作用。施肥条件下,M处理CW134的提水作用显著高于D处理;上层施肥处理XN979的提水作用也表现为M处理较D处理有增加趋势。说明较高水势差条件下(D处理),上层土壤较低的土壤含水量会在一定程度上影响根系生长分布,不利于作物发挥较高的夜间提水作用。Corak等^[19]也认为,根系提水作用虽然只在土壤低水势条件下发生,但土壤水势过低也会限制根系中水分向土壤扩散。因此,土壤水势差是决定根系提水作用的重要因子,且合理范围的水势差条件才能保证最佳的根系提水作用,以促进旱地农田生态系统养分循环,以及对作物吸收耕层养分、维持作物同化力可能具有重要作用。

前人对植物根系是否均具有提水作用,以及不同生育期植物根系提水量的大小是否有差异,目前尚未定论。Wan等^[8]证明,不同品种玉米提水作用存在差异,耐旱杂交种TAES176根系平均提水量为163g/(d·株),而耐旱对照杂交种P3223根系平均提水量仅为96g/(d·株)。本研究选取了不同

抗旱型的冬小麦进行研究,拟从根系提水作用的角度来解释作物的抗旱性。从拔节期开始即可测到冬小麦的提水量,随着生育期推进,抗旱型 CW134 和水分敏感型 XN979 提水作用随作物生育期均呈单峰状,但 2 个品种土壤体积含水量日变化趋势不一致。上层施肥条件下,XN979 提水作用高峰的持续时间相对较短,且最高提水量显著低于 CW134,表现出明显的品种差异,这可能与品种间抗旱基因序列对水分的响应在时间和空间上的异质性有关。进一步从不同品种作物生育期根系特征和活力等进行分析。根系是作物吸水的重要器官,其形态结构以及在土壤剖面的时空分布与土壤水分消耗特征吻合^[20],与土壤水分的吸收和利用有着密切关系^[21],也影响着整株作物的生长发育和养分的吸收利用^[22],利于作物获得较高的生物学和籽粒产量,达到根冠协调。本研究中,CW134 的根系长度、根系表面积、根系体积均显著高于 XN979,但不同土层施肥会显著增加施肥土层根系分配比例,这与施肥对作物提水作用的改变有关。

根系的生长发育除决定于遗传因子外,在很大程度上受土壤环境和栽培管理技术的调控,使其在土壤剖面中的构型和时空分布更趋合理,以利于作物水分养分吸收利用。本研究中,M 和 D 条件下,11:00 之前 CW134 土壤体积含水量变化趋势表现为上层和下层施肥处理高于不施肥处理,说明施肥可促进试验冬小麦根系夜间的提水作用。而上层施肥和下层施肥处理下,土壤体积含水量变化的差异也说明施肥层次影响冬小麦根系提水作用。对旱地农田分层施磷的研究结果也表明,深层施磷会改变根系分布模式,显著增加小麦深层(>30 cm)根长,利于作物对深层储水的充分利用^[23]。Asseng 等^[24]研究认为,深层根系是旱地作物籽粒产量形成的功能根系,充足的深层根系利于作物对深层土壤水分和养分的吸收利用,提高水分利用率及产量。Singh 等^[25]研究认为,土壤水分供应不足时,作物深层土壤根系的增加也有利于植株养分吸收及产量形成。进一步相关分析表明,品种、水分处理和施肥深度显著或极显著影响冬小麦水分利用效率。因此,对旱地作物而言,研究作物不同生育时期的根系提水能力,可以为通过合理的水肥措施,如改变施肥深度以充分调动作物的根系提水作用来提高自身灌溉能力,湿润养分丰富的浅层土壤,刺激微生物活性和维持细根有效性或生命周期,以增加植物的养分吸收。品种和合理施肥措施可进一步调控作物根系提水作

用,在保证旱作作物生产的同时,有效地调控和减少作物生育期水分灌溉,提高作物水分和养分利用效率。

4 结 论

1) CW134 的根系长度、根系表面积、根系体积均较大,且显著高于 XN979,但不同土层施肥会显著增加施肥土层根系分配比例。

2) 不同品种冬小麦根系均有明显的提水作用,且整个生育期根系提水量变化均呈单峰状,除不施肥处理根系提水量在灌浆期达到最大外,其余施肥处理根系提水量均在扬花期达到最大。

3) 上层中度水分胁迫(M)和重度水分胁迫(D)下,抗旱型 CW134 根系提水量显著高于水分敏感型 XN979。相同水肥条件下,CW134 生育期根系提水总量高于 XN979。

因此,抗旱型作物品种较发达的根系和较高的全生育期提水作用,有利于充分发掘深层土壤水分;同时施肥深度也可以调节作物根系分布特征及提水作用,进一步促进作物对有限水分的高效利用。

[参考文献]

- [1] Maurel C, Simonneau T, Sutka M. The significance of roots as hydraulic rheostats [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(12): 3191-3198.
- [2] Burrell S S O, Adams M A, Tumer N C, et al. The redistribution of soil water by tree root systems [J]. *Oecologia*, 1998, 115(3): 306-311.
- [3] 刘美珍, 孙建新, 蒋高明, 等. 植物土壤系统中水分再分配作用研究进展 [J]. *生态学报*, 2006, 26(5): 1550-1557.
Liu M Z, Sun J X, Jiang G M, et al. Hydraulic redistribution in plant-soil systems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1550-1557.
- [4] Richards J H, Caldwell M M. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots [J]. *Oecologia*, 1987, 73(4): 486-489.
- [5] Nadezhkina N, Ceuleman R. Stem-mediated hydraulic redistribution in large roots on opposing sides of a Douglas-fir tree following localized irrigation [J]. *New Phytologist*, 2009, 184(4): 932-943.
- [6] Prieto I, Maartínez-Tillería K, Martínez-Manchego L, et al. Hydraulic lift through transpiration suppression in shrubs from two arid ecosystems: patterns and control mechanisms [J]. *Oecologia*, 2010, 163(4): 855-865.
- [7] 鱼腾飞. 黑河下游荒漠河岸植物根系水力再分配及其生态水文效应 [D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
Yu T F. Hydraulic redistribution of roots and its ecohydrological effects for desert riparian plants on the lower Heihe River

- [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [8] Wan C G, Xu W W, Sosebeel R E, et al. Hydraulic lift in drought-tolerant and susceptible maize hybrids [J]. *Plant and Soil*, 2000, 219(1/2): 117-126.
- [9] Sun S J, Meng P, Zhang J S, et al. Hydraulic lift by *Juglans regia* relates to nutrient status in the intercropped shallow-root crop plant [J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1/2): 629-641.
- [10] Meunier F, Rothfuss Y, Bariac T, et al. Measuring and modeling hydraulic lift of *Lolium multiflorum* using stable water isotopes [J]. *Vadose Zone Journal*, 2017, 17(1): 1-15.
- [11] Hirota I, Sakuratani T, Sato T, et al. A split-root apparatus for examining the effects of hydraulic lift by trees on the water status of neighboring crops [J]. *Agroforestry Systems*, 2004, 60(2): 181-187.
- [12] Hultine K R, Cable W L, Burgess S S O, et al. Hydraulic redistribution by deep roots of Chihuahuan Desert phreatophyte [J]. *Tree Physiology*, 2003, 23(5): 353-360.
- [13] Brooks J R, Meinzer F C, Coulombe R, et al. Hydraulic redistribution of soil water during summer drought in two contrasting Pacific Northwest coniferous forests [J]. *Tree Physiology*, 2002, 22(15/16): 1107-1117.
- [14] Durand J L, Bariac T, Ghesquière M, et al. Ranking of the depth of water extraction by individual grass plants, using natural ^{18}O isotope abundance [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60(1): 137-144.
- [15] Doussan C, Pierret A, Garrigues E, et al. Water uptake by plant roots: II. Modelling of water transfer in the soil root-system with explicit account of flow within the root system-comparison with experiments [J]. *Plant and Soil*, 2006, 283(1/2): 99-117.
- [16] Moroke T S, Schwartz R C, Brown K M, et al. Soil water depletion and root distribution of three dryland crops [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2005, 69(1): 197-205.
- [17] Wang X, Tang C, Guppy C N, et al. The role of hydraulic lift and subsoil P placement in P uptake of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2009, 325(1/2): 263-275.
- [18] Shen Y F, Zhang Y, Li S Q. Nutrient effects on diurnal variation and magnitude of hydraulic lift in winter wheat [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(10): 1589-1594.
- [19] Corak S J, Blevins D G, Pallardy S G. Water transfer in an alfalfa/maize associations [J]. *Plant Physical*, 1987, 84: 582-586.
- [20] Jackson R B, Sperry J S, Dawson T E. Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions [J]. *Trends in Plant Science*, 2000, 5(11): 482-488.
- [21] Campbell C A, De Jong R. Root-to-straw ratios--influence of moisture and rate of N fertilizer [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2001, 81(1): 39-43.
- [22] 程乙, 王洪章, 刘鹏, 等. 品种和氮素供应对玉米根系特征及氮素吸收利用的影响 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(12): 2259-2269.
Cheng Y, Wang H Z, Liu P, et al. Effect of different maize varieties and nitrogen supply on root characteristics and nitrogen uptake and utilization efficiency [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(12): 2259-2269.
- [23] 康利允, 沈玉芳, 岳善超, 等. 不同水分条件下分层施磷对冬小麦根系分布及产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 140-147.
Kang L Y, Shen Y F, Yue S C, et al. Effect of phosphorus application in different soil depths on root distribution and grain yield of winter wheat under different water conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(15): 140-147.
- [24] Asseng S, Ritchie J T, Smucker A J M, et al. Root growth and water uptake during water deficit and recovering in wheat [J]. *Plant and Soil*, 1998, 201(2): 265-273.
- [25] Singh D K, Sale P W G, Routley R R. Increasing phosphorus supply in subsurface soil in northern Australia; rationale for deep placement and the effects with various crops [J]. *Plant and Soil*, 2005, 269(1/2): 35-44.