

DOI: 10.5846/stxb201306091544

李彩霞, 周新国, 孙景生, 王和洲. 根区交替控制灌溉条件下玉米根系吸水规律. 生态学报, 2015, 35(7): 2170–2176.

Li C X, Zhou X G, Sun J S, Wang H Z. Root water uptake of maize with controlled root-divided alternative irrigation. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2170–2176.

根区交替控制灌溉条件下玉米根系吸水规律

李彩霞^{1,3}, 周新国¹, 孙景生^{1,3,*}, 王和洲^{1,2}

1 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002

2 商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站, 商丘 476001

3 农业部作物需水与调控重点实验室, 新乡 453002

摘要:为了阐明根区交替控制灌溉(CRDAI)条件下玉米根系吸水规律,通过田间试验,在沟灌垄植模式下采用根区交替控制灌溉研究玉米根区不同点位(沟位、坡位和垄位)的根长密度(RLD)及根系吸水动态。研究表明,根区土壤水分的干湿交替引起玉米 RLD 的空间动态变化,在垄位两侧不对称分布,并存在层间差异;土壤水分和 RLD 是根区交替控制灌溉下根系吸水速率的主要限制因素。在同一土层,根系吸水贡献率以垄位最大,沟位最低;玉米营养生长阶段,10—30 cm 土层的根系吸水速率最大;玉米生殖生长阶段,20—70 cm 为根系吸水速率最大的土层,根系吸水贡献率为 43.21%—55.48%。研究阐明了交替控制灌溉下根系吸水与土壤水分、RLD 间相互作用的动态规律,对控制灌溉下水分调控机理研究具有理论意义。

关键词:根区交替控制灌溉(CRDAI); 玉米; 根长密度(RLD); 根系吸水; 土壤水分

Root water uptake of maize with controlled root-divided alternative irrigation

LI Caixia^{1,3}, ZHOU Xinguo¹, SUN Jingsheng^{1,3,*}, WANG Hezhou^{1,2}

1 Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China

2 Shangqiu Farmland Ecological System State Field Observation Research Station, Shangqiu 476001, China

3 Key Laboratory for Crop Water Requirement and Regulation of Ministry of Agriculture, Xinxiang 453002, China

Abstract: Roots are very important part of plant substance metabolism and information exchange system. The development situation and vitality of root system effects greatly crop shoot growth and yield. While soil moisture decrease, roots will detect firstly soil moisture changes and respond actively to water regulation, which is beneficial to drought resistance and good yield. Therefore, root system research has become the highlight in crops drought-tolerance and water saving researches in recent years. In order to understand the dynamics of maize root water uptake under controlled root-divided alternative irrigation (CRDAI), a field experiments was carried out in 2010 and 2011 seasons to investigate root distribution and dynamics of maize root water uptake at different sites (furrow bottom, slope and top ridge) under CRDAI. Results indicated that spatial distribution of root length density (RLD) was influenced obviously by alternative wetting and drying in maize root zone. The maximum RLD at vertical direction occurred at soil layer of 10—20 cm, and then RLD decreased gradually as depth increased. The roots at top ridge site had maximum penetration depth. Root senescence started at early grain filling stage, and senescence rate of roots at furrow bottom was greater than that at top ridge. Maize roots distributed asymmetrically on both ridge sides under CRDAI. RLD at horizontal direction declined generally in order: top ridge, slope, and furrow bottom. The RLD distribution models at different soil layers and growth stages were quite different. There were no

基金项目:国家自然科学基金项目(51009139); 国家“十二五”“863”计划项目(2011AA100502); “十二五”公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203077, 201203032)

收稿日期:2013-06-09; 网络出版日期:2014-07-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jshsun623@163.com

regularities to fit RLD distribution at soil layer of 20—50 cm, because of the obvious influences of frequently soil moisture changes. Maize root water uptake under CRDAI was mainly determined by soil moisture and RLD distribution. At same soil depth, the main contribution to total root water uptake may attributed to roots at top ridge, and minimum contribution come from roots at furrow bottom. The maximum contribution to root water uptake come from soil layer of 10—30 cm during vegetative growth stage. The root water uptake in soil layer of 20—70 cm contributed a main part of the total water absorption during reproductive growth stage, because of higher RLD value and water uptake rate in the soil layers. The percentage of root water uptake in soil layer of 20—70 cm to total root water uptake increased from 33.34% in vegetative growth stage to 55.48% in reproductive growth stage. Soil moisture content in the main water absorption layer was very crucial to meet crop water requirement. After grain filling started, the roots in top soil layer senesced gradually, while RLD in deep soil layer increased slightly. Therefore, water update from roots in soil layer below 70 cm depth was very important to good grain filling. The distribution of RLD and soil moisture in soil profile was very important to crop root water uptake and crop viability under water stress. The dynamics of the interaction among root water uptake, soil moisture and RLD distribution under CRDAI were investigated and analyzed in this paper, which is helpful for understanding crop water regulation mechanism under controlled alternative irrigation.

Key Words: controlled root-divided alternative irrigation (CRDAI); maize; root length density (RLD); root water uptake; soil moisture

根系吸水是植物水分供应的途径,超过 50%的降雨或灌溉水被植物吸收利用^[1],是现代农业对水、肥料优化利用的关键因素^[2-3]。研究表明,根系吸水是植物地下和地上部分生理生态相互作用的结果^[4],主要受到根系分布、土壤水力特性和气候条件的影响^[5-7]。在很多研究中,根密度随土层深度呈指数减少,但土壤密实度和分层结构能够改变这种根系分布^[8-9],特别是受到水分亏缺影响时,植物根系吸水受到土层的根系分布影响^[10-11],已被一些研究^[12-13]和模型^[14-15]所证实,这些研究增进了我们对根系分布与植物吸水关系的理解。然而,能够预报根系吸水的复杂过程是十分有限的。一方面,现有的一些模型与根系的实际分布相偏离^[16-17];另一方面,一些研究简化了根系-土壤-水分系统,不能为人们充分理解根系吸水的复杂过程提供一个综合信息平台,很少有对根系分布具有现实意义的满意描述,这承载了一定气候条件下特定的土壤剖面水文状况和土壤水分吸收再分布的反馈效应^[18]。根区交替控制灌溉为作物根系生长及吸水提供了良好的自身调控可能^[19],使土壤水分和根系吸水的关系形成作用机制,这方面的科学研究,对于揭示根系吸水、根系分布和田间剖面土壤水分动态之间的响应机制是非常重要的。

根区交替控制灌溉增强了根系生长与代谢能力,水分利用效率也得以提高^[20],此环境下根系形态与土壤水分的关系决定了根系吸水的空间动态,其关系研究对理解作物-土壤系统的水分作用机理非常重要,并能揭示根区交替控制灌溉下的根系吸水动态。

1 材料与方法

1.1 试验区概况及试验设置

试验于 2010—2011 年在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场(35°19' N, 113°53' E, 海拔 73.2 m)进行,区域多年平均气温 14.1 °C,无霜期 210 d,日照时数 2398.8 h,多年平均降雨量 588.8 mm,多年平均蒸发量 2000 mm。沟和垄规格及灌溉方法如图 1 所示。试验小区面积为 100 m²,4 次重复。灌水方式为根区交替控制灌溉(Controlled Root-Divided Alternative Irrigation, CRDAI),当灌水沟处的根区土壤含水量达到田间持水量的 70%—75%时,开始灌水,根区土壤水分保持非充分状态。玉米(浚单 18)播种日期分别为:2010 年 4 月 22 日,2011 年 4 月 20 日,种植密度为 41669 株/hm²,株距 40 cm,行距 60 cm。收获日期分别为 2010 年 8 月 26 日、2011 年 8 月 22 日。播前对试验区土壤进行深翻松土和打垄,基施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)用量为

675 kg/hm²,在玉米拔节期追施尿素 300 kg/hm²(含 N 46%)。试验期间灌溉和降雨情况见表 1。

表 1 试验期间灌溉和降雨情况

Table 1 Irrigation and precipitation during the experimental period				
生长季 Season	灌溉日期 Irrigation date(m-d)	灌溉定额 Irrigation norm/mm	灌溉总量 Irrigation amount/mm	降雨量 Precipitation/mm
2010	04-30; 05-03; 05-22;06-01	18	189	289.2
	06-12; 06-17; 06-28	27		
	07-14	36		
2011	04-20	27	174	230.3
	06-01	18		
	06-14	24		
	06-21;07-02	30		
	07-17	45		

1.2 研究方法

由根钻取根法测定根长密度(Root Length Density, RLD),根钻钻头直径 7 cm,高度 10 cm。共设垄顶、坡 1、坡 2、沟 1 和沟 2 5 个取根点(图 1),垄、坡、沟处沿剖面垂直向下分别取至 120、110 cm 和 100 cm。取出的根样先在清水中浸泡 6—8 h,然后用 0.1 mm 孔径的网筛过滤并冲洗干净,用修正的 Newman 法量测根长,计算 RLD。在玉米苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期和成熟期各取根一次,根系的水平和垂向伸展距离由垂直于垄向、沿植株根部向下挖取土壤剖面获得。

作物蒸腾速率由 LI-6400 光合作用系统(LI-6400,LI-Cor,USA)测定,与根系取样同步观测,选长势中等的 5 株玉米,从底叶至顶叶分别测定蒸腾速率,位置为距叶尖 1/3 处,以 1 h 为间隔测日变化。

土壤含水量采用土钻取土烘干法测定,每 10 cm 取 1 钻,取至 120 cm,取土位置与根系取样点一致,每 3 d 取 1 次土样,在灌前、灌后及雨后加测。

使用微型蒸渗仪(Mico-lysimeter)测定棵间土壤蒸发量,每天 7:30 测定,间隔 1d 换土。Mico-lysimeter 由镀锌铁皮制成,壁厚 2 mm,内径分别为 10 cm 和 5 cm,高 10 cm,5cm 内径的安装在垄顶和坡处,10 cm 内径的安装在沟底。

比重计法测定土壤粒径组成;土壤为轻砂壤土,田间分层取样,采用 Ku-pF 非饱和导水仪(Ku-pF, Germany)测定土壤非饱和导水率 $K(\theta)$ 和土壤水分特征曲线 pF(表 2)。

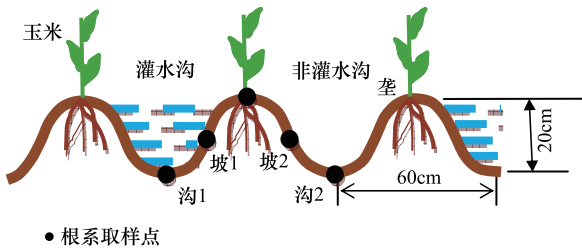


图 1 地表结构及湿润方式示意图
Fig.1 Ground surface structure and wetting method

表 2 试验区土壤物理特性及水分运动参数

Table 2 Soil physical properties and hydraulic parameters of the experimental site						
深度 Depth/ cm	粒径分析 Particle size distribution/%			干容重 Bulk density/ (g/cm ³)	土壤孔隙度 Soil porosity/ %	非饱和导水率 Unsaturated hydraulic conductivity/ (cm/min)
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay			土壤水分特征曲线 Water retention curve/cm
0—40	34	43	23	1.38	40.58	$K(\theta) = 1257 \times \theta^{12.648}$ $pF = -0.46\theta^{-5.89}$
40—60	28	42	30	1.44	39.93	
60—120	28	42	30	1.44	39.93	$K(\theta) = 189\theta^{9.743}$ $pF = -0.81\theta^{-5.06}$

1.3 根系吸水速率

采用 Feddes 模型计算根系吸水速率^[21]

$$S(x, z, t) = \sigma \beta(x, z, t) \gamma(h) \quad (1)$$

$$\text{其中, } \gamma(h) = \begin{cases} h/h_1, & h_1 \leq h \leq 0 \\ 1 & h_2 \leq h \leq h_1 \\ (h - h_3)/(h_2 - h_3) & h < h_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{T_r}{\int_0^{z_m} \int_0^{x_m} \gamma(h) \beta(x, z, t) dx dz} \quad (3)$$

式中, T_r 为作物蒸腾速率; σ 为待定系数; $S(x, z, t)$ 为根系吸水速率; $\gamma(h)$ 为水分胁迫函数; h 为土壤水势; h_1, h_2, h_3 为影响根系吸水的几个土壤水分阈值。 h_1 为取样限制水势, 取值范围 30—40 cm, 当含水量高于 h_1 时, 土壤湿度高, 透气性差, 根系吸水速率降低。 h_3 为凋萎点水势, 取值范围为 -1500—2000 cm; (h_2, h_1) 为根系吸水最适的土壤含水量区间, h_2 为田间持水量^[21]。 $\beta(x, z, t)$ 为根长密度 (cm cm^{-3})。 z 为根系下扎深度 (cm), x 为水平伸展距离 (cm), t 为玉米播后天数 (d) ($28 \leq t \leq 120$)。

2 结果与分析

2.1 根长密度 RLD 分布规律

图 2 给出了玉米 5 个生长阶段 (44 d—苗期、64 d—拔节期、73 d—抽雄期、90 d—灌浆期和 105 d—乳熟期) 的 RLD 情况, 由于连续两年的 RLD 分布规律非常一致, 只给出 2011 年的 RLD 分布。图 2 中, 沟、坡、垄处的根系深度以各自点位所处的位置为坐标 0 点, 向下为正。

由图 2 可知, 在垂向分布上, 最大 RLD 在 10—20 cm 深度, 自 20 cm 向下的 RLD 大体上呈递减规律。在玉米苗期, 根系最大下扎深度为 70 cm (垄位), 此时已经实施了交替隔沟灌溉, 沟位和坡位的 RLD 明显地受到土壤湿润方式的影响, 其在垄位两侧呈不对称分布。在玉米拔节期, 垄位根系已达到 90 cm, 两个相邻沟位的 RLD 不对称分布, 较大密度根系集中在 0—30 cm。玉米抽雄期, 各点位处 RLD 明显增大, 其根系密集区域为 0—50 cm, 两个对称坡位的 RLD 差别明显。玉米灌浆期, 根系进入衰老阶段, 沟位的 RLD 小于抽雄阶段, 但垄位的 RLD 高于其他阶段, 达到全生育期最大值 5.06 cm/cm^3 。在玉米成熟期, 根区的活根逐渐衰败, 0—70 cm 土层根系最先出现衰败, RLD 小于前期, 而 70 cm 以下土层的根系仍有较强的生长力, 相应 RLD 无减小趋势。

在水平分布上, 平均 RLD 基本上为垄、坡和沟位递减分布, 且 RLD 的水平分布随时间变化存在层间差异, 其中 20—50 cm 土层的 RLD 分布较为不规律, 说明较为活跃的大密度根系层受土壤水分的影响较大。播种 90d 之后的 RLD 在垄位两侧逐渐呈对称分布, 说明在玉米生长中后期 (每年 7 月份之后) 的大量降雨能够改变 RLD 的空间不均匀分布状况。

2.2 根系吸水速率分布

图 3 和表 3 中, 沟、坡、垄处的土层根系吸水速率分析是在同一坐标系下进行, 以垄顶处地表为水平面的坐标 0 点。

图 3 给出了 4 个日期的根系吸水速率, 其中 7 月 5 日为灌水结束第 6 天, 土壤较为干燥, 剖面平均根系吸水速率较小, 土壤水分成为土层间根系吸水的限制因素。7 月 16 日为灌水结束第 2 天, 根区土壤水分整体较高, 其土壤剖面分布情况主要与 RLD 有关。玉米营养生长期, 根系吸水速率最大值发生在 10—30 cm 土层, 此土层区间的根系吸水速率点位差异明显, 根系吸水速率由大到小的顺序是垄位-坡位-沟位; 玉米生殖生长阶段, 根系吸水速率最大值的分布深度逐渐下移, 主要在 15—70 cm 土层, 垄位根系吸水速率最大, 沟位最小。在沟位, 根系吸水速率达到最大值之后, 随深度的增加而逐渐减小, 其点位差异逐渐缩小。

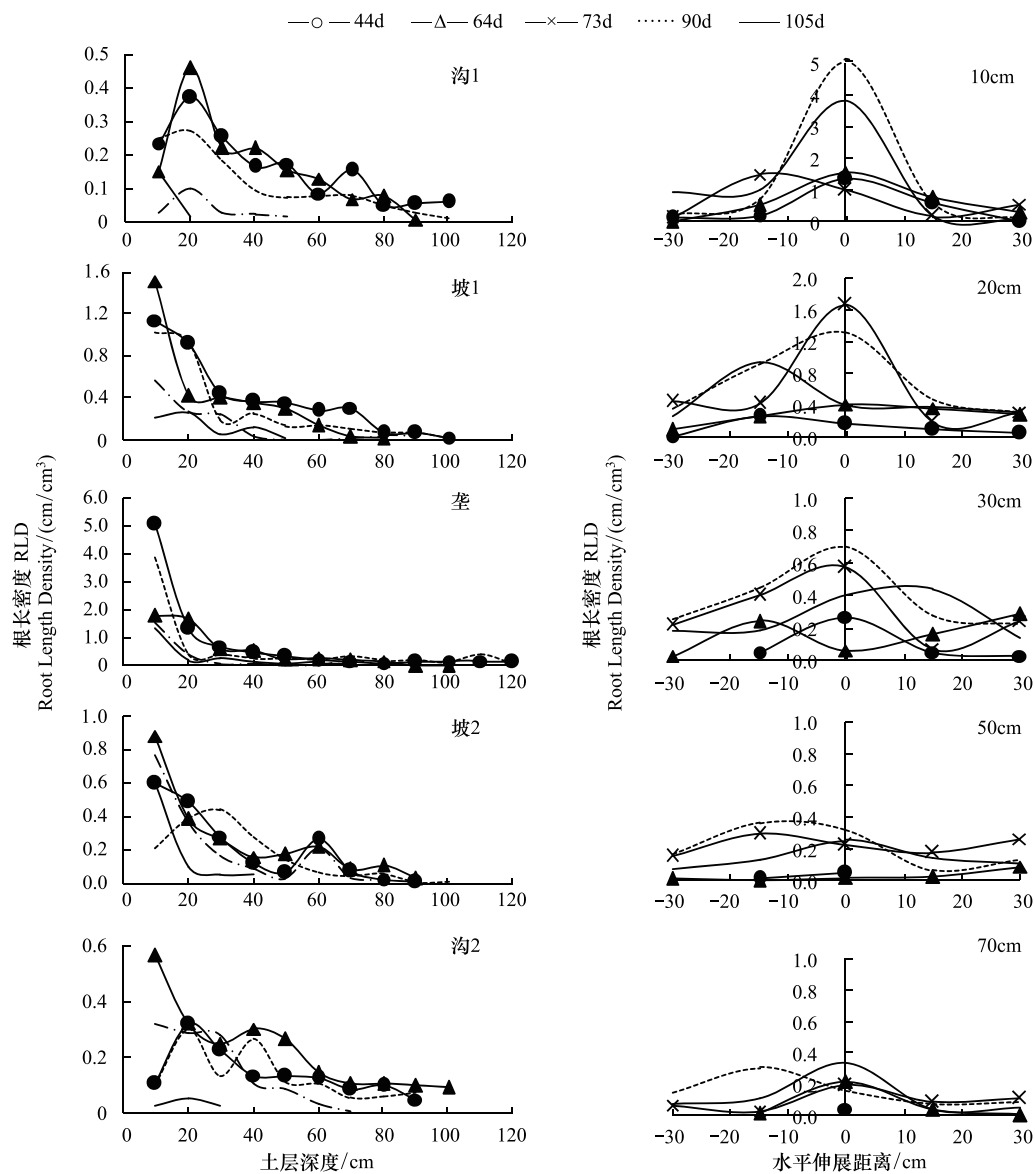


图2 玉米不同时期的根长密度(Root Length Density, RLD)空间分布(2011,新乡)
Fig.2 Root length density(RLD) distribution at different growing stages in 2011

表3 不同位置处不同土层根系吸水贡献率

Table 3 Percentage of roots in different depth to the total water absorption in different sites												
日期 Date	6月5日 June 5			6月19日 June 19			7月5日 July 5			7月16日 July 16		
土层 Layer/cm	0—20	20—70	70—120	0—20	20—70	70—120	0—20	20—70	70—120	0—20	20—70	70—120
沟 Furrow	4.45	11.45	5.71	4.23	12.60	6.11	4.63	13.85	5.82	6.87	15.50	7.10
坡 Slope	16.84	11.29	8.25	12.87	15.86	7.75	9.72	17.08	7.09	10.54	19.55	8.88
垄 Ridge	23.59	10.59	7.82	23.95	14.75	8.77	16.11	19.26	8.80	15.66	20.43	9.58
比例 Percentage/%	44.88	33.34	21.79	41.06	43.21	22.63	30.46	50.19	21.72	33.07	55.48	25.56

玉米苗期(6月5日)的上层(0—20)根系占总吸水量的44.88%,下层根系占总吸水量的比例逐渐减小;在6月19日、7月5日和7月16日,20—70 cm深度的根系吸水贡献率逐渐增大,为主要根区吸水层。从RLD分布情况看,垄位0—20 cm土层的RLD较大,玉米营养生长阶段其吸水速率也较大,这一土层的充分湿润对玉米营养生长期的根系吸水非常重要;从整体根区看,20—70 cm土层为根量最大的区域,其较大的根系

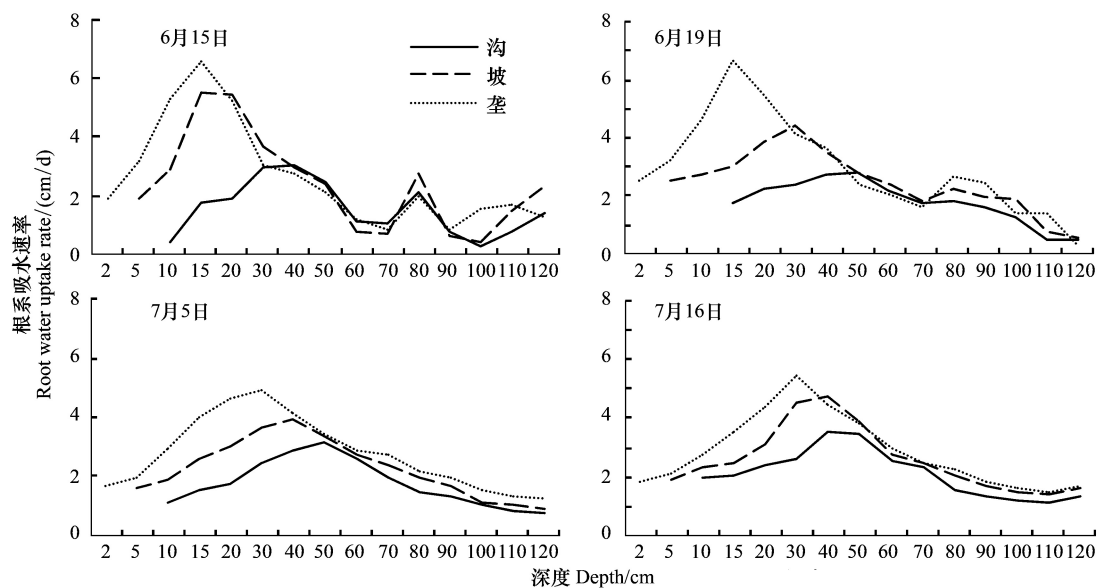


图3 根系吸水速率的剖面分布(新乡,2010)

Fig.3 Distribution of root water uptake rate in the soil profile (Xinxiang, 2010)

吸水速率与根系的大密度分布和根区水分的调控有关,这一层的根系吸水比例从营养生长期的 33.34%增至生殖生长阶段的 55.48%(表 3);在同一土层,垄位的根系吸水比例最大,沟位最小。

3 讨论

通过水分调控措施,局部改变根系形态,对节水增产是有利的^[22-23]。植物根系的吸水特性对植物的生长状况起决定作用,根系吸水使水分在植物体内得以传输^[24],土壤水分状况又直接影响根系吸水速率^[25],分根区干湿交替的土壤水分条件,很好地反应了根系吸水与土壤水分的动态关系。研究表明,在湿土中,处于密集根区的土层水饱和度和下降速度高于其他土层,显现了高密度根区吸水的显著效果。玉米根系在干、湿交替的土壤环境中形成了自身的适应机制,根系形态产生“补偿效应”,非灌水区域复水后根系的生长活性和代谢明显增强^[20],是引起交替灌溉期间 RLD 不对称分布的主要原因,另一方面也反应了土壤水分与 RLD 的牵制关系。根区交替控制灌溉能够刺激根系向垂向和水平向的发展,提高根长密度^[20],RLD 与土壤水分相互作用引起了根系吸水的时空动态。由图 2 可知,垄位的 RLD 在玉米整个生长期处于最高,垄位在干、湿沟之间,在交替灌溉过程中其根系始终保持湿润,因此在水分和高根长密度的共同促进下,产生了垄位的高吸水速率;图 3 中,根区土壤干燥时段(7 月 5 日)的剖面平均根系吸水速率较小,土壤水分成为土层间根系吸水的限制因素,根区土壤水分较高时段(7 月 16 日)的根系吸水速率主要与 RLD 有关;因而部分根区水分胁迫锻炼了两侧根系的吸水补偿能力,同样能够满足作物蒸腾需求,根系吸水速率由根系分布、剖面土壤水分及短期气候条件所决定,与 Graham 等^[26]、Yu 等^[1]的研究结论一致。在日间,根系密集土层的含水量对作物吸收水分特别关键,在干燥根区,根密度较大土层(如沟位 30 cm)的根系吸水将引起剖面土壤水分吸收再分布,使得一些土层根系吸水占作物总吸水量的比例较大(如玉米拔节期之后的 20—70 cm 土层,根系吸水占总吸水量的 3.21%—55.48%)。地面灌溉条件下,小麦 0—60 cmRLD 占总 RLD 的 68%—77%,为其主要根系吸水层^[22],本研究玉米 20—70 cmRLD 占总 RLD 的 68%—94%,为主要吸水层,所以主要吸水层的水分供给对满足作物需水非常关键,在玉米生长后期,上层根系迅速衰亡,下层 RLD 却略有增加,说明玉米生长后期 70 cm 以下土层根系吸水对其灌浆具有重要作用。因此,RLD 与剖面土壤水分的关系对植物根系吸水以及水分胁迫下的生存能力研究尤为重要。

4 结论

根区交替控制灌溉条件下,土壤水分和 RLD 交互影响根系吸水速率,土壤较为干燥时,土壤水分成为土层间根系吸水的限制因素,土壤较为湿润时,根系吸水速率主要与 RLD 有关,较高土壤水分以及较大的根长密度使得垄位根系吸水速率最大,沟位根系吸水速率最小。

根区交替控制灌溉条件下,玉米营养生长阶段,10—30 cm 为 RLD 最大的土层,也是对根系吸水贡献最大的土层;玉米生殖生长阶段,20—70 cm 为根系吸水需求最大的土层,根系吸水贡献率达 43.21%—55.48%;保证根系吸水关键土层的水分供应对满足根区交替控制灌溉条件下的作物需水非常重要。

参考文献 (References):

- [1] Yu G R, Zhuang J, Nakayama K, Jin Y. Root water uptake and profile soil water as affected by vertical root distribution. *Plant Ecology*, 2007, 189 (1): 15-30.
- [2] Clothier B E, Green S R. Root zone processes and the efficient use of irrigation water. *Agriculture Water Manage*, 1994, 25(1): 1-12.
- [3] Moroke T S, Schwartz R C, Brown K W, Juo A S R. Soil water depletion and root distribution of three dryland crops. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 197-205.
- [4] Zhuang J, Yu G R, Nakayama K, Urushisaki T. Environmental dependence of sap flow of maize. *The Technical Bulletin of Faculty of Horticulture, Chiba University, Japan*, 2000, 54: 53-64.
- [5] Jackson R B, Sperry J S, Dawson T E. Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions. *Trends in Plant Science*, 2000, 5(11): 482-488.
- [6] Zhuang J, Nakayama K, Yu G R, et al. Estimation of root water uptake of maize: an ecophysiological perspective. *Field Crops Research*, 2001, 69 (3): 201-203.
- [7] Wang E, Smith C J. Modelling the growth and water uptake function of plant root systems: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2004, 55(5): 501-523.
- [8] Passioura J B. Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell & Environment*, 25(2): 311-318.
- [9] Araki H, Iijima M. Stable isotope analysis of water extraction from subsoil in upland rice (*Oryza sativa* L.) as affected by drought and soil compaction. *Plant and Soil*, 2005, 270(1): 147-157.
- [10] Calmon M A, Batchelor W D, Jones J W, Ritchie J T, Boote K J, Hamind L C. Simulating soybean root growth and soil water extraction using a functional crop model. *Transactions of the ASAE*, 1999, 42: 1867-1877.
- [11] Dardanelli J L, Calmon M A, Jones J W, Andriani J M, Diaz M P, Collino D J. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three Argentine soils. *Transactions of the ASABE*, 2003, 46(4): 1265-1275.
- [12] Angadi S V, Entz M H. Root system and water use patterns of different height sunflower cultivars. *Agronomy Journal*, 2002, 94(1): 136-145.
- [13] Moroke T S, Schwartz R C, Brown K W, Juo A S R. Soil water depletion and root distribution of three dryland crops. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 197-205.
- [14] Bruckler L, Lafolie F, Doussan C, Bussieres F. Modeling soil-root water transport with non-uniform water supply and heterogeneous root distribution. *Plant and Soil*, 2004, 260(1/2): 205-224.
- [15] Hao X, Zhang R, Kravchenko A. Effects of root density distribution models on root water uptake and water flow under irrigation. *Soil Science*, 2005, 170(3): 167-174.
- [16] Calmon M A, Batchelor W D, Jones J W, Ritchie J T, Boote K J, Hammond L C. Simulating soybean root growth and soil water extraction using a functional crop model. *Transactions of the ASAE*, 1999, 42(6): 1867-1878.
- [17] Wang E, Smith C J. Modelling the growth and water uptake function of plant root systems: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2004, 55(5): 501-523.
- [18] Guswa A J. Soil-moisture limits on plant uptake: an upscaled relationship for water-limited ecosystems. *Advances in Water Resources*, 2005, 28 (6): 543-552.
- [19] 王小林, 张岁岐, 王淑庆. 不同密度下品种间作对玉米水分平衡的影响. *中国生态农业学报*, 2013, 21(2): 171-178.
- [20] 李彩霞, 孙景生, 周新国, 邱新强, 刘祖贵, 强小媛, 郭冬冬. 隔沟交替灌溉条件下玉米根系形态性状及结构分布. *生态学报*, 2011, 31 (14): 3956-3963.
- [21] Feddes R A, Kabat P, Van Bakel P J T, Bronswijk J J B, Halbertsma J. Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone-state of the art. *Journal Hydrology*, 1988, 100(1): 69-111.
- [22] 李运生, 王菱, 刘士平, 王吉顺. 土壤-根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响. *生态学报*, 2002, 22(10): 1680-1687.
- [23] 杨启良, 张富仓, 刘小刚, 戈振扬. 沟灌方式和水氮对玉米产量与水分传导的影响. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 15-21.
- [24] 杨启良, 张富仓, 刘小刚, 王玺, 张楠, 戈振扬. 植物水分传输过程中的调控机制研究进展. *生态学报*, 2011, 31(15): 4427-4436.
- [25] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [26] Graham E A, Nobel P S. Root water uptake, leaf water storage and gas exchange of a desert succulent: implications for root system redundancy. *Annals of Botany*, 1999, 84(2): 213-223.