文章编号:1000-7601(2018)01-0156-08

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2018.01.24

东北春玉米不同发育期干旱胁迫 对根系生长的影响

陈鹏狮¹,纪瑞鹏²,谢艳兵²,史奎桥³,杨 扬³,张 慧³,蔡 福² (1.辽宁省气象科学研究所,辽宁沈阳 110166; 2.中国气象局沈阳大气环境研究所,辽宁沈阳 110166; 3.锦州市生态与农业气象中心,辽宁 锦州 121001)

摘 要:分别在玉米拔节期(BJ)和抽雄期(CX)进行水分胁迫试验,利用微根管技术观测不同发育期干旱过程 中根分布动态,并利用根分布模型模拟相关参数(d₅₀和 d₉₅:累积根比例分别为 50%和 95%的土层深度),对不同干 旱胁迫处理的土壤湿度、根系分布及相关参数时空动态特征进行分析。结果表明:水分控制后的土壤湿度在 130 cm以上基本达到预期干旱效果,即 BJ和 CX处理在控水时段 0~100 cm 土层土壤相对湿度都降至 40%以下,但深 层土壤湿度并未受到水分控制影响;拔节和抽雄期干旱胁迫条件下,根长密度(RLD)最大值分别为 2.18±0.89 cm·cm⁻³和 2.10±0.47 cm·cm⁻³,所在土壤深度为 60 cm,对照(CK) RLD 最大值为 1.24±0.77 cm·cm⁻³,所在深度为 40 cm,CK和 BJ处理的 RLD 在最大值深度以下随土层深度增加而减小,CX处理的 RLD 在 80 cm 以下仍保持较大值; BJ和 CX 比 CK 的 d₅₀分别增大 45%和 59%, d₉₅分别增大 8%和 41%,证明玉米根系因干旱胁迫而向深层土壤生长。

关键词:东北春玉米;干旱胁迫;根系分布;拔节期;抽雄期;根长密度

中图分类号: S513 文献标志码: A

Effects of drought stresses during key growth periods on root growth of spring maize in Northeast China

CHEN Peng-shi¹, JI Rui-peng², XIE Yan-bing², SHI Kui-qiao³, YANG Yang³, ZHANG Hui³, CAI Fu²

(1. Liaoning Institute of Meteorological Science, Shenyang 110166, China;

2. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China;

3. Jinzhou Ecological and Agricultural Meteorology Center, Jinzhou 121001, China)

Abstract: To investigate the effects of drought stress during growing periods on root distribution (RD) of spring maize during the jointing (BJ) and tasseling (CX) stages of maize, the root length densities (RLDs) at different soil depths during the corresponding growth periods were dynamically measured with the minirhizotron method, and the parameters d_{50} and d_{95} related to RD representing respectively the soil depths where cumulative root fraction are 50% and 95% were simulated using root distribution model, and then spatio-temporal characteristics of soil relative water contents (SWC), RDs and theirs parameters were analyzed. The results showed that after water stress, actual SWC was basically consistent with the expectant condition though there were some differences between the two. More specifically, the SWC above the soil depth of 130 cm basically achieved the intended result, that is, the SWCs above the soil depth of 100 cm for the BJ and CX treatments were respectively below 40%. Conversely, the SWCs in the deeper soil layers were not impacted by water stress and still kept suitable soil water conditions. In addition, the maximums of RLDs were 1.24 ± 0.77 cm⁻cm⁻³ at the depth of 40 cm for the CK treatment and 2.18 ± 0.89 cm^{-cm⁻³} and 2.10 ± 0.47 cm^{-cm⁻³} at the depth of 40 cm for the CK treatment and 2.18 ± 0.89 cm^{-cm⁻³} and 2.10 ± 0.47 cm^{-cm⁻³} at the depth of 40 cm for the CK treatment and 2.18 ± 0.89 cm⁻³ and 2.9%, 8% and 41% larger than those of the CK treatment respectively, which proved that the maize root will grow to deeper soil layers when suffering

收稿日期:2016-09-30 修回日期:2017-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41775110);辽宁省气象局博士启动项目(D201504);辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划项 目(2015060)

作者简介:陈鹏狮(1972-),男,山西运城人,副研究员,本科,主要从事农业气象科研及服务工作。E-mail:Cps55@163.com。

通信作者:蔡 福(1980—),男,辽宁海城人,副研究员,博士,研究方向为农业气象、陆面过程及作物模型。E-mail: caifu_80@163. com。

drought stress relative to normal condition. In conclusion, this study can offer a reference for optimizing the root water uptake parameterization schemes in land surface, ecological and crop growth models.

Keywords: spring maize in northeast China; drought stress; root distribution; jointing stage; tasseling stage; root length density

根系是植物实现土壤与大气间水分和能量交换 的重要通路^[1],通过吸水过程调控土壤水分向蒸发、 蒸腾及渗透的分配^[2-3],在生态、水文、陆面及作物 模型中对水热通量模拟起到重要作用。根的分布影 响不同土壤深度根系吸水的分布^[4],是生态、水文、 陆面等各类模型的重要输入^[5]。虽然根分布非常重 要,但由于全根观测的困难使得可用数据非常缺 乏^[6],而不同水分条件下根分布的观测研究更鲜有 报道。植物根系动态监测方法已有很多,主要有田 间直接取样方法,如挖掘法、整段标本法、土钻法、剖 面法等;直接观察法,如装有玻璃壁的剖面、根系室、 微根管观测、分根移位法等;间接观测方法,如土壤 水含量的变化法、染色技术法、非放射性示踪物吸收 法、放射性示踪法、土壤注射法、植株注射法、同位素 测定法等^[7],其中微根管技术有明显优势^[8-9],与大 型根剖面系统相结合,可准确定位跟踪植物根系在 土壤中生长动态变化,对植物根系生长研究有较好的 推广应用价值^[10]。刘晶淼等^[9]和廖荣伟等^[10]利用微 根管技术对玉米根系进行观测,认为该方法对真实反 映玉米根系分布具有很好的适用性。现有主流陆面 过程模型中根分布模型主要有三种,第一种为累积根 比例与土壤深度的指数关系模型^[11],应用于 NCAR LSM^[12]、IBIS^[13]、DGVM^[14]和 SIB^[15]模型中。第二种是 双参数指数模型^[16],在 CLM3^[17]和 CLM4.5^[18]模型中 应用。第三种由 Schenk and Jackon^[19]提出,除了考虑 累积根比例与土壤深度之外,增加了50%和95%累 积根总量土层深度参数(d50和 d95),使用该方案的代 表性陆面模型为 CoLM 模型^[20]。蔡福等^[21]利用玉米 根生物量资料对上述三种根分布模型进行比较,认为 Schenk and Jackon^[19]模型更适合玉米根分布的模拟, 且 d50和 d95参数具有实际物理含义,对于描述玉米根 系分布具有重要指示意义。

玉米作为种植面积最广的作物之一,整个生育 期对水分都十分敏感,干旱是影响玉米生长发育和 产量最主要的灾害^[22],一般可减产 20% ~ 30%^[23], 甚至达到 40% ~ 50%^[24]。干旱胁迫对产量的影响 不但取决于其严重程度,还取决所处玉米的生长阶 段^[25]。大量学者通过在玉米关键发育期进行水分 胁迫来研究其主要生理过程对干旱的响应规 律^[26-27],而开展干旱胁迫下玉米根分布特征研究 将为阐明玉米耗水过程机制提供重要参考,但目前 仅有少量学者开展此项研究。东北地区是我国春玉 米主产区,玉米播种面积约占全国的26.6%,年产 量占全国的30%,在我国的粮食生产中占据重要地 位^[28-29]。20世纪90年代以来,该地区春旱和春夏 连旱发生频繁,玉米生产受到严重影响^[30-31]。有 学者研究^[32]认为,到21世纪中期,东北春玉米缺水 率仍呈增加趋势,表明干旱对玉米生产影响将进一 步加剧,因此,从机理上阐明干旱对东北春玉米生产 的影响十分必要,将对合理指导玉米生产防灾减灾 进而稳定产量具有重要意义,而开展东北春玉米根 系对干旱胁迫的响应研究将为此提供重要参考。

本研究在锦州大型干旱胁迫试验观测场通过在 玉米不同发育期开展干旱胁迫试验,研究玉米根分 布对干旱的响应规律,旨在为阐明东北春玉米不同 水分限制条件下耗水机制提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究地概况及试验设计

试验于 2012 年在锦州市生态与农业气象中心 大型干旱胁迫试验场(41°49′N,121°12′E,海拔 17 m) 进行,所在区域属典型温带季风型气候区,年平均气 温9.5℃,1月平均气温-8.0℃,7月平均气温 24.4℃,年降水量 565.9 mm,主要作物玉米的生育 期为5-9月,土壤为典型棕壤。试验场内建有3m ×5 m 的试验小区 15 个,为防止小区之间相互渗 水,采用水泥层进行隔离,利用移动遮雨棚遮挡自然 降水,通过人工控水和补水的方式形成不同干旱胁 迫条件^[33]。选用玉米品种丹玉 39 为供试材料,行 距 50 cm,株距 35 cm,种植密度 5.7 株·m⁻²。发育 期观测结果见表1。试验设对照(CK)、拔节期(拔节 ~ 吐丝, BJ)和抽雄期(抽雄~乳熟, CX)水分胁迫3 个处理,每个处理3次重复,CK 在全生育期内保证 土壤水分适宜,即土壤相对湿度(0~60 cm 土壤湿 度)控制在(75% ± 5%)之内,田间持水量(0~60 cm)为22%;BJ处理在拔节~吐丝期控水,土壤相对 湿度控制到萎蔫湿度(土壤相对湿度为29%);CX 在抽雄~乳熟期控水,土壤相对湿度下降至凋萎湿 度(土壤相对湿度为29%);各处理控水结束后,复 水到适宜土壤相对湿度75%±5%。上述处理仅是理 想预期的控水方式,由于控水过程中试验场地及灌水 误差等原因,实际土壤湿度以观测为准。补水量采用 以下公式求得:

$$\Delta D_w = 1000 \times \sum_{i=1}^{n} \left[h_i \times \rho_i (a\theta_{f_i - \theta_i}) \right]$$

式中, ΔD_w 为补水量(mm); h_i 为第 i 层土层厚度 (m); ρ_i 为第 i 层土壤容重(g·cm⁻³);a 为参考土壤 相对湿度,对照试验为75%; θ_{fi} 为第*i* 层土壤田间持 水量(g・g⁻¹); θ_i 为第*i* 层土壤重量含水量(g・g⁻¹); *n* 为土壤层数,观测土壤湿度每10 cm 为1层,本试 验中 *n* = 6。

表	1	玉米生育			期		
Tabla 1	C.	anth	atama	of			

Table 1 Orowin stage of maize											
项目 Items	播种 Sowing	出苗 Emergence	三叶 Three leaf	七叶 Seven leaf	拔节 Jointing	抽雄 Tasseling	乳熟 Milk	成熟 Mature			
日期 Date(M-d)	04 - 30	05 – 10	05 – 13	05 - 30	06 – 17	07 – 14	08 - 18	09 - 25			
日序 Day of year	121	131	134	151	169	196	231	269			

1.2 观测项目

土壤湿度观测:利用时域反射仪(德国产 TRIME - IPH)每隔 3 天分 9 层(每层 20 cm)测定土壤体积 含水量,通过换算得到土壤相对湿度(Wr),根据土 壤湿度实测值确定补水量,进而实现土壤湿度的定 量控制。根据《农业干旱等级》^[34]国家标准,壤土 50%≤Wr < 60%为轻度干旱,40%≤Wr < 50%为中 度干旱,30%≤Wr < 40%为重度干旱。

玉米根系观测:在不同处理的小区中垂直埋下 深度为140 cm的玻璃管,利用自主研发的植物根系 生长监测系统 SYIAE - 01(CCD 原理)1/4 英寸 CCD 的摄像头(像素 30 万)在同一深度土层通过平移旋 转拍照实现根长密度(RLD)的观测,观测深度间隔 为20 cm。观测从玉米拔节期开始,每7天进行一 次。具体方法和原理参见廖荣伟^[7]的研究。

1.3 研究方法

本研究采用 Schenk and Jackon 根分布模型对不 同深度 RLD 进行拟合,表达式为:

$$F_{root}(z) = \frac{1}{1 + \left(\frac{z}{d_{50}}\right)^c}$$
(1)

$$c = \frac{-1.27875}{(\lg d_{95} - \lg d_{50})} \tag{2}$$

式中,z为土壤深度(m);F_{root}(z)为z深度以上的累积根比例,可以通过根长密度或根生物量计算该值^[19];c是决定根分布廓线形态的参数,由式(2)求得,这里的廓线是指某层土壤深度以上累积 RLD占观测深度总 RLD 的比例随土壤深度变化的曲线;d₅₀和 d₉₅分别是累积根比例为50%和95%时的土壤深度(m),它们分别反映根在土层中的集中位置和最大根深。利用不同深度 RLD 可以计算得到每层土壤中根系占总根系的比例,然后进行累加可得到不同土层深度以上累积根比例,把累积根比例和对应层次的深度代入式(1)和式(2)中,运用最小二乘法回

归拟合求得 d50 和 d95 两个参数。

2 结果与分析

2.1 不同干旱处理土壤湿度(Wr)时空分布

图 1 给出不同深度 Wr 随时间变化的分布,从 CK 处理来看,拔节前 20~40 cm 土层 Wr 为 50%~ 55%,属于轻度干旱状态,土壤湿度随深度的增加而 增大;抽雄前后 20~40 cm 深度土壤出现 Wr 为 40% ~50%的轻、中度干旱,而在 8 月上中旬出现 40%以 下的重度干旱。60 cm 土层以下 Wr 一般都在 50% 以上。从整个生育期来看,130 cm 以下 Wr 都在 70%以上。

BJ 处理中,从拔节前一周开始,40 cm 以上土壤 达到轻、中度干旱状态,直至乳熟前 120 cm 以上深 度都处于干旱状态,其中 90 cm 以上深度达到重度 干旱水平,从日序 224 开始在补水作用下 40 cm 以 上深度土壤出现短暂的 Wr 恢复期,但在 60 cm 以下 土壤仍持续处于轻、中度干旱水平。尽管玉米处于 持续干旱状态,但 130 cm 以下的深层土壤仍处于适 宜状态。CX 处理从拔节后一周开始出现轻、中度干 旱,之后干旱土壤深度及强度都不断增加,时空分布 以重度干旱为主,乳熟前在补水的作用下虽然表层 干旱有所缓解,但深层土壤干旱一直持续到生育期 结束。

2.2 不同干旱处理根系垂直分布

由于不同试验处理中用于根系观测的玻璃管埋 设位置与玉米植株的水平距离不同,因此观测得到 的 RLD 的数值在各处理之间存在差异,但这不会影 响同一处理不同深度 RLD 比例的计算,即不同处理 之间累积根比例的对比不受影响。从拔节至抽雄期 间平均 RLD 的分布情况来看(图 2),CK 处理最大 RLD 处于 40 cm 土层深度,达 1.24 ± 0.77 cm · cm⁻³, 且变异性最大,RLD 及其变异性随土壤深度增加而 减小。



(a) CK

(b) BJ





Note: BJ - drought stress during jointing stage, CX - drought stress during tasseling stage; the same below.

图 1 不同水分胁迫处理土壤湿度时空分布

Fig.1 Spatial-temporal patterns of soil water content under different water treatment conditions





BJ 处理根系主要分布在 40~100 cm 土层深度, 60 cm 深度处 RLD 最大,为 2.18±0.89 cm·cm⁻³,其 次是 80~100 cm,40 cm 略小于上述 2 个层次。在 60 cm 深度以下 RLD 随深度增加而减小。40 cm 和 60 cm 深度处变异性最大,分别为 0.79 cm·cm⁻³和 0.89 cm·cm⁻³。CX 处理 RLD 高值区分布在 60~100 cm 深度,最大值出现在 60 cm 深度,为 2.10±0.47 cm·cm⁻³,但 100 cm 深度以下仍保持较大的数值,为 1.08±0.44 cm·cm⁻³。综合来看,两个干旱处理 RLD 最大值都出现在 60 cm 深度,说明不同发育期 干旱都会促进根系向更深层土壤生长。

为更清晰反映各层 RLD 对不同干旱处理的响 应,对40、60 cm 和80 cm 土壤深度 RLD 动态特征进 行分析。由图 3 可见, CK 处理 40 cm 深度 RLD 明显 高于 60、80 cm 土层,且最大值出现在抽雄期,8 月 8 日(日序 221)明显减小,从图 1 可以看出,当时对应 的土壤湿度明显低于其它时期,说明干旱胁迫抑制 根系生长。60 cm 深度 RLD 在整个生育期都大于 80 cm 深度,表明玉米根系随土层深度的增加而减小。 在8月22日以后, RLD 明显减小, 可能是由植株衰 老枯萎引起。BJ处理中,40 cm 土层 RLD 除拔节后 10天(6月27日)大于其它两土层外,其它时段一直 偏小。60 cm 深度 RLD 在 7 月 4 日以后一直比其它 两土层偏大,最大值出现在抽雄期(7月14日),这 与土壤湿度较高有关,之后随着干旱的持续加重 RLD 快速减小,在8月1-8日(日序213-221),土 壤处于重度干旱状态,此时 RLD 达到整个发育期的

最小值,到8月15日(日序228), RLD 明显增大,然 后随着土壤湿度的不断减小, RLD 再次减小。80 cm 深度 RLD 在整个生育期内都明显高于 40 cm 处, 且 随着干旱的持续二者差异增大,在生育末期差异减 小。与CK相比, BJ处理整个根层深度明显增加。 CX 处理中,6月27日3个层次 RLD 差异很小,7月 4日60 cm 深度处 RLD 开始明显大于其它两土层, 此时 40 cm 深度以上土壤已经处于中度干旱状态, 可能是导致主根区向下发展的原因。此时 40 cm 处 RLD仍明显大于80 cm处,分析其原因认为,玉米植 株处于拔节阶段,大部分根系还没向更深处生长,加 之40~60 cm 深度土层刚刚出现干旱,根系生长还 未明显受到影响。从7月14日至8月1日,40~60 cm 处 RLD 都呈下降趋势, 而 80 cm 土层 RLD 则有 所增大,说明主根区不断向下移动。到8月8日,40 cm 处 RLD 继续下降, 80 cm RLD 仍有所增加, 而 60 cm处 RLD 也有所增大,这可能是由于 80 cm 深度 RLD 增大导致根系吸水能力增强,因 120 cm 以下土 壤湿度处于适宜状态,意味着根系能够充分吸收水 分,有研究表明,根系具有水分再分配作用^[4],即根 系可把从水分充足区域吸收的水分分配到更干区域 的根系,来保证根系正常生长,这种机制可能是本研 究中 60 cm 处根系在持续干旱后还能保持 RLD 增加 的原因。但随着干旱的持续,根系的水分再分配作用 不断减弱,导致8月15-22日60~80 cm处 RLD减 小。8月29日,在复水的作用下,40~60 cm 处 RLD 开始增大,而 80 cm RLD 则因为植株衰老而减小。





Fig.3 Dynamics of RLD at different soil depths with time under different water treatment conditions

2.3 不同水分处理根系垂直分布模拟

图 4 给出玉米不同发育期干旱胁迫下两个根分 布参数对比情况。就 d50而言,CK 的 d50和 d95都不 同程度小于 BJ 和 CX,分别为 0.44 m、0.64 m、0.70 m和1.31 cm、1.41 cm、1.85 cm,说明对照处理玉米 根系主要根区深度比干旱胁迫处理明显偏小,意味 着浅层土壤水分可以满足植株生长需要,而干旱处 理的植株为了吸收水分而使主根区向深层土壤伸 展。BJ和CX处理的情况略有不同,表现为前者的 d50值略小于后者,说明拔节期遭遇干旱会使玉米主 根区略浅于抽雄期干旱,造成这一情况的原因很可 能是前者玉米遭受干旱过早,即使植株根系表现出 向深层土壤吸水的自适应性,但由于较长时间的干 旱使根系生长能力下降,相比之下,抽雄以后遭遇干 旱使玉米有充分时间在适宜的土壤湿度条件下伸展 根系,在遇到干旱胁迫后植株的自适应性进一步促 进根系生长。利用 d50和 d95的平均值带入式(1)和 式(2)可模拟出不同水分处理玉米根系垂直廓线(图 5),可以看出,不同深度累积根比例 CK > BJ > CX, 更为直观地反映出不同发育期干旱胁迫对根系影响 的差异,即干旱使主根区向深层土壤移动,其中抽雄 期干旱胁迫使根系向更深土层生长。









图 5 不同水分处理垂直根廓线拟合



3 讨 论

关于玉米干旱胁迫的研究很多,但多数研究中 仅给出土壤水分控制的理想状态,一般不同干旱处 理都没有对应的连续观测数据进行验证,这将导致 实际土壤湿度与预期不一致,甚至存在很大差异,进 而导致试验结论与实际情况不符。为此,本研究对 设置的水分控制试验进行全程土壤湿度观测,以确 保试验结论与真实情况相对应。从实测土壤湿度随 不同土壤深度及时间动态变化情况看,对照处理的 实际情况与预期存在差异,个别时段 40 cm 深度以 上土层出现不同程度的干旱,说明根据0~60 cm 土 层厚度换算补水量进行定期补水不能保证土壤湿度 达到适宜水平,60 cm 以下的深层土壤湿度基本都 处于轻度干旱以上水平,从植株形态上看,没有因上 层土壤偏干而出现受胁迫的现象,说明对照处理土 壤湿度能够保证玉米正常生长。拔节期干旱胁迫处 理土壤湿度基本达到预期效果,100 cm 深度以上土 层达到中重度干旱水平,但补水后仅能改善 50 cm 以上土壤湿度。抽雄期干旱胁迫处理干旱程度较预 期偏重。不同处理之间一个共同的特点是 130 cm 以下土壤都处于适宜状态,这一现象与大田不同,因 为池栽试验每个池子四周采用水泥层防水处理,使 得池中土壤水分不能向水平方向扩散,这也是干旱 胁迫池栽试验共同问题。通过根分布模拟发现,玉 米最大根深接近2m,意味着玉米下层根系可以吸 收到充分的水分,而实际上植株还是受到干旱的胁 迫,表明当绝大部分根系处于干旱环境而仅少部分 根系在适宜的土壤湿度条件下时,玉米植株仍受到 干旱胁迫,因此,植株是否受到干旱影响与遭受干旱 胁迫根系比例有关,并非有根系可以充分吸水就能 使植株免受胁迫。

已有研究表明,干旱胁迫会抑制玉米根系的生长,无论是根干物质还是根系吸收面积都不同程度减少^[35],但关于干旱胁迫对根系分布的研究还鲜有报道。利用现有主流陆面模型中的根分布模型对累积根比例为50%和95%的参数 d₅₀和 d₉₅拟合发现,拔节期和抽雄期干旱胁迫使 d₅₀和 d₉₅不同程度增大,进一步说明玉米根系主根区因干旱胁迫会向土 壤深层生长,最大根深也随之增大。不同水分处理条件下的两个参数与蔡福等^[21]研究结果(0.15~0.17 m和 0.40~0.80 m)和现有陆面模型^[20]中(0.157 m和 0.808 m)数值有较大差异,其原因一方 面是蔡福等^[21]研究中所用资料为根生物量数据,可 能与根长密度在反映根分布上存在差异,另一方面 是所用资料仅为1m深度,忽略了更深层次细根的 分布。本研究中两个参数为利用多次观测资料拟合 得到,具有较高的可信度。蔡福等^[36]研究认为,玉 米农田水热通量模拟精度对参数 d₅₀具有较高的敏 感性,而现有很多陆面模型中该参数明显小于实测 值,这将直接导致水热通量模拟不准确。本研究通 过实际观测资料给出真实的玉米根分布相关参数, 可为陆面模型、作物模型及生态水文模型等模型参 数优化提供参考。

4 结 论

本研究分别在玉米拔节期和抽雄期进行水分胁 迫试验,利用微根管技术观测不同发育期干旱过程 中根分布动态,并利用根分布模型模拟相关参数,对 不同干旱胁迫处理的土壤湿度、根系分布及相关参 数特征进行分析,得出以下结论:1)正常供水条件 下,玉米最大根长密度所处深度为40 cm,随土层深 度增加而减小;发育期内根长密度在抽雄期达最大, 且直到乳熟期都保持较大数值。2) 某层土壤中根 长密度会因干旱胁迫而明显减小,迫使根系向深层 土壤生长;拔节期和抽雄期干旱胁迫根长密度最大 值都出现在 60 cm 深度,在该深度以下,拔节期根长 密度随土壤深度增加而减小,抽雄期根长密度虽然 在 80 cm 深度有所减小,但在该层以下仍保持较大 数值:在整个生育期,最大根长密度出现在抽雄期, 补水促进根系的生长。3)利用现有主流陆面模型 中的根分布模型对累积根比例为 50% 和 95% 的参 数 d50和 d95 拟合发现,拔节期和抽雄期干旱胁迫使 d50分别增大45%和59%,而使 d95分别增大8%和 41%,进一步说明玉米根系主根区因于旱胁迫会向 土壤深层生长,最大根深增大。发育期之间根系对 干旱胁迫的响应存在差异,抽雄期干旱胁迫比拔节 期干旱胁迫对根分布影响更大。

参考文献:

- Feddes R A, Hoff H, Bruen M, et al. Modeling root water uptake in hydrological and climate models[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001,82(12);2797-2809.
- [2] Dickinson R E, Shaikh M, Bryant R, et al. Interactive canopies for a climate model[J]. Journal of Climate, 1998,11:2823-2836.
- [3] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. Ecological Appli-

cations, 2000, 10:423-436.

- [4] Zheng Z, Wang G L. Modeling the dynamic root water uptake and its hydrological impact at the reserve Jaru site in Amazonia[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(G4):G0412.
- [5] Maayar M E, Oliver S. Crop model validation and sensitivity to climate change scenarios[J]. Climate research, 2009,39:47-59.
- [6] Jing C Q, Li L, Chen X, et al. Comparison of root water uptake functions to simulate surface energy fluxes within a deep – rooted desert shrub ecosystem[J]. Hydrological processes, 2013,28:5436-5449.
- [7] 廖荣伟.作物根系观测技术与方法研究[D].北京:中国气象科 学研究院,2008.
- [8] 张志山,李新荣,张景光,等.用 Minirhizotron 观测柠条根系生长 动态[J].植物生态学报,2006,30(3):457-464.
- [9] 刘晶淼,安顺清,廖荣伟,等.玉米根系在土壤剖面中的分布研 究[J].中国生态农业学报,2009,17(3):517-521.
- [10] 廖荣伟,刘晶森,安顺清,等.基于微根管技术的玉米根系生长 监测[J].农业工程学报,2010,26(10):156-161.
- [11] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. Oecologia, 1996, 108: 389-411.
- [12] Bonan GB. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: technical description and user's guide[R]. NCAR Tech. Note, NCAR/TN – 4171STR. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research, 1996.
- [13] Peter K S, Foley J A, Hitchman M H, et al. Analyzing the effects of complete tropical forest removal on the regional climate using a detailed three-dimensional energy budget: an application to Africa[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(D21); D21102.
- [14] Levis S, Bonan G B, Vertenstein M, et al. The Community Land Models dynamic global vegetation model (CLM – DGVM): technical description and user's guide[R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN – 459 + IA. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research, 2004.
- [15] Baker I T, Prihodko L, Denning A S, et al. Seasonal drought stress in the Amazon: Reconciling models and observations[J]. Journal of Geophysical Research, 2008,113: G00B01.
- [16] Zeng X B. Global vegetation root distribution for lang modeling[J]. American Meteorological Society, 2001,2(5):525-530.
- [17] Oleson K W, Dai Y J, Bonan G, et al. Technical Description of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR Tech. Note, NCAR/ TN461 + STR. Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research, 2004.
- [18] Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. Technical Description of version 4.5 of the Community Land Model(CLM)[R]. NCAR Tech. Note, NCAR/TN503 + TR, Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research, 2013.
- [19] Schenk H J, Jackson R B. The global biogeography of roots[J]. Ecological Monographes, 2002,72(3):311-328.
- [20] Ji D Y, Dai Y J. The common land model(CoLM) technical guide[R]. Beijing: Beijing Normal University, 2008.
- [21] 蔡 福,明惠青,祝新宇,等.玉米根分布模拟方法比较[J].生

态学杂志,2015,34(2):582-588.

- [22] 蔡 福,米 娜,纪瑞鹏,等.关键生育阶段持续干旱对东北春 玉米光合特性的影响[J].生态学杂志,2017,36(6):1578-1589.
- [23] 齐 伟,张吉旺,王空军,等.干旱胁迫对不同耐旱性玉米杂交
 种产量和根系生理特性的影响[J].应用生态学报,2010,21
 (1):48-52.
- [24] 米 娜,蔡 福,张玉书,等.不同生育期持续干旱对玉米的影响及其与减产率的定量关系[J].应用生态学报,2017,28(5): 1563-1570.
- [25] 纪瑞鹏,车宇胜,朱永宁,等.干旱对东北春玉米生长发育和产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(11):3021-3026.
- [26] 刘庚山,郭安红,任三学,等.夏玉米苗期有限水分胁迫拔节期 复水的补偿效应[J].生态学杂志,2004,23(3):24-29.
- [27] 马树庆,王 琪,陈凤涛,等.春旱背景下春玉米苗情对产量的 影响及减产评估模式[J].农业工程学报,2015,31(S1):171-179.
- [28] Cheng Z Q, Meng J H, Wang Y M. Improving spring maize yield estimation at field scale by assimilating time – series hj – 1 ccd data into the wofost model using a new method with fast algorithms[J]. Remote Sensing, 2016,8(4):303.

- [29] 赵 锦,杨晓光,刘志娟,等.全球气候变暖对中国种植制度的可能影响X.气候变化对东北三省春玉米气候适宜性的影响 [J].中国农业科学,2014,47(16):3143-3156.
- [30] 张建平,王春乙,杨晓光,等.温度导致的我国东北三省玉米产 量波动模拟[J].生态学报,2009,29(10):5516-5522.
- [31] 刘 实,王 勇,缪启龙,等.近50年东北地区热量资源变化 特征[J].应用气象学报,2010,21(3):266-278.
- [32] 刘志娟,杨晓光,王文峰,等.全球气候变暖对中国种植制度可 能影响Ⅳ.未来气候变暖对东北三省春玉米种植北界的可能 影响[J].中国农业科学,2010,43(11):2280-2291.
- [33] 于文颖,纪瑞鹏,冯 锐,等.不同生育期玉米叶片光合特性及 水分利用效率对水分胁迫的响应[J].生态学报,2015,35(9): 2902-2909.
- [34] 吕厚荃,张玉书,李茂松,等.GB/T 32136-2015.农业干旱等级 [S].北京:中国标准出版社,2015.
- [35] 韩希英,宋凤斌.干旱胁迫对玉米根系生长及根际养分的影响 [J].水土保持学报,2006,20(3):170-172.
- [36] 蔡 福,明惠青,米 娜,等.基于 CoLM 模型的根分布对陆 -气水热交换的影响研究:以玉米农田为例[J].气象学报, 2015,73(3):566-576.

- (上接第120页)
- [21] 李丁仁,张振海,王永宏,等.宁夏小麦、水稻、玉米高产栽培技 术[M].银川:宁夏人民出版社,2012:19.
- [22] 刘 涛,周广胜,谭凯炎,等.华北地区冬小麦灌溉制度机器环 境效应研究进展[J].生态学报,2016,36(19):1-8.
- [23] 赵丽英,邓西平,山 仑.水分亏缺下作物补偿效应类型及机 制研究概述[J].应用生态学报,2004,15(3):523-526.
- [24] 杨静敬,卢振广,潘国强,等.亏缺灌溉对冬小麦耗水规律及产量的影响[J].节水灌溉,2013,(4):8-11.
- [25] 李红梅,李志宏,韩湘玲.冬小麦降水年型与补水灌溉动态管 理[J].灌溉排水,2001,20(1):60-64.
- [26] 张建军,唐小明,党 翼.灌水量及其分配方式对冬小麦水分 李龙效率、光合特性和产量的影响[J].麦类作物学报,2008,28 (1):85-90.
- [27] 肖俊夫,刘战东,段爱旺,等.不同灌水处理对冬小麦产量和水 分利用效率的影响研究[J].灌溉排水学报,2006,25(2):20-23.

- [28] 张崇智.西安市主要作物节水灌溉制度研究[J].干旱地区农 业研究,2005,23(3):150-153.
- [29] 韩绍林.旱作农业与河南旱地小麦栽培[M].郑州:河南水利 出版社,2010:171.
- [30] 王文佳,冯 浩.基于 CROPWAT-DSSAT 关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究[J].中国生态农业学报,2012,20(6): 795-802.
- [31] 张英普,何武全,韩 健.玉米不同生育期水分胁迫指标[J]. 灌溉排水,2001,20(4):18-20.
- [32] 东先旺,刘培利,刘树堂,等.夏玉米耗水特性与灌水指标的研 究[J].玉米科学,1997,2(16):55-57.
- [33] 王辛未.谈玉米灌溉[J].陕西水利,1989,(4):28-30.
- [34] 吕军杰,王聪慧,丁志强,等.豫西夏玉米不同灌水方式研究 [J].河南农业科学,2006,(11):31-32.
- [35] 陈 丹,钟思强.农业气象[M].北京:气象出版社,2009:180-182.