

膜下滴灌不同灌水定额对玉米根系生长的影响

徐宝山¹, 贾生海¹, 雒天峰², 金建新¹

(1. 甘肃农业大学 工学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省水利科学研究院, 兰州 730000)

摘 要:玉米根系的分布特征受多种因素的制约,其中影响最大的有土壤水分和生育期阶段等,通过分析不同灌水处理条件下,不同生育期,土壤深度与根长密度和根重密度的关系,研究膜下滴灌玉米各生育期根系在不同灌水定额处理下的分布规律,利用大田代表植株挖根试验得到的实测数据进行根长密度和根重密度计算。结果表明:根长在表层土壤中,随着水分的胁迫减轻,呈现增大趋势,深层反之,而且最大根深出现在 80 cm 处,在大喇叭期,处理 1 在 20 cm 土层根长密度最小(77.27 mm/cm³),处理 9 最大(143.31 mm/cm³),在 40 cm 土层,处理 8 的根长密度最小(16.11 mm/cm³),处理 1 最大(24.89 mm/cm³)。根重密度与根长密度的规律基本一致,水分胁迫能促进根系向下伸长,在玉米拔节期,处理 1 在 20 cm 以上土层根干重仅占总根干重的 67.9%,而处理 9 在 20 cm 则达到了 90.2%。随着生育期的推进,表层根重密度随灌水量增大而增大,在大喇叭期,处理 1 的根重密度为 8.16×10^{-4} g/cm³,处理 7 为 2.358×10^{-3} g/cm³。水分胁迫使得根系深扎吸取水分来补偿亏缺,并且根变得较细较小,这说明根系自身会做出水分适应性环境调整,以达到重要机制的平衡。

关键词:膜下滴灌;玉米根系;分布规律;土壤水分

中图分类号:S513;S275.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)05-0272-05

Effect of Different Drip Irrigation Schedule under Mulch on Root Distribution of Maize

XU Bao-shan¹, JIA Sheng-hai¹, LUO Tian-feng², JIN Jian-xin¹

(1. School of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Research Institute for Water Conservancy, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Distribution of maize roots is affected by many factors which have the greatest impact on soil moisture and growth stage. This paper analyzed the conditions under different irrigation schedules and different growth stages, the relationship of soil depth with the root length density and root weight density, studied the drip irrigation maize roots for different irrigation schedules the root distribution of all growth stages. Root length density and root weight density of representative maize was calculated by using the data measured in field trials. The results showed that the root length presented an increasing trend in the surface soil with the water stress reduction, it was contrary in the deep soil layer, and the maximum roots depth was 80 cm, at the big horn stage, root length density of treatment 1 appeared minimum at 20 cm soil layer (77.27 mm/cm³), treatment 9 appeared maximum (143.31 mm/cm³) in 40 cm soil depth, root length density of treatment 8 was minimum (16.11 mm/cm³), treatment 1 is maximum (24.89 mm/cm³). Root weight density is consistent with the pattern of the root length density, water stress can promote root to stretch to depths, at the jointing stage, proportion of root dry weight to total root dry weight of treatment 1 in 0—20 cm soil layer is only 67.9%, 90.2% for the treatment 9 in 0—20 cm soil layer, with the growth period progresses, the root weight density rose with the increase the irrigation volume in the surface, at the big horn stage, root weight density of treatment 1 is 8.16×10^{-4} g/cm³, treatment 7 is 2.358×10^{-3} g/cm³. Water stress makes roots grow in deep soil to absorb water for compensating the deficiency, but roots will become fine and small.

收稿日期:2013-10-22

修回日期:2013-12-23

资助项目:国家自然科学基金“滴灌条件下土壤—玉米—大气系统水分传输机制与模拟”(51169001)

作者简介:徐宝山(1986—),男,甘肃武威人,在读硕士,研究方向:节水灌溉。E-mail:13609313759@139.com

通信作者:贾生海(1963—),男,甘肃武威人,教授,硕士生导师,主要从事农业水土工程的教学与研究工作。E-mail:jiash@gsau.edu.cn

ler, showing that the roots will make their adaptability to environmental adjustment under water stress and balance the important mechanisms.

Key words: drip irrigation; corn roots; distribution; soil moisture

膜下滴灌是一种滴灌与地上覆膜保温保水相结合的高效节水灌溉方式,由于覆膜技术的使用,阻断了土壤水分与大气之间的直接连续,改变了蒸发体的上边界条件,土壤的蒸发率大大减小,从而起到抑制土面蒸发的作用,也改变了土壤水盐动态变化^[1]。因而,对土壤水分和玉米根系分布产生很大影响,由于根系是玉米吸收水分和养分的最主要器官,故玉米根系分布规律对灌溉水的利用效率以及农田养分的利用起主要作用,也决定着玉米地面生物产量、干物质的积累和生理特性^[2]。因此,研究膜下滴灌条件下玉米根系分布对提高灌溉水利用系数有极其重要的作用。国内外学者对不同种植条件及灌溉制度下作物根系的分布规律做了大量的研究,取得了一系列成果。李少昆等^[3]采用双向切片法对玉米根系在土壤中的分布规律进行了研究,即以植株为中心分别向两侧行间向下切割,每层被切成相同大小的立方体或圆柱体土体,然后将每一层的根系洗净称重,并通过数据线性拟合,分析得出玉米根系在土壤纵向剖面上呈指数分布,横向呈 S 形曲线。Laboskietal 等^[4]试验得出:玉米抽雄期 94% 的根系都分布于地面以下 60 cm 深度范围内,85% 的根系分布于地面以下 30 cm。赵秉强等^[5]提出:间作地膜覆盖早春玉米拔节期根深在 100 cm 左右,大喇叭口期时根深可以达到 140 cm 左右,乳熟期时则达到最大根深 160 cm 左右,而且随着生育进程推进,根量与根重密度基本呈小→大→小变化,并且在垂直土体中呈“T”型分布。王密侠等^[6]通过玉米调亏灌溉试验研究表明:玉米在苗期接受不同程度水分调亏灌溉,根系的数量和长度也出现不同程度的减少和降低,调亏程度越严重,根数和根长减少和减低的也就越大。刘晶森等^[7]采用地下室玻璃窗观测法和方形整段标本法,得出玉米根长、根干重均随土壤深度的增加基本呈递减类型。目前玉米根系分布的研究主要集中在水肥耦合、中耕措施以及种植方式对其的影响^[8-12],在膜下滴灌条件下不同灌水量玉米根系分布规律的研究少有报道。本试验在膜下滴灌条件下研究了玉米根系生长发育规律,通过拟合根长、根重密度曲线得出玉米根系生长动态模型,为沙漠绿洲灌区制定合理的灌溉制度,以及玉米节水和高产、稳产提供理论基础,对完善膜下滴灌技术理论具有重要的科学意义和应用价值,并且对于干旱地区生态环境建设与水资源合理配置提供决策依据^[13]。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在甘肃省水利科学研究院民勤节水农业生态建设试验示范基地进行,地理位置东经 130°05′10″,北纬 38°37′18″。降雨稀少,蒸发量大,风沙多。自然灾害频繁。多年平均气温 7.8℃,极端最高气温 39.5℃,极端最低气温 -27.3℃,多年平均降雨量 110 mm,多年均蒸发量 2 644 mm,日照时数 3 028 h,≥10℃ 积温 3 145℃,>0℃ 积温 3 550℃,无霜期 150 d,最大冻土深 115 cm,试验区土壤物理参数如表 1 所示。

表 1 试验区土壤物理参数

| 土层 深度/cm | 容重/ (g·cm ⁻³) | 田间持 水率/% | 总孔 隙度/% | 饱和含 水率/(mS·cm ⁻¹) | 电导率/ |
|-------------|------------------------------|-------------|------------|----------------------------------|------|
| 0—20 | 1.43 | 21.78 | 42.4 | 31.52 | 3.47 |
| 20—40 | 1.45 | 23.05 | 39.2 | 32.47 | 3.39 |
| 40—60 | 1.39 | 20.17 | 41.3 | 28.91 | 3.46 |
| 60—80 | 1.35 | 16.45 | 46.5 | 26.35 | 2.32 |

1.2 试验处理及测定项目

1.2.1 试验处理 试验采用膜下滴灌灌水,用长流道式滴头供水,滴头流量 0.2 L/s,滴头间距 30 cm,用水表控制水量,试验共设计 9 个灌水处理,灌水定额分别为处理 1:225 m³/hm²,处理 2:270 m³/hm²,处理 3:315m³/hm²,处理 4:360 m³/hm²,处理 5:405 m³/hm²,处理 6:450 m³/hm²,处理 7:495 m³/hm²,处理 8:540 m³/hm²,处理 9:585 m³/hm²,每个处理设置 3 个重复,全生育期总灌水次数为 9 次。每个小区面积 50.4 m²,试验区土壤为砂质黏壤土,且在 70—80 cm 处有砂土夹层,土壤氨态氮含量 15 mg/kg,速效钾 173 mg/kg,土壤有机质含量 13%。灌溉采用的水源为深层地下水,灌水周期为 8 d,在第 3~7次灌水时在首部加肥料罐,每小区随水追施尿素 2 kg,玉米种植模式采用 1 膜 3 行、行距 40 cm,株距 25 cm。

1.2.2 测定项目

(1) 玉米根区土壤水分含量的测定。采用土壤墒情自动监测系统连续测定玉米全生育期内每个小区内 0—120 cm,每 20 cm 一层的土壤含水量动态分布,该仪器是利用土壤中的水和其他介质介电常数之间的差异及时域反射测试技术进行测量。探测器外观呈圆柱体形状(杆式),截面直径 3 cm,高度为 70

cm。杆体 48 cm 段内为感应部分,若将探测器整体垂直埋入土壤中,可以测得该垂线的平均体积含水率,若水平埋入,则测得该水平层的平均体积含水率。这种探测器较探针式等其它探测设备的采集空间范围大、精度高。本试验采取水平放置的办法,在土壤中埋入 6 层,间隔 20 cm,并采用取土烘干称重法对 TDR300 便携式土壤水分速测仪、TRIME-Fm³ 土壤剖面水分速测仪测定的含水量进行校正,并利用自动气象采集系统检测气象资料。张瑞美等^[14]认为土壤相对有效含水量大于 0.75~0.85 时作物不受土壤水分胁迫,本试验根据土壤墒情自动监测系统测得的土壤含水率来判断玉米是否处于水分胁迫状态。

(2) 玉米根长及干重测定。分别在玉米拔节期、大喇叭期、抽雄期,在每个处理小区随机选取选取一棵长势具有代表性的玉米植株,将地面以上部分割去,以根部为中心,选取 20 cm×20 cm 的小样方划分区域,横向每 10 cm 一个层次进行取样,纵向每 20 cm 一层挖去根系,取回的土样用土壤筛冲洗,检出死根和其它杂质,然后进行分类,测定出根长、根粗及根鲜重,最后将所有根放在 105℃ 的恒温箱中杀青 1 h,之后置于 55℃ 恒温下 48 h,烘干测定干重。

(3) 玉米根长密度及根重密度计算方法。用已经测得的根长和根重,根据测定根长和根重时划分的区域面积,以 20 cm 为一层进行分层计算,用每个区域的根长和根重除以相应的体积得到各个区域的根长密度和根重密度,具体计算为:

$$\rho_{根i}=\frac{m_{根i}/l_{根i}}{V_{区域i}}\tag{1}$$

式中: $\rho_{根i}$ ——相应区域不同处理的根重密度或根长密度; $m_{根i}$ ——相应区域不同处理的总根重; $l_{根i}$ ——相应区域不同处理的总根长; $V_{区域i}$ ——不同区域的体积。

2 结果与分析

2.1 各生育期各处理土壤水分状况

土壤含水量以变化显著、测定简便、直观性强等优点通常作为作物水分亏缺的诊断指标,根据已测的土壤含水量动态变化过程进行数据处理分析,与土壤胁迫相对含水量阈值进行比较,进而判定该生育期是否处于水分胁迫状态,具体比较如表 2 所示。

由表 2 可以看出,处理 9 在拔节期、大喇叭期、抽雄期均处于胁迫状态,由于在大喇叭期和抽雄期玉米需水量较大,因此胁迫程度较拔节期严重。其他处理灌水量均小于处理 9,说明在各生育期内均处于胁迫

状态,胁迫程度由于玉米生长状况与灌水量的不同而存在差异。

表 2 各生育期土壤水分状况

| 项目 | 拔节期 | 大喇叭期 | 抽雄期 |
|--------------|------|------|------|
| 处理 9 土壤相对含水量 | 0.70 | 0.65 | 0.61 |
| 水分胁迫阈值 | 0.75 | 0.8 | 0.8 |
| 是否胁迫 | — | — | — |

注:—表示不胁迫,一表示胁迫。

2.2 玉米根长的基本生长规律

玉米根系由初生根、次生根和气生根组成^[15],随着玉米的生长,不同水分处理下玉米根系生长总体趋势一致,在地面生物量增大的同时其根系逐渐向下扎深,水平方向逐步扩展,不同灌水量条件下玉米根长密度均随着土层深度的增加呈减小趋势,但是不同灌水量对根长生长的影响差异显著。由图 1 可知,在拔节期玉米根系生长迅速,为需水临界期,在此生育期对玉米进行水分胁迫处理,则加速其根系向下生长,并且胁迫越严重,根系向下生长越快。在大喇叭期,如图 2 所示,水分胁迫仍然对根系的向下扎深生长有一定的促进作用,与其他灌水量相比,处理 1 在 20 cm 土层根长密度最小(77.27 mm/cm³),处理 9 最大(143.31 mm/cm³),在 40 cm 土层,处理 8 的根长密度最小(16.11 mm/cm³),处理 1 最大(24.89 mm/cm³)。在图 3 中,总体趋势与图 1、图 2 一致,但是由于前期的水分胁迫抑制了玉米根系的生长,故处理 1 根系生长速率在继续向下生长的同时其速率明显减缓,在拔节期处理 1 的平均生长速率为 2.576 cm/(cm²·d),在抽雄期处理 1 的平均生长速率为 1.196 cm/(cm²·d)。胁迫灌水处理使根系向较深的土层伸长,有利于吸收土壤中的水分和养分,导致深层土壤根系密度较大,进而缓解水分胁迫对玉米生长的影响。总之,在各个生育期,水分胁迫越严重,在 0—20 cm 土层根长密度越小,40 cm 以下根长密度越大。反之,供水充足则表层根长密度较大,深层处较小。

由表 3 可以看出,不同水分胁迫对根系生长具有不同程度的影响,并且胁迫越严重根长密度在表层土壤越小,在深层越大。在拔节期不同处理玉米根系主要集中在 0—40 cm,在各土层中各处理平均根长密度差异显著($P<0.05$),这是因为在拔节期水分不足促进根系的向下生长,所以在表层处理 1 较处理 9 根长密度小,差异极为显著($P<0.01$),在深层灌水量较多的处理 9 根长密度较小,而处理 1 较大,两差异表现亦显著。大喇叭期和抽雄期不同处理根长密度生长呈现出与拔节期大体一致,表 3 所呈现的规律与图 1 基本一致。

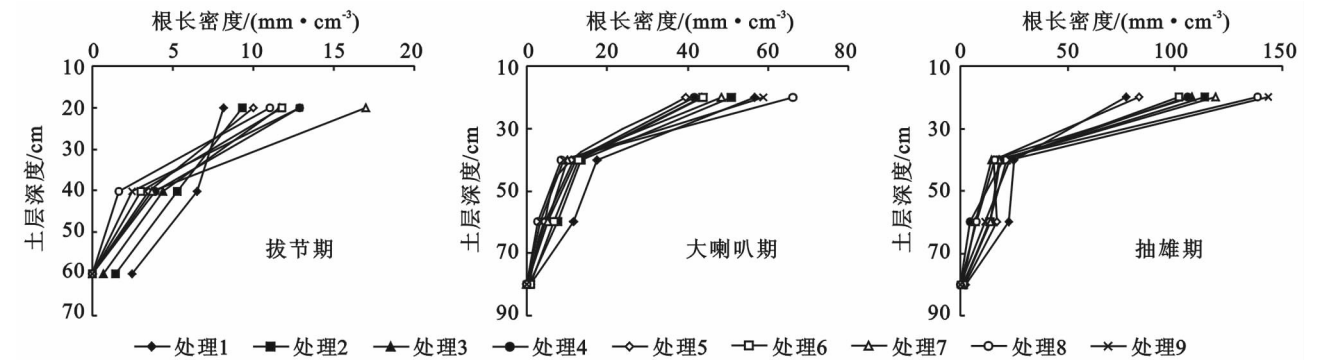


图 1 不同时期根长密度垂直分布

表 3 不同处理各生育期根长密度对比

| 处理 | 拔节期 | | | 大喇叭期 | | | | 抽雄期 | | | |
|----|----------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|-----------|----------|----------|---------|
| | 20 cm | 40 cm | 60 cm | 20 cm | 40 cm | 60 cm | 80 cm | 20 cm | 40 cm | 60 cm | 80 cm |
| 1 | 8.124Eg | 6.506Aa | 2.488Aa | 56.582Cc | 17.435Aa | 11.659Aa | 1.053Aa | 77.271Ii | 24.894Aa | 22.583Aa | 2.718Aa |
| 2 | 9.306Df | 5.247Bb | 1.418Bb | 51.024Dd | 13.535Bb | 7.553Bb | 0.729Cc | 113.765Dd | 18.782Ee | 14.194Cc | 1.271Dd |
| 3 | 11.635Cc | 4.418Bc | 0.694Cc | 43.624Gg | 12.365Dd | 5.247Dd | 0.000Ee | 107.665Ee | 14.324Ii | 7.159Hh | 0.988Ff |
| 4 | 12.894Bb | 3.876Ccd | 0.000Dd | 41.547Hh | 11.776Ee | 4.594Ff | 0.000Ee | 105.953Ff | 20.300Dd | 4.682Ii | 0.000Gg |
| 5 | 9.994De | 3.488Ce | 0.000Dd | 39.529Ii | 11.135Ff | 4.288Gg | 0.724Dd | 83.155Hh | 15.659Hh | 17.224Bb | 1.935Bb |
| 6 | 11.776Cc | 3.035Def | 0.000Dd | 43.894Ff | 12.794Cc | 6.841Cc | 1.018Bb | 101.829Gg | 21.576Cc | 13.312Ee | 1.341Cc |
| 7 | 17.012Aa | 3.718Cde | 0.000Dd | 48.373Ee | 10.153Gg | 5.129Ee | 0.000Ee | 118.712Cc | 17.824Ff | 13.971Dd | 1.206Ee |
| 8 | 11.04Cd | 1.671Eg | 0.000Dd | 66.212Aa | 8.606Ii | 2.653Ii | 0.000Ee | 138.491Bb | 16.112Gg | 7.312Gg | 0.000Gg |
| 9 | 12.847Bb | 2.494Ef | 0.000Dd | 58.824Bb | 9.218Hh | 3.306Hh | 0.000Ee | 143.312Aa | 22.912Bb | 11.659Ff | 0.000Gg |

注:不同大小写字母表示置信区间在 1%和 5%水平上的差异显著程度。

2.3 不同水分处理下玉米根重密度分布规律

根重密度是指单位体积土壤上根干重所占的比例^[16],根重密度的变化趋势与根长密度基本一致。在玉米拔节期,与其他水分处理相比较,处理 1 中较粗根系向下生长,在 20 cm 以上土层根干重仅占总根干重的 67.9%,而处理 9 在 20 cm 则达到了 90.2%(图 2A)。在玉米生长的过程中,随着灌水量的增加,表层根重密度逐渐增大,在大喇叭期,处理 1 的根重密度为 8.16×10^{-4} g/cm³,处理 7 为 23.58×10^{-4} g/cm³,原因是灌水量的增加使较粗根系主要集中分布在上层土壤,然而处理 8 和处理 9 可能是因为灌水充分从而促进了玉米毛根的生长。在深层土壤中根重密度逐渐减小,处理 1 为 1.83×10^{-4} g/cm³,处理 7 为 0.85×10^{-4} g/cm³,其原因是水分胁迫导致根系向深

层深扎吸取水分以补给水分亏缺(图 2B)。在玉米抽雄期,各层根重所占比例变化不大,处理 1 在 20 cm 土层以上根干重占总的根干重 71.8%,处理 9 为 95.3%,说明在后期灌水主要促进较细根系的伸长(图 2C)。总之,玉米在不同生育期,根重密度随着土层深度的增加呈降低趋势,降低幅度在 0—40 cm 处较大,在 40 cm 以下较小,这也是玉米对不同环境的一种适应能力。

由表 4 可以看出,不同处理各生育期根重密度与根长密度变化基本一致,各生育期不同处理各土层根重密度差异显著,说明在表层水分胁迫越严重对玉米根重密度的增加具有抑制作用,且根系变小变密,在深层土壤水分胁迫对根重密度具有促进作用。

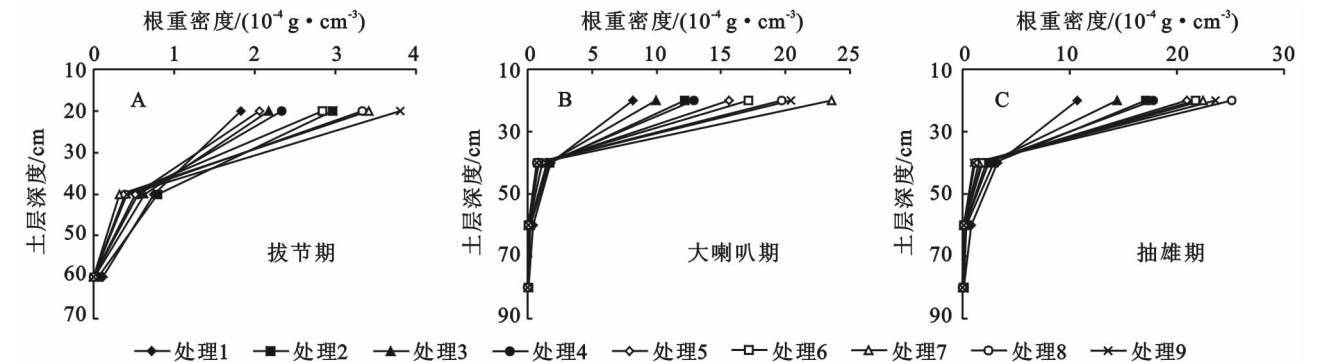


图 2 不同时期根重密度垂直分布

表 4 不同处理各生育期根重密度对比

| 处理 | 拔节期 | | | 大喇叭期 | | | | 抽雄期 | | | |
|----|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| | 20 cm | 40 cm | 60 cm | 20 cm | 40 cm | 60 cm | 80 cm | 20 cm | 40 cm | 60 cm | 80 cm |
| 1 | 1.825Ii | 0.750Bb | 0.110Aa | 8.156Ii | 1.825Aa | 0.400Aa | 0.103Aa | 10.713Ii | 3.300Aa | 0.763Aa | 0.138Aa |
| 2 | 2.963Dd | 0.788Aa | 0.063Bb | 12.163Gg | 1.713Bb | 0.213Bb | 0.075Bb | 17.138Gg | 2.900Bb | 0.400Bb | 0.100Bb |
| 3 | 2.175Gg | 0.638Cc | 0.013Cc | 9.938Hh | 1.563Cc | 0.138Cc | 0.000Ee | 14.413Hh | 2.488Cc | 0.250Cc | 0.088Cc |
| 4 | 2.338Ff | 0.550Dd | 0.000Dd | 12.888Ff | 1.488Dd | 0.113Dd | 0.000Ee | 17.813Ff | 2.250Dd | 0.175Dd | 0.000Ff |
| 5 | 2.063Hh | 0.513Ee | 0.000Dd | 15.588Ee | 1.113Ee | 0.100Dd | 0.050Cc | 20.988Ee | 1.813Ee | 0.138Ee | 0.063Dd |
| 6 | 2.838Ee | 0.400Fg | 0.000Dd | 17.125Dd | 0.835Gg | 0.075Ff | 0.038Dd | 21.763Dd | 1.788Ff | 0.113Ff | 0.063Dd |
| 7 | 3.413Bb | 0.325Hi | 0.000Dd | 23.575Aa | 0.850Ff | 0.050Gg | 0.000Ee | 22.388Cc | 1.538Gg | 0.088Gg | 0.038Ee |
| 8 | 3.338Cc | 0.388Gh | 0.000Dd | 19.675Cc | 0.725Hh | 0.075Ff | 0.000Ee | 25.113Aa | 1.163Hh | 0.063Hh | 0.000Ff |
| 9 | 3.800Aa | 0.413Ff | 0.000Dd | 20.388Bb | 0.700Ii | 0.088Ee | 0.000Ee | 23.563Bb | 1.050Ii | 0.113Ff | 0.000Ff |

注:不同大小写字母表示置信区间在 1%和 5%水平上的差异显著程度。

3 结论和讨论

不同的灌水处理对玉米的生长发育有重要的影响,根系是土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 的关键部分^[17-18],也是研究水分传输和运动的主要内容,而根长和根重是研究根系的主要指标。有研究表明:玉米根系在大喇叭口期可以达到 140 cm 左右,而后随着生育期的推进,最大根深可达 160 cm,之后衰亡减低^[19-20]。本研究发现,从拔节期到抽雄期最大根长仅在 80 cm 处,相比而言,最大根深明显减小。可见,膜下滴灌这种局部供水方式对根长和根重产生极大的影响。水分胁迫能促进根系的生长发育,特别是在玉米早期(出苗期至拔节期)采用胁迫灌水,有利于玉米后期对水分和养分的有效利用,而在苗期玉米自身所需水分不是太多且抗旱性较强,因此胁迫灌水不会影响正常生长和后期生物量的积累。而且,因水分胁迫的轻重呈现差异,以至于根系分布规律在保持原有规律的基础上表现出一些新的特征,试验结果表明,不同生育期,不同水分处理条件下,根系会倾向于有利于自身生长的水分区域增长,而且受干旱胁迫越严重,根系直径明显有变细、变小,由此可知,植物为满足自身生长需要,会对自身根系生长环境进行感知和做出适应性调整,这表明,水分是关联作物生长的关键因子之一,不同的灌水处理,不仅能够影响作物的生理指标,而且会改变作物的重要机制。

胁迫对玉米根系生长的影响是一个极其复杂的过程,并且胁迫程度不同对玉米根系生长的程度和效果也不尽相同,虽然根系随土层的增加逐渐减少,但水分胁迫可以促使根系向深层土壤生长,这也是玉米为满足自身生长需要,对根系生长过程的一种调整,也是其对外界环境表现出的一种适应性,但过度和长期的水分胁迫不利于根系的生长发育,容易使根系变得纤细、生命力不强。在玉米生长过程中,水分胁迫

会抑制根系后期的生长,加速根系的衰退,并且胁迫越严重这种抑制作用就越强。但作物的生长是一个复杂的大系统,除受水分的影响之外,还会受盐分和其他因素的影响,作物的最终长势是各项因子综合作用的结果,影响程度如何,怎样影响的,需进一步深入研究。

参考文献:

[1] 陈丽娟,冯起,张新民,等. 明沟排水洗盐条件下土壤水盐动态模拟研究[J]. 水土保持研究,2010,17(1):235-238.

[2] 姚春霞,张岁岐,燕晓娟. 干旱及复水对玉米叶片光合特性的影响[J]. 水土保持研究,2012,19(3):278-283.

[3] 李少昆,涂华玉,张旺峰. 玉米根系在土壤中的分布及与地上部分的关系[J]. 新疆农业科学,1992(3):99-103.

[4] Lamm F R, Manges H L, Stone L R. Water requirement of subsurface drip-irrigated corn in northwest Kansas[J]. Trans. ASAE,1995,38(2):441-448.

[5] 赵秉强,张福锁,李增嘉,等. 间套作条件下作物根系数量与活性的空间分布及变化规律研究Ⅱ. 间作早春玉米根系数量与活性的空间分布及变化规律[J]. 作物学报,2011,27(6):974-979.

[6] 王密侠,康绍忠,蔡焕杰. 玉米调亏灌溉节水调控机理研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(12):87-90.

[7] 刘晶淼,安顺清,廖荣伟. 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.

[8] 张立桢,曹卫星,张思平,等. 棉花根系生长和空间分布特征[J]. 植物生态学报,2005,29(2):266-273.

[9] 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.

[10] 张岁岐,周小平,慕自新,等. 不同灌溉制度对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(10):1-6.

- (6):5286-5296.
- [4] 朱建军,崔保山,杨志峰,等. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征[J]. 生态学报,2006,26(1):146-153.
 - [5] 张慧,付强,赵映慧. 松嫩平原北部土壤重金属空间分异特征及生态安全评价[J]. 水土保持研究,2013,20(2):165-169.
 - [6] 陈家栋,潘宝宝,张金池,等. 广东大宝山矿区土壤重金属含量及其影响因素[J]. 水土保持研究,2012,19(6):237-246.
 - [7] 郑海龙,陈杰,邓文靖,等. 城市边缘带土壤重金属空间变异及其污染评价[J]. 土壤学报,2006,43(1):39-45.
 - [8] Liang J T, Chen C C, Song X L, et al. Assessment of heavy metal pollution in soil and plants from Dun Hua sewage irrigation area[J]. International Journal of Electrochemical Science,2011,6(11):5314-5324.
 - [9] 杨元根, Paterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物[J]. 环境科学,2001,22(3):44-48.
 - [10] 赵美微,塔莉,李萍. 土壤重金属污染及其预防、修复研究[J]. 环境科学与管理,2007,32(6):70-72.
 - [11] Vreca P, Dolenc T. Geochemical estimation of copper contamination in the healing mud from Makirina Bay, central Adriatic[J]. Environment International,2005,31(1):53-61.
 - [12] Audry S, Schafer J, Blanc G, et al. Fifty-year sedimentary record of heavy metal pollution (Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs (France)[J]. Environmental Pollution,2004,132(3):413-426.
 - [13] 何江,王新伟,李朝生,等. 黄河包头段水沉积物系统中重金属的污染特征[J]. 环境科学学报,2003,23(1):53-58.
 - [14] 赵智杰,贾振邦,张宝权,等. 应用脸谱图与地积累指数法综合评价沉积物中重金属污染的研究[J]. 环境科学,1993,14(4):48-52.
 - [15] Hkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach[J]. Water Research,1980,14(8):975-1001.
 - [16] 袁英贤,丁少军,李剑友,等. 平顶山市煤矿矿区土地复垦煤灰充填后土壤的污染性分析[J]. 能源环境保护,2007,27(6):640-645.
 - [17] 樊文华,白中科,李慧峰,等. 复垦土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 农业工程学报,2011,27(1):348-354.
 - [18] 姜菲菲,孙丹峰,李红,等. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价[J]. 农业工程学报,2011,27(8):330-337.
 - [19] 孟昭虹,周嘉,郑元福. 哈尔滨市城市土壤重金属生态风险评价[J]. 水土保持研究,2009,16(4):152-159.
 - [20] 贾英,方明,吴友军,等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. 中国环境科学,2013,33(1):147-153.
 - [21] 杨秀红,胡振琪,张学礼. 粉煤灰充填复垦土地风险评价及稳定化修复技术[J]. 科技导报,2006,24(3):33-35.
 - [22] 甘居利,贾晓平,林钦,等. 近岸海域底质重金属生态风险评价初步研究[J]. 水产学报,2000,24(6):533-538.
 - [23] 王登启. 设施菜地土壤重金属的分布特征与生态风险评价研究[D]. 山东泰安:山东农业大学,2008.
 - [24] 李海霞,胡振琪,李宁,等. 淮南某废弃地矿区污染场重金属污染风险评价[J]. 煤炭学报,2008,33(4):423-426.
 - [25] 王莹,董霁红. 徐州矿区充填复垦地重金属污染的潜在生态风险评价[J]. 煤炭学报,2009,34(5):650-655.
 - [26] 刘小梅,吴启堂,李秉滔. 超富集植物治理重金属污染土壤研究进展[J]. 农业环境科学学报,2003,22(5):636-640.
 - [27] 田吉林,诸海焘,杨玉爱,等. 大米草对有机汞的耐性、吸收及转化[J]. 植物生理与分子生物学报,2004,30(5):577-582.
 - [28] 赵美微,塔莉,李萍. 土壤重金属污染及其预防、修复研究[J]. 环境科学与管理,2007,32(6):70-72.
- ~~~~~
- (上接第 276 页)
- [11] 李明思,贾宏伟. 棉花膜下滴灌湿润锋的实验研究[J]. 石河子大学学报,2001,5(4):316-319.
 - [12] 王孟雪,张有利,张玉先. 黑龙江风沙土区不同耕作措施对玉米地土壤水分及产量的影响[J]. 水土保持研究,2011,18(6):245-251.
 - [13] 邸利,窦学成,成自勇,等. 甘肃省生态环境建设与水资源合理配置研究[J]. 水土保持研究,2007,14(2):175-178.
 - [14] 张瑞美,彭世彰,徐俊增,等. 作物水分亏缺诊断研究进展[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(2):205-210.
 - [15] 康绍忠,刘晓明. 玉米生育期土壤—植物—大气连续体水流阻力与水势的分布[J]. 应用生态学报,1993,4(3):260-266.
 - [16] 邵明安,杨文治,李玉山. 土壤—植物—大气连续体中的水流阻力及相对重要性[J]. 水利学报,1986(9):8-14.
 - [17] 胡田田,康绍忠. 局部灌水方式对玉米不同根区土—根系统水分传导的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(2):11-16.
 - [18] 刘晚苟,山仑,邓西平. 不同土壤水分条件下土壤容重对玉米根系生长的影响[J]. 西北植物学报,2002,34(5):831-838.
 - [19] 郭相平,康绍忠,索丽生. 苗期调亏处理对玉米根系生长影响的试验研究[J]. 灌溉排水,2001(1):25-27.
 - [20] 慕自新,张岁岐,郝文芳. 玉米根系形态性状和空间分布对水分利用效率的调控[J]. 生态学报,2005,25(11):2895-2900.