

# 干旱胁迫对玉米根系及植株生长发育影响研究

王甜霞<sup>1</sup>, 李欣钰<sup>1</sup>, 金晨<sup>2</sup>, 蔡福<sup>3</sup>, 张碧<sup>1</sup>, 袁淑杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学, 四川 成都

<sup>2</sup>锦州市生态与农业气象中心, 辽宁 锦州

<sup>3</sup>中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2022年8月21日; 录用日期: 2022年9月21日; 发布日期: 2022年9月27日

## 摘要

为了进一步研究干旱胁迫对玉米根系及植株生长发育的影响, 本文对干旱胁迫试验的土壤相对湿度资料、根系资料和生物量资料进行了分析, 研究了春玉米不同发育期干旱胁迫对玉米不同土壤深度根系及玉米生物量的影响。结果表明: 1) 吐丝期时40 cm土壤深度RD总根长密度为0.36 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D2的总根长密度分别比RD少2%、5%, D3的总根长密度比RD多46%, 120 cm土壤深度RD总根长密度为0.07 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D3、D4的总根长密度分别比RD多213%、14%、43%, 说明在拔节期间短期控水可以促进根系生长, 同时也促进根向深处土壤发展; 乳熟期时40 cm土壤深度RD总根长密度为0.20 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D2、D4的总根长密度分别比RD少34%、59%、42%, D3的总根长密度分别比RD多13%, 其中D1、D2可能是因早期的干旱根系发展得更深, 40 cm土壤深度根系衰老速度比RD快。D4总根长密度小可能是其遭遇干旱比较迟, 更多的干物质被植株转移到果穗而加速根系的衰老。D3总根长密度明显较高, 可能是因其在结束干旱后复水不久, 根的补偿性迅速生长的结果。160 cm土壤深度各组不同直径根长密度占比相差不大, D1、D4的总根长密度分别比RD少46%、37%, D3的总根长密度分别比RD多46%, D3总根长密度高于其他组, 这可能是在抽雄期, 干旱将促进根向深处生长, 复水后又有补偿作用, 使其进一步向深处延伸, D4遭遇干旱较晚, 根系已过最佳生长阶段, 导致其在深层土壤中总根长密度较小。2) 抽雄期时T1与T2叶面积指数分别较CK低6.42%、8.41%, T3叶面积指数比CK高5.31%, T3叶面积指数明显高于其他组, 这表明拔节期短时间促进玉米的生长发育, 而T1与T2叶面积指数低于CK, 则说明拔节期干旱让玉米生长发育不如未遭遇干旱的玉米; 至乳熟期, T1、T2、T3叶面积指数分别比CK低46.53%、26.57%、53.21%, 说明玉米遭遇干旱后对玉米的生长发育有不好的影响, 并且即使是后期复水但造成的影响没有消除, 其生长情况还是不如未遭遇干旱的玉米, 而T1不如T2则说明越长时间的干旱对于玉米的生长发育影响越严重。3) T1、T2及T3组的总生物量都远小于CK组, 其中T2组的总生物量又比T1及T3组稍微大些, T1、T2及T3组的总生物量重分别比CK组低48.15%、30.62%及45.68%, 说明干旱对玉米植株生长发育的不利影响与玉米遭遇干旱时间有关, 长期干旱比短期干旱的不利影响更大, 并且相同的控水时长导致干旱, 抽雄期干旱比拔节期干旱对玉米植株生长发育的影响更大, 这种不利影响同样也不会因为后面复水而消除。

## 关键词

春玉米, 干旱胁迫, 根系生长, 生物量, 生长发育

# Effects of Drought Stress on Maize Root System and Plant Growth and Development

Tianxia Wang<sup>1</sup>, Xinyu Li<sup>1</sup>, Chen Jin<sup>2</sup>, Fu Cai<sup>3</sup>, Bi Zhang<sup>1</sup>, Shujie Yuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Jinzhou Center for Ecology and Agrometeorology, Jinzhou Liaoning

<sup>3</sup>Shenyang Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang Liaoning

Received: Aug. 21<sup>st</sup>, 2022; accepted: Sep. 21<sup>st</sup>, 2022; published: Sep. 27<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to further study the effects of drought stress on maize root system and plant growth and development, the data of soil relative humidity, roots and biomass in the drought stress experiment were analyzed, and the effects of drought stress on the roots and biomass of maize in different soil depths at different development stages of spring maize were studied. The results showed that: 1) the total root length density of RD in 40 cm soil layer was 0.36 cm/cm<sup>3</sup> at silking stage, the total root length density of D1 and D2 was 2% and 5% less than that of RD, respectively, the total root length densities of D3 was 46% more than that of RD, and the RD in 120 cm soil layer was 0.07 cm/cm<sup>3</sup>. The total root length density of D1, D3 and D4 was 213%, 14% and 43% more than that of RD, respectively, which indicated that short-term water control during jointing period could promote root growth and promote root development into deep soil; at milk stage, the total root length density of RD was 0.20 cm/cm<sup>3</sup> at 40 cm soil depth, the total root length density of D1, D2 and D4 decreased by 34%, 59% and 42% respectively compared with RD, and that of D3 increased by 13% respectively. D1 and D2 might develop deeper roots due to early drought. The senescence rate of root system in 40 cm soil depth was faster than that of RD. The low total root length density of D4 may be due to its delayed drought, and more dry matter was transferred by plants to fruit ears, which accelerated root senescence. The total root length density of D3 is significantly higher, this may be the result of the compensatory rapid growth of the roots shortly after the end of the drought by rehydration. The total root length density of D1 and D4 was 46% and 37% less than that of RD, respectively, and the total root length density of D3 was 46% more than that of RD, respectively. The total root length densities of D3 were higher than those of other groups, which may be due to the fact that drought promoted the growth of roots to the depth at the tasseling stage, and there was a compensatory effect after rewatering. As a result, the total root length density of D4 in deep soil was low because of the late drought and the root system had passed the optimal growth stage. 2) At the tasseling stage, the leaf area index of T1 and T2 was 6.42% and 8.41% lower than that of CK, respectively, and the leaf area index of T3 was 5.31% higher than that of CK, which indicated that the jointing stage promoted the growth and development of maize in a short time, while the leaf area indexes of T1 and T2 were lower than those of CK. It shows that the drought in jointing stage makes the growth and development of maize worse than that of maize without drought; at the milk stage, the leaf area index of T1, T2, T3 were 46.53%, 26.57% and 53.21% lower than CK, respectively, indicating that drought had a negative impact on the growth and development of maize, and even after rewatering in the late period, the growth of maize was still not as good as that of maize without drought. However, T1 was not as good as T2, indicating that the longer the drought, the more serious the impact on the growth and development of maize. 3) The total biomass of T1, T2 and T3 was much less than that of CK, and the total biomass of T2 was slightly larger than that of T1 and T3, and the total biomass weight of T1, T2 and T3 was 48.15%, 30.62% and 45.68% lower than that of CK, respectively. The results showed that the adverse effects of drought on the growth and development of maize plants were related to the time of

**drought encountered by maize, and the adverse effects of long-term drought were greater than those of short-term drought, and the same length of water control led to drought, the impact of drought at tasseling stage on the growth and development of maize plants was greater than that at jointing stage, and this adverse effect would not be eliminated by rewatering later.**

## Keywords

Spring Maize, Drought Stress, Root Growth, Biomass, Growth and Development

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

玉米, 又名珍珠米、苞米棒子、包谷等, 属于禾本科草本植物, 生长周期一年。玉米是全球最大的粮食作物, 它的产量仅次于小麦、水稻, 位列第三, 是我国的主要粮食和主要的饲料来源。中国是世界上玉米产量和消费量居世界第二位的国家, 同时也是全球两大著名玉米黄金带之一, 玉米对于世界对于中国有着不可或缺的重要作用, 在粮食生产中占有举足轻重的地位。土壤含水量是影响农作物生长发育和生长的重要因素, 在农作物的整个生长期, 土壤水分占有很大的比重。玉米不但需要大量的水, 还对干旱胁迫非常敏感。全球气候变化下频发的干旱灾害已成为世界范围内的重大气候问题。近年来, 国内外有许多研究人员针对干旱胁迫给植物根系及植株生长发育带来的影响做了大量调研及试验, 得出了重要结论。根是植物的生命活动, 是最直接的吸收和利用土壤水分, 它与植物的生长和产量的形成有着密切的关系。在干旱条件下, 根系会第一时间作出响应, 从而引起整个植物对干旱的响应, 同时, 根系的形态、化学组成、生物质量等都会发生相应的改变, 从而对地面部分“光系统”的形成和产出产生一定的影响。大量的研究结果同样表明, 根系在土壤中的空间分布对植株吸水和植株生长发育起着重要的作用, 而且根的可塑性则与土壤含水量的分配有着紧密的联系, 并且对土壤水分的多少反应十分敏感[1]-[6]。北方春玉米播种区以东北三省、内蒙古、宁夏为主, 而锦州地区位于辽宁省, 是春玉米主产区之一, 播种面积也在逐年扩大, 占粮食作物播种面积的80%以上。东北地区过去50年中干旱程度有明显的加剧趋势, 并且干旱的区域也有明显的扩大趋势。研究显示农作物干旱受灾面积和成灾面积一定的增加趋势, 这在很大程度上制约了当地农业生产, 导致发生大尺度干旱事件, 影响经济发展[7]。因为锦州地区降水少且雨量分布不均, 干旱是影响锦州春玉米生长发育的一种常见的灾害, 并且预计在未来干旱对于春玉米的影响还将进一步加剧。本研究在锦州大型土壤水分控制试验场及大型根系观测场通过在春玉米不同发育期开展干旱胁迫试验, 研究春玉米根分布以及玉米植株生物量对干旱胁迫的响应, 进而为说明水分限制条件下玉米耗水过程生理机制提供参考, 同样可为提前预防和抵御干旱灾害提供必要的参考依据。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 研究区概况

土壤水分控制试验在锦州市农业气象试验站大型土壤水分控制试验场内进行, 锦州地区属于典型的温带季风气候区, 年平均气温为9.5℃, 1月平均气温为-8.0℃, 7月平均气温为24.4℃, 年降水量为

565.9 mm, 主要作物春玉米的生育期为 5~9 月, 土壤为典型棕壤。试验场内建有 16 个试验小区, 为了避免小区间的渗漏, 采取了水泥层隔断措施, 使用可移动遮雨棚来控制雨水, 并采取人工控水、补水措施来控制土壤含水量。地下根观测系统中装有 12 个钢化玻璃观测窗口, 并与每个种植区的土壤密切相关。将根微型观测管(长为 2.2 m, 外径为 6 cm)安装在玻璃观测窗口中, 在每一玻璃观测窗口的垂直中线位置, 分别在 40 cm、80 cm、120 cm、160 cm、200 cm 土壤深度处, 将 5 根直径 10 cm 的玻璃管插入作物种植小区土壤中。

## 2.2. 试验设计

在干旱胁迫试验场进行的多年水分控制试验结果发现, 若通过对某一水平的土壤湿度进行调控, 需要对试验小区进行定期补充, 这样的控水方式会导致上部土壤湿度过大, 而下层土壤无法得到水分补充, 从而无法达到所要求的干旱胁迫条件。所以, 在本文的试验中, 均通过持续不浇水的方式来控制水分, 从而创造干旱胁迫条件。

2014 年试验通过持续不浇水的方式来创造干旱胁迫条件, 并设了 4 个干旱处理和 1 个对照处理, 各设 2 次重复, 春玉米品种“丹玉 39”在 4 月 30 日播种, 自玉米出苗起, 每 7 天浇水一次(10.0 mm 左右), 保证玉米的正常生长。对照处理(RD)自拔节起每 7 天浇水 20.0 mm 左右, 乳熟后每 7 天浇水 10.0 mm 左右。根据实测结果, 春玉米在不同发育期遭受干旱对发育期时间无明显影响, 以对照处理的春玉米发育期代表各处理的发育期(表 1)。处理 1 (D1)在春玉米拔节开始不浇水, 连续 40 天不浇水, 然后恢复浇水, 处理 2 (D2)自春玉米拔节后 10 天(7 月 1 日)连续不浇水 30 天, 然后恢复浇水(7 月 31 日), 这可实现在同一天获得间隔为 10 天的不同控水条件, 从而比较春玉米根的分布, 处理 3 (D3)自 7 月 11 日起连续不浇水 40 天, 然后恢复浇水, 处理 4 (D4)在 8 月 1 日开始不浇水直到玉米成熟收获。不同土壤水分处理在不浇水前和恢复浇水后与对照浇水情况相同。

**Table 1.** Dates of spring maize development in Jinzhou area in 2014

**表 1.** 2014 年锦州地区春玉米各发育期日期

发育期	拔节	抽雄	开花	吐丝	乳熟	成熟
RD	6 月 20 日	7 月 16 日	7 月 18 日	7 月 20 日	8 月 22 日	9 月 24 日

2016 年通过连续不浇水的方式创造干旱胁迫条件。具体试验设计如下: 设置 3 个干旱处理和 1 个对照处理, 各占 3 个试验小区, 玉米品种“丹玉 39”于 4 月 30 日播种, 自玉米出苗起, 每 7 天浇水一次(10.0 mm 左右)保证玉米的正常生长。根据实测结果, 春玉米在不同发育期遭受干旱对发育期时间无明显影响, 以对照处理的春玉米发育期代表各处理的发育期(表 2)。对照试验(CK)自拔节期起每 7 天浇水 24 mm, 抽雄后每 7 天浇水 25 mm, 乳熟后每 7 天浇水 10 mm。拔节 - 抽雄、抽雄 - 乳熟期干旱胁迫试验(T1): 从拔节期(6 月 30 日)开始持续不浇水 40 天后(8 月 10 日)恢复浇水。拔节 - 抽雄、抽雄 - 乳熟期干旱胁迫试验(T2): 从拔节期(6 月 30 日)开始连续不浇水 27 天后(7 月 27 日)恢复浇水。拔节 - 抽雄、抽雄 - 乳熟期干旱胁迫试验(T3)从拔节期(7 月 15 日)开始连续不浇水 40 天后(8 月 24 日)恢复浇水。

**Table 2.** Dates of spring maize development in Jinzhou area in 2016

**表 2.** 2016 年锦州地区春玉米各发育期日期

发育期	三叶	拔节	抽雄	乳熟	成熟
CK	5 月 30 日	6 月 29 日	7 月 20 日	8 月 24 日	9 月 21 日

## 2.3. 观测项目及方法

### 2.3.1. 根长密度观测

2014年试验利用电子窥镜摄像头观测管内的根系生长情况,并用仪器本身配有的植物根系获取软件处理后,可得到每张图片根系的总面积,再利用摄像头长度与根管直径可算出摄像头长度根管的总体积,每张图片的根系面积与根管体积之比,得出根长密度。每根根管观测4次。但是因为部分根管破裂漏水,导致80 cm、200 cm深度以及D2处理80 cm以下深度无法进行根长密度观测。一些时段由于地表灌水导致根管周围为泥水覆盖,使观测数据无法真实反映根系特征。所以观测数据有限,对同一深度根管测得数据剔除无效数据后平均,代表该层的平均根长密度。把有效数据根据不同根系直径分为4类,分别为:c1: 0.0~0.5 mm; c2: 0.5~1.0 mm; c3: 1.0~2.0 mm; c4: 2.0 mm以上。

### 2.3.2. 土壤相对湿度

2014年试验为了更好的掌握不同深度土壤的水分动态变化规律,自不浇水起每7天利用土钻法测出0~50 cm不同深度土壤相对湿度( $W_r$ ),即土壤重量含水量与田间持水量的比值。

2016年试验自拔节期起,每7天测一次0~50 cm土壤深度土壤墒情(称重法),从而得到土壤相对湿度( $W_r$ )。原则上补水当天取土,取土后补水。观测之后要进行回填,否则钻孔太多影响试验。

根据《农业干旱等级》国家标准,可制作土壤相对湿度的干旱等级划分表(表3)。

**Table 3.** Drought classification table of soil relative moisture

**表 3.** 土壤相对湿度的干旱等级划分表

土壤相对湿度 $W_r$ (%)	$W_r \leq 30\%$	$30\% \leq W_r < 40\%$	$40\% \leq W_r < 50\%$	$50\% \leq W_r < 60\%$	$60\% \leq W_r$
干旱等级	特别重度干旱	重度干旱	中度干旱	轻度干旱	无旱

### 2.3.3. 生物量和叶面积指数

2016年试验观测生物量(干\鲜重)、叶面积。每个处理取3株,分株记录,并求平均值,控水期间每7天观测一次。叶面积指数可由站内配有的LAI-2200植物冠层分析仪进行测定。本文利用干重生物量(叶干重、茎干重、根干重以及穗干重)和叶面积指数分析不同处理下植株的生长发育。

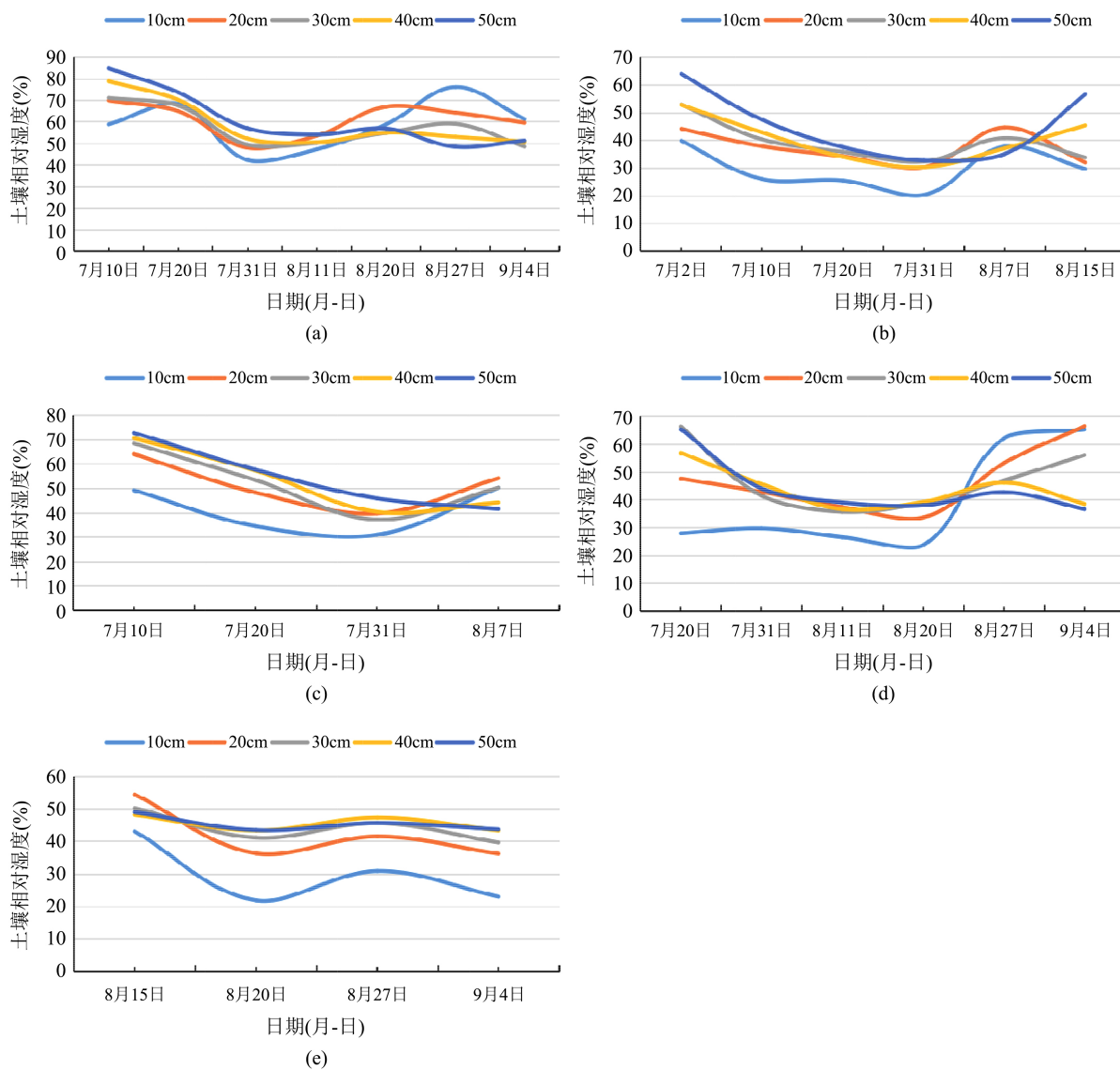
## 3. 结果与分析

### 3.1. 土壤水分对玉米根系的影响

#### 3.1.1. 不同干旱胁迫条件下不同深度土壤相对湿度随时间变化

图1为2014年锦州春玉米不同干旱处理不同深度土壤相对湿度 $W_r$ 随时间变化,(图1(a))RD处理组在7月10日至吐丝期10 cm深度土壤的 $W_r$ 由59%变为68%,干旱程度由轻旱转为无旱,在这期间其他深度土壤的 $W_r$ 均大于60%,为无旱状态;吐丝后,8月中上旬10 cm及20 cm深度土壤出现 $W_r$ 为40%~60%的轻、中旱,其他深度土壤 $W_r$ 为50%~60%,干旱程度为轻旱;乳熟-成熟期10 cm及20 cm深度的土壤 $W_r$ 均大于60%,干旱程度为无旱,其他深度的土壤 $W_r$ 为50%~60%,干旱程度为轻旱。(图1(b))D1处理组7月2日至吐丝期(控水30天后)10 cm深度的土壤干旱程度由中旱转为特旱,其他深度的土壤干旱程度为中旱,一直至7月31日(复水)期间不同深度土壤干旱程度没有变化,复水后在8月7日10 cm及50 cm深度的土壤干旱程度为重旱,20 cm、30 cm及40 cm深度的土壤干旱程度为中旱。(图1(c))D2处理组在7月10日至吐丝期(控水20天)10 cm、20 cm深度的土壤干旱程度分别由中旱、无旱转为重旱、中旱,其他深度的土壤干旱程度由无旱转为轻旱;到7月31日(复水)10 cm、30 cm深度的土壤干旱程度

为重旱,其他深度的土壤干旱程度为中旱,恢复浇水后8月7日时30 cm及30 cm以上深度的土壤干旱程度轻旱,其他深度的土壤干旱程度为中旱。(图 1(d)) D3 处理组吐丝(控水 10 天)至乳熟期 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm 深度的土壤干旱程度分别由特旱、中旱、无旱、轻旱、无旱转为了重旱,乳熟期(复水)8月27日后10 cm、20 cm 深度的土壤干旱程度分别为无旱、轻旱,其他深度的土壤干旱程度为中旱。(图 1(e)) D4 处理组8月15日至乳熟期(控水 20 天)时10 cm 深度的土壤干旱程度由中旱转为特旱,20 cm、30 cm 深度的土壤干旱程度由轻旱分别转为重旱、中旱,40 cm 及 50 cm 深度的土壤干旱程度一直为中旱;乳熟至成熟期土壤干旱程度基本无变化。



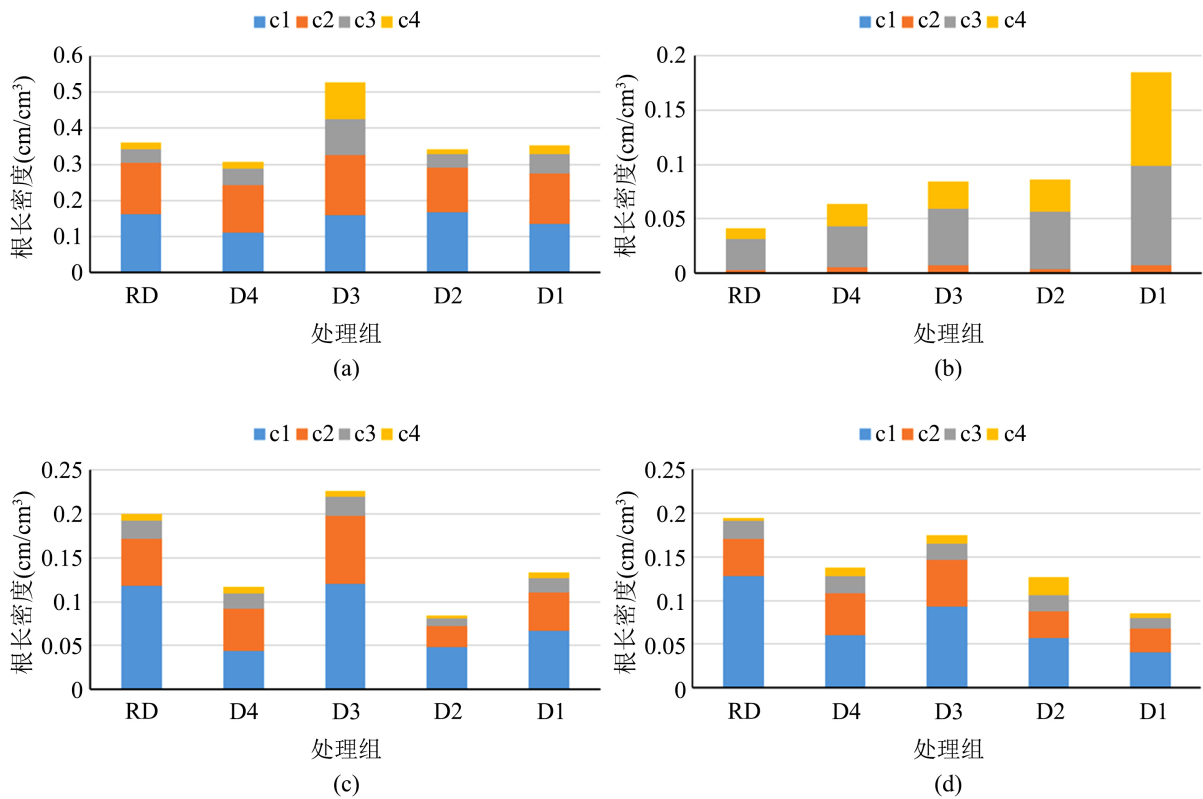
**Figure 1.** Dynamic changes of soil fill relative humidity under (a) RD, (b) D1, (c) D2, (d) D3 and (e) D4 treatments of spring maize in Jinzhou in 2014

**图 1.** 2014 年锦州春玉米 (a) RD、(b) D1 处理、(c) D2 处理、(d) D3 处理和 (e) D4 处理土壤相对湿度的动态变化

### 3.1.2. 干旱胁迫对不同直径根系分布的影响

由图 2 不同处理下 40 cm 土壤深度土壤根长密度可知,2014 年 7 月 23 日(图 2(a)) RD 总根长密度为

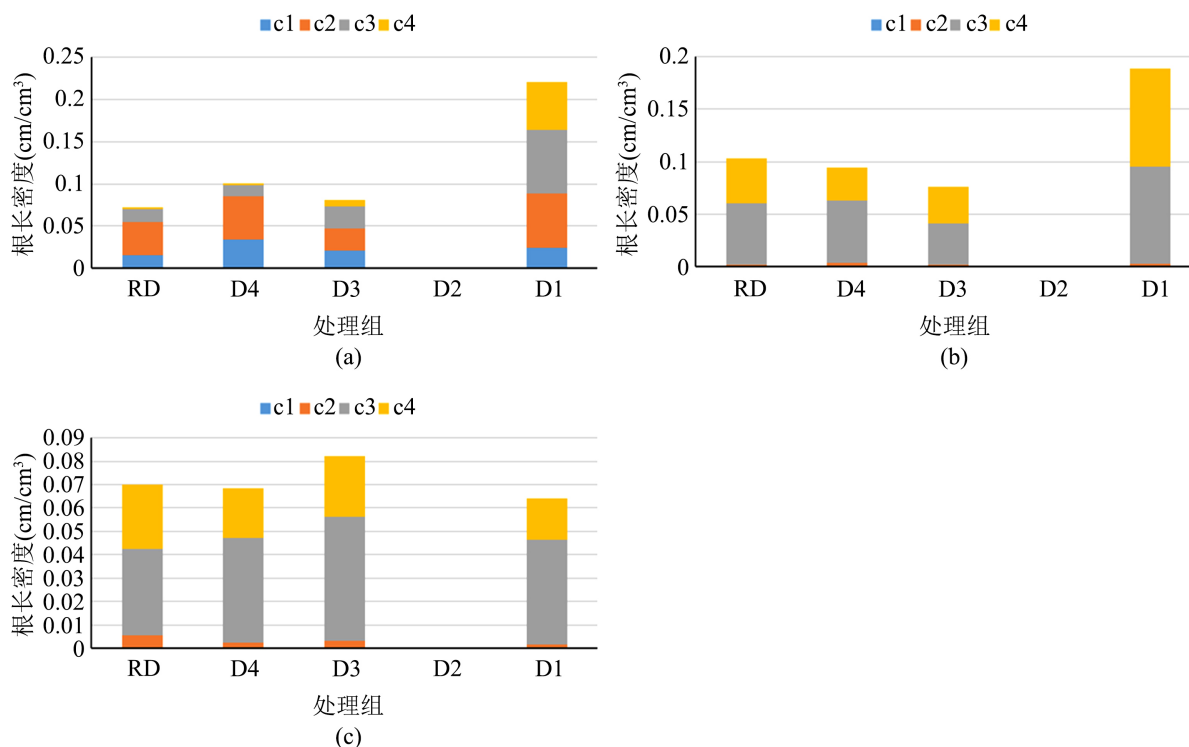
0.36 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D2 的总根长密度分别比 RD 少 2%、5%, D3 的总根长密度比 RD 多 46%, RD、D1、D2、D3 的直径在 1.0 mm 以下的根系分别占其总根系的 84%、78%、85%、61%, 此时 D1、D2、D3 分别控水 33 天、23 天、13 天, 这说明在拔节期间短期控水可以促进根系生长, 同时也促进根向深处土壤发展。7 月 30 日(图 2(b)) RD 总根长密度为 0.04 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D2、D3 的总根长密度分别比 RD 多 352%、112%、106%, RD、D1、D2、D3 的直径在 1.0 mm 以下的根系分别占其总根系的 6%、4%、4%、9%, 此时 D1、D2、D3 分别控水 40 天、30 天、20 天, 这说明拔节至吐丝初期干旱不只促进根的生长, 还会促使玉米由细根转为粗根, 即可能是根系老化。此时的 D4 总根长密度比 CK 多 56%, 这种差别产生原因可能是玉米植株生长的个体差异或者观测误差。至 8 月 26 日(图 2(c)) RD 总根长密度为 0.20 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D2、D4 的总根长密度分别比 RD 少 34%、59%、42%, D3 的总根长密度比 RD 多 13%, RD、D1、D2、D3、D4 直径在 1.0 mm 以下的根系分别占其总根系的 86%、83%、88%、88%、78%, 此时 D1、D2、D3 分别复水 27 天、27 天、4 天, D4 控水 26 天, 其中 D1、D2 可能是因早期的干旱根系发展得更深, 40 cm 土壤深度根系衰老速度比 RD 快。D4 虽与 D1 和 D2 总根长密度相差不大, 但总根长密度小可能是其遭遇干旱的时间比较迟, 更多的干物质被植株转移到果穗而加速根系的衰老。D3 总根长密度明显较高, 可能是因其在结束干旱后复水不久, 根的补偿性迅速生长的结果。9 月 10 日(图 2(d)) RD 总根长密度为 0.19 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D2、D3、D4 的总根长密度分别比 RD 少 56%、35%、10%、29%, D3 总根长密度因根系老化作用而略有减小, D4 总根长密度比其他组都小, 是因为其处于干旱状态导致根系大量衰老死亡, 其他组根系密度变化较小。



**Figure 2.** Changes of root length density of maize at 40 cm soil depth under different drought treatments on (a) July 23, (b) July 30, (c) August 26, and (d) September 10 in Jinzhou spring maize in 2014

**图 2.** 2014 年锦州春玉米 (a) 7 月 23 日、(b) 7 月 30 日、(c) 8 月 26 日和 (d) 9 月 10 日不同干旱处理 40 cm 土壤深度玉米根长密度变化

由 120 cm 土壤深度土壤根长密度可知(图 3),2014 年 7 月 23 日(图 3(a)) RD 总根长密度为 0.07 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D3、D4 的总根长密度分别比 RD 多 213%、14%、43%, RD、D1、D3、D4 直径在 1.0 mm 以下的根系分别占其总根系的 77%、40%、58%、84%, 其中 D1 总根长密度最高, 粗根也明显多于其他组, 这是因为干旱胁迫可以明显促进根系生长。7 月 30 日 RD、D1、D3、D4 直径在 1.0 mm 以下的细根几乎没有(图 3(b)), 分别占其总根系的 2%、2%、2%、4%, 以直径为 1.0 mm 以上的粗根为主, D3、D4 的总根长密度分别比 RD 少 26%、8%, D1 的总根长密度分别比 RD 多 83%, 显著高于其他组, 这可能是试验误差。8 月 6 日(图 3(c))各总根长密度与前期相比明显减少, 可能是因为根系不断向下伸展。此时 RD、D1、D3、D4 直径为 1.0 mm 以下的细根几乎没有, 分别占其总根系的 8%、2%、4%、3%, 以直径为 1.0 mm 以上的粗根为主。

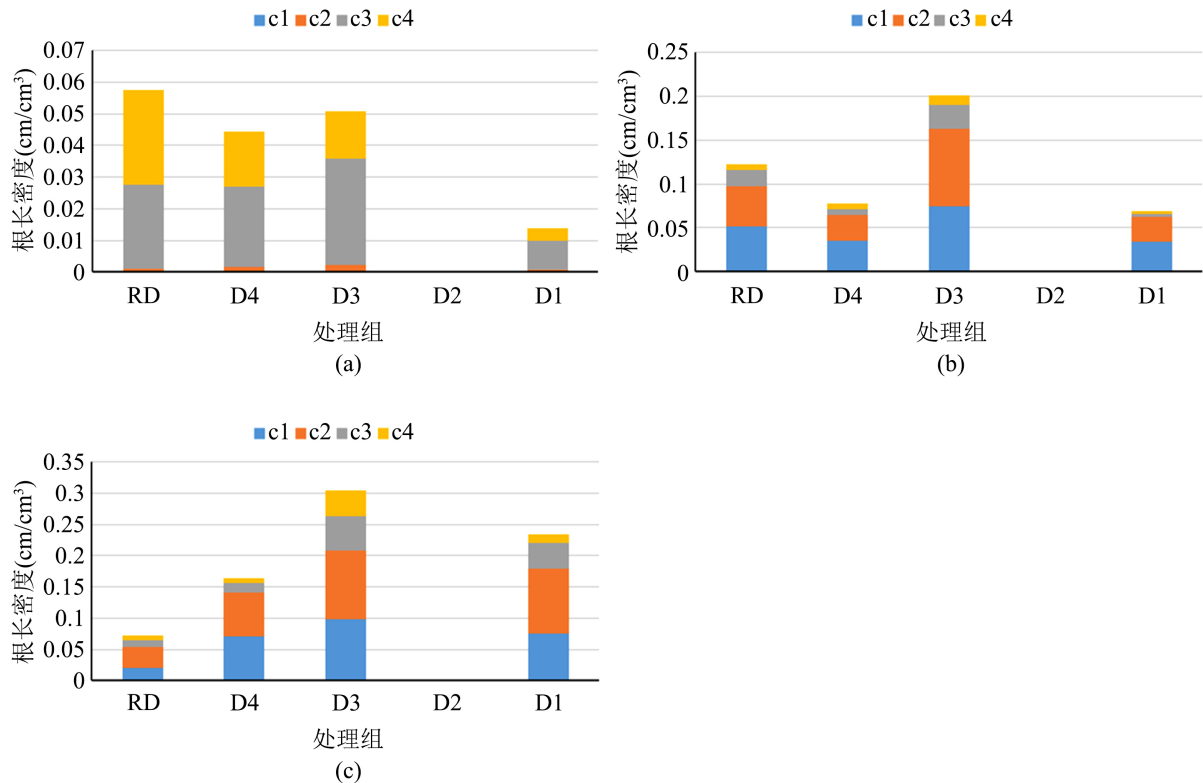


**Figure 3.** Changes of root length density of maize at 120 cm soil depth under different drought treatments on (a) July 23, (b) July 30, and (c) August 6 in Jinzhou spring maize in 2014

**图 3.** 2014 年锦州春玉米 (a) 7 月 23 日、(b) 7 月 30 日和 (c) 8 月 6 日不同干旱处理 120 cm 土壤深度玉米根长密度变化

由 160 cm 土壤深度土壤根长密度可知(图 4), 8 月 6 日(图 4(a)) RD、D1、D3、D4 直径为 1.0 mm 以下的细根几乎没有, 分别占其总根系的 2%、4%、4%、4%, 以直径为 1.0 mm 以上的粗根为主, D1、D3、D4 的总根长密度分别比 RD 少 76%、12%、23%, D1 总根长密度显著低于其他组, 可能是试验误差。8 月 26 日各组不同直径根长密度占比相差不大(图 4(b)), D1、D4 的总根长密度分别比 RD 少 46%、37%, D3 的总根长密度分别比 RD 多 46%, D3 总根长密度高于其他组, 这可能是在抽雄期, 干旱将促进根向深处生长, 复水后又有补偿作用, 使其进一步向深处延伸, D4 遭遇干旱较晚, 根系已过最佳生长阶段, 导致其在深层土壤中总根长密度较小。9 月 10 日(图 4(c)) D1、D3、D4 的总根长密度分别比 RD 多 226%、324%、129%, 说明干旱促进根系向深层土壤生长, D1、D3 的总根长密度显著偏高, 也说明在抽雄期, 干旱将促进根向深处生长, 复水后又会产生补偿作用, 使其进一步向深处延伸。





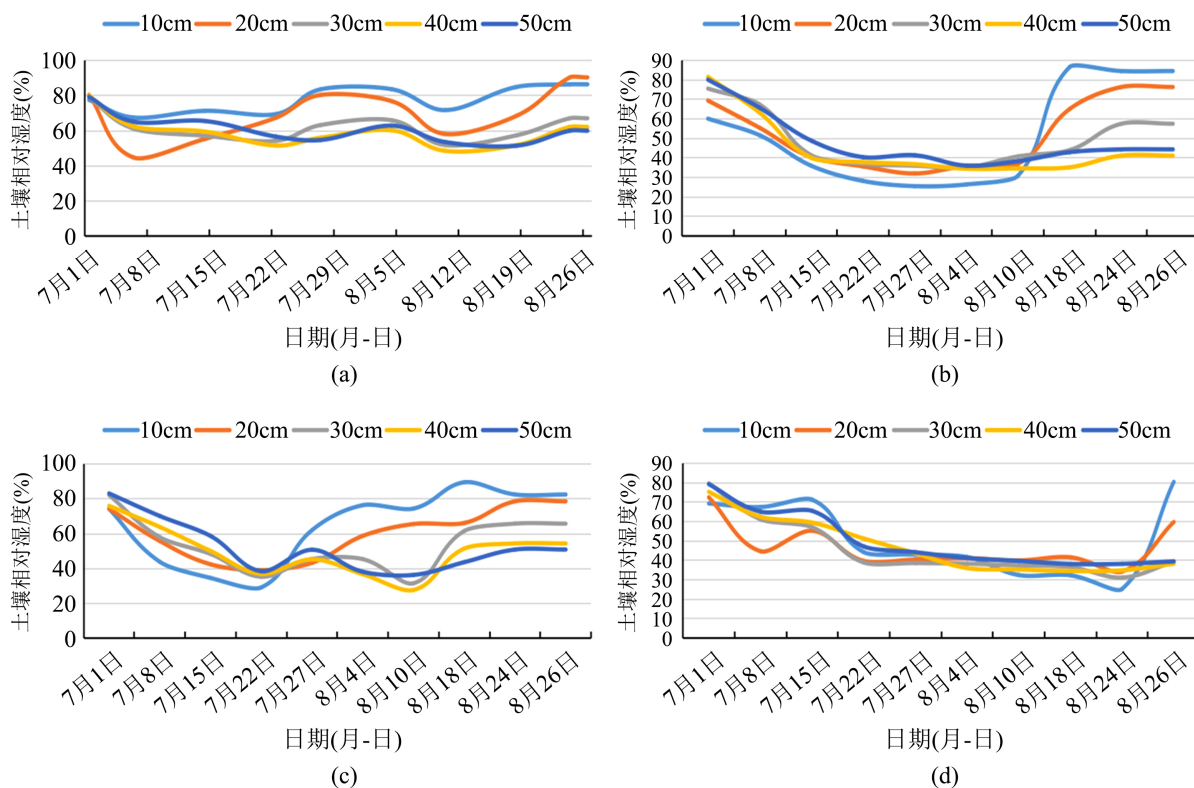
**Figure 4.** Changes of root length density of maize at 160 cm soil depth under different drought treatments on (a) August 6, (b) August 26, (c) July 10 in Jinzhou spring maize in 2014

**图 4.** 2014 年锦州春玉米 (a) 8 月 6 日、(b) 8 月 26 日、(c) 9 月 10 日不同干旱处理 160 cm 土壤深度玉米根长密度变化

## 3.2. 土壤水分对玉米生物量的影响

### 3.2.1. 不同干旱胁迫条件下不同深度土壤相对湿度的变化

图 5 为 2016 年锦州春玉米不同处理不同土壤深度土壤相对湿度  $W_r$  随时间变化, (图 5(a)) CK 拔节期不同深度土壤  $W_r$  大都高于 60%, 处于无旱状态, 7 月中上旬 20 cm 和 30 cm 深度土壤出现  $W_r$  为 40%~60% 的中旱、轻旱; 抽雄期不同土壤  $W_r$  一直高于 60%, 处于无旱状态, 30 cm 及 30 cm 深度以下的土壤大都处于无旱或轻旱状态, 其中 8 月 10 日 40 cm 深度的土壤出现中旱。T1 (图 5(b)) 拔节期至 7 月 14 日 30 cm 深度以上的土壤由无旱逐渐干旱至重旱, 30 cm 及 30 cm 深度以下的土壤由无旱逐渐干旱至中旱; 抽雄期 50 cm 深度的土壤为中旱, 其他深度的土壤为重旱; 抽雄期(7 月 22)至复水前 10 cm 深度的土壤由重旱逐渐干旱至特旱, 50 cm 深度的土壤保持一周左右的中旱后变为重旱, 其他深度的土壤一直是重旱; 复水(8 月 10 日)后至乳熟期, 30 cm 深度以上的土壤逐渐恢复湿润至无旱, 30 cm 深度的土壤逐渐恢复湿润至轻旱状态, 30 cm 深度以下的土壤逐渐恢复湿润至中旱。T2 (图 5(c)) 拔节期至 7 月 14 日 10 cm、20 cm、30 cm 深度的土壤由无旱逐渐干旱至特旱、中旱、中旱, 30 cm 深度以下的土壤由无旱逐渐干旱至轻旱; 抽雄期(7 月 22) 10 cm 深度的土壤为特旱, 其他深度的土壤为重旱; 复水(7 月 27 日)后至乳熟期, 30 cm 及 30 cm 深度以上的土壤逐渐恢复湿润至无旱, 30 cm 深度以下的土壤逐渐恢复湿润至轻旱。T3 (图 5(d)) 控水前不同深度的土壤与  $W_r$  与 CK 一致, 控水(7 月 15 日)后至抽雄期 30 cm 深度以上、30 cm 深度以下的土壤分别逐渐干旱至中旱、轻旱, 30 cm 深度的土壤逐渐干旱至重旱; 抽雄至乳熟期 10 cm 深度的土壤达到特旱, 其他深度的土壤都达到重旱。复水 2 天后 30 cm 深度以上的土壤迅速恢复至无旱, 其他保持不变。



**Figure 5.** Dynamic changes of soil fill relative humidity under (a) CK, (b) T1, (c) T2, (d) T3 treatments of spring maize in Jinzhou in 2016

**图 5.** 2016 年锦州春玉米 (a) CK、(b) T1 处理、(c) T2 处理、(d) T3 处理土壤相对湿度的动态变化

### 3.2.2. 不同干旱胁迫条件下叶面积指数 LAI 的变化

在不同处理下叶面积指数随时间的变化如图 6 所示, 2016 年抽雄前叶面积指数各组均在上升, 后期除 7 月 28 日各玉米的叶面积指数基本相同及 8 月 4 日 T3 与 CK 相同外, 其他时候 T1、T2、T3 叶面积指数都比 CK 小, T1 复水(8 月 10 日)及 T2 复水(7 月 27 日)后两组玉米叶面积指数并没有增大, 尤其是 T1 处理组反而还在复水后的一周内减小。抽雄期时 T1 与 T2 叶面积指数分别比 CK 低 6.42%、8.41%, T3 叶面积指数比 CK 高 5.31%, 此时 T1、T2、T3 控水 22 天、22 天、7 天, 其中 T3 叶面积指数明显高于其他组, 这表明拔节期短时间促进玉米的生长发育, 而 T1 与 T2 叶面积指数低于 CK, 则说明拔节期干旱让玉米生长发育不如未遭遇干旱的玉米; 至乳熟期, T1、T2、T3 叶面积指数分别较 CK 低 46.53%、26.57%、53.21%, 说明玉米遭遇干旱后对玉米的生长发育有不好的影响, 并且即使是后期复水但造成的影响没有消除, 其生长情况还是不如未遭遇干旱的玉米, 而 T1 不如 T2 则说明越长时间的干旱对于玉米的生长发育影响越严重。

### 3.2.3. 不同干旱胁迫条件下生物量的变化

锦州地区不同水分处理下春玉米根干重的变化如图 7 所示, 在拔节初期, 2016 年 7 月 7 日时 T1 与 T2 的根干重都稍微大于 CK, 此时 CK 的根干重为 11.26 g, T1 与 T2 的根干重分别比 CK 多 26.65%、44.42%, 造成这种现象的原因可能是拔节期的短时间干旱促进玉米的根系生长。在抽雄期时, 此时 T1、T2 及 T3 分别控水 20 天、20 天、7 天, CK 的根干重为 36.55 g, 而 T1、T2 及 T3 的根干重分别比 CK 低 43.24%、45.95%、13.51%, 这表明干旱对根的生长有不利影响, 遭受干旱的玉米根系生长比不上正常浇水的玉米, 并且干旱时间越长影响越严重。乳熟期时 CK 的根干重为 39.24 g, T2 与 CK 的根干重基本无差别, T2

的根干重比 CK 低 5.12%，T1 及 T3 的根干重都比 CK 组低 30.77%，这说明对于玉米根的生长，短期干旱与长期干旱都对玉米根生长有不利影响，其中短期干旱造成的不利影响复水后基本可以消除，而长期干旱却严重影响了玉米根的生长，甚至于后期复水后也无法消除这种不利的影响。

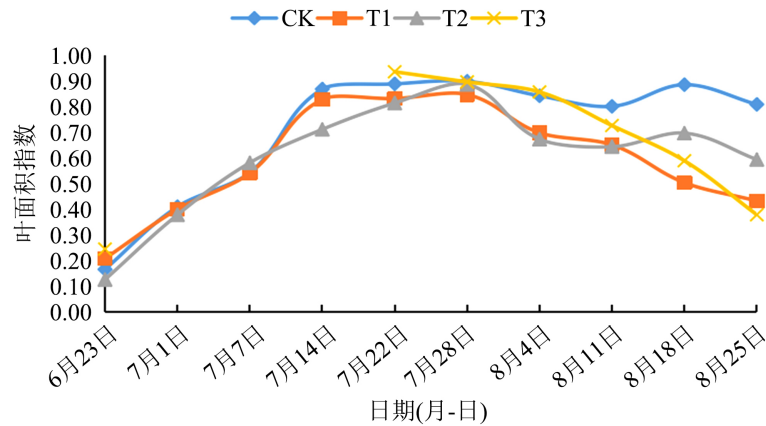


Figure 6. Dynamic changes of leaf area index of spring maize different water treatments in Jinzhou area in 2016  
 图 6. 2016 年锦州地区春玉米不同水分处理下叶面积指数的动态变化

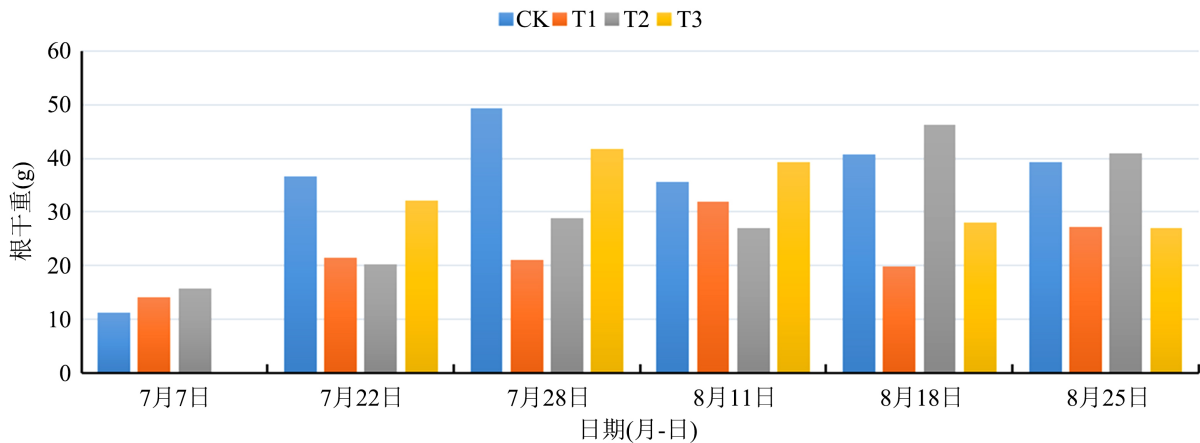
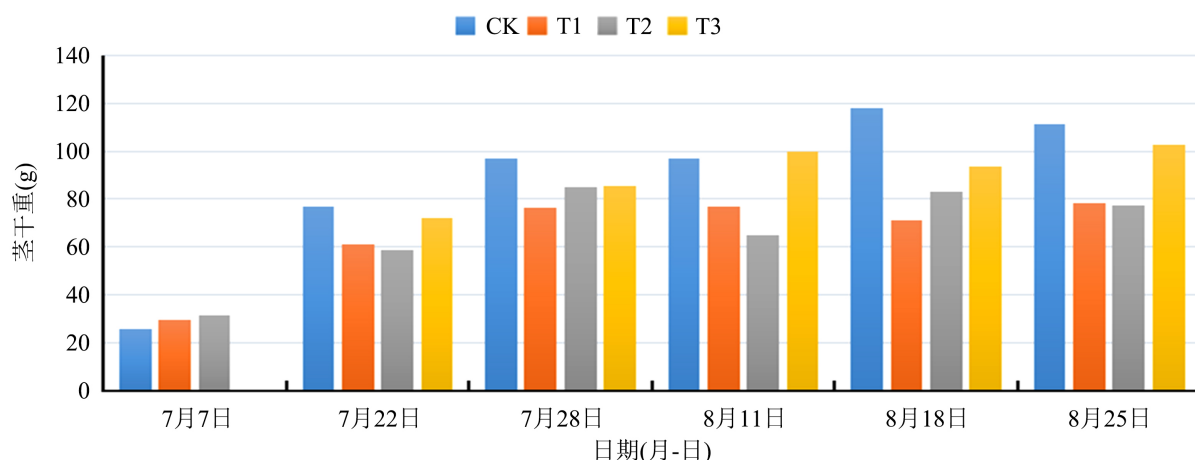


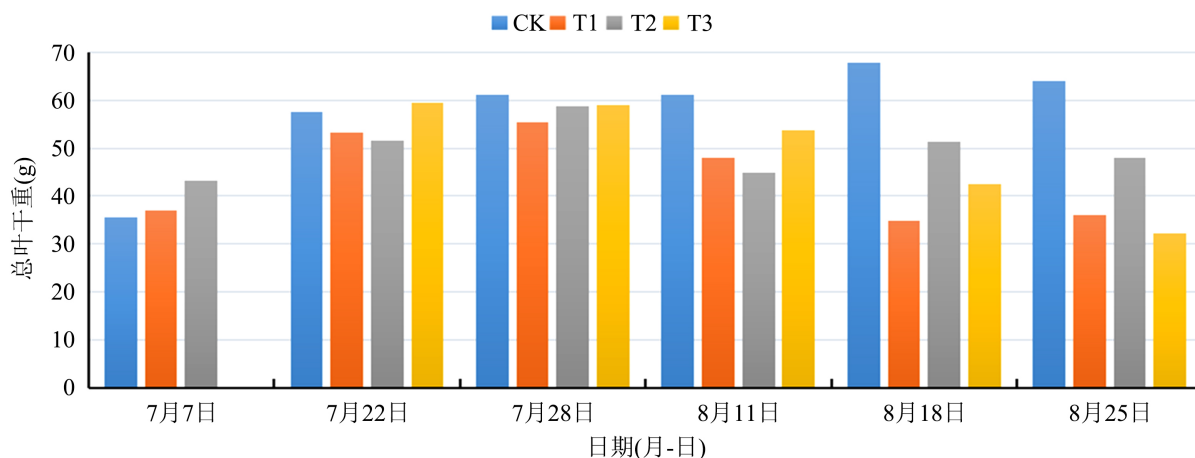
Figure 7. Changes of root dry weight of spring maize under different water treatments in Jinzhou in 2016  
 图 7. 2016 年锦州春玉米不同水分处理下根干重的变化

锦州地区春玉米不同水分处理下茎干重的变化如图 8 所示，在拔节初期，7 月 7 日时 T1 与 T2 的茎干重都稍微大于 CK，此时 CK 的茎干重为 25.76 g，而 T1 与 T2 的茎干重分别比 CK 多 13.58%、22.69%，造成这种现象的原因可能是拔节期的短时间干旱在一定程度上促进玉米茎的生长。在抽雄期时，此时 T1、T2 及 T3 分别控水 20 天、20 天、7 天，CK 的茎干重为 76.68 g，而 T1、T2 及 T3 的茎干重分别比 CK 组低 22.54%、25.35%、7.04%，这表明干旱对玉米茎的生长有不利影响，遭受干旱的玉米茎的生长比不上正常浇水的玉米，并且干旱时间越长影响越严重。乳熟期时 CK 的茎干重为 111.41 g，此时 T1、T2 及 T3 的茎干重分别比 CK 低 29.73%、30.63%、7.21%，其中 T1 与 T2 的茎干重基本无差别，T1 及 T2 的茎干重又都比 T3 低，这说明对于玉米茎的生长，干旱对生长的不利影响还与玉米遭遇干旱时所处的生育期有关，拔节期干旱与抽雄期干旱都对于玉米生长有不好的影响，并且相同的控水时长导致的干旱，拔节期干旱比抽雄期干旱对玉米茎的生长的影响更大，甚至这种不利影响不会因为后面复水而消除。



**Figure 8.** Variation of spring maize stem dry weight under different water treatments in Jinzhou area in 2016  
**图 8.** 2016 年锦州地区不同水分处理下春玉米茎干重的变化

锦州地区春玉米不同水分处理下总叶干重的变化如图 9 所示, 在拔节初期, 7 月 7 日时 T1 与 T2 的总叶干重都稍微大于 CK, 此时 CK 的茎干重为 35.67 g, 而 T1 与 T2 的总叶干重分别比 CK 多 3.55%、20.96%, 造成这种现象的原因可能是拔节期的短时间干旱在一定程度上促进玉米叶的生长。在抽雄期 T1、T2 及 T3 分别控水 20 天、20 天、7 天, 此时 CK 的总叶干重为 57.62 g, T3 的总叶干重比 CK 多 3.45%, T1 及 T2 总叶干重分别比 CK 低了 8.62%、10.24%, 其中 T3 的总叶干重比 CK 高, 是因为短时间干旱促进了叶的生长, 而 T1 及 T2 总叶干重低于 CK, 则说明干旱对玉米叶的生长有不利影响, 遭受干旱的玉米叶的生长比不上正常浇水的玉米, 并且干旱时间越长影响越大。至乳熟期时 CK 的总叶干重为 63.94 g, 此时 T1、T2 及 T3 的总叶干重都远小于 CK, T1、T2 及 T3 的总叶干重分别比 CK 组低 43.75%、25.00%、50.00%, 其中 T2 的总叶干重又比 T1 及 T3 的总叶干重大些, T1 的总叶干重稍微大于 T3, 这说明对于玉米叶的生长, 干旱对生长的不利影响不仅与干旱时间的长短有关, 还与玉米遭遇干旱时所处的生育期有关。玉米遭遇干旱时间越长, 对玉米叶生长的不利影响越大。拔节期干旱与抽雄期干旱都对于玉米叶的生长有不利影响, 并且相同的控水时长导致的干旱, 抽雄期干旱比拔节期干旱对玉米叶的生长的影响更大, 甚至这种不利影响不会因为后面复水而消除。



**Figure 9.** Variation of total leaf dry weight of spring maize under different water treatments in Jinzhou area in 2016  
**图 9.** 2016 年锦州地区不同水分处理下春玉米总叶干重的变化

锦州地区春玉米不同水分处理下穗干重的变化如图 10 所示, 7 月 28 日穗出现时 T1、T2 及 T3 分别控水 28 天、27 天、13 天, 这时 CK 的穗干重为 13.35 g, T1、T2 及 T3 的穗干重分别比 CK 组低 73.16%、60.12%、33.15%, 这说明干旱对穗的生长有不利影响, 干旱时间越长, 不利影响越大。之后 T1、T2 及 T3 的穗干重都小于 CK 组, 至乳熟期, 这时 CK 的穗干重为 190.88 g, T1、T2 及 T3 的穗干重都远小于 CK, T1、T2 及 T3 的穗干重分别比 CK 低 64.40%、45.03%、69.63%, 其中 T2 组的穗干重又比 T1 及 T3 组稍微大些, T1 的穗干重稍微大于 T3, 这说明拔节及抽雄期干旱对玉米穗的生长有不利影响, 一般干旱时间的越长, 影响越大。这说明对于玉米叶的生长。除此之外干旱对生长的不利影响还与玉米遭遇干旱时所处的生育期有关, 相同的控水时长导致的干旱, 抽雄期干旱比拔节期干旱对玉米穗的生长的不利影响更大, 并且这种不利影响不会因为后面复水而消除。

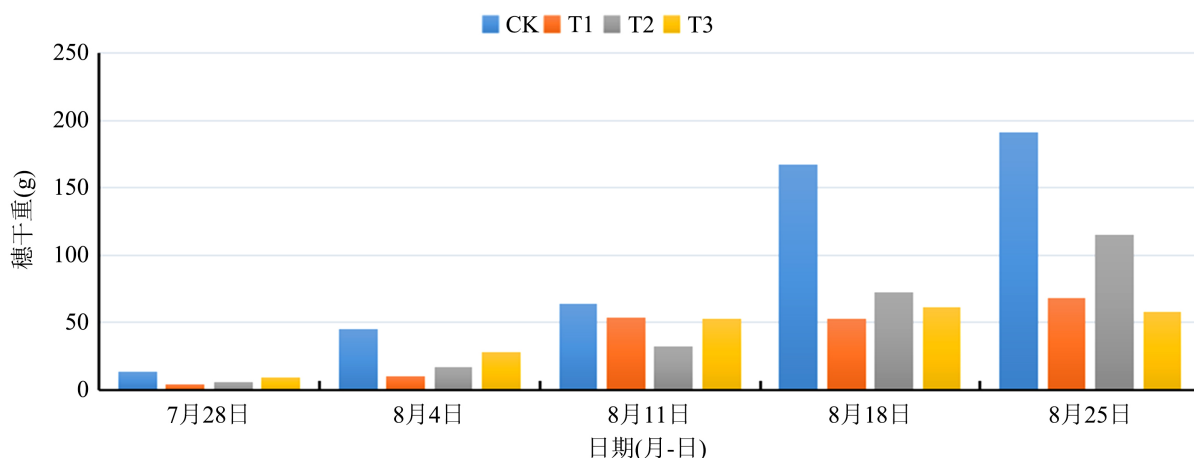


Figure 10. Variation of spring corn ear dry weight under different water treatments in Jinzhou area in 2016

图 10. 2016 年锦州地区不同水分处理下春玉米穗干重的变化

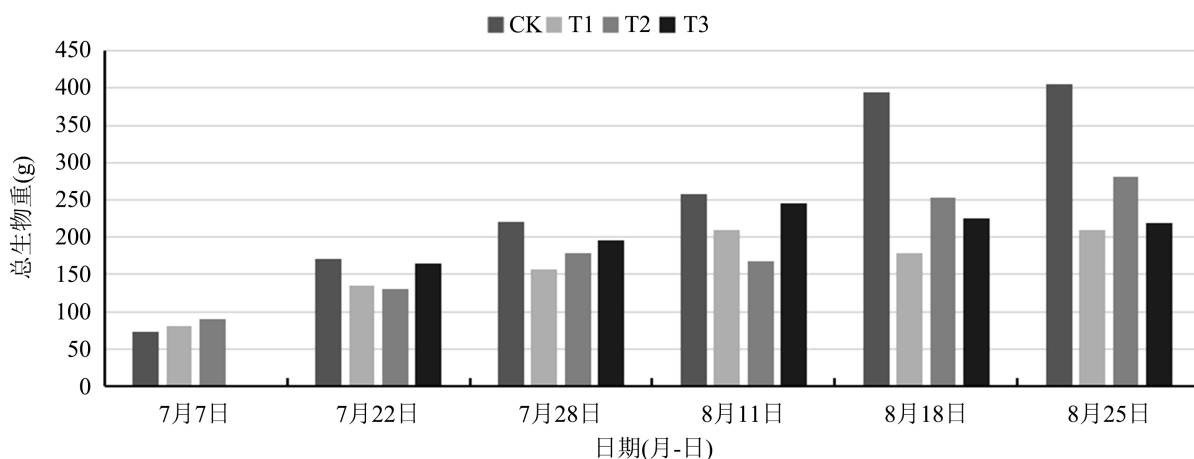


Figure 11. Variation of total biomass dry weight of spring maize under different water treatments in Jinzhou area in 2016

图 11. 2016 年锦州地区不同水分处理下春玉米总生物量干重的变化

2016 年锦州地区不同水分处理下春玉米根总生物量干重的变化如图 11 所示, 拔节初期 7 月 7 日时 CK 的总生物量干重为 72.68 g, T1、T2 组总生物量干重分别比 CK 组高 9.59%、24.66%, 此时各组总生物量干重是这样显示的原因可能是短时间干旱一定程度上促进玉米植株的生长发育。抽雄期时 T1、T2

及 T3 分别控水 20 天、20 天、7 天, 此时 CK 的总生物量干重为 170.85 g, T1、T2 及 T3 的总生物量干重分别比 CK 低 20.47%、23.39% 及 4.09%, 这说明干旱对玉米植株的生长发育产生不利影响, 使遭受干旱的玉米的生长发育比不上正常浇水的玉米, 并且干旱时间越长影响越大。乳熟期时, T1、T2 及 T3 的总生物量干重都远小于 CK, 此时 CK 的总生物量干重为 405.47 g, T1、T2 及 T3 的总生物量干重分别比 CK 组低 48.15%、30.62% 及 45.68%, 其中 T2 组的总生物量干重又比 T1 及 T3 稍微大些, T3 的总生物量干重干重稍微大于 T1, 这说明玉米植株生长发育的不利影响不仅与干旱时间的长短有关, 还与玉米遭遇干旱时所处的生育期有关。长期干旱比短期干旱的不利影响更大, 在相同的控水时长导致干旱, 抽雄期干旱比拔节期干旱对玉米植株生长发育的影响更大, 这种不利影响同样也不会因为后面复水而消除。

## 4. 结论与展望

### 4.1. 主要结论

1) 拔节期开始控水 30 天及 40 天, 在这控水期间各层土壤逐渐干旱, 表层土壤比深层土壤更易干旱, 表层土壤易达到特别干旱等级, 且此时深层的土壤处于中旱或者重旱等级, 有达到拔节及抽雄期干旱胁迫效果。复水后也容易恢复, 但深层土壤尤其是 50 cm 深度的土壤控水及复水后变化不明显, 这可能有表层土壤水分挥发的原因, 也可能有玉米根系利用消耗土壤水的原因, 可能是因为干旱前期深层根系较少, 植株从深层土壤获取水分少, 因此土壤干旱速度低于表层, 后面由于干旱促进根系向深处生长, 使深层土壤的根系增多, 从而耗水较大, 使复水后土壤恢复速度慢。

2) 吐丝期时 D1、D2、D3 分别控水 33 天、23 天、13 天 40 cm 土壤深度 RD 总根长密度为 0.36 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D2 的总根长密度分别比 RD 少 2%、5%, D3 的总根长密度比 RD 多 46%, 这说明在拔节期间短期控水可以促进根系生长, 同时也促进根向深处土壤发展, 乳熟期后, 8 月 26 日 RD 总根长密度为 0.20 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D2、D4 的总根长密度分别比 RD 少 34%、59%、42%, D3 的总根长密度比 RD 多 13%, RD、D1、D2、D3、D4 直径在 1.0 mm 以下的根系分别占其总根系的 86%、83%、88%、88%、78%, 此时 D1、D2、D3 分别复水 27 天、27 天、4 天, D4 控水 26 天, 其中 D1、D2 可能是因早期的干旱根系发展得更深, 40 cm 土壤深度根系衰老速度比 RD 快。D4 虽与 D1 和 D2 总根长密度相差不大, 但总根长密度小可能是其遭遇干旱比较迟, 更多的干物质被植株转移到果穗而加速根系的衰老。D3 总根长密度明显较高, 可能是因其在结束干旱后复水不久, 根的补偿性迅速生长的结果。9 月 10 日 RD 总根长密度为 0.19 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D2、D3、D4 的总根长密度分别比 RD 少 56%、35%、10%、29%, D3 总根长密度因根系老化作用而略有减小, D4 总根长密度比其他组都小, 是因为其处于干旱状态导致根系大量衰老死亡, 其他组根系密度变化较小。2014 年吐丝时 120 cm 土壤深度 RD 总根长密度为 0.07 cm/cm<sup>3</sup>, D1、D3、D4 的总根长密度分别比 RD 多 213%、14%、43%, RD、D1、D3、D4 直径在 1.0 mm 以下的根系分别占其总根系的 77%、40%、58%、84%, 其中 D1 总根长密度最高, 粗根也明显多于其他组, 这是因为干旱胁迫可以明显促进根系生长。乳熟后 8 月 26 日 160 cm 土壤深度各组不同直径根长密度占比相差不大, D1、D4 的总根长密度分别比 RD 少 46%、37%, D3 的总根长密度分别比 RD 多 46%, D3 总根长密度高于其他组, 这可能是在抽雄期, 干旱将促进根向深处生长, 复水后又有补偿作用, 使其进一步向深处延伸, D4 遭遇干旱较晚, 根系已过最佳生长阶段, 导致其在深层土壤中总根长密度较小。

3) 叶面积指数是反映植物群体生长状况的一个重要指标, 玉米遭遇干旱时, 不论哪个生育期其叶面积指数都低于正常浇水的玉米叶面积指数, 本文中玉米拔节期至抽雄期干旱时在一定程度上影响玉米生长, 使玉米生长情况不如不干旱的玉米, 抽雄期时 T1 与 T2 叶面积指数分别比 CK 低 6.42%、8.41%, T3 叶面积指数比 CK 高 5.31%, 此时 T1、T2、T3 控水 22 天、22 天、7 天, 其中 T3 叶面积指数明显高于其他组, 这表明拔节期短时间促进玉米的生长发育, 而 T1 与 T2 叶面积指数低于 CK, 则说明拔节期干旱

让玉米生长发育不如未遭遇干旱的玉米;至乳熟期,T1、T2、T3叶面积指数分别比CK低46.53%、26.57%、53.21%,说明玉米遭遇干旱后对玉米的生长发育有不好的影响,并且即使是后期复水但造成的影响没有消除,其生长情况还是不如未遭遇干旱的玉米,而T1不如T2则说明越长时间的干旱对于玉米的生长发育影响越严重。

4) 拔节初期T1与T2的根茎叶干重都稍微大于CK,根干重分别比CK多26.65%、44.42%,茎干重分别比CK多13.58%、22.69%,总叶干重分别比CK多3.55%、20.96%,拔节初期短时间干旱一定程度上促进玉米植株的生长发育,促进了玉米根茎叶的生长。乳熟期时,CK与T2组根干重基本无差别,T2比CK低5.12%,T1及T3根干重都比CK组低30.77%;还表明短期干旱虽然对根系生长有不好的影响,不过复水后对根系生长这种影响可以减轻,即存在补偿性效应。但长期干旱严重影响玉米根系的生长,甚至于后期复水后也无法消除这种不好的影响。T1、T2及T3组的茎干重分别比CK组低29.73%、30.63%、7.21%;玉米茎的生长在拔节期比在抽雄期对水分敏感,拔节期干旱与抽雄期干旱对玉米茎的生长不利影响更大,甚至这种影响也不会因为后面复水而消除。乳熟时T1、T2及T3组的总叶穗干重都远小于CK组,其中T2组的叶穗干重又比T1及T3组稍微大些,T1、T2及T3组的叶干重分别比CK组低43.75%、25.00%、50.00%,T1、T2及T3组的穗干重分别比CK组低64.40%、45.03%、69.63%,说明了干旱对玉米叶穗生长的不利影响与玉米遭遇干旱时间有关,长期干旱比短期干旱的不利影响更大,并且相同的控水时长导致的干旱,抽雄期干旱比拔节期干旱对玉米叶穗的生长的影响更大,这种不利影响同样也不会因为后面复水而消除。

5) 抽雄期时T1、T2及T3组总生物量分别比CK组低20.47%、23.39%及4.09%,这说明干旱对玉米植株的生长发育产生不利影响,使玉米的生长发育比不上未遭遇干旱的玉米,并且干旱时间越长影响越大;乳熟期时,T1、T2及T3组的总生物量都远小于CK组,其中T2组的总生物量又比T1及T3组稍微大些,T1、T2及T3组的总生物量重分别比CK组低48.15%、30.62%及45.68%,说明干旱对玉米植株生长发育的不利影响与玉米遭遇干旱时间有关,长期干旱比短期干旱的不利影响更大,并且相同的控水时长导致干旱,抽雄期干旱比拔节期干旱对玉米植株生长发育的影响更大,这种不利影响同样也不会因为后面复水而消除。

## 4.2. 总结论

由4.1主要结论可说明干旱对玉米植株生长发育的不利影响与玉米遭遇干旱时间有关,长期干旱比短期干旱的不利影响更大,并且相同的控水时长导致干旱,抽雄期干旱比拔节期干旱对玉米植株生长发育的影响更大,这种不利影响同样也不会因为后面复水而消除。

## 4.3. 存在的问题及展望

### 4.3.1. 问题

1) 虽然春玉米的生育期内持续控水有达到干旱的目的,但还是无法准确的控制各层土壤处于一种干旱等级,使土壤干旱等级更加明确。

2) 2014年试验用微根管方法虽然极好的观测到不同土壤下玉米根系分布,但一些根管出了小故障,使部分数据缺少,使现有的观测数据无法准确且真实反映根系特征。同样,2016年试验的生物量观测数据也有限,没有全程生育期的数据。

### 4.3.2. 展望

为了更加了解对土壤水分对玉米根系及生物量的影响,未来工作的重点应该是一方面寻求高超的观测根分布与观测玉米各生物量方法的仪器应用,另一方面尽可能多地增加相关干旱胁迫的试验,不断进

行优化从而尽可能得到详细的试验资料，从而掌握干旱响应规律，进而为说明水分限制条件下玉米耗水过程生理机制提供参考，同样可为提前预防和抵御干旱灾害提供必要的参考依据。

## 致 谢

不知不觉中，大学生活已近尾声，在这四年的大学生涯中，我遇见了许多不同的人，感谢有他们，让我的大学生活多姿多彩。在生活上，感谢我的室友对我的友好帮助，我的老师们对我的关心；学习上，感谢我的教课老师们，因为学习本专业，我见过新奇的事物，也有近距离的接触和了解它。最后，在毕业论文完成时候，感谢为我论文提供资料的学长及为我论文提供帮助的张老师，也感谢我毕业论文的指导老师袁老师，她让我学到了许多，对我的毕业论文的完成提供了很大的帮助。

## 参考文献

- [1] 蔡福, 明惠青, 米娜, 张淑杰, 谢艳兵, 张玉书. 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.
- [2] 蔡福, 明惠青, 祝新宇, 米娜, 赵先丽, 谢艳兵, 张玉书. 玉米根分布模拟方法比较[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 582-588. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2015.0080>
- [3] 慕自新, 张岁岐, 郝文芳, 梁爱华, 梁宗锁. 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.
- [4] 赵先丽, 张玉书, 纪瑞鹏, 冯锐, 张淑杰, 米娜, 蔡福, 王宏博. 辽宁春玉米出苗期水分胁迫试验初探[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(4): 35-39.
- [5] Xue, Q., Zhu, Z., Musick, J.T., Stewart, B.A. and Dusek, D.A. (2003) Root Growth and Water Uptake in Winter Wheat under Deficit Irrigation. *Plant and Soil*, **257**, 151-161. <https://doi.org/10.1023/A:1026230527597>
- [6] Zheng, Z. and Wang, G.L. (2007) Modeling the Dynamic Root Water Uptake and Its Hydrological Impact at the Reserva Jaru Site in Amazonia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **112**, 1-14. <https://doi.org/10.1029/2007JG000413>
- [7] 马树庆, 王琪, 陈凤涛, 徐丽萍, 张铁林, 于海, 纪玲玲. 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.