

王亚萍,胡正华,张雪松,等. 土壤水分胁迫对冬小麦根系分布规律的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(11):67-71.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.11.019

# 土壤水分胁迫对冬小麦根系分布规律的影响

王亚萍<sup>1,3</sup>, 胡正华<sup>1,2,3</sup>, 张雪松<sup>2,3</sup>, 吴杨周<sup>3</sup>, 陈书涛<sup>3</sup>, 谢 燕<sup>3</sup>, 申双和<sup>1,2</sup>

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏南京 210044; 2. 江苏省农业气象重点实验室, 江苏南京 210044; 3. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏南京 210044)

**摘要:**开展土壤水分控制试验,设置水分充分(CK,65%~75%田间持水量)、轻度干旱(T<sub>1</sub>,50%~60%田间持水量)、中度干旱(T<sub>2</sub>,40%~50%田间持水量)、重度干旱(T<sub>3</sub>,30%~40%田间持水量)4种处理,并在关键生育期测定各处理下的冬小麦总根质量密度、根质量密度、根长密度,以研究土壤水分胁迫对冬小麦根系分布规律的影响。结果表明:土壤含水量显著影响冬小麦根系生长与分布。各处理均表现出0~10 cm土层的总根质量密度较多,根质量密度、根长密度较大。冬小麦总根质量密度、根质量密度和根长密度均以T<sub>1</sub>处理最高,即T<sub>1</sub>处理最适合小麦根系的生长。根长密度与土层深度为负相关,其中在灌浆期,CK、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>和T<sub>3</sub>的根长密度与土层深度的负相关系数分别为0.88、0.66、0.72、0.82。研究表明轻度干旱对冬小麦根系生长最合适。

**关键词:**冬小麦根系;土壤水分胁迫;根长密度;根质量密度

**中图分类号:** S512.1<sup>+</sup>10.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)11-0067-05

干旱是世界上发生频率高、持续时间长、影响范围广的常见自然灾害,尤其在全球气候变暖背景下,农业干旱灾害发生逐渐呈常态化趋势,特大农业干旱事件发生的频率与强度都在增强,农业干旱灾害的异常性更加突出,破坏性更加明显<sup>[1-2]</sup>。我国农作物常年受旱面积为0.20亿~0.27亿hm<sup>2</sup>,约占总播种面积的15%,成灾面积913万hm<sup>2</sup>左右,约占播种面积的6.3%,每年损失粮食250亿~300亿kg,占自然灾害损失总量的60%以上<sup>[3-4]</sup>。农业干旱灾害严重威胁着我国的粮食和生态安全,是制约经济可持续发展的重要因素之一。

冬小麦是我国主要粮食作物之一,对满足人民生活需求、促进国民经济发展具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。在不同地区不同灌溉条件下冬小麦生理生态反应也不相同,而根系是决定作物抗旱性能的最重要因素。根系是冬小麦感受土壤干旱的原初部位,其分布情况直接影响作物抗旱性的强弱<sup>[7]</sup>。在冬小麦生产过程中,根系作为小麦吸收水分和营养物质的主要器官,其研究越来越受到人们的重视。有研究证明,干旱胁迫降低了冬小麦幼苗的总根数、根系总长、根系体积和根系干质量,限制了根系的生长<sup>[8]</sup>。越冬前期不灌溉有利于拔节期根系发育,提高根系吸水能力及后期产量;相反,前期灌溉过多,造成根系浅层分布<sup>[9]</sup>。于振文认为最适宜根系生长发育的土壤

含水量为田间持水量的70%~80%<sup>[10]</sup>,此时,根系衰老速度慢,根系分布较为合理且籽粒产量较高。肖俊夫等认为在一定土壤水分范围内,水分越多根系生长越好;水分亏缺虽然抑制根系生长,但促使根系吸收更深层土壤中的水分<sup>[11]</sup>。因此,冬小麦根系生长与分布受限于土壤水分含量。

目前根系资料的获取主要通过实测和模拟2种方式,而这方面的研究工作大多基于盆栽试验或冬小麦根冠部分,田间试验条件开展不同水分条件下根系研究的工作较少<sup>[12-13]</sup>。本研究通过土壤水分自动灌溉系统控制土壤水分含量,研究不同土壤水分胁迫下冬小麦根系分布规律,对于探讨冬小麦合理灌溉,促进根系生长,充分利用土壤水分,提高农田土壤水分有效利用率和节水农业的可持续发展具有一定的科学意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

于2013—2014年冬小麦生长季在南京信息工程大学农业气象与生态试验站(32.16°N,118.86°E)进行农田试验。该区属于亚热带季风气候区,多年平均降水量1100mm,年平均气温15.6℃。试验土壤为潴育型水稻土、灰马肝土属,土壤质地为壤质黏土,耕土层黏粒含量为26.1%,土壤pH值为6.1,有机碳和全氮的含量分别为19.4、1.15g/kg,最大田间持水量为27.57%(质量含水量)。

### 1.2 试验设计

试验于南京信息工程大学农业气象与生态试验站水肥种植试验场进行,试验场共有30个试验小区,每个小区的长宽深为2.5m×2.5m×1.2m。试验场上方是移动式钢构骨架阳光板防雨棚,以避免降雨影响。试验共设4个处理,土壤水分含量分别控制在田间持水量的65%~75%(CK,水分充分)、50%~60%(T<sub>1</sub>,轻度干旱)、40%~50%(T<sub>2</sub>,中度干旱)、30%~40%(T<sub>3</sub>,重度干旱),每种处理3个重复,共计使

收稿日期:2015-09-17

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY201306046);公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(编号:GYHY201506001);江苏省“六大人才高峰”项目(编号:2014-NY-015);江苏省高校“青蓝工程”项目。

作者简介:王亚萍(1991—),女,吉林榆树人,硕士研究生,主要研究方向为农业气象灾害评估与预警。E-mail:wangyaping310@163.com。

通信作者:胡正华,博士,教授,主要研究方向为农业应对气候变化。E-mail:zhhu@nuist.edu.cn。

用12个试验小区,随机排列。

在每个小区土壤20 cm深处装有土壤水分传感器(AV-EC5, AVALON Scientific, USA),该传感器是根据土壤中电介质的电容率与土壤水分含量直接相关的原理,通过测定土壤中电介质的电容率而获得土壤含水量。在试验开始前用烘干法对传感器进行标定。土壤水分含量数据由数据采集器(CR1000, Campbell Scientific, USA)自动采集,并记录每小时的土壤水分含量均值。根据测得的土壤水分含量数据计算需要的灌水量,用带小孔的PVC管道进行灌溉。

供试冬小麦品种为扬麦13,条播,行距22.7 cm,播种深度3~5 cm。冬小麦主要的生育期见表1。

表1 冬小麦主要生育期

日期	生育期	日期	生育期
2013-11-16	播种	2014-04-06	抽穗
2014-01-03	出苗	2014-04-11	开花
2014-03-16	拔节	2014-05-16	乳熟
2014-04-01	孕穗	2014-05-24	成熟

### 1.3 观测项目与方法

生育期的观测:观测标准参照《农业气象观测规范》(国家气象局,1993)所示方法。

根系观测:在关键生育期测定,用土钻采用五点法来采集土柱样本,分层(每10 cm 1层)整理样品,用细流清水冲洗根系。采用Newman提出的交叉法计算根长<sup>[14]</sup>,烘干根系并测定其干质量。

### 1.4 统计方法

用Excel进行数据处理,Matlab制图,SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, USA)进行显著性检验,分析不同土壤水分条件对冬小麦根系分布的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土壤水分对冬小麦根质量密度的影响

2.1.1 不同土层根质量占总根质量的比例 表2是4种水分梯度下冬小麦根质量在不同土层深度的分布情况。在冬小麦整个生育期内,0~10 cm土层的根质量占总根质量的81%~95%,是根系分布最密集的土层;10~20 cm土层的根质量约占总根质量的2.6%~14.5%;大于20 cm深度的各层根系所占比例较小,为0%~6.2%。可见,根系在浅层土中分布较多,在深层土中分布较少。从孕穗期开始,根系向30 cm以下土层生长,且根质量比例随不同土壤水分处理而发生明显变化。 $T_1$ 处理由于水分充分,0~10 cm土层内集中了全部根系的90%左右,而30 cm以下土层约为5%左右。 $T_3$ 处理,由于土壤含水量较低,根系下扎较深,在0~10 cm土层内根系占总根系的比例下降为85%左右,而30 cm以下土层上升为9%左右,且随着冬小麦生长发育,深层土的根质量比例逐渐增加。由表2还可以看出,在乳熟期,不同土壤水分处理下0~10 cm土层根质量占总根质量比例大小依次为 $T_1 > CK > T_2 > T_3$ ,而20~30 cm,30~40 cm和40~50 cm土层表现为 $T_3 > T_2 > T_1 \geq CK$ ,在40~50 cm处 $T_3$ 处理的根质量比例明显高于其他处理。

2.1.2 冬小麦总根质量的动态变化 图1表示不同水分处理冬小麦总根质量密度动态变化过程。由图1可见,冬小麦

表2 不同土壤水分下不同土层根质量占总根质量的比例

时期	处理	不同土层深度根质量占总根质量的比例(%)				
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm
拔节期	CK	93.9	6.1			
	$T_1$	87.7	12.3			
	$T_2$	91.0	9.0			
	$T_3$	85.5	14.5			
孕穗期	CK	87.8	6.1	2.8	1.7	1.6
	$T_1$	92.4	2.6	1.9	1.8	1.3
	$T_2$	81.8	8.5	6.2	1.7	1.8
	$T_3$	88.6	6.1	2.3	1.6	1.4
抽穗期	CK	91.1	4.6	2.6	0.9	0.8
	$T_1$	89.7	5.8	3.5	1.0	0.0
	$T_2$	78.9	14.3	1.0	2.9	2.9
	$T_3$	85.0	8.5	2.5	1.4	2.6
开花期	CK	93.9	3.3	1.1	1.2	0.5
	$T_1$	88.8	5.9	1.8	2.2	1.3
	$T_2$	87.7	4.5	4.8	2.5	0.5
	$T_3$	87.2	3.1	3.4	3.6	2.7
灌浆期	CK	90.3	5.5	2.2	1.4	0.6
	$T_1$	90.1	3.7	2.0	2.8	1.4
	$T_2$	90.4	3.7	2.5	2.3	1.2
	$T_3$	81.4	8.6	4.4	3.3	2.2
乳熟期	CK	92.9	4.4	1.7	0.9	0.1
	$T_1$	94.2	2.9	1.8	0.9	0.2
	$T_2$	92.8	2.7	2.2	1.7	0.6
	$T_3$	86.6	3.1	4.7	3.7	1.9

的总根质量密度维持在 $0.5 \sim 2.5 \text{ mg/cm}^3$ ,总根质量密度随生育期推进呈现先增加后降低的变化趋势,但在不同土壤水分胁迫下总根质量密度有明显差异。开花期之前,4个处理中由于CK的水分充分,总根质量密度一直高于其他处理,但到灌浆中后期 $T_1$ 的总根质量密度迅速增长并达到最高。与其他处理相比, $T_3$ 处理水分匮乏,总根质量密度一直处于较低状态,且无明显动态变化趋势。进一步分析可以看出,在不同土壤水分处理下,除 $T_2$ 外总根质量密度均在孕穗期达到第一个高峰,之后总根质量密度开始减少,到灌浆中期CK、 $T_1$ 的总根质量密度迅速增加,而 $T_2$ 、 $T_3$ 的无明显增长。乳熟期, $T_1$ 的总根质量密度达到最高,约是 $T_3$ 的2倍,总根质量密度大小依次是 $T_1 > CK > T_2 > T_3$ 。

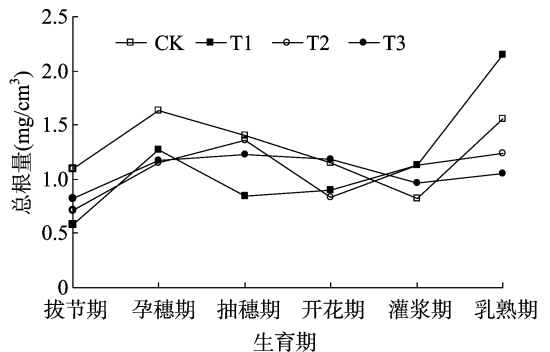


图1 不同水分条件下冬小麦总根质量密度动态变化

2.1.3 不同土层的冬小麦根质量密度 图2-a显示在0~10 cm土层,孕穗期的根质量密度最大,拔节期的根质量密度

最小;4种处理均表现出CK的根质量密度最大,说明CK水分充分,根系较浅,主要集中在浅层。在抽穗期, $T_2$ 处理在10~50 cm土层都有较高的根质量密度,表明干旱使小麦根系扎根较深,以获得足够的水分。从乳熟期来看,0~10 cm土层 $T_1$ 处理根质量密度最大,且从图2-b至图2-e来看, $T_1$ 在10~50 cm土层的根质量密度也不小。可见,在整个生育期过程中,轻度干旱 $T_1$ 的根系生长状况最好。由于严重干旱,尽管 $T_3$ 处理在20~30、30~40、40~50 cm土层的根质量密度相对较大(图2-c至图2-e),但在0~10 cm的根质量密度最小(图2-a), $T_3$ 的总根质量密度也最小。

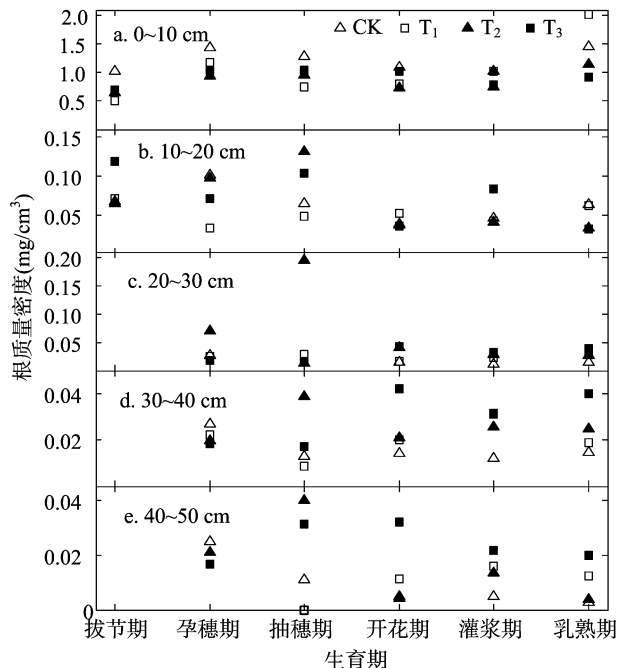


图2 不同水分条件下根质量密度在不同土层的时间变化

由图3可以看出,在整个冬小麦生育期,根质量密度主要集中于0~10 cm土层中,10~50 cm土层根质量密度所占比例很小。

## 2.2 不同土壤水分条件下冬小麦根长密度

**2.2.1 根长密度分布规律** 由图4可见,在冬小麦整个生育期,不同土层根长密度对土壤水分胁迫有不同响应,总体表现为根长密度随土层深度增加而持续减小。在5个土层中,所有处理的根长密度都是在0~10 cm土层最大,与根质量密度的分布情况相似。4种处理的根长密度均在孕穗期达到第一个高峰,随后根长密度开始减小。在0~10 cm土层中,整个生育期CK的根长密度一直较大,表明因为充足的水分,根系主要分布在浅层。 $T_3$ 的根长密度在0~10 cm最小,但从图4-c、图4-d、图4-e看出,在20~50 cm土层,灌浆期和乳熟期 $T_3$ 的根长密度都是最大,表明因为较严重的干旱胁迫, $T_3$ 的根系扎得较深,以吸取深层土壤水分。

**2.2.2 根长密度与土层深度的回归分析** 如图5所示,在灌浆期,不同土壤水分胁迫下,根长密度均随着土壤深度的增加呈现降低的趋势。CK、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  4种不同土壤水分处理下根长密度与土壤深度的指数回归方程相关系数 $r^2$ 分别为0.88、0.66、0.72和0.82,可见根系密度与土壤深度相关程度很大,根系在浅层土中分布较多,深层较少。

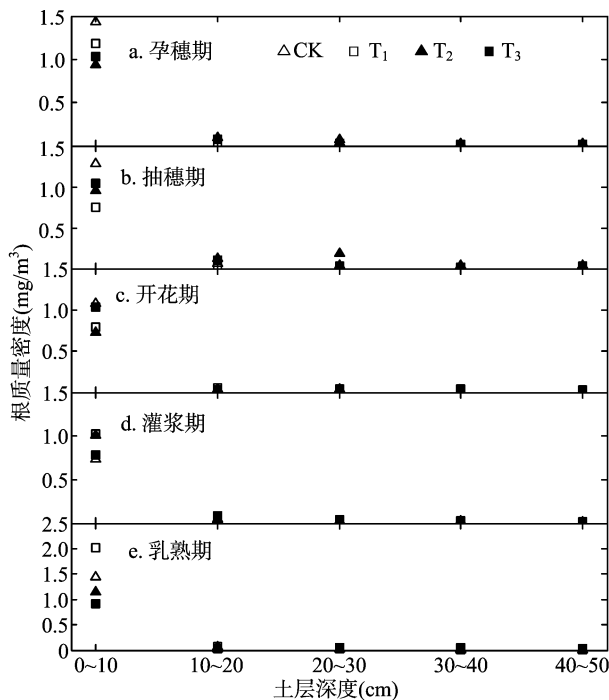


图3 不同水分条件下根质量密度在不同土层的动态变化

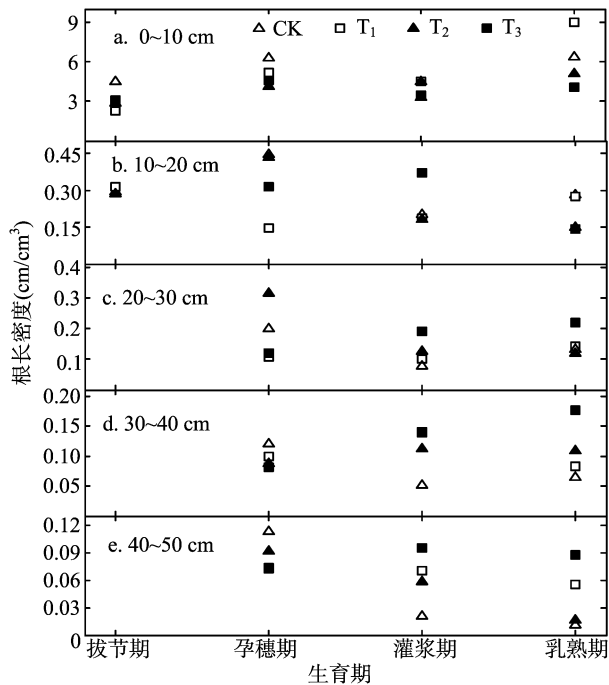


图4 不同水分条件下根长密度在不同土层的时间变化

## 3 讨论

### 3.1 冬小麦总根质量变化特征

根系生长分布与土壤水分状态有密切关系,冬小麦总根质量变化在很大程度上受土壤水分影响。土壤水分正常条件下,根系主要集中在浅土层,土壤干旱时根系在深层的分布明显增多<sup>[15]</sup>。本次田间实测数据中显示,在0~10 cm土层,不同土壤水分胁迫下根质量占总根质量的比例为80%~90%,即浅层(0~10 cm)土壤中根质量密度最大,几乎是深层土

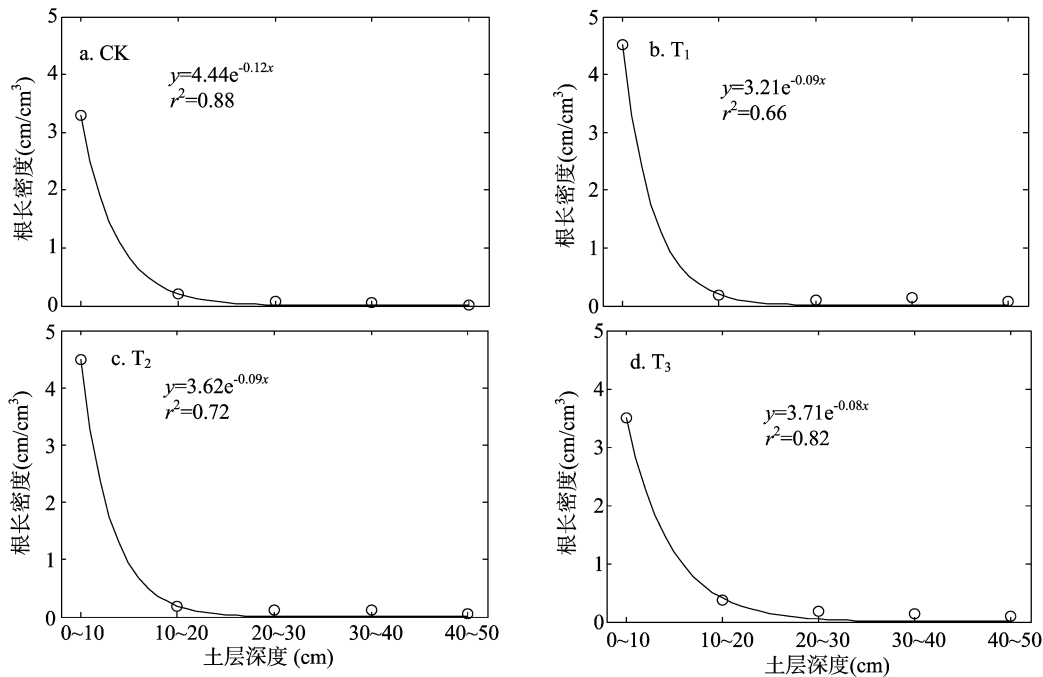


图5 灌浆期根长密度和土层深度的相关性

(10~50 cm)的10倍。由此可知,冬小麦根系在浅层土中分布较多,深层较少。土壤含水量一直处于较低状态的T<sub>3</sub>处理在30 cm以下土层中根质量比例较高,说明干旱促进根系向下延伸,使土壤中下层根质量比例增大,这些与前人观点一致<sup>[11]</sup>。4种土壤水分胁迫下,总根质量密度在孕穗后期出现下降趋势,主要是由于营养物质以向籽粒转运为主,向根系转运相对减少,因而降低了冬小麦的总根质量<sup>[16]</sup>。有研究表明,在冬小麦生育后期,主要依靠深层土的根系吸收利用相应土层的贮水来维持其生长和产量形成<sup>[15,17-18]</sup>。一般来说,浅土层根系衰亡速度较快,而深层根系由于生态环境稳定,受大气变化影响小,衰亡速度较缓慢,因此成为作物籽粒灌浆的功能根系<sup>[15,19-20]</sup>。根系分布深,深层根系比例大的作物不仅消耗土壤表层水分较少,而且在生育中后期若上层土壤干旱则有利于促进利用深层水分,提高水分利用率<sup>[21]</sup>。然而本试验显示,土壤含水量较低的T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>处理,尽管深层根质量比例大,可以充分吸收利用深层水分,但在灌浆中后期,总根质量密度没有明显变化。CK处理由于土壤含水量较高,主要消耗灌溉水,对土壤水利用少,轻度干旱(T<sub>1</sub>)条件下的根系在灌浆后期迅速增加,到乳熟期总根质量密度达到最大,则说明轻度干旱最利于根系生长与分布,即适量的水分亏缺可以增强小麦的抗旱能力更利于作物生长发育。

### 3.2 冬小麦根质量密度变化特征

根系是冬小麦感知干旱的重要位点,根质量密度是重要指标之一<sup>[17]</sup>。冬小麦根质量密度变化很大程度上受到根系建成期间的土壤水分胁迫影响。在土壤水分正常条件下,根系主要集中在浅土层,土壤干旱时根系在深层的分布明显增多<sup>[19]</sup>。李凤民等曾认为,浅层土根质量密度较大时将形成大量非水力根信号,从植物非水力根信号的生理调节作用和生活史进化角度看,对小麦产量形成有一定抑制作用。在大田条件下浅层土根质量密度小、深层根质量密度大有助于稀释

根信号作用,从而提高水分利用效率和小麦产量<sup>[22-23]</sup>。在本次田间实测试验中,通过不同土壤水分处理,观察根质量密度在不同土层的动态变化。在土壤水分含量较高的0~10 cm土层,轻度干旱(T<sub>1</sub>)的冬小麦根质量密度最大,CK处理次之,T<sub>3</sub>处理最小。这说明土壤水分可以影响根系的生长,根系分布具有高度的可塑性。水分亏缺的T<sub>3</sub>处理在30~40、40~50 cm土层根质量密度较高,根系下扎较深,尽管深层根系有利于冬小麦吸收深层土壤水分,但这只是相对值的增加,而非绝对值的增加,总根质量还是远小于水分较为充足的CK和T<sub>1</sub>处理。土壤含水量较高的CK处理,以吸取灌溉水为主,根系主要集中在浅土层,向深层生长发育受到抑制,导致冬小麦总根质量较低<sup>[24]</sup>,最终可能会导致冬小麦的生物学产量降低。在30~40、40~50 cm土层根质量密度较小,不同水分条件下有明显变化,T<sub>3</sub>处理的根质量密度明显高于其他处理。说明土壤水分越少根系下扎得越深,这是由于冬小麦为了适应土壤水分的亏缺,增加根系长度,以能吸收到较深处土壤水分来维持其生存。通过不同土壤水分处理下根质量密度在不同土层的动态变化可以看出,小麦的根质量密度与土层深度之间成指数衰减关系,与其他禾本科作物的根系生长分布规律基本<sup>[2,25]</sup>一致,这与前人研究结论<sup>[26]</sup>一致。综上所述,土壤不同水分处理可以影响冬小麦根系生长分布,使根质量密度发生变化。当土壤水分亏缺时,冬小麦根系生长受到限制,根质量密度减小,而轻度干旱则有利于根系向下延伸生长,使根质量密度大于其他处理。在干旱或较干旱的水分胁迫下,植物的反应是积极主动的,它能在水分亏缺造成损伤之前感知到土壤水分胁迫,使植物对土壤干旱做出适应性调节反应,使植物本身做出最优化的选择<sup>[25]</sup>。

### 3.3 冬小麦根长密度变化特征

植物生长分布对水土环境十分敏感,对土壤水分的竞争能力首先取决于其根系占据的土壤空间,这一能力由根长密

度等根系特征决定<sup>[27]</sup>。根长密度是反映地下部分生长的重要指标,它在一定程度上可以反映出根系对土壤资源利用能力的强弱<sup>[28]</sup>。根长密度与根质量密度的变化规律极为相似:冬小麦的根系越接近地表土层,根量分布越多,根长密度越大,随着根系向深层土壤的生长,根系分布较少且根长密度变化较小;根长密度在土壤剖面的垂直分布均表现为随土壤深度的增加呈指数式下降<sup>[28]</sup>。本研究增加了不同水分条件下根长密度在不同土层的时间变化,尤其增加了不同水分梯度,得出在不同水分处理下不同土层深度与根长密度之间的关系并对它们进行相关性分析。不同土壤水分条件下冬小麦的根长密度不同,0~10 cm的表层土壤中,土壤含水量较高,小麦根长密度大;20~50 cm深层土中,土壤含水量较低,根长密度小。在水分含量低的情况下,不同生育期之间的根长密度差别不大,这说明表层土壤水分较低时,根系主要从土壤中吸取水分,因为土壤层不同深度水分差别较小,所以20~50 cm土层的根长密度基本相同<sup>[29-30]</sup>。灌浆期不同土层深度与根长密度之间的指数回归分析证明根长密度与土层深度有较大相关性,且轻度干旱处理的根质量密度、根长密度最高,最利于冬小麦根系生长。

#### 4 结论

不同土壤水分胁迫可调控冬小麦根系生长分布。水分充分,根系较多集中在表层,水分缺乏,上层的干旱促使根系向深层发育,但重度干旱使小麦总根质量密度减少并使根质量密度、根长密度减小。小麦总根质量密度以土壤轻度干旱的最多,重度干旱的最少,所以轻度干旱有利于小麦根系的生长。

冬小麦根质量密度和根长密度随作物生长呈先增后降的变化趋势,随土层深度增加而呈指数式下降趋势。4种不同土壤水分处理在0~10 cm土层根质量密度、根长密度大,在20~50 cm土层分布较少。

#### 参考文献:

[1] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat - induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660 - 684.

[2] 康绍忠, 潘英华, 石培泽, 等. 控制性作物根系分区交替灌溉的理论及试验[J]. *水利学报*, 2001(11): 80 - 86.

[3] 姚玉璧, 张存杰, 邓振镛, 等. 气象、农业干旱指标综述[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(1): 185 - 189.

[4] 李茂松, 李 森, 李育慧. 中国近 50 年旱灾灾情分析[J]. *中国农业气象*, 2003, 24(1): 7 - 10.

[5] 杨荣光, 于春霞, 张兴强, 等. 不同土壤水分条件下冬小麦根系分布规律研究[J]. *耕作与栽培*, 2014(1): 4 - 8.

[6] 毕建杰, 刘连颖, 谭秀山, 等. 冬小麦农艺性状对花前水分胁迫的响应[J]. *科技导报*, 2012, 30(19): 40 - 44.

[7] 刘 培, 蔡焕杰, 王 健. 土壤水分胁迫对冬小麦生长发育、物质分配及产量构成的影响[J]. *农业现代化研究*, 2010, 31(3): 330 - 335.

[8] 单长卷, 梁宗锁. 土壤干旱对冬小麦幼苗根系生长及生理特性的

影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 38 - 41.

[9] 王晨阳, 马云喜. 不同土壤水分条件下小麦根系生态生理效应的研究[J]. *华北农学报*, 1992, 7(4): 1 - 8.

[10] 于振文. 作物栽培学各论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 32 - 33.

[11] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 不同土壤水分条件下冬小麦根系分布规律及其耗水特性研究[J]. *中国农村水利水电*, 2007(8): 18 - 21.

[12] 杨书运, 严 平, 梅雪英, 等. 土壤水分亏缺对冬小麦根系的影响[J]. *麦类作物学报*, 2007, 27(2): 309 - 313.

[13] 姚 宁, 宋利兵, 刘 健, 等. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(12): 2379 - 2389.

[14] Newman E I. A method of estimating the total length of root in a sample[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996(3): 139 - 145.

[15] 薛丽华, 段俊杰, 王志敏, 等. 不同水分条件下对冬小麦根系时空分布、土壤水利用和产量的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(19): 5296 - 5305.

[16] 梁丽银, 陈培元. 水分胁迫和氮素营养对小麦根苗生长及水分利用效率的效应[J]. *西北植物学报*, 1995, 15(1): 21 - 25.

[17] 孙书雯, 陈秀敏, 乔文臣, 等. 冬小麦干旱胁迫下不同土层根量分布于产量的关系[J]. *河北农业科学*, 2008, 12(5): 6 - 8.

[18] 关军峰, 马春红, 李广敏. 干旱胁迫下小麦根冠生物量变化及其与抗旱性的关系[J]. *河北农业大学学报*, 2004, 27(1): 1 - 5.

[19] 李鲁华, 李世清, 翟军海, 等. 小麦根系与土壤水分胁迫关系的研究进展[J]. *西北植物学报*, 2001, 21(1): 1 - 7.

[20] 苗果园, 张云亭, 尹 钧, 等. 黄土高原旱地冬小麦根系生长规律的研究[J]. *作物学报*, 1989, 15(2): 104 - 115.

[21] Narayan D. Root growth and productivity of wheat cultivars under different soil moisture condition[J]. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 1991, 17(1): 19 - 26.

[22] 李凤民, 鄢 珣, 郭安红, 等. 试论麦类作物非水力根信号与生活史[J]. *生态学报*, 2000, 20(3): 510 - 513.

[23] 刘庚山, 郭安红, 任三学, 等. 人工控制有限供水对冬小麦根系生长及土壤水分利用的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(11): 2342 - 2352.

[24] 张顺堂, 张桂莲, 陈立云, 等. 高温胁迫对水稻剑叶净光合速率和叶绿素荧光参数的影响[J]. *中国水稻科学*, 2011, 25(3): 335 - 338.

[25] 霍治国, 白月明, 温 民, 等. 水分胁迫效应对冬小麦生长发育影响的试验研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(9): 1527 - 1535.

[26] 王学臣, 任海云, 娄成后. 干旱胁迫下植物根与地上部间的信息传递[J]. *植物生理学通讯*, 1992, 28(6): 397 - 402.

[27] Casper B B, Jackson R B. Plant competition under ground[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28(1): 545 - 570.

[28] 姚素梅, 康跃虎, 刘海军. 喷灌与地面灌溉冬小麦根系生长和分布的比较研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(4): 1 - 5, 14.

[29] Chen K M, Gong H J, Chen G C, et al. ACC and MACC biosynthesis and ethylene production in water - stressed spring wheat[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(7): 775 - 881.

[30] 王淑芬, 张喜英, 裴 冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 27 - 32.