

# 黄土高原旱塬区不同覆盖模式下冬小麦耗水特征及根系生长规律研究

潘小莲<sup>1</sup>, 李秀<sup>1</sup>, 赵英<sup>1</sup>, 张建国<sup>1</sup>, 张阿凤<sup>1</sup>, 冯浩<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为探究黄土高原旱塬区不同覆盖模式对冬小麦耗水及根系生长的影响, 采用微根管动态监测技术, 连续两年对比分析平作不覆盖(T0)、秸秆覆盖平作(T1)、半膜覆盖垄作(T2)和垄上覆膜沟覆秸秆(T3)4种处理下冬小麦不同生育时期0~130 cm土层根系密度及土壤水分的变化。结果表明, 与T0处理相比, T1、T2和T3处理对冬小麦耗水总量无显著影响, T1、T2和T3处理的水分利用效率分别提高25.42%、9.68%和20.13%。T1、T2和T3处理均会减小冬小麦根系富集深度, 使根系分布深度上移, 根系富集区离地表深度表现为T2<T3<T1≤T0。与T0处理相比, T1、T2和T3处理分别增产23.10%、12.24%和20.70%。由此可知, T1、T2和T3处理在减小冬小麦根系富集深度及提高水分利用效率和产量方面均优于传统平作不覆盖种植模式, 其中以T1处理最优。

**关键词:** 覆盖模式; 微根管; 根系生长; 土壤水分; 产量

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2018)06-0726-08

## Characteristics of Water Consumption and Root Growth of Winter Wheat under Different Covering Modes in Arid Tableland of the Loess Plateau

PAN Xiaolian<sup>1</sup>, LI Xiu<sup>1</sup>, ZHAO Ying<sup>1</sup>, ZHANG Jianguo<sup>1</sup>, ZHANG Afeng<sup>1</sup>, FENG Hao<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture/Collage of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil And Water Conversation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Field experiment was conducted to explore the effects of different covering modes on characteristics of water consumption and root growth of winter wheat in arid tableland of the Loess Plateau. Minirhizotron root monitoring system was used to study the root length density and soil moisture in a 0-130 cm soil profile at different growth stages for two years. There were four treatments: flat plot without mulching(T0), flat plot with straw mulching(T1), plastic mulching on soil ridges(T2), and plastic mulching on soil ridges and straw mulching in furrows(T3). The results showed that T1, T2 and T3 had no significant effect on total water consumption in comparison with T0. However, water use efficiency of T1, T2 and T3 was increased by 25.42%, 9.68% and 20.13%, respectively. T1, T2 and T3 also reduced the depth of root enrichment zone, and shallowed depth of root enrichment zone in the order of T2<T3<T1≤T0. Moreover, the average yield of T1, T2 and T3 was increased by

收稿日期: 2017-09-26

修回日期: 2017-11-30

基金项目: 国家863计划项目(2013AA102904); 陕西省科学技术研究发展计划项目(2014KJXX-44)

第一作者 E-mail: panxiaolian\_soils@163.com

通讯作者: 赵英(E-mail: yzhaosoils@gmail.com)

23.10%, 12.24% and 20.70%, respectively, compared with T0. Therefore, all covering modes could reduce the depth of root enrichment zone, increase water use efficiency and yield of winter wheat, compared with traditional non-mulching treatments, and flat plot with straw mulching is the best mode.

**Key words:** Covering modes; Minirhizotron; Root development; Soil moisture; Yield

根系是冬小麦吸收水分和养分的重要器官,其生长动态可反映冬小麦的生长发育状况,对籽粒产量具有极其重要的影响<sup>[1-2]</sup>。冬小麦根系的生长主要受遗传因素和土壤水肥条件影响<sup>[3-4]</sup>,而农田耕作措施如耕翻、覆盖等通过影响土壤水肥条件而显著影响根系生长<sup>[5-8]</sup>。因此,在旱作农业生产区,研究不同覆盖模式下冬小麦根系生长变化规律对指导冬小麦生产具有重要意义。由于作物根系隐藏在土壤中,研究根系生长动态较为困难,传统的根系生长研究方法往往费力耗时,甚至会破坏土壤-根系系统,不利于获得准确的根系生长动态结果。

目前,对于冬小麦根系的研究主要是利用人工取样和剖面观察的方法。冯福学等<sup>[5]</sup>利用根钻法研究认为,免耕秸秆覆盖会显著增加冬小麦根系总干重和总根长;蔡永强等<sup>[6-7]</sup>利用剖面观察法分析发现,覆膜会减少土壤深层根量,增加浅层根量;而郑飞等<sup>[8]</sup>研究表明,垄作可以提高小麦发根潜力,促进根系发育,从而提高产量。微根管技术是一种非破坏性的、可原位直接观察植物细根的研究方法,能系统、便捷地对根系的生长过程进行长期定位监测<sup>[8-9]</sup>。该技术已经广泛应用到施氮水平、耕作制度、不同生育时期和不同品种之间作物根系动态变化的研究<sup>[10-14]</sup>。但目前关于不同覆盖模式下旱塬区冬小麦根系生长及耗水特征的研究报道较少。本研究利用微根管法探究不同覆

盖模式下黄土高原旱塬区冬小麦根系生长动态、耗水特征及产量,以期为农田栽培模式的优化提供理论依据及技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2013 年 10 月—2015 年 6 月在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院灌溉试验站进行(34°20'N, 108°24'E, 海拔 521 m)。该站地处渭河三道台塬地区,地下水埋藏较深,其向上补给量可以忽略不计。长期监测结果显示,该地年均气温为 13.0 °C。2013—2014 和 2014—2015 两年度冬小麦生育期内降雨分布见图 1,其中两个年度降雨量分别为 303.2 和 232.7 mm,平均气温分别为 8.64 和 9.00 °C。试验区土壤类型土垫旱耕人为土,初始土壤理化性质见表 1。

### 1.2 试验设计

田间试验设置平作不覆盖、秸秆覆盖平作(行间均匀覆盖小麦秸秆,覆盖量为 0.4 kg·m<sup>-2</sup>)、半膜覆盖垄作(播前起垄,垄上覆白膜,膜间沟内种植 2 行小麦,先覆膜后种植)和垄覆膜沟覆秸秆(播前起垄,垄上覆白膜,膜间沟内先种植 2 行小麦后覆秸秆,覆盖量为 0.4 kg·m<sup>-2</sup>)4 个处理,分别用 T0、T1、T2 和 T3 表示,垄宽 30 cm,垄间沟宽 30 cm。各个处理均基施纯氮 120 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 kg·hm<sup>-2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 50

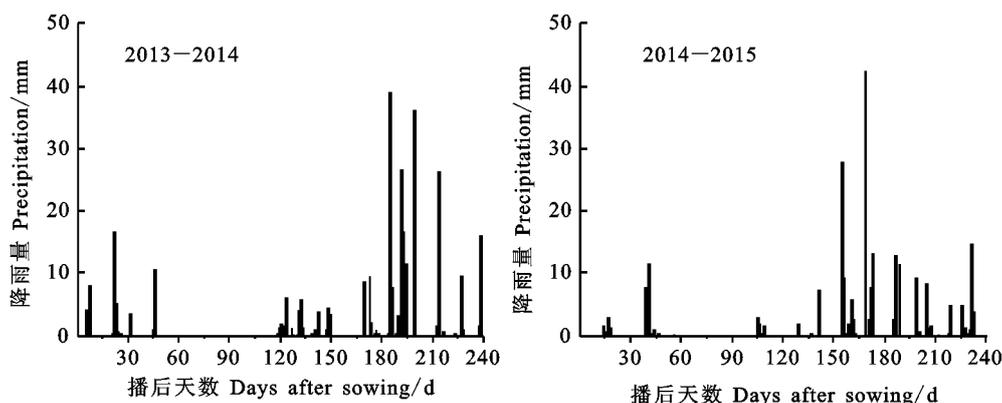


图 1 试验期间(2013—2014 和 2014—2015)冬小麦生育期内降雨量分布

Fig. 1 Distribution of precipitation during the two growing seasons(2013—2014 and 2014—2015) of winter wheat

表 1 试验地基本土壤理化性质

Table 1 Basic physiochemical properties of soil at the experimental site

层次 Layer/cm	容重 Bulk density/ (g · cm <sup>-3</sup> )	有机质 Organic matter/ (g · kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available phosphorus/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available potassium/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	田间持水量 Field water capacity/%	砂粒 Sand (2~0.02 mm)/%	粉粒 Silt (0.02~ 0.002 mm)/%	粘粒 Clay (<0.002 mm)/%
0~20	1.27	28.51	20.91	174.59	22.17	30.46	41.63	27.91
20~40	1.57	14.01	—	—	26.43	57.15	26.36	16.49
40~60	1.40	12.49	—	—	26.24	65.02	21.57	13.41
60~80	1.35	8.89	—	—	26.03	34.25	44.52	21.23
80~100	1.39	8.80	—	—	25.18	49.21	32.12	18.67

kg · hm<sup>-2</sup>,返青前追施纯氮 30 kg · hm<sup>-2</sup>。采用随机区组试验设计,每个处理重复 3 次,小区为东西走向,面积 10 m<sup>2</sup>(5 m × 2 m),每个小区之间有 0.5 m 宽的保护行。2013 年小麦于 10 月 9 日播种,次年 6 月 5 日收获;第 2 年小麦于 2014 年 10 月 15 日播种,次年 6 月 8 日收获。两年播种量均为 187.5 kg · hm<sup>-2</sup>,每个小区有 6 行小麦,行距 30 cm,均匀条播,供试冬小麦品种为小偃 22。其他田间管理措施如除草、病虫害防治等按正常田间管理进行。

1.3 观测项目与方法

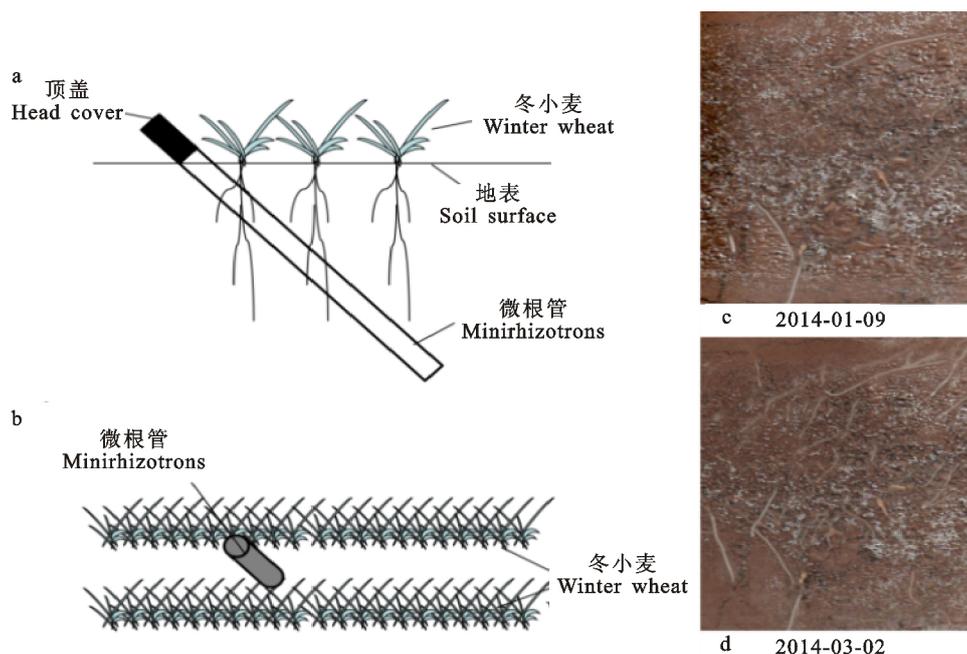
1.3.1 微根管的安装

CI-600 根系监测系统 (CID Bio-Science,

Camas, WA, USA) 由微根管、微型摄像头和 WinRHIZOTron 图像分析软件 3 部分组成,采集图像尺寸为 21.56 cm × 19.56 cm。微根管(长 200 cm,内径 6.4 cm)于 2013 年 11 月安装,在每个处理安装微根管动态监测根系生长动态,安装角度与地面夹角为 45°,上部约 20 cm 露出地面,并用黑色薄膜与胶带包裹,防止阳光照射进入管内,影响微根管附近根系的生长,同时在管口安装顶盖防止雨水和灰尘进入管内(图 2)。

1.3.2 根系的测定

原位监测根系时,将附有滑竿的微型摄像头与计算机连接,借助 CI-600 根系监测系统配备的扫描软件于冬小麦的不同生育时期(越冬期、拔节



a: 纵切图;b: 平面图;c: 2014 年 1 月 9 日小麦根系图;d: 2014 年 3 月 1 日小麦根系图。

a: Transverse plane image;b: Plane image;c: Roots of winter wheat on January 9, 2014;d: Roots of winter wheat on March 1, 2014.

图 2 微根管安装及不同时间应用微根管观测的小麦根系

Fig. 2 Diagram of minirhizotron installation and roots of winter wheat detected by minirhizotron at different periods

期、抽穗期与成熟期)获取 0~130 cm 土壤根系图像(滑竿移动深度为 10 cm,共 13 个土层)。将每次获取的有重叠部分的图片用 Adobe Photoshop CS6 软件拼接成一张完整的根系图片,然后裁剪成不同深度图片,再利用 MATLAB 软件的辅助图像处理功能(包括图像对比增强、图像二值化、中值滤波、对象标注、特征度量等步骤),设计出基于图像识别和根系参数计算的处理程序,对所获取的根系图像进行分析处理,以获得根系根长、根面积等根系形态参数。

### 1.3.3 土壤水分测定

试验期间,运用 Trime-TDR 每 7 d 手动监测 0~140 cm 土层土壤体积含水量,每 10 cm 监测一次数据,重复三次。

### 1.3.4 冬小麦产量的测定

选取 1 m<sup>2</sup> 的样方进行冬小麦实际产量的测定,各处理重复三次,计算冬小麦的籽粒产量和生物产量。

## 1.4 数据统计分析

### 1.4.1 根系密度的计算

利用 MATLAB 软件对微根管系统获得的图片进行处理,并进行根长测定,按已知的图片面积计算相应的根系密度(root length density, RLD)<sup>[14]</sup>。

$$RLD = (L - \sin \theta) / (S \times D)$$

式中,RLD 为单位体积的根长密度(cm·cm<sup>-3</sup>);L 为根长(cm);S 为扫描图片面积(cm<sup>2</sup>);D 为微根管摄像头扫描可见的土层厚度,一般为 0.2~0.3 cm<sup>[10]</sup>,本试验选取 D=0.2 cm。由于微根管安装时与地表呈角度 θ,需要将计算的结果转换成垂直方向的单位体积根长密度。

### 1.4.2 冬小麦耗水量和水分利用效率的计算

$$ET = R + \Delta W; WUE = Y / ET$$

式中,ET 为冬小麦耗水量(mm),R 为阶段生育期内降水量(mm),ΔW 为阶段土壤水分消耗量(mm)(初期与末期土壤含水量的差),WUE 为水分利用效率(kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>),Y 为籽粒产量(kg·hm<sup>-2</sup>)。

## 1.5 数据处理

运用 Microsoft Excel 2007 对根系数据进行整理,通过 SPSS 软件进行统计分析,采用单因素 ANOVA 分析法对不同覆盖模式下作物耗水量进行比较,利用 surfer Demo11、OriginPro 9.0 对数据进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同覆盖模式下麦田土壤水分变化特征

麦田土壤水分含量的季节性动态变化明显,且随土层深度的增加而增大(图 3)。在 2013—2014 年度,降雨集中在小麦播后 120~150 d 和 171~195 d,分别占到了整个生育期降雨量的 12.07%(36.6 mm)和 41.56%(126 mm);降雨过后各处理土壤剖面含水量均有显著增加,其中 T2、T3 处理变化较明显,而 T1 处理仅在 0~40 cm 深度内增加了土壤含水量。T1 处理在整个生育期内 40 cm 以下的土层含水量均小于其他处理。T2 处理的整个土壤剖面含水量都较高。T3 处理在生育期内的表层土壤含水量较 T2 处理有所下降,深层土壤含水量并无明显差异。在 2014—2015 年度,总降雨量为 232.7 mm,降雨主要集中在播后 155~191 d(139.5 mm);降雨过后,土壤含水量快速上升,此时冬小麦处于返青-拔节-抽穗期,集中降雨有助于产量的增加。在此期间,两个垄作处理(T2 和 T3)的土壤含水量均达到 34%,说明半膜垄作集雨效果更好。

小麦耗水量随生育进程逐渐增大(图 4)。在 2013—2014 年度,T0、T1、T2 处理的抽穗期耗水量均出现下降,而 T3 处理并没有下降,说明其水分储存较强。在 2014—2015 年度,耗水量变化趋势大致与 2013—2014 年度相似。但由于降水量的减少,所有处理的整个生育期耗水量都小于 2013—2014 年,且 T0、T1、T2 处理耗水量从抽穗期开始均持续上升,T3 处理略降。

### 2.2 不同覆盖模式下冬小麦根长特征

从冬小麦根长密度在土壤剖面中的分布变化(图 5)可以看出,随着生育时期的推移,根系逐渐下扎,深层根量不断增加。拔节期(播种后 180 d 左右),各土层根系数量均达到最大值,且不同处理间根长密度出现明显差异。在 2013—2014 年度,T0 处理根系主要集中在 80~130 cm 土层,占总根系的 55.45%,其中 0~20 cm 土层根系占 18.05%。T1 处理的根系主要集中在 10~30 cm 土层(21.79%)和 100~130 cm 土层(26.30%)。

T2 处理的小麦根系主要集中在 0~20 cm 土层(28.07%)和 50~90 cm 土层(45.60%)。T3 处理根系主要集中在 10~20 cm 和 70~100 cm 土层,分别占总根系的 13.24%和 35.14%,说明垄作覆膜促使小麦根系主要在土壤表层富集。T0、

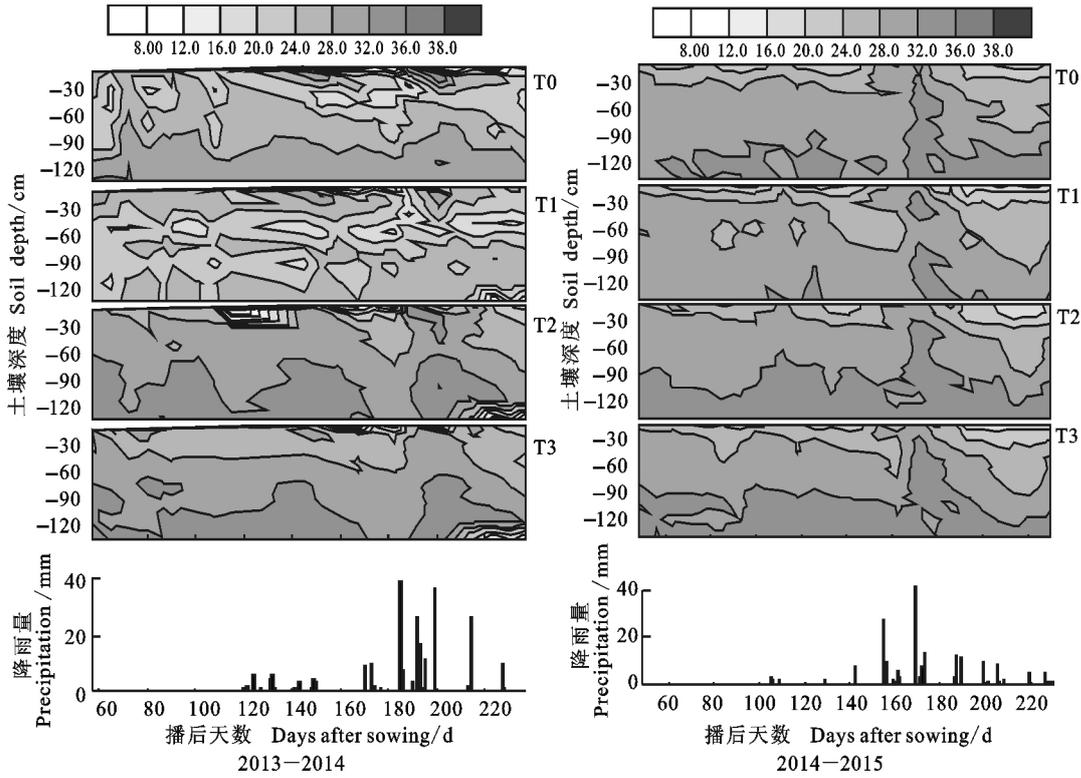


图 3 不同覆盖模式下土壤剖面水分时空分布特征

Fig. 3 Temporal and spatial distribution characteristics of soil moisture under different mulching patterns

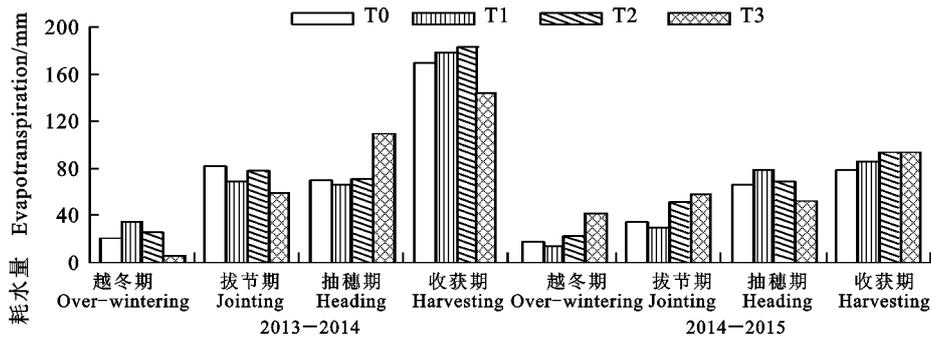


图 4 不同覆盖模式下土冬小麦不同生育期耗水量特征

Fig. 4 Water consumption of winter wheat under different mulching patterns at different growth stages

T1、T2、T3 处理根长密度最大值分别为 2.09、1.29、1.84 和 1.97  $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，T0 处理具有的根长密度值最大是由于其根系分布较集中。在 2014—2015 年度，由于降雨较少，各处理在整个生育期的表层根系数量较少，根系主要集中于 60 cm 以下的深层土壤，根系最大值出现在播种后 160~180 d。T0、T1、T2 和 T3 处理的根系分别主要集中在 100~130、90~130、50~90、60~110 cm 土层，分别占总根系的 51.07%、68.59%、45.90%、60.09%，根长密度最大值分别为 0.60、3.48、2.69、2.47  $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，根系分布均较集中。

降雨减少时，小麦根系主要富集在 60 cm 以下土层，而当雨量充沛时，起垄、秸秆和地膜覆盖等保护性措施还会在 0~30 cm 土层使根系形成另一个富集区。从深层土壤来看，冬小麦根系在土壤中集中区域离地表的深度表现为  $T2 < T3 < T1 \leq T0$ ，表明垄作覆膜栽培会减少小麦深层根量，使根系富集深度变浅。

### 2.3 不同覆盖模式对冬小麦产量与水分利用效率的影响

与 T0 处理相比，在 2013—2014 年度，虽然 T1 和 T2 处理增加小麦籽粒产量，T1 和 T3 处

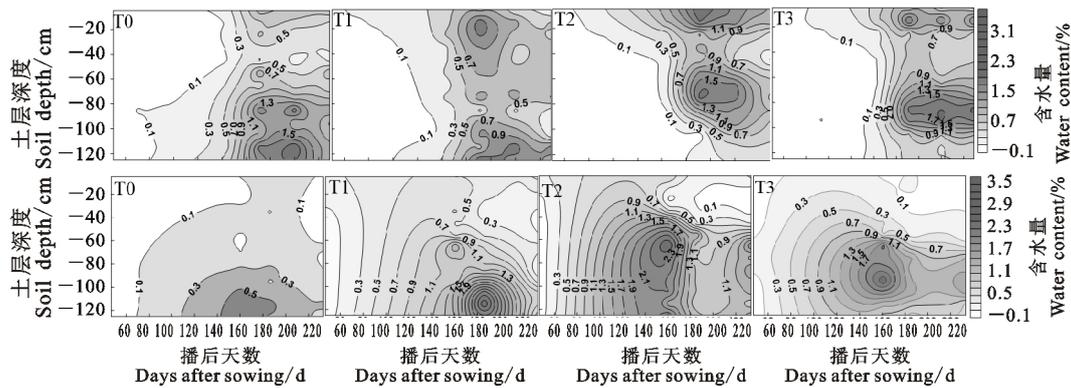


图 5 不同覆盖模式下冬小麦根长密度的时空变化

Fig. 5 Temporal and spatial distribution characteristics of root length density of winter wheat under different mulching patterns

理增加生物产量,但不同处理间籽粒产量和生物产量差异均未达到显著水平。在 2014—2015 年度,秸秆覆盖处理的籽粒产量与生物产量都高于 T0 处理,其中 T1 和 T3 处理的籽粒产量和生物产量增加效果均达到了显著水平(表 2)。T1、T2 和 T3 处理的 2 年平均籽粒产量分别比 T0 处理提高了 23.10%、12.24% 和 20.70%,其中 T3 处理对籽粒产量的影响两年差异较大。

不同处理间小麦总耗水量无显著差异,2013

—2014 年度的耗水量高于 2014—2015 年度。虽然除 T3 处理在 2013—2014 年度外,秸秆覆盖处理的水分利用效率在两个年度均高于 T0 处理,但不同处理间在 2013—2014 年度差异不显著,在 2014—2015 年度只有 T1 处理显著高于 T0 处理,提高 43.62%; T1、T2 和 T3 处理的两年平均水分利用效率分别提高 25.42%、9.68% 和 20.13%。这表明秸秆覆盖对旱地小麦水分有效利用有一定的影响,但程度较小。

表 2 不同覆盖模式对小麦地上部分生物量与水分利用效率的影响

Table 2 Effect of biomass and root length root under different covering modes

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	生物产量 Biomass/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	耗水量 Water consumption/mm	水分利用效率 WUE/ (kg · hm <sup>-2</sup> · mm <sup>-1</sup> )
2013—2014	T0	5 881±471a	17 572±499a	324.13±33.06a	18.21±1.51a
	T1	6 243±854a	19 580±5 322a	331.91±38.26a	19.20±5.12a
	T2	6 473±642a	16 623±1 649a	326.58±27.24a	19.81±0.49a
	T3	5 483±903a	19 025±2 023a	306.93±18.75a	17.85±2.47a
2014—2015	T0	5 195±790b	10 837±1 219b	259.35±18.39a	19.99±2.10b
	T1	7 392±1 717a	17 813±2 785a	258.91±8.63a	28.71±7.41a
	T2	5 959a±640ab	13 155±1 499b	269.76±6.60a	22.09±2.19ab
	T3	7 886a±525a	17 640±936a	282.16±12.80a	28.04±3.09ab

同列数值后字母不同表示同一年内不同处理间差异显著(P<0.05)。

Different letters after the values in same columns mean significantly different among the treatments in same year at 0.05 level.

### 3 讨论

研究旱区不同覆盖模式下土壤水分的时空变化对于冬小麦生长具有重要意义<sup>[15]</sup>。不同覆盖模式都可以通过改变地表状况来提高降水利用效率,增加土壤水分含量<sup>[16]</sup>。秸秆覆盖平作处理下,由于秸秆覆盖阻隔蒸发层与地表之间的联系,削弱了水汽对流交换强度,抑制了蒸发<sup>[17]</sup>,还可使地表水径流量降低,增加入渗量<sup>[18]</sup>。垄作地膜覆盖将降水汇于沟内,并且地膜覆盖抑制了水分

蒸发,沟内覆盖秸秆更进一步减少了土壤水分蒸发,起到了蓄水保墒,提升水分利用效率的作用,两年田间试验都表明秸秆覆盖平作能提高水分利用效率,且在第二年达到显著水平,这与冯浩等<sup>[19]</sup>、Sharma 等<sup>[20]</sup>和薛澄等<sup>[21]</sup>的研究结果类似。

水分状况可以影响根系富集深度、水平分布范围与垂直深度,还会影响根系呼吸等<sup>[22-23]</sup>。在相对应的土层中,当整体土壤水分含量充足时,小麦根系生长旺盛,表现为根密水大,土壤含水量愈

大,根系发育愈多<sup>[24]</sup>。而当土壤含水量较低时,根系不断下扎以吸取深层水分,提高深层水分利用效率,维持作物生长发育<sup>[25-26]</sup>。本试验得到类似结论:2013—2014 年度各处理根系主要集中在 0~30 cm 和 60 cm 以下土层;2014—2015 年各处理主要富集在 60 cm 以下土层,且根系富集深度表现为  $T_2 < T_3 < T_0$  和  $T_1$ (图 5)。这主要由于 2013—2014 年度降雨量较高,表层土壤一直能保持较高的含水量,根系生长旺盛,故土壤表层也具有较高的根系累积。2014—2015 年度降雨量较低,且苗期降雨仅 26.7 mm,导致根系不断下扎。从 2 年田间试验结果能明显看出垄作覆膜处理( $T_2$ 、 $T_3$ )根系富集深度变浅,这可能与起垄覆膜表层水热条件较优和良好的物理结构有关<sup>[22]</sup>。

覆盖措施一直是干旱半干旱地区农林业提升土壤水分利用效率的主要方法之一。大量研究表明,覆盖栽培会提升农作物产量<sup>[27-29]</sup>。薛澄等<sup>[21]</sup>研究发现,在渭北旱塬区优化施氮结合垄覆膜沟覆秸秆使产量增加达 15%~41%,水分利用效率增加 10%~30%。党廷辉等<sup>[30]</sup>和张向前等<sup>[31]</sup>表明,覆盖措施能提升小麦产量,提升水分利用效率。本研究中,不同覆盖模式下小麦平均籽粒产量较对照增加 23.10%、12.24% 和 20.70%, $T_3$  处理增产不稳定,可能是由于 2013—2014 年度降水过多,且  $T_3$  处理强烈的保水作用,使土壤持久湿冷而导致作物减产<sup>[32]</sup>。不同土壤水分条件下,秸秆覆盖效果不同<sup>[30]</sup>。覆盖处理提升水分利用效率在第一年不显著,这是因为降水较为丰富,基本可满足作物生长,使覆盖作用相对减小。而在第二年覆盖处理提升水分利用效率作用加强了,且秸秆平作处理达到了显著增加。由此可知,覆盖方式能创造良好的水分条件,提高水分利用效率,增加作物产量,其中秸秆覆盖平作表现最优。

不同覆盖处理对于冬小麦根系与土壤水分的时空分布的影响具有差异,这种差异能帮助我们进一步开展参数化根系吸水研究。但是本研究各处理差异较小且年际间结果有所不同,进行参数化具有一定难度,有待于更进一步细致分析。

#### 参考文献:

[1] 苗果园,张云亭,尹钧,等.黄土高原旱地冬小麦根系生长研究[J].作物学报,1989,15(2):104.  
MIAO G Y,ZHANG Y T,YIN J,et al. A study on the development of root system in winter wheat under unirrigated conditions in semi-arid Loess Plateau [J]. *Acta Agronomica Sini-*

*ca*,1989,15(2):104.

- [2] 周本智,张守攻,傅懋毅.植物根系研究新技术 Minirhizotron 的起源、发展和应用[J].生态学报,2007,26(2):253.  
ZHOU B Z,ZHANG S G,FU M Y. Minirhizotron, a new technique for plant root system research its invention, development and application [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007,26(2):253.
- [3] 王淑芬,张喜英,裴东.不同供水条件下对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2006,22(2):27.  
WANG S F,ZHANG X Y,PEI D. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat [J]. *Transactions of the CSAE*,2006,22(2):27.
- [4] 刘殿英,石立岩,黄炳茹,等.栽培措施对冬小麦根系及其活力和植株性状的影响[J].中国农业科学,1993,26(5):51.  
LIU D Y,SHI L Y,HUANG B R,et al. Research of cultivation methods on root system, root vigor and plant characteristics in winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,1993,26(5):51.
- [5] 冯福学,黄高宝,柴强,等.不同耕作措施对冬小麦根系时空分布和产量的影响[J].生态学报,2009,29(5):2499.  
FENG F X,HUANG G B,CHAI Q,et al. Effects of different tillage on spatiotemporal distribution of winter wheat root and yield [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2009,29(5):2499.
- [6] 蔡永强,牛新胜,焦小强,等.灌溉条件下覆膜对冬小麦根系分布及抗倒性状的影响[J].华北农学报,2014(S1):328.  
CAI Y Q,NIU X S,JIAO X Q,et al. Effects on root distribution and lodging traits of winter wheat under irrigation mulching [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*,2014(S1):328.
- [7] 宋海星,李生秀.覆膜条件下冬小麦根系生理特性及其空间分布变化[J].干旱地区农业研究,2006,24(6):1.  
SONG H X,LI S X. The physiological characteristics of winter wheat roots and its spatial distribution under mulching plastic film condition [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006,24(6):1.
- [8] 郑飞,孙向辉,邵运辉,等.垄作栽培对冬小麦根系及其发育环境的影响[J].河南农业科学,2005(5):11.  
ZHENG F,SUN X H,SHAO Y H,et al. Effects of bed-planting on the root system and its development environment in winter wheat [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2005(5):11.
- [9] JOHNOSON M G,TINGEY D T,PHILLIPS D L,et al. Advancing fine root research with minirhizotron [J]. *Environmental and Experimental Botany*,2001,45:263.
- [10] 史建伟,于水强,于立忠,等.微根管在细根研究中的应用[J].应用生态学报,2006,17(4):715.  
SHI J W,YU S Q,YU L Z,et al. Application of minirhizotron in fine root studies [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2006,17(4):715.
- [11] HERRERA JM,STAMP P,LIEDGENS M. Interannual variability in root growth of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) at low and high nitrogen supply [J]. *European Journal of Agronomy*,2007,26:317.
- [12] VERNICA MUOZ-ROMERO, JORGE BENTEZ-VEGA, et al. Monitoring wheat root development in rainfed vertisol: tillage effect [J]. *European Journal of Agronomy*,2010,33:182.

- [13]熊淑萍,王小纯,李春明,等.冬小麦根系时空分布动态及产量对不同氮源配施的响应[J].植物生态学报,2011,35(7):759.  
XIONG S P, WANG X C, LI C M, *et al.* Responses of the spatial-temporal distribution of winter wheat (*Triticum aestivum*) roots and yield to different ratios of nitrogen sources [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(7):759.
- [14]邱新强,高阳,李新强,等.黄淮平原冬小麦不同品种根系生长差异[J].应用生态学报,2012,23(70):1832.  
QIU X Q, GAO Y, LI X Q, *et al.* Differences in root development of winter wheat cultivars in Huang-Huai Plain, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(70):1832.
- [15]李梦哲,张维宏,张永升,等.不同水分管理下全田土下微膜覆盖的冬小麦耗水特性[J].中国农业科学,2013,46(23):4893.  
LI M Z, ZHANG W H, ZHANG Y S, *et al.* Water consumption characteristics of winter wheat with soil-coated ultrathin plastic-film mulching under different water managements [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(23):4893.
- [16]王红丽,张绪成,宋尚有,等.旱地全膜双垄沟播玉米的土壤水热效应及其对产量的影响[J].应用生态学报,2011,22(10):2609.  
WANG H L, ZHANG X C, SONG S Y, *et al.* Effects of whole field-surface plastic mulching and planting in furrow on soil temperature, soil moisture, and corn yield in arid area of Gansu Province, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2609.
- [17]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.  
XIAO J F, LIU Z D, DUAN A W, *et al.* Root distribution and water consumption characteristics of winter wheat under different soil moisture [J]. *China Rural Water & Hydropower*, 2007(8):18.
- [18]赵君范,黄高宝,辛平,等.保护性耕作对地表径流及土壤侵蚀的影响[J].水土保持通报,2007,27(6):16.  
ZHAO J F, HUANG G B, XING P, *et al.* Runoff and quantity of soil erosion under conservation tillage system by simulated rainfall [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(6):16.
- [19]冯浩,刘匣,余坤,等.不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J].农业机械学报,2016,47(12):192.  
FENG H, LIU X, YU K, *et al.* Effects of different mulching patterns on soil moisture, soil temperature and summer maize growth [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12):192.
- [20]SHARMA P K, PARMAR D K. The effect of phosphorus and mulching on the efficiency of phosphorus use and productivity of wheat grown on a mountain Alfisol in the Western Himalayas [J]. *Soil Use & Management*, 2010, 14(1):25.
- [21]薛澄,王朝辉,李富翠,等.渭北旱塬不同施肥与覆盖栽培对冬小麦产量形成及土壤水分利用的影响[J].中国农业科学,2011,44(21):4395.  
XUE C, WANG Z H, LI F C, *et al.* Effects of different fertilization and mulching cultivation methods on yield and soil water use of winter wheat on weibe dryland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(21):4395.
- [22]孙文泰,董铁,刘兴禄,等.覆盖处理苹果细根分布与土壤物理性状响应关系研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):88.  
SUN W T, DONG T, LIU X L, *et al.* The relationship between root distribution of apple and soil physical properties by different ground covering approaches [J]. *Agricultural Research in The Arid Areas*, 2016, 34(2):88.
- [23]ILLERIS L, MICHELSEN A, JONASSON S. Soil plus root respiration and microbial biomass following water, nitrogen, and phosphorus application at a high arctic semi desert [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 65(1):15.
- [24]武荣,李援农.水氮耦合对冬小麦根系分布和根冠比及产量的影响[J].南方农业学报,2013,44(6):963.  
WU R, LI Y N. Effect of water and nitrogen fertilizer coupling on root distribution, root/shoot ratio and yield of winter wheat [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2013, 44(6):63.
- [25]MO F, WANG J Y, XIONG Y C, *et al.* Ridge-furrow mulching system in semiarid Kenya: A promising solution to improve soil water availability and maize productivity [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 80:124.
- [26]QI Z J, ZHANG T, ZHOU L, *et al.* Combined effects of mulch and tillage on soil hydrothermal conditions under drip irrigation in Hetao irrigation district, China [J]. *Water*, 2016, 8(11):504.
- [27]程宏波,牛建彪,柴守玺,等.不同覆盖材料和方式对旱地春小麦产量及土壤水环境的影响[J].草业学报,2016,25(2):47.  
CHEN H B, NIU J B, CHAI S X, *et al.* Effect of different mulching materials and methods on soil moisture and temperature and grain yield of dryland spring wheat in northwestern China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(2):47.
- [28]ZHAO H, WANG R Y, MA B L, *et al.* Ridge-furrow with full plastic film mulching improves water use efficiency and tuber yields of potato in a semiarid rainfed ecosystem [J]. *Field Crops Research*, 2014, 161(1385):137.
- [29]WANG Q, ZHANG E, LI F, *et al.* Runoff efficiency and the technique of micro-water harvesting with ridges and furrows, for potato production in semi-arid areas [J]. *Water Resources Management*, 2008, 22(10):1431.
- [30]党廷辉,郭栋,戚龙海.旱地地膜和秸秆二元覆盖栽培下小麦产量与水分效应[J].农业工程学报,2008,24(10):20-24.  
DANG T H, GUO D, QI L H. Effects of wheat yield and water use under dual-mulching mode of plastic film and straw in the dryland farming [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10):20.
- [31]张向前,张贺飞,钱益亮.不同秸秆覆盖模式下小麦植株性状、光合及产量的差异[J].麦类作物学报,2016,36(1):120.  
ZHANG X Q, ZHANG H F, QIAN Y L. Differences in plant traits, photosynthesis and yield of wheat under different straw mulching modes [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(1):120.
- [32]赵秀玲,任永祥,赵鑫,等.华北平原秸秆还田生态效应研究进展[J].作物杂志,2017(1):1.  
ZHAO X L, REN Y X, ZHAO X, *et al.* Advances in ecological effects of residue retained in north china plain [J]. *Crops*, 2017(1):1.