

# 沟覆盖材料对垄沟集雨种植土壤水分和玉米根系分布的影响

李富春<sup>1</sup>, 王琦<sup>1</sup>, 张登奎<sup>1</sup>, 张恩和<sup>2</sup>, 刘青林<sup>2</sup>, 王鹤龄<sup>3</sup>

(1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070;  
3. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省气候变化与减灾重点(开放)实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** 为寻求半干旱地区垄沟集雨环保沟覆盖材料, 探究垄沟集雨种植增产机理, 在半干旱黄土高原区通过大田试验, 以传统平作为对照, 研究不同沟覆盖方式(无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖)对土壤含水量、玉米根干重、根长、根表面积和根体积的影响。结果表明: 垄沟集雨种植沟中的土壤含水量、玉米根干重、根长、根表面积和根体积明显大于垄中; 与平作相比, 无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖耕层沟中作物生育期平均土壤含水量分别增加 6.9%、10.6% 和 9.3%, 垄中平均土壤含水量分别降低 13.8%、10.9% 和 5.6%; 玉米总根干重(沟中 + 垄中)分别降低 15.9%、6.1% 和 16.8%, 总根长分别增加 37.6%、43.7% 和 34.8%, 总根表面积分别增加 10.5%、33.6% 和 15.0%。无覆盖和秸秆覆盖玉米总根体积分别降低 34.5% 和 16.3%, 生物可降解地膜覆盖玉米总根体积增加 13.2%。与传统平作相比, 垄沟集雨种植增加土壤水分、玉米根长和根表面积, 降低玉米根干重。在不同沟覆盖方式中, 生物可降解地膜覆盖具有较高土壤含水量、根长、根表面积和根体积。

**关键词:** 玉米; 垄沟集雨; 沟覆盖材料; 土壤水分; 根系

**中图分类号:** S513; S152.7      **文献标志码:** A

## Effects of furrow-mulching materials on soil moisture and maize root distribution in ridge-furrow rainwater harvesting system

LI Fu-chun<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, ZHANG Deng-kui<sup>1</sup>, ZHANG En-he<sup>2</sup>, LIU Qing-lin<sup>2</sup>, WANG He-ling<sup>3</sup>

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. Key (Open) Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou, Gansu 730020, China)

**Abstract:** In order to screening environmental friendly mulching materials and elucidate the mechanism of yield increase in ridge-furrow rainwater harvesting system, a field experiment was conducted to investigate the effects of different furrow mulching methods (non-mulching, biodegradable film mulching and straw mulching) on soil moisture and root dry matter, length, surface area and volume of maize in semi-arid areas of the Loess Plateau. The results showed that the soil water content and the values of physiological characteristics (dry matter, length, surface area and volume) of maize roots within furrow soil profiles were clearly higher than that within ridge soil profiles. Compared with traditional flat planting without mulching, average soil water content within furrow soil profiles increased during maize growing season was 6.9%, 10.6% and 9.3% for non-mulching, biodegradable film mulching and straw mulching, respectively, while within ridge soil profiles decrease was 13.8%, 10.9% and 5.6%. Total root dry matter (ridge + furrow) of maize decreased by 15.9%, 6.1% and 16.8%. Total root length of maize increased by 37.6%, 43.7% and 34.8%, and total root surface area of maize increase was 10.5%, 33.6% and 15.0%. Total root volume of maize decreased by 34.5% and 16.3% for non-mulching and straw mulching, respectively, but increased by 13.2% for biodegradable film mulching. Root dry matter of maize decreased, but soil moisture, root length and root surface area of maize increased in

收稿日期: 2016-01-23  
基金项目: 国家自然科学基金(41461062)  
作者简介: 李富春(1987—), 男, 甘肃通渭人, 硕士研究生, 主要从事半干旱区牧草集雨灌溉和水土保持研究。E-mail: 769506499@qq.com。  
通信作者: 王琦(1969—), 男, 副教授, 主要从事干旱区农作物节水研究。E-mail: wangqigsau@gmail.com。

ridge-furrow rainwater harvesting system, compared with the traditional flat planting without mulching. Biodegradable film mulching had a higher soil water content, root length, surface area and volume of maize than other furrow mulching methods.

**Keywords:** maize; ridge-furrow rainwater harvesting; furrow mulching material; soil moisture; root

甘肃省定西半干旱黄土丘陵区深居内陆腹地,地形多为梁、峁和丘陵沟壑地带,属典型雨养农业区<sup>[1-2]</sup>。该地区降水年际和年内变化较大,有效降水量少,大气干燥,43 a(1971—2013 年)年平均降雨量为 388 mm,60%~69%的降雨量主要集中在 6—9 月,且降雨以无效降雨(<5 mm)为主<sup>[3-4]</sup>。天然降水不足、变化频率较大和降雨时期与作物需水期错位使干旱灾害频繁发生和粮食产量低而不稳<sup>[5-6]</sup>。

为了降低干旱危害和解决粮食安全生产问题,该地区农民应用雨水集流系统进行雨水收集和利用。垄沟集雨种植技术,尤其全膜双垄沟播种玉米技术,在该地区发展较为完善。垄沟集雨种植技术指平地或缓坡地沿等高线起垄,形成垄沟相间微地形。垄沟集雨覆盖技术结合保护性耕作和覆盖技术,在通常情况下,垄覆盖作为集雨区,沟覆盖或无覆盖作为种植区,垄覆膜减少土壤水分蒸发,2 个面(垄面和沟面)降雨用于 1 个面(沟面),垄产生径流与沟内降雨进行叠加,将无效降雨(<5 mm)变为有效降雨,促进降水入渗,增加种植区(沟)土壤含水量,从而提高降雨资源利用效率<sup>[7-8]</sup>。覆盖材料阻碍表层土壤界面与大气热交换,从而减缓了土壤温度的昼夜变化,对提高作物出苗和减缓春寒具有明显作用<sup>[9-10]</sup>。垄沟集雨种植技术设计参数随降雨量、降雨类型、作物种类、土壤类型、覆盖材料等变化而变化<sup>[11-13]</sup>。

植物对土壤水分的利用效率主要取决于土层中根系分布特征值和吸水速率<sup>[14]</sup>。根系分布特征值主要取决于根系形态和构型,根系吸水速率主要取决于土壤水分、温度和通气状况等<sup>[15-16]</sup>。植物根系对外界环境变化具有较好自我调节(可塑性)功能<sup>[17]</sup>。在垄沟集雨种植系统中,沟覆盖引起沟内土壤温度和土壤水分等变化,进而改变根系指标和分布规律<sup>[18-19]</sup>。高玉红等<sup>[20]</sup>研究表明,垄沟集雨种植玉米根干重主要集中在 0~30 cm 土层,且沟中的玉米根干重明显大于垄中。邹聪明等<sup>[21]</sup>研究表明,与传统耕作相比,秸秆覆盖明显增加玉米苗期的根干重、根长和根表面积。杨青华等<sup>[22]</sup>研究表明,与无覆盖相比,普通地膜和液体地膜覆盖使棉花前期具有较高根系活力和根干重,但不利于棉花根系下扎,使深层根系衰减较快。熊瑛等<sup>[23]</sup>研究表

明,烟草根系活力和根干重排列次序为普通地膜覆盖>液体地膜覆盖>无覆盖,普通地膜覆盖和液体地膜覆盖促进根系活力和抗逆性,可以延缓作物早期衰老。周昌明等<sup>[24]</sup>研究表明,与无覆盖相比,平地生物可降解地膜全覆盖、垄覆生物可降解地膜和沟垄生物可降解地膜全覆盖的玉米根系密度分别增加 9.23%、13.85%和 16.92%。

国内外关于垄沟集雨种植技术覆盖材料多采用普通地膜。普通地膜主要成分是一种人工合成的分子结构非常稳定的聚乙烯、聚氯乙烯等高分子材料,在自然条件下很难降解,不易通过细菌、酶等生物方式降解,难以直接回收<sup>[25]</sup>。近年来,随垄沟集雨覆盖技术的推广,普通地膜覆盖产生大量残留,引起白色污染,残留地膜不利于农机耕作和作物生长,引起土壤透气性、土壤动物和微生物数量下降,限制土壤水分和养分运移,阻碍作物根系正常生长,导致土壤质量下降和作物减产,尤其对采食动物健康造成威胁<sup>[26-27]</sup>,从而限制该地区农牧业可持续发展。利用生物可降解材料(作物秸秆、树叶、树皮、干草等有机材料)进行覆盖和种植,该覆盖材料具有透气、透水、集雨保墒、易降解和增产等效果<sup>[28-29]</sup>。在垄沟集雨种植条件下,本试验研究不同沟覆盖生物可降解材料对土壤含水量、玉米根干重、根长、根表面积、根体积等影响,为垄沟集雨种植沟覆盖材料选择提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

田间试验于 2013 年 4 月 20 日—10 月 15 日在中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地(35°33'N, 104°35'E, 海拔 1 896.7 m)进行。该试验基地位于甘肃省定西市安定区,属黄土高原丘陵区 and 半干旱地区,属典型的温带大陆性季风气候。光能较多,雨热同季,气候干燥。年均 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温 2 933.5 $^{\circ}\text{C}$ ,年均 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 2 239.1 $^{\circ}\text{C}$ 。年日照时间为 2 433 h,年均气温 6.7 $^{\circ}\text{C}$ ,极端最高最低气温分别为 34.3 $^{\circ}\text{C}$ 和 -27.1 $^{\circ}\text{C}$ 。空气相对湿度 65.8%,年均降雨量 386.1 mm。降水较少,且极不规律,5—10 月降雨量占年降雨量的 86.9%;蒸发强烈,年蒸发量(1 531 mm)是年均降雨量的 4.0 倍;无

霜期为 140 d。

试验地地势平坦,表层土壤为重壤土,地力相对均匀。田间持水量为 25.6%,凋萎系数为 6.7%。试验区土壤肥力状况见表 1。当地耕作制度为 1 年 1

熟,主要种植作物有春小麦(*Triticum aestivum*)、燕麦(*Avena sativa*)、玉米(*Zea mays*)、高粱(*Sorghum bicol-*  
*or*)、蚕豆(*Vicia faba*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)、谷  
子(*Panicum miliaceum*)和胡麻(*Sesamum indicum*)等。

表 1 试验区土壤肥力状况  
Table 1 Soil fertilities of the experimental plots

| 深度<br>Depth<br>/cm | 全氮<br>Total N<br>/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全磷<br>Total P<br>/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全钾<br>Total K<br>/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 有机质<br>Organic matter<br>/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮<br>Ammonium N<br>/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效磷<br>Olsen P<br>/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>Available K<br>/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|--------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 0~40               | 0.78                                    | 0.69                                    | 22.40                                   | 10.37                                           | 48                                           | 13.35                                     | 245                                           |

1.2 试验设计

试验以玉米(*Zea mays*)为供试作物,品种为沈单 16 号,采用田间垄沟覆盖集雨种植技术,垄为集雨区,沟为种植区,小区随机排列,共设 4 个处理,包括 3 种沟覆盖和平作无覆盖,重复 3 次。垄覆盖材料均为生物可降解地膜,3 种沟覆盖方式分别为无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖。生物可降解地膜为德国 BASF 化工厂生产(基料为淀粉和生物材料,生物材料来源于玉米秸秆和其他可再利用原材料),厚度为 0.008 mm,宽度为 1.4 m,将宽度 1.4 m 生物可降解地膜切割为宽 0.6、0.8 m,将宽度

0.6 m 生物可降解地膜覆盖于宽度 45 cm 垄上,宽度 0.8 m 生物可降解地膜覆盖于宽度 60 cm 沟中,在垄角处生物可降解地膜埋入土壤深度为 5~10 cm。秸秆覆盖采用当地燕麦秸秆,粉碎成 5~10 cm 长的碎段,一次性均匀覆盖在沟内,覆盖量为 9 000 kg·hm<sup>-2</sup>,然后撒 4 000~5 000 kg·hm<sup>-2</sup>碎土覆于秸秆上,以免秸秆被风吹走。垄宽为 45 cm,沟宽为 60 cm,垄高为 15~20 cm,垄形为弧形,垄沿等高线修筑。玉米种植示意图图 1。每个试验小区有 3 条沟和 4 条垄,小区面积为 36 m<sup>2</sup>(10 m 长×3.6 m 宽),小区编号、面积及沟覆盖材料见表 2。

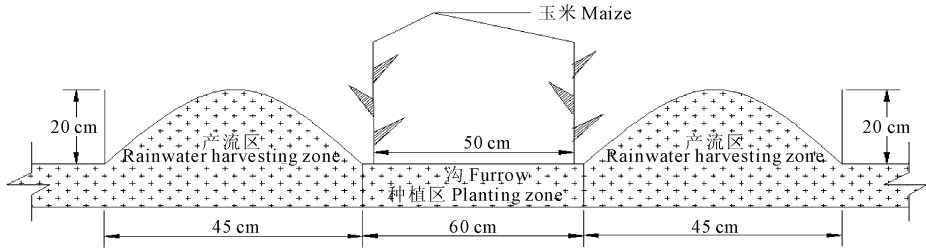


图 1 沟垄集雨种植玉米示意图  
Fig.1 Schematic diagram of ridge – furrow rainwater harvesting for maize production

表 2 垄沟集雨种植玉米试验设计  
Table 2 Experimental design for maize production in ridge-furrow rainwater harvesting system

| 代码<br>Code | 处理<br>Treatment                       | 垄面积/m <sup>2</sup><br>Ridge area | 沟面积/m <sup>2</sup><br>Furrow area | 小区面积/m <sup>2</sup><br>Plot area |
|------------|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| TFP        | 传统平作 Traditional plat planting        | —                                | —                                 | 36.0                             |
| NM         | 无覆盖 No-mulching                       | 18.0                             | 18.0                              | 36.0                             |
| BM         | 生物可降解地膜覆盖 Biodegradable film mulching | 18.0                             | 18.0                              | 36.0                             |
| SM         | 秸秆覆盖 Straw mulching                   | 18.0                             | 18.0                              | 36.0                             |

1.3 种植管理

试验地前茬连续种植 6 a 马铃薯,2012 年马铃薯收获后,翻地和耨地各 1 次。玉米播种前 7 d (2013 年 4 月 13 日)整地、划分小区、起垄和覆膜。根据当地施肥经验,施加 420 kg·hm<sup>-2</sup>过磷酸钙和

220 kg·hm<sup>-2</sup>尿素作为基肥,播种前(2013 年 4 月 19 日)将 2 种肥料混合撒施于沟土壤表面,然后翻入土壤,施肥深度 20~30 cm。2013 年 4 月 20 日穴播播种玉米,播种密度 5.25×10<sup>4</sup>株·hm<sup>-2</sup>,播种深度 3~5 cm,每条沟种植 2 行玉米。玉米播种完成后,为了

保护土壤水分,即刻在种植沟内覆盖生物可降解地膜和秸秆。在 2013 年 5 月 10 日 18:00—20:00 放苗,每个穴留 1 株健壮玉米。整个玉米生育期不追肥和灌溉,采用人工除草,禁止人为踩踏垄和破坏垄覆盖材料,人工除草时间分别为 2013 年 5 月 10 日、6 月 15 日和 7 月 23 日。2013 年 10 月 15 日人工收获玉米后,将生物可降解地膜和秸秆残留翻耕埋入土壤深度 20~30 cm。

#### 1.4 土壤含水量和根系分布特征参数测定

在玉米全生育期,土壤含水量测定间隔为 25~30 d,测定深度 40 cm,按 10 cm 分层,采用烘干法(105℃,10 h)测定土壤含水量,每 1 小区的 3 条沟随机选取 3 个样点,采样点居于沟中心和垄弧顶,同一层次 3 个样点的土样均匀混合。

玉米收获后(10 月 16 日)用挖掘法取根样,分别在垄上和沟内开挖样方,垄上开挖样方的长和宽分别为 45 cm(垄宽)和 35 cm(株距),沟内开挖样方的长和宽分别为 60 cm(沟宽)和 35 cm,垄上和沟内取样深度 40 cm,垄和沟取样深度以沟面为标准,按 10 cm 分层。先将挖出的根放入水池中浸泡 1 h,然后用冲根器将根系冲洗干净,在实验室用扫描仪(Epson Perfection 4990 Photo 型)进行扫描,扫描仪的分辨率为 300 dpi。用 Win-RHIZO 根系扫描与分析系统测定根样有关特征指标,计算不同土层单位土体根长( $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ )、根表面积( $\text{cm}^2\cdot\text{cm}^{-3}$ )和根体积( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ )等特征参数。将扫描后所有根系脱水,

然后放在 65℃烘箱烘干至恒重,称重计算不同土层单位土体的根干重( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )。

#### 1.5 数据处理

利用完全随机模型分析沟覆盖材料对玉米根系分布特征的影响,将 3 次重复收集的参数采用 SPASS 19.0 与 Excel 2010 软件进行方差分析和显著性检验;方差分析多重比较用 Duncan 法( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

#### 2.1 玉米生育期降雨量特征

2013 年试验地年降雨量为 448.8 mm,与近 41 年(1972—2012 年)年平均降雨量(383.3 mm)相比,2013 年是丰水年。由图 2 可以看出,在 2013 年玉米全生育期(04-20—10-15)降雨次数为 80 次,降雨量为 417.2 mm,占年降雨量的 93.0%。通过对玉米全生育期降雨量数据统计,<5 mm、5~10 mm、10~20 mm 和 >20 mm 的降雨次数分别为 55、13、6 和 6 次,占总降雨次数的比例分别为 68.8%、16.3%、7.5%和 7.5%。>5 mm 降雨定义为有效降雨,无效降雨次数(55 次)大于有效降雨次数(25 次),但无效降雨对总降雨量贡献率(23%)明显小于有效降雨贡献率(77%),降雨分布不规则,其中 4、5、6、7、8、9 和 10 月降雨量分别为 12.8、64.1、44.1、145.0、86.0、61.3 mm 和 3.9 mm,分别占玉米全生育期降雨量的 3.1%、15.4%、10.6%、34.8%、20.6%、14.7%和 0.9%。

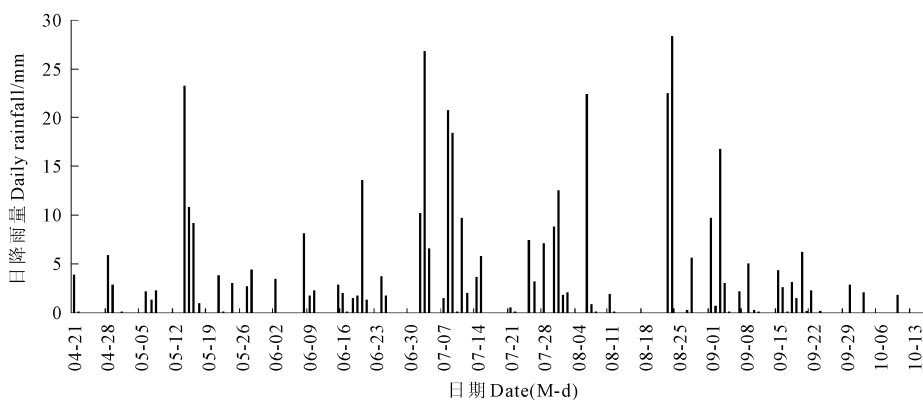


图 2 2013 年玉米生育期降雨量

Fig.2 Rainfall during maize growing seasons in 2013

#### 2.2 覆盖材料对 0~40 cm 土壤含水量的影响

土壤含水量是限制植物地上部和地下部生长的重要因素,土壤水分动态变化受降雨、植物蒸腾、土壤表面蒸发、土壤水分深层渗漏和侧向运移等影响(图 3)。从图 3 可以看出,土壤含水量随降雨量增加而增加,随植物蒸腾和土壤表面蒸发增加而减少。

玉米苗期(04-21—05-19)降雨量为 62.9 mm,日平均降雨量( $2.2\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )中等,气温较低和植株矮小,蒸散量和蒸发量较小,沟中土壤含水量随生育期逐渐增加;玉米拔节期(05-20—07-24)降雨量为 164.1 mm,日平均降雨量( $2.5\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )中等,气温较高、植株蒸腾和棵间蒸发较大,沟中土壤含水量随

生育期逐渐降低,拔节期~大喇叭口期沟中土壤含水量达到全生育期最低值;玉米大喇叭口~开花期(07-25—09-21)降雨量为 180.9 mm,日平均降雨量( $3.2\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )较高,气温、植株蒸腾和棵间蒸发达到最大值,沟中土壤含水量随生育期逐渐提高;玉米成熟期(09-22—10-15)降雨量为 9.3 mm,日平均降雨量( $0.4\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )较低,气温降低和植株成熟,蒸散量和蒸发量较小,沟中土壤含水量随生育期逐渐降低。与沟中土壤含水量相比,垄中土壤含水量随降雨、植物蒸腾、土壤表面蒸发等变化不明显,其变化规律滞后于沟中土壤含水量。

在玉米全生育期,各处理沟中土壤含水量明显大于垄中,不同处理沟中土壤含水量差异明显大于垄中。玉米全生育期耕作层(0~40 cm)土壤含水量平均值,平作土壤含水量为 16.9%,生物可降解地膜覆盖、秸秆覆盖和无覆盖沟中土壤含水量分别为 18.9%、18.6%和 18.2%,垄中土壤含水量分别为 15.2%、16.0%和 14.9%。与平作相比,无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖耕作层的沟中平均土壤含水量分别增加 6.9%、10.6%和 9.3%,垄中平均土壤含水量分别降低 13.8%、10.9%和 5.6%。

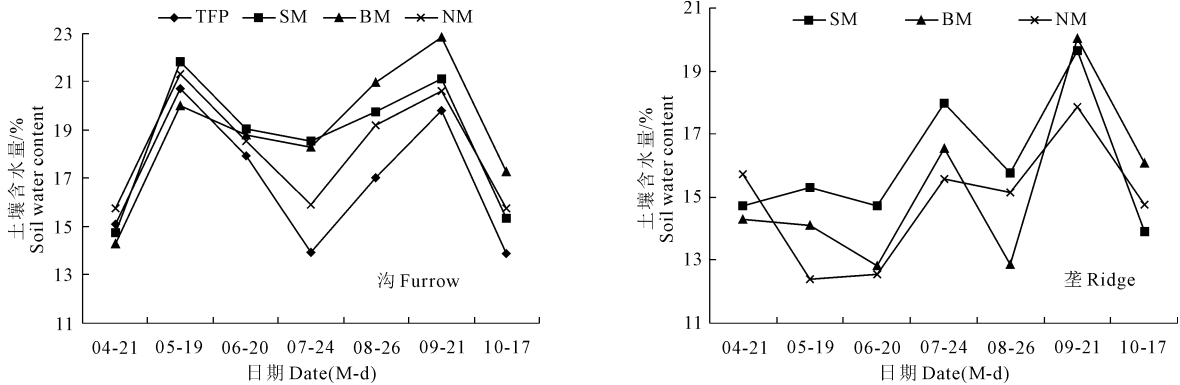


图 3 沟覆盖材料对沟中和垄中 0~40 cm 土壤含水量的影响

Fig.3 Effects of furrow mulching materials on soil water content in 0~40 cm soil depth at furrow bottoms and ridge tops  
注:TFP、NM、BM 和 SM 分别代表平作、无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖,下同。  
Note: TFP, NM, BM and SM represent traditional flat planting without mulching, no-mulching, biodegradable film mulching and straw mulching, respectively. The same below.

2.3 覆盖材料对玉米根干重的影响

玉米根系生物量及在土壤中分布规律与其吸收矿质元素和水分的能力密切相关。从表 3 可以看出,玉米根干重随土壤深度增加而急剧减少,土壤深度 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 的玉米根干重(沟中+垄中)占 0~40 cm 总根干重比例,平作比例分别为 57%、22%、14%和 7%,无覆盖比例分别为 55%、23%、14%和 8%,生物可降解地膜覆盖比例分别为 66%、17%、9%和 8%,秸秆覆盖比例分别为 60%、17%、14%和 9%。不同沟覆盖材料不同土壤深度玉米根干重比例分配差异不明显。沟中玉米根干重明显大于垄中,沟中玉米根干重与垄中玉米根干重比值随土层深度增加而减少。土壤深度 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 沟中与垄中比值,无覆盖比值分别为 5.6、2.4、1.5 和 1.1,生物可降解地膜覆盖比值分别为 4.7、3.1、1.8 和 1.1,秸秆覆盖比值分别为 10.9、2.1、1.2 和 0.8。秸秆覆盖在夏季高温季节,缓冲高温效应,为 0~10 cm 土层根系生长和延缓衰老提供有利条件。0~40 cm 土层

玉米总根干重(垄中+沟中)排列次序为平作>生物可降解地膜覆盖>无覆盖>秸秆覆盖,平作的玉米总根干重显著大于秸秆覆盖和无覆盖,生物可降解地膜覆盖与其它 3 种处理均差异不显著。与平作相比,无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖的玉米总根干重分别降低 15.9%、6.1%和 16.8%。

2.4 覆盖材料对玉米根长的影响

植物根系长度受遗传特性、土壤水分、土壤养分和温度等的影 响,当遗传特性一致时,土壤水分是根系生长的主要信号,根系长度决定植物吸水时间和吸水速率,从而影响植物地上部光合能力和同化物分配。垄沟集雨改变植物生长区的水热状况,从而 影响植物根系生长和分布。从表 4 可以看出,无覆 盖垄中玉米根长略大于沟中,生物可降解地膜覆盖 和秸秆覆盖的沟中玉米根长明显大于垄中,沟中玉 米根长与垄中玉米根长比值随土层深度增加而减 少。土壤深度 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 的沟中玉米根长与垄中玉米根长比值,无覆盖 比值分别为 0.6、1.7、0.9 和 0.8,生物可降解地膜覆盖

比值分别为 1.2、2.3、1.6 和 1.2,秸秆覆盖比值分别为 2.2、2.3、0.9 和 0.8。土层深度 0~40 cm 玉米总根长(垄中+沟中),生物可降解地膜覆盖的玉米总根长显著大于无覆盖,无覆盖的玉米总根长显著大于秸秆覆盖,秸秆覆盖的玉米总根长显著大于平作,玉米总根长排列次序为生物可降解地膜覆盖>无覆盖>秸秆覆盖>平作。与平作相比,无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖玉米总根长(垄中+沟中)分别增加 37.6%、43.7%和34.8%。如果深层土壤水分较高,植物根系偏重纵向伸展,根系分布较深;如果浅层土壤水分较高,植物根系偏重横向伸展,根

系分布较浅。与传统平作种植相比,垄沟集雨种植覆盖材料减少土壤水分蒸发和提高种植区土壤含水量,从而影响根系纵向和横向分布。垄中较高土壤含水量和疏松土壤有利于根系伸长,使无覆盖垄中植物根系长度略高于沟中,秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖有利于沟中玉米根系纵向和横向伸长。当土壤温度较低时,根系伸长生长随土壤温度的升高而增加,在大多数玉米生长季节,无覆盖的土壤温度明显高于秸秆覆盖,无覆盖的玉米总根长显著大于秸秆覆盖。

表 3 覆盖材料对玉米根干重的影响/( $\times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )  
Table 3 Effects of mulching materials on root dry matter of maize

| 深度<br>Depth<br>/cm | 沟中+ 垄中<br>Furrows + ridges |        |        |       | 沟中/垄中<br>Furrows/ridges |     |      | 比例<br>Proportion/% |     |     |     |
|--------------------|----------------------------|--------|--------|-------|-------------------------|-----|------|--------------------|-----|-----|-----|
|                    | TFP                        | NM     | BM     | SM    | NM                      | BM  | SM   | TFP                | NM  | BM  | SM  |
| 0~10               | 1.22a                      | 0.99b  | 1.31a  | 1.07b | 5.6                     | 4.7 | 10.9 | 57                 | 55  | 66  | 60  |
| 10~20              | 0.48a                      | 0.41ab | 0.37bc | 0.31c | 2.4                     | 3.1 | 2.1  | 22                 | 23  | 17  | 17  |
| 20~30              | 0.30a                      | 0.25a  | 0.17b  | 0.24a | 1.5                     | 1.8 | 1.2  | 14                 | 14  | 9   | 14  |
| 30~40              | 0.14a                      | 0.15a  | 0.15a  | 0.16a | 1.1                     | 1.1 | 0.8  | 7                  | 8   | 8   | 9   |
| 0~40               | 2.14a                      | 1.80b  | 2.01ab | 1.78b | 3.1                     | 3.5 | 3.6  | 100                | 100 | 100 | 100 |

注:同一列后的不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。  
Note: Means followed by different letters in each column are significantly different at  $P<0.05$ . The same below.

表 4 覆盖材料对玉米根长的影响/( $\times 10^{-3} \text{ cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ )  
Table 4 Effects of mulching materials on root length of maize

| 深度<br>Depth<br>/cm | 沟中+ 垄中<br>Furrows + ridges |       |       |       | 沟中/垄中<br>Furrows/ridges |     |     | 比例<br>Proportion/% |     |     |     |
|--------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------------------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|-----|
|                    | TFP                        | NM    | BM    | SM    | NM                      | BM  | SM  | TFP                | NM  | BM  | SM  |
| 0~10               | 1182d                      | 2309c | 3003a | 2323b | 0.6                     | 1.2 | 2.2 | 37                 | 45  | 53  | 48  |
| 10~20              | 1072d                      | 1273a | 1220b | 1203c | 1.7                     | 2.3 | 2.3 | 34                 | 25  | 22  | 25  |
| 20~30              | 632c                       | 782a  | 606d  | 705b  | 0.9                     | 1.6 | 0.9 | 20                 | 15  | 11  | 15  |
| 30~40              | 286d                       | 719b  | 801a  | 637c  | 0.8                     | 1.2 | 0.8 | 9                  | 14  | 14  | 13  |
| 0~40               | 3172d                      | 5083b | 5630a | 4868c | 0.9                     | 1.4 | 1.7 | 100                | 100 | 100 | 100 |

### 2.5 覆盖材料对玉米根表面积的影响

根表面积是植物根系吸附能力的重要标志,根表面积越大,根系活力和吸附能力越强。当植物根系发育空间受限和生长于不良环境时,植物通过增加根表面积和根系活力,抵抗不良外界环境。不同沟覆盖材料的玉米根表面积随土壤深度分布规律与根长类似(表 5)。沟中玉米根表面积明显大于垄中,沟中玉米根表面积与垄中玉米根表面积比值随土层深度增加而减少。土壤深度 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 的沟中玉米根表面积与垄中玉米根表面积比值,无覆盖分别为 0.8、1.9、1.0 和 0.9,生物可降解地膜覆盖分别为 1.8、3.1、1.6 和

1.2,秸秆覆盖分别为 2.9、2.3、1.0 和 0.9。土壤深度 0~40 cm 平均值,无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖的沟中玉米根表面积与垄中玉米根表面积比值分别为 1.1、1.9 和 1.8。土层深度 0~40 cm 玉米总根表面积(垄中+沟中),生物可降解地膜覆盖的玉米总根表面积显著大于秸秆覆盖,秸秆覆盖的玉米总根表面积显著大于无覆盖,无覆盖的玉米总根表面积显著大于平作,玉米总根表面积排列次序为生物可降解地膜覆盖>秸秆覆盖>无覆盖>平作。与平作相比,无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖的玉米总根表面积分别增加 10.5%、33.6%和 15.0%。

表 5 覆盖材料对玉米根表面积的影响/( $\times 10^{-3}\text{cm}^{-2}\cdot\text{cm}^{-3}$ )

Table 5 Effects of mulching materials on root surface area of maize

| 深度<br>Depth<br>/cm | 沟中 + 垄中<br>Furrows + ridges |        |        |        | 沟中/垄中<br>Furrows/ridges |     |     | 比例<br>Proportion/% |     |     |     |
|--------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|-------------------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|-----|
|                    | TFP                         | NM     | BM     | SM     | NM                      | BM  | SM  | TFP                | NM  | BM  | SM  |
| 0 ~ 10             | 243.6d                      | 250.2c | 434.9a | 297.7b | 0.8                     | 1.8 | 2.9 | 49                 | 39  | 50  | 44  |
| 10 ~ 20            | 175.4b                      | 176.8b | 210.6a | 159.3c | 0.9                     | 3.1 | 2.3 | 21                 | 27  | 24  | 23  |
| 20 ~ 30            | 119.2b                      | 116.7c | 105.1d | 122.8a | 1.0                     | 1.6 | 1.0 | 20                 | 18  | 12  | 18  |
| 30 ~ 40            | 59.4c                       | 104.0b | 122.8a | 102.3b | 0.9                     | 1.2 | 0.9 | 10                 | 16  | 14  | 15  |
| 0 ~ 40             | 579.6d                      | 647.7c | 873.4a | 682.1b | 1.1                     | 1.9 | 1.8 | 100                | 100 | 100 | 100 |

2.6 覆盖材料对玉米根体积的影响

根体积是根系数量、长度以及分枝数的综合体现,是植物与土壤环境之间的综合反应。从表 6 可以看出,沟中玉米根体积明显大于垄中,沟中玉米根体积与垄中玉米根体积比值随土层深度增加而减少。土壤深度 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 和 30 ~ 40 cm 的沟中玉米根体积与垄中玉米根体积比值,无覆盖分别为 1.0、2.2、1.2 和 1.0,生物可降解地膜覆盖分别为 2.7、3.0、1.6 和 1.2,秸秆覆盖分别为 3.8、2.3、1.2 和 1.0。土壤深度 0 ~ 40 cm 平均值,无覆

盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖的沟中玉米根体积与垄中玉米根体积比值分别为 1.3、2.2 和 2.0。土层深度 0 ~ 40 cm 玉米总根体积(垄中 + 沟中),生物可降解地膜覆盖的玉米总根体积显著大于平作,平作的玉米总根体积显著大于秸秆覆盖,秸秆覆盖的玉米总根体积显著大于无覆盖,玉米总根体积排列次序为生物可降解地膜覆盖 > 平作 > 秸秆覆盖 > 无覆盖。与平作相比,无覆盖和秸秆覆盖的玉米总根体积分别降低 34.5%和 16.3%,生物可降解地膜覆盖的玉米总根体积增加 13.2%。

表 6 覆盖材料对玉米根体积的影响/( $\times 10^{-3}\text{cm}^{-3}\cdot\text{cm}^{-3}$ )

Table 6 Effects of mulching materials on root volume of maize

| 深度<br>Depth<br>/cm | 沟中 + 垄中<br>Furrows + ridges |       |        |       | 沟中/垄中<br>Furrows/ridges |     |     | 比例<br>Proportion/% |     |     |     |
|--------------------|-----------------------------|-------|--------|-------|-------------------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|-----|
|                    | TFP                         | NM    | BM     | SM    | NM                      | BM  | SM  | TFP                | NM  | BM  | SM  |
| 0 ~ 10             | 4.00b                       | 2.17d | 5.20a  | 3.10c | 1.0                     | 2.7 | 3.8 | 44                 | 32  | 50  | 40  |
| 10 ~ 20            | 2.28a                       | 1.95b | 2.27a  | 1.66c | 2.2                     | 3.0 | 2.3 | 25                 | 29  | 22  | 21  |
| 20 ~ 30            | 1.78a                       | 1.39c | 1.45c  | 1.70b | 1.2                     | 1.6 | 1.2 | 20                 | 21  | 14  | 22  |
| 30 ~ 40            | 0.98d                       | 1.21c | 1.49a  | 1.31b | 1.0                     | 1.2 | 1.0 | 11                 | 18  | 14  | 17  |
| 0 ~ 40             | 9.04b                       | 6.72d | 10.41a | 7.77c | 1.3                     | 2.2 | 2.0 | 100                | 100 | 100 | 100 |

3 讨 论

在垄沟集雨种植系统中,垄覆膜作为集雨区,沟覆盖或无覆盖作为种植区,垄上径流和沟中降雨在沟中产生叠加,从而增加沟中土壤含水量,沟中部分土壤水分侧渗到垄下土壤,当遇到干旱时,沟中与垄中土壤水分进行重新分配,供干旱时作物吸收和利用。本研究结果表明,垄沟集雨种植的沟中土壤含水量明显大于垄中,沟中土壤含水量随降雨、植物蒸腾、土壤表面蒸发等变化明显,垄中土壤含水量变化不明显,垄中土壤含水量变化滞后于沟中土壤含水量。垄沟集雨种植沟中土壤含水量明显高于传统平作,但垄中土壤含水量明显低于传统平作,覆盖增加沟中土壤含水量,沟中土壤含水量排列次序为生物

可降解地膜覆盖 > 秸秆覆盖 > 无覆盖,垄中土壤含水量排列次序为秸秆覆盖 > 生物可降解地膜覆盖 > 无覆盖。

植物地下发育状况是植物地上部光合和产量形成的反馈过程,健壮植物根系发育促进地上部光合和产量形成,而地上部光合和生长发育为根系的生长提供必需的物质基础<sup>[30]</sup>。植物根系指标受遗传特性和外界环境的共同影响,当植物受到环境胁迫时,根系进行自我调节,降低环境胁迫对自身伤害。植物根系对环境的调节能力与环境状况、植物类型、植物生育期等有关<sup>[31]</sup>。垄沟集雨种植改变土壤微地形、土壤水分、土壤温度和风速等外界环境条件,提高沟中土壤水分和温度,从而使沟中根干重、根长、根表面积和根体积明显大于垄中。本研究表明,

根干重、根长、根表面积和根体积随土层深度增加而急剧减少。苗果园等<sup>[32]</sup>研究表明,作物根干重随土壤深度增加符合指数递减方程,须根系作物随土壤深度增加根干重递减率较小,直根系作物随土壤深度增加根干重递减率较大。

垄沟集雨种植沟中较高土壤含水量有利于根系生长和延伸,但不利于根系干物质积累。与传统平作无覆盖相比,无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖的玉米总根干重分别降低 15.9%、6.1% 和 16.8%。植物根系生物量及其空间分布规律是植物抗旱能力的重要标志,它影响植物对土壤水分和营养元素吸收,从而影响冠层生长发育和产量形成<sup>[33]</sup>。与垄沟集雨种植相比,传统平作土壤水分较低,为了获得更多水分和养分资源,植物分配到地上部分的同化物较少,冠层生长速度较慢和不旺盛,而具有较高根系生物量。杨青华等<sup>[22]</sup>研究结果表明,生物可降解液体地膜(喷施量  $112.5 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )明显提高土壤温度和土壤含水量,降低土壤水分蒸发和土壤容重,促进棉花根系吸收和合成能力。

当植物遇到干旱胁迫时,根系最早感知干旱胁迫,并将该信号传给地上部分,使作物茎秆叶生长受到抑制,为了降低干旱胁迫对植株造成生理伤害,植物继续加大根系生长<sup>[34]</sup>。朱维琴等<sup>[35]</sup>研究表明,植物通过加大根表面积而利用深层土壤水分,通过增加深层单位土体内的根系数量抵抗干旱胁迫。本研究表明,与传统平作无覆盖相比,沟无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖玉米总根长分别增加 37.6%、43.7% 和 34.8%,玉米总根表面积分别增加 10.5%、33.6% 和 15.0%。当土壤含水量较低时,为了获得更多土壤水分和较多籽粒产量,植物延伸根系生长,从而增加根长和根表面积,但根直径降低。

## 4 结 论

本研究结果表明,玉米根干重、根长、根表面积和根体积随土层深度增加而急剧减少,垄沟集雨种植沟中的土壤含水量、玉米根干重、根长、根表面积和根体积明显大于垄中。与平作相比,无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖耕作层的沟中平均土壤含水量分别增加 6.9%、10.6% 和 9.3%。平作、无覆盖、生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖的 0~40 cm 玉米总根干重分别为  $2.14$ 、 $1.80$ 、 $2.01 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $1.78 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,总根长分别为 3 172、5 083、 $5\,630 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $4\,868 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,总根表面积分别为  $579.6$ 、 $647.7$ 、 $873.4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $682.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,总根体积分别为 9.04、6.72、 $10.41 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $7.77 \times 10^{-3}$

$\text{cm}^{-3} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。与平作相比,垄沟集雨种植降低根干重,但增加根长和根表面积,尤其生物可降解地膜覆盖效果更明显。

## 参 考 文 献:

- [1] Ren X L, Jia Z K, Chen X L, et al. Rainfall concentration for increasing corn production under semiarid climate[J]. Agriculture Water Management, 2008, 95: 1293-1302.
- [2] Wang Q, Ren X, Song X Y, et al. The optimum ridge-furrow ratio and suitable ridge-covering material in rainwater harvesting for oats production in semiarid regions of China[J]. Field Crops Research, 2015, 172: 106-118.
- [3] 贾 宇,徐炳成,王晓凌,等.半干旱黄土丘陵区垄沟集雨对紫花苜蓿人工草地土壤水分和产草量的影响[J].植物生态学报, 2007, 31(3): 470-475.
- [4] 李 荣,王 敏,贾志宽,等.渭北旱塬区不同垄沟覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J].农业工程学报, 2012, 28(2): 106-113.
- [5] 任小龙,贾志宽,韩清芳,等.半干旱区模拟降雨下垄沟集雨种植对夏玉米生产影响[J].农业工程学报, 2007, 23(10): 45-50.
- [6] 王润元,杨兴国,赵 鸿,等.半干旱雨养区小麦叶片光合生理生态特征及其对环境的响应[J].生态学杂志, 2006, 25(10): 1161-1166.
- [7] 莫 非,周 宏,王建永,等.田间微集雨技术研究及应用[J].农业工程学报, 2013, 29(8): 1-17.
- [8] Li X Y, Gong J D. Effect of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3): 243-254.
- [9] Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam[J]. Field Crops Research, 2006, 95(2/3): 115-125.
- [10] Ghosh P K, Dayal D, Bandyopadhyay K K, et al. Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut[J]. Field Crops Research, 2006, 99(2/3): 76-86.
- [11] 王彩绒,田霄鸿,李生秀.垄沟覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响[J].中国农业科学, 2004, 37(2): 208-214.
- [12] 李春荣,苏德荣,何 峰,等.覆膜垄沟集雨种植对老芒麦生长发育的影响[J].中国草地学报, 2010, 32(2): 25-31.
- [13] 王晓凌,陈明灿,易现峰,等.垄沟覆膜集雨系统垄宽和密度效应对玉米产量的影响[J].农业工程学报, 2009, 25(8): 40-47.
- [14] 宋海星,李生秀.玉米生长空间对根系吸收特性的影响[J].中国农业科学, 2003, 36(8): 899-904.
- [15] 李富春,任 祥,王 琦,等.沟垄集雨种植对燕麦根系分布特征的影响[J].生态学报, 2013, 32(11): 2966-2972.
- [16] 李彩霞,孙景生,周新国,等.隔沟交替灌溉条件下玉米根系形态性状及结构分布[J].生态学报, 2011, 31(14): 3956-3963.
- [17] 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.
- [18] 慕自新,张岁岐,郝文芳,等.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.

(下转第 70 页)

- ganese oxides on zinc adsorption by soil[J]. *Soil Science*, 1988, 146(4): 248-254.
- [16] Cavallaro N, McBride M B. Zinc and copper sorption and fixation by an acid soil clay: Effect of selective dissolutions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(5): 1050-1054.
- [17] Shuman L M. Zinc adsorption isotherms for soil clays with and without iron oxides removed[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40(3): 349-352.
- [18] 宋娇艳, 袁林, 杨志丹, 等. 铁锰复合氧化物对铅离子的吸附特征及影响因素研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(7): 135-142.
- [19] 丁振华, 冯俊明, 王明士. 天然氧化铁矿物对铅离子的吸附研究[J]. *生态环境*, 2003, 12(2): 131-134.
- [20] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [21] 熊毅. 土壤胶体: 土壤胶体研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 241-268.
- [22] 朱健, 吴庆定, 王平, 等. 经典等温吸附模型在重金属离子/硅藻土体系中的应用及存在问题[J]. *环境科学*, 2013, 34(11): 4341-4348.
- [23] 熊毅. 土壤胶体: 土壤胶体的物质基础[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [24] Abd-Elfattah A L Y, Wada K. Adsorption of lead, copper, zinc, cobalt, and cadmium by soils that differ in cation-exchange materials[J]. *Journal of Soil Science*, 1981, 32(2): 271-283.
- [25] Follett E A C. The retention of amorphous, colloidal 'ferric hydroxide' by kaolinites[J]. *Journal of Soil Science*, 1965, 16(2): 334-341.
- [26] 刘冬碧, 贺纪正, 刘凡, 等. 中南地区几种土壤的表面电荷特性Ⅳ. 氧化铁铝对土壤表面电荷性质的影响[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1): 123-127.
- [26] Liu Dong-bi, He Ji-zheng, Liu Fan, et al. Surface charge characteristics of soils in central and southern china IV. The effect of Fe and Al oxides on surface charge characteristics of soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, (1): 123-127.
- [27] 杨亚提, 张一平. 离子强度对恒电荷土壤胶体吸附  $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Pb}^{2+}$  的影响[J]. *环境化学*, 2001, 20(6): 566-571.
- [28] 杨亚提, 张一平. 几种土壤粘粒表面  $\text{Pb}^{2+}$  吸附—解吸不可逆性特征[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(1): 127-132.
- [29] Malekani K, Rice J A, Lin J S. The effect of sequential removal of organic matter on the surface morphology of humin[J]. *Soil Science*, 1997, 162(5): 333-342.
- [30] Dong D, Nelson Y M, Lion L W, et al. Adsorption of Pb and Cd onto metal oxides and organic material in natural surface coatings as determined by selective extractions: new evidence for the importance of Mn and Fe oxides[J]. *Water Research*, 2000, 34(2): 427-436.
- [31] Bascomb C L, Thanigasalam K. Comparison of aqueous acetylacetone and potassium pyrophosphate solutions for selective extraction of organic-bound Fe from soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1978, 29(3): 382-387.
- [32] Jordao C P, Carari D M, Pereira W L, et al. Adsorption of Zn (II) in Oxisols as affected by selective removal of soil fractions[J]. *International Journal of Environmental Studies*, 2010, 67(6): 879-897.

(上接第 40 页)

- [19] 张杰, 任小龙, 罗诗峰, 等. 环保地膜覆盖对土壤水分及玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 14-19.
- [20] 高玉红, 郭丽琢, 牛俊义, 等. 栽培方式对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(2): 78-81.
- [21] 邹聪明, 王国鑫, 胡小东, 等. 秸秆覆盖对套作玉米苗期根系发育与生理特征的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3): 496-500.
- [22] 杨青华, 黄勇, 马二培. 液体地膜覆盖对棉花根系生长发育的影响[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(3): 299-302.
- [23] 熊瑛, 吕强, 王小东, 等. 液体地膜覆盖对烟苗生长发育的影响[J]. *河南农业科学*, 2007, (7): 31-33.
- [24] 周昌明, 李援农, 银敏华, 等. 连垄全覆盖降解膜集雨种植促进玉米根系生长提高产量[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 109-117.
- [25] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 269-272.
- [26] Wang Q, Zhang EH, Li FM, 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): 1431-1443.
- [27] Qin, S H, Zhang, J L, Dai, H L, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131(1): 87-94.
- [28] 李倩, 张睿, 贾志宽, 等. 不同地膜覆盖对垄体地温及玉米出苗的影响[J]. *西北农业学报*, 2009, 18(2): 98-102.
- [29] 陈素英, 张喜英, 胡春胜, 等. 秸秆覆盖对夏玉米生长过程及水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(4): 55-57.
- [30] 杨丽雯, 张永清. 4 种旱作谷类作物根系发育规律的研究[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(11): 2244-2251.
- [31] 吕强, 熊瑛, 陈明灿, 等. 不同覆盖方式对烟苗根系生长及耕层生态环境的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(1): 86-89.
- [32] 苗果园, 尹钧, 张云亭, 等. 中国北方主要作物根系生长的研究[J]. *作物学报*, 1998, 24(1): 2-6.
- [33] 乐章燕, 刘晶森, 廖荣伟, 等. 土壤温湿度对玉米根系的影响[J]. *玉米科学*, 2013, 21(6): 68-72.
- [34] 薛丽华, 段俊杰, 王志敏, 等. 不同水分条件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.
- [35] 朱维琴, 吴良欢, 陶勤南. 作物根系对干旱胁迫逆境的适应性研究进展[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(4): 430-433.