

株行距配置连作对黄土旱塬覆膜春玉米土壤水分和产量的影响

王磊¹, 樊廷录¹, 李尚中¹, 党翼¹, 赵刚¹, 张建军¹, 辛丽², 程万莉¹, 王淑英¹

(1. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室,

兰州 730070; 2. 甘肃省气象局, 兰州 730000)

摘要: 探讨株行距配置调整后密度对旱地覆膜春玉米连作稳产和水分利用的影响, 为旱地雨养区春玉米高产稳产栽培提供依据。试验于2014—2017年在黄土旱塬区甘肃省镇原县(35°30'N, 107°39'E)进行, 以紧凑型耐密高产春玉米品种“先玉335”为试验材料, 设55, 75 cm 2种等行距垄沟覆盖种植方式, 6.0, 7.5, 9.0, 10.5万株/hm² 4个种植密度水平, 采用裂区设计, 连作定位观测。使用烘干法测定不同处理春玉米生育期0—200 cm土层土壤水分, 研究黄土旱塬连作春玉米籽粒产量和土壤剖面水分变化。结果表明, 在试验设计行距下, 在干旱年份55, 75 cm行距0—200 cm土层土壤剖面水分均有低湿区形成, 2种行距40—200 cm土层最低含水率均出现在160 cm土层剖面, 55 cm行距土壤含水量为8.9%, 75 cm行距土壤含水量为8.7%, 受降水及植株生育耗水的影响, 20—120 cm土层土壤水分变化较为剧烈。不论降水年型如何, 2种行距下0—200 cm土壤深层水分均未产生土壤干层, 75 cm行距低湿区较55 cm行距随年份变化有不同程度扩大, 但2种行距下7.5~10.5万株/hm²相同密度耗水量没有显著差异。4年平均产量75 cm行距相同密度均高于55 cm行距, 9.0万株/hm²及以下种植密度处理稳产性较好, 密度由低到高产量分别增加2.2%, 5.8%, 4.1%和3.0%, 平均水分利用效率分别提升1.1%, 5.9%, 0.3%和-1.5%, 不同行距相同密度产量和水分利用效率没有显著差异。研究表明, 在黄土旱塬区55, 75 cm行距配置7.5万株/hm²种植密度连作具有稳定产量, 并且不会导致土壤深层水分亏缺至产生土壤干层, 是较为理想的连作稳产株行距配置种植模式。

关键词: 旱地; 春玉米; 株行距配置; 土壤水分; 水分利用效率

中图分类号: S152.7; S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0079-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.02.013

Effects of Row Spacing and Continuous Cropping on Soil Moisture and Yield of Spring Maize Covered with Film in Loess Plateau Dryland

WANG Lei¹, FAN Tinglu¹, LI Shangzhong¹, DANG Yi¹, ZHAO Gang¹,

ZHANG Jianjun¹, XIN Li², CHENG Wanli¹, WANG Shuying¹

(1. Gansu Key Laboratory of Water Efficient Use in Dryland, Dryland Agriculture Institute, Gansu

Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070; 2 Gansu Provincial Meteorological Bureau, Lanzhou 730000)

Abstract: The effect of the adjusted density on the steady yield and water use of spring maize covered with film in dry land was discussed in order to provide a basis for the high and stable yield of spring maize in rain-fed area of dry land. The experiment was conducted from 2014 to 2017 in the Loess Plateau, Zhenyuan, Gansu (107°39'E, 35°30'N) in a split plot design. The compact and dense and high-yield spring maize variety Xianyu 335 was used as the test material, 55 cm and 75 cm were set up with two kinds of row spacing covering planting, 6.0×10^4 plants/hm², 7.5×10^4 plants/hm², 9.0×10^4 plants/hm² and 10.5×10^4 plants/hm² 4 planting density levels. The soil moisture of 0—200 cm soil layer in different spring maize growth period was measured by drying method, and the grain yield and soil profile water change of continuous cropping spring maize were studied in the Loess Plateau. The results showed that under the experimental design distance, there is a low moisture area between 0—200 cm in the soil profile of 55 cm and 75 cm in the dry year, and the lowest water content of two row spacing 40—200 cm soil layer is in the section of 160 cm soil layer, the soil moisture content of 55 cm row spacing is 8.9%, the soil moisture content of 75 cm row spacing is 8.7%. The soil moisture of 20—120 cm soil layer changed more sharply with the influence of

收稿日期: 2018-09-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(31660364, 41561067); 国家科技支撑计划项目(2015BAD22B02-02); 国家公益性行业(农业)专项(201503124); 国家现代玉米产业技术体系项目(CARS-02-55); 甘肃省自然科学基金项目(17JR5RA182, 18JR3RA255)

第一作者: 王磊(1982—), 男, 副研究员, 主要从事旱地栽培、作物抗逆防灾减灾及水分高效利用研究。E-mail: qyzlwl@163.com

precipitation and plant growth water consumption. Regardless of the annual precipitation pattern, the soil dry layer was not produced in the 0—200 cm soil depth under two row spacing. Compared with the 55 cm row spacing, the distance to the low humidity area of the 75 cm row spacing enlarged in varying degree with the change of years, but there was no significant difference in the same density water consumption of the $7.5 \times 10^4 \sim 10.5 \times 10^4$ plants/hm² under the two rows. The 4 years average yield of the 75 cm row spacing was higher than that of the 55 cm row spacing, and better stable yield was achieved in 9.0×10^4 plants/hm² and below planting density. The yield increased from low to high density by 2.2%, 5.8%, 4.1% and 3.0% respectively, while the average water use efficiency increased by 1.1%, 5.9%, 0.3% and -1.5% respectively, and the yield of the same density and water use efficiency in different row spacing were the same. The research showed that in the Loess Plateau, 55 cm and 75 cm row spacing with 7.5×10^4 plants/hm² planting density for continuous cropping has stable yield, and will not lead to soil water deficit to produce dry soil layer, which is the ideal planting pattern of continuous cropping stable plant spacing.

Keywords: dryland; spring maize; row spacing; soil moisture; water use efficiency

我国黄土旱塬区是典型依靠自然降水从事农业生产的旱作农业区,该区域春玉米生长主要依靠自然降水,但该区域降水年际变化差异较大,季节分配不均,玉米生长的主要需水时期季节性干旱及高温热害等灾害频发,使玉米产量增产和稳产受到限制,旱作雨养农作区自然降水对农田土壤水分变化和作物生长有显著影响^[1]。株行距配置对改善作物群体结构和合理利用光、热、水等自然资源具有重要意义,通过合理株行距配置改变种植密度,有利于构建良好的冠层结构,促进玉米群体和个体协调发展,进而增加产量^[2-7]。地膜覆盖垄膜沟种和通过改变株距调整密度对改善土壤水、热状况,以及提高春玉米产量和水分利用效率起到重要的作用^[8-10]。有研究^[11-13]表明,地膜覆盖及增密种植在加快作物生长的同时,会增加作物对土壤水分的消耗,从而造成作物生长中后期土壤干旱,影响产量提升;而侯慧芝等^[14]研究表明,地膜覆盖能够在不增加耗水量的情况下提高作物产量和水分利用效率;也有研究^[15]认为,长期地膜覆盖对土壤生产能力可持续发展有负面影响;莫非等^[16]研究表明,垄沟地膜覆盖栽培对土壤水分补给和作物高产造成负面效应;樊廷录等^[17]研究表明,垄膜沟种增密高产,土壤剖面没有干层形成,不论降雨年型如何,垄膜沟种均能高效蓄集降水。对于垄膜沟种模式下玉米生产对土壤水分影响没有一致结论,这可能和研究区域气候状况不同引起的水热差异,以及土壤状况等因素有关。目前,在黄土旱塬区关于株行距多年连作对土壤水分影响方面的报道较少,为了进一步探索黄土旱塬雨养农业区在自然降水条件下,覆膜春玉米连作种植对土壤剖面水分特征和产量的影响,本研究通过覆膜条件下株行距配置连作定位试验,探讨不同株行距配置下黄土旱塬覆膜春玉米连作适宜种植密度,以及多年连作对土壤水分的影响问题,为旱作雨养覆膜春玉米水分高效利用和稳产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2012—2017 年在位于甘肃省庆阳市镇原县的甘肃省农业科学院镇原综合试验站(35°30'N, 107°39'E)进行。试验于 2012 年 4 月起每年在同一地块的同一位置定位实施。该区土壤类型为黑垆土,有机质含量 11.4 g/kg,全氮含量 0.87 g/kg,碱解氮含量 93.3 mg/kg,速效磷含量 11.3 mg/kg,速效钾含量 208.1 mg/kg,肥力中等,多年平均降水量 540 mm,其中 7—9 月降水占全年降水的 60%,年蒸发量 1 532 mm,年均气温 8.3 ℃,无霜期 169 d,海拔 1 279 m,年日照时间 2 450 h,≥0 ℃积温 3 447 ℃,≥10 ℃积温 2 730 ℃,为暖温带半湿润偏旱大陆性季风气候,属典型的旱作雨养农业区。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,行距为主因素,设 55 cm(F)和 75 cm(S)2 种行距;密度为副因素,通过调整株距改变密度,分别为 6.0 万株/hm²(F1:株距 30.3 cm;S1:株距 22.2 cm)、7.5 万株/hm²(F2:株距 24.2 cm;S2:株距 17.8 cm)、9.0 万株/hm²(F3:株距 20.2 cm;S3:株距 14.8 cm)和 10.5 万株/hm²(F4:株距 17.3 cm;S4:株距 12.7 cm)。各处理均设 3 次重复,小区面积 33 m²(6.6 m×5 m),按照试验设计密度拉绳人工点播。覆膜前结合整地一次基施控释尿素 495 kg/hm²(纯 N 227.7 kg/hm²)和普通过磷酸钙 938 kg/hm²(P₂O₅ 168.8 kg/hm²),玉米生育期内不追肥,其他栽培管理措施同高产农田生产。试验于 2012 年起定位种植,2014 年起测定数据。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干燥度及降水年型划分 依据 Selianinov 干燥度由我国科学家张宝堃等根据我国实际情况修正的计算公式^[18-19]计算关键生育期干燥度(K),计算方

法为:

$$K=0.16\times\sum T\geqslant 10/R$$

式中: K 为干燥度; 0.16 为经验系数; $\sum T\geqslant 10$ 为玉米阶段生育期内日平均气温 $\geqslant 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的有效积温; R 为同期降水量(mm)。干燥度 <1.0 时表明气候湿润, $1.0\leqslant$ 干燥度 <1.5 时表明气候半湿润, $1.5\leqslant$ 干燥度 <4.0 时表明气候半干旱,干燥度 $\geqslant 4.0$ 时表明干旱,干燥度数值越大表明干旱程度越重。

降水年型划分^[20]:

丰水年: $P_i>P_N+0.33\delta$; 枯水年: $P_i<P_N-0.33\delta$; 平水年: $P_N-0.33\delta\leqslant P_i\leqslant P_N+0.33\delta$

式中: δ 为多年同期降水量均方差(mm); P_i 为当年同期降水量(mm); P_N 为同期多年平均降水量(mm)。多年 4 月下旬至 9 月上旬降水量均方差为 91.5 mm,研究区域连续 67 年 4 月下旬至 9 月上旬平均降水量为 361.2 mm。

1.3.2 土壤水分及耗水量测定 采用土钻法人工取土,烘干称重法测定。玉米播种前及关键生育时期进行取土,每隔 20 cm 为 1 层由地表向下依次取 0—200 cm 土层,分 10 层测定土壤含水量。

土壤含水量(%)=(湿土质量(g)−烘干土质量(g))/烘干土质量(g)×100%

土壤贮水量(mm)=土壤含水量(%)×土壤容重(g/cm³)×土层深度(cm)

土壤贮水变化量(mm)=阶段初土壤贮水量(mm)−阶段末土壤贮水量(mm)

由于试验地点地下水埋深在 60 m 以下,无地下水补给,不计算地下水补给量;试验区为黄土旱塬区,土壤疏松多孔,降水不产生径流,所以本研究中地表径流可以忽略不计。玉米生育期耗水量计算公式为:

生育期耗水量(mm)=玉米生育期内降水量(mm)+玉米播前和收获土壤贮水量变化量(mm)

1.3.3 产量测定与水分利用效率计算 玉米成熟后

按每小区实收脱粒称重,使用 PM-8188A 型谷物水分测定仪测定籽粒水分含量,按 14% 含水量折合单位面积产量。

水分利用效率计算:水分利用效率(kg/(hm²·mm))=籽粒产量(kg/hm²)/作物耗水量(mm)

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2010 及 Sigma Plot 13.0 软件处理数据和制图,使用 Surfer 12.0 软件绘制土壤水分等值线图,用 DPS 7.5 软件进行统计分析,利用最小显著极差法(LSD)进行差异显著性检验(P 为 0.05 和 0.01)。

2 结果与分析

2.1 试验年份春玉米生育期降水情况

由表 1 可知,春玉米生育期内年际间降水变化有显著差异。对试验年玉米生育期降水分析可知,2014 年、2015 年、2016 年为枯水年,2017 年为丰水年,分别为多年同期平均降水的一37.0%,−23.6%,−24.3%和 23.8%。7 月中旬为玉米抽雄散粉期,7 月中下旬玉米进入灌浆期,此时降水量的多少会对产量形成产生重要影响^[21]。2014—2017 年,7 月下旬至 8 月上旬降水量分别占当年玉米生育期降水量的 16.5%,12.6%,8.9%和 5.1%,各试验年 8 月中旬至 9 月上旬降水量分别占当年玉米生育期降水量的 29.1%,31.4%,13.9%和 46.9%,相同年型和不同年型间玉米产量形成关键期降水量分布不均。玉米收获以后 9 月中旬至 10 月,气温降低,降水增多,有利于土壤水分恢复。对各试验年 7 月下旬至 8 月上旬干燥度分析可知,2014 年、2015 年同期气候为半湿润,2016 年、2017 年同期气候为半干旱,干燥度由大到小分别为 2017 年>2016 年>2015 年>2014 年,该阶段气候过于干旱造成高温热害胁迫或过于湿润造成低温寡照多雨,均对玉米灌浆影响很大,会造成玉米高温逼熟或延迟收获。

表 1 2014—2017 年生育期降水比较								单位:mm
年份	4 月下旬	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月上旬	7 月下旬至 8 月上旬干燥度	降水年型
2014	23.1	21.7	64.1	14.8	81.9	21.9	1.14	枯水年
2015	8.1	34.4	79.8	45.1	72.0	36.5	1.22	枯水年
2016	0	44.8	75.5	105.2	48.0	0	1.83	枯水年
2017	0	62.1	102.8	64.0	211.3	7.0	2.15	丰水年
67 a 平均值	12.6	52.0	61.5	104.7	99.5	30.9	—	—

2.2 株行距配置连作条件下春玉米不同生育期 0—200 cm 土壤水分时空变化

由图 1 可知,不同年型对 0—200 cm 土层土壤含水量影响显著,不同行距处理土壤含水量变化趋势相同。土壤水分随土层深度整体呈逐渐降低趋势,S 行距处理 80—200 cm 土壤含水量较 F 行距处理有所

降低,说明 S 行距在促进产量提升的同时导致植株对水分需求增加,在干旱年份导致土壤水分亏缺显著,在受到大量降水补给作用下,S、F 行距深层土壤含水量没有显著差异。随 7 月下旬至 8 月上旬干燥度的增加,各生产年土壤低湿持续时间呈增加趋势。2017 年受高温气候胁迫,土壤低湿区向地表显著上移,0—

100 cm 平均土壤含水量 F 行距和 S 行距分别为 10.3% 和 9.5%，较 2014—2016 年同期平均含水量下降 2.6, 2.0 个百分点；0—200 cm 平均土壤含水量 F 行距处理为 9.8%，S 行距处理为 9.3%，较 2014—2016 年同期平均含水量下降 2.5, 2.3 个百分点。受 8 月中下旬降水补给影响，2017 年玉米收获期 0—100 cm 土壤含水量 F、S 行距处理分别回升至 21.6% 和

20.5%，2014—2016 年同期平均土壤含水量分别为 12.3% 和 11.5%；0—200 cm 土壤含水量分别回升至 17.8% 和 16.3%，2014—2016 年同期平均土壤含水量分别为 11.3% 和 10.6%。说明收获后充分降水能够对不同株行距配置 0—200 cm 土壤水分均起到不同程度的恢复作用，缓解玉米生长季耗水造成的土壤水分亏缺。

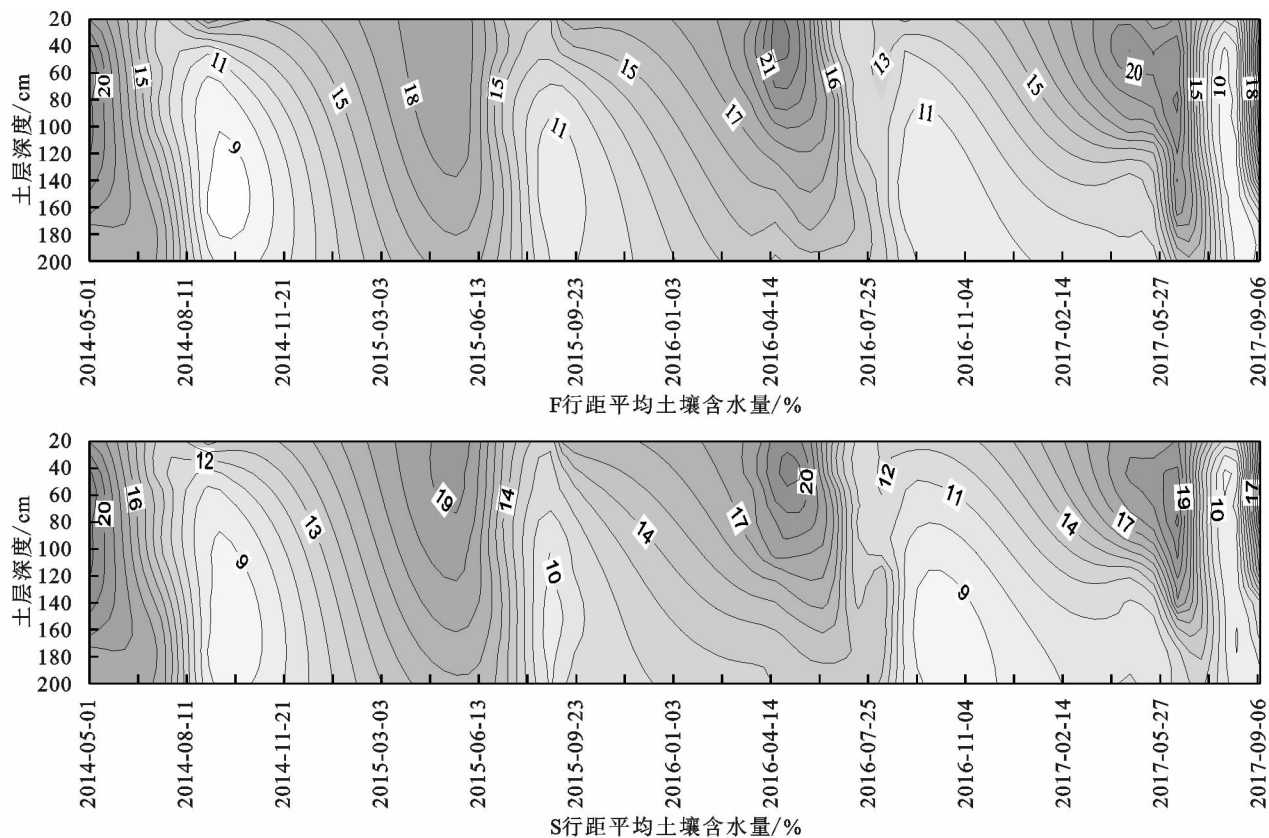


图 1 不同行距种植玉米土壤水分时空变化

2.3 不同株行距配置春玉米土壤水分及其变异系数变化

对不同株行距配置下春玉米土壤水分进行分析(图 2)，结果表明不同株行距配置对 0—200 cm 土层土壤含水量有显著影响。由于少量降水入渗对浅层土壤补给作用使 0—20 cm 土层土壤水分变化较小，而降水稀少对深层土壤补给作用较弱，以及干旱气候使春玉米植株对土壤深层水分消耗加剧，使 20—120 cm 土层土壤水分变化较为剧烈，随着土层深度增加，120 cm 以下土壤水分变异系数减小。说明在植株生长季内深层土壤水分消耗后，降水对深层土壤水分补给缓慢，深层土壤水分恢复滞后于浅层土壤，造成深层土壤水分变化相对浅层缓慢。密度由低到高 0—200 cm 土壤平均含水率 F 行距处理分别为 14.4%，14.8%，14.8% 和 15.3%，S 行距处理分别为 14.4%，14.3%，14.3% 和 14.5%，同一种种植密度下 0—200 cm 土壤平均含水率除 6.0 万株/hm² 2 种行距无显著差异，其余各密度 F 行距处理均高于 S 行距处理。2014 年收获期与 2017 年同期土壤含水量平均

差值按照密度由低到高 F 行距处理分别为 -7.4%，-7.2%，-7.2% 和 -8.3%，S 行距处理分别为 -6.8%，-7.0%，-6.3% 和 -6.2%。综上表明，大量降水均可以有效对不同株行距配置处理 0—200 cm 土壤水分进行补给提升土壤含水量。

2.4 不同株行距配置春玉米阶段耗水量变化

从表 2 可以看出，不同株行距配置对春玉米耗水量和耗水强度变化影响显著。不同年份间春玉米对土壤水分影响不同。播种期至抽雄期，2014 年、2015 年各处理间耗水量变化差异较小，2016 年、2017 年各处理间耗水量变化差异较大。2014 年、2015 年相同密度下 2 种行距间耗水量无显著差异，2014 年 F4 处理耗水量最高，2015 年 S2 处理耗水量最高，其余各处理间相同年度无显著差异；2016 年、2017 年 6.0 万株/hm² 密度下 2 种行距耗水量差异达显著水平 ($P < 0.05$)，F1 耗水量 2016 年和 2017 年分别比 S1 增加了 35.4, 54.4 mm，其余密度下 2 种行距间耗水量差异不显著。抽雄至成熟，2014 年、2015 年、2017 年 6.0 万株/hm² 密度下 2 种行距耗水量差异达显著水平 ($P <$

0.05), F1 耗水量 2014 年、2015 年、2017 年分别比 S1 减少 26.6、41.7、41.5 mm, 其余密度下 2 种行距间耗水量差异不显著; 2016 年 10.5 万株/hm² 密度下 2 种行距耗水量差异达显著水平 ($P<0.05$), F4 耗水量比 S4 减少 34.8 mm, 其余密度下 2 种行距间耗水量差异不显著。全生育期不同株行距配置相同

密度下耗水量 2014 年、2017 年无显著差异, 2 个试验年 S3 处理耗水量均最高; 2015 年、2016 年 6.0 万株/hm² 密度 2 种行距下耗水量差异达显著水平 ($P<0.05$), 2015 年 F1 耗水量比 S1 减少 49.7 mm, 2016 年 F1 耗水量比 S1 增加 43.1 mm, 其余密度下 2 种行距间耗水量无显著差异。

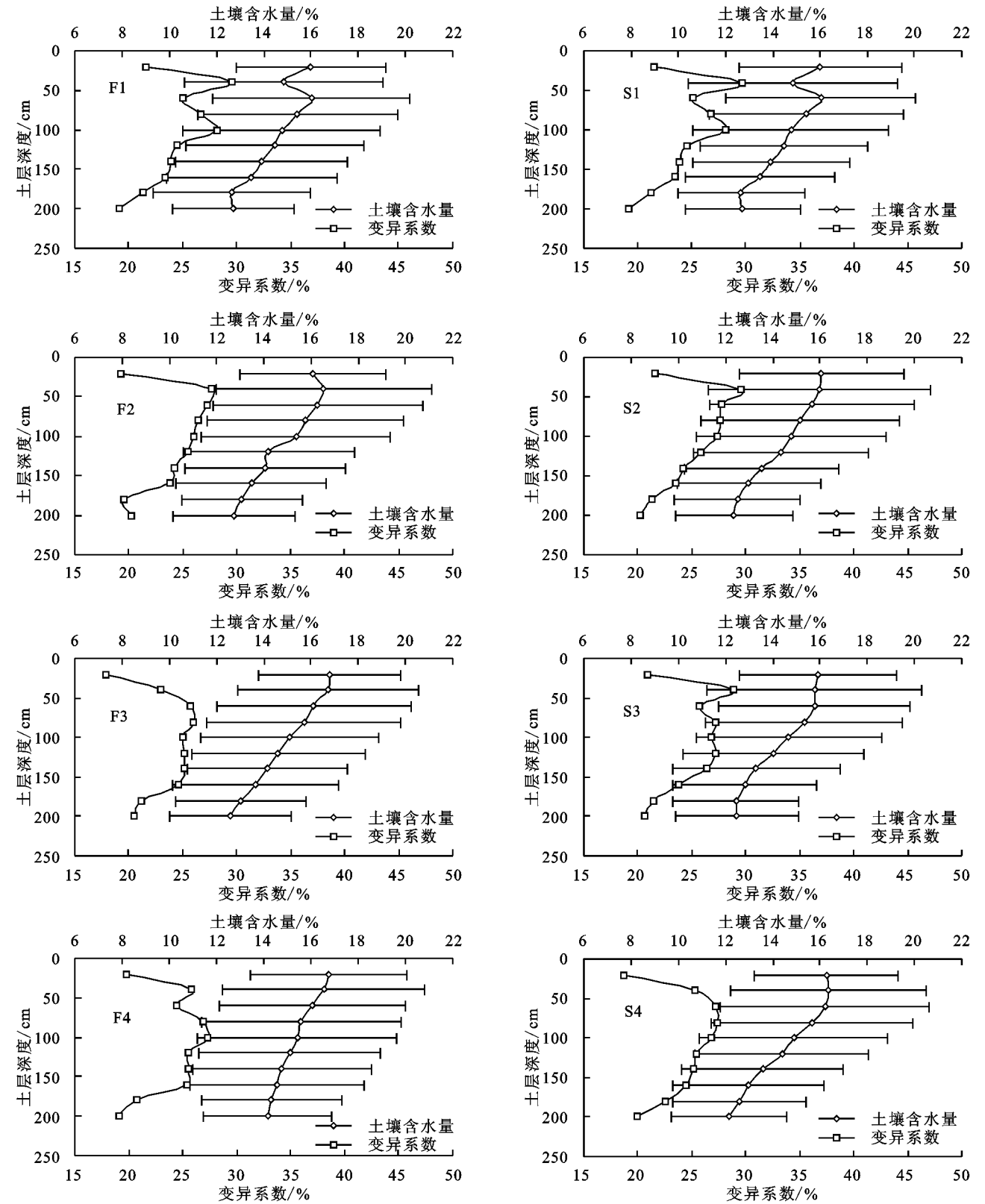


图 2 株行距配置土壤含水量和变异系数剖面分布

耗水强度年际间变化不同。从播种至抽雄耗水强度来看,2014 年 F4 显著高于 S4 处理和 F 行距其余处理($P<0.05$),与 S 行距其余处理没有显著差异,6.0,7.5,9.0 万株/hm² 相同密度下 2 种行距间耗水强度差异不显著;2015 年 S2 耗水强度最大,但相同密度下 2 种行距间耗水强度无差异;2016 年、2017 年 6.0 万株/hm² 密度 2 种行距下耗水强度差异显著($P<0.05$),F1 耗水强度 2016 年、2017 年分别比 S1 增加 0.4,0.7 mm/d,其余密度下 2 种行距

间耗水量无显著差异。抽雄期至成熟期,2014 年、2015 年、2016 年耗水强度变化与耗水量变化趋势相同,2014 年、2015 年 6.0 万株/hm² 密度下 2 种行距耗水强度差异显著($P<0.05$),2016 年 10.5 万株/hm² 密度下 2 种行距耗水强度差异显著($P<0.05$),其余密度下 2 种行距间耗水强度无显著差异;2017 年 7.5 万株/hm² 密度下 2 种行距耗水强度无显著差异,6.0,9.0,10.5 万株/hm² 密度下 2 种株行距耗水强度差异显著($P<0.05$)。

表 2 春玉米不同株行距配置耗水量变化

年份	处理	播种期至抽雄期			抽雄期至成熟期			全生育期		
		耗水量/	耗水强度/	降水量/	耗水量/	耗水强度/	降水量/	耗水量/	耗水强度/	降水量/
		mm	(mm·d ⁻¹)	mm	mm	(mm·d ⁻¹)	mm	mm	(mm·d ⁻¹)	mm
2014	F1	262.0ab	3.5b	121.2	189.4b	3.6b	88.7	451.4a	3.6a	209.9
	F2	256.3b	3.5b	121.2	205.8ab	4.0a	88.7	462.1a	3.7a	209.9
	F3	260.9b	3.5b	121.2	200.8ab	3.9ab	88.7	461.7a	3.7a	209.9
	F4	284.8a	3.8a	121.2	189.8b	3.6b	88.7	474.6a	3.8a	209.9
	S1	262.7ab	3.6ab	121.2	216.0a	4.2a	88.7	478.8a	3.8a	209.9
	S2	273.3ab	3.7ab	121.2	203.4ab	3.9ab	88.7	476.8a	3.8a	209.9
	S3	266.8ab	3.6ab	121.2	217.2a	4.2a	88.7	483.9a	3.8a	209.9
	S4	262.0ab	3.5b	121.2	205.2ab	3.9ab	88.7	467.2a	3.7a	209.9
2015	F1	210.6a	2.9b	122.3	211.7c	3.2c	153.6	422.3b	3.0b	275.9
	F2	222.7a	3.1ab	122.3	249.8ab	3.7a	153.6	472.5a	3.4a	275.9
	F3	223.0a	3.1ab	122.3	229.7bc	3.4bc	153.6	452.6ab	3.2ab	275.9
	F4	224.4a	3.1ab	122.3	225.3bc	3.4bc	153.6	449.7ab	3.2ab	275.9
	S1	218.7a	3.0ab	122.3	253.4a	3.8a	153.6	472.0a	3.4a	275.9
	S2	228.2a	3.1a	122.3	236.1ab	3.5ab	153.6	464.3a	3.3a	275.9
	S3	222.1a	3.0ab	122.3	220.1bc	3.3c	153.6	442.2ab	3.2ab	275.9
	S4	213.6a	2.9ab	122.3	241.6ab	3.6ab	153.6	455.2ab	3.3ab	275.9
2016	F1	278.9a	3.3a	133.2	208.9a	4.2a	140.3	487.8a	3.6a	273.5
	F2	276.5a	3.3a	133.2	181.7b	3.6b	140.3	458.2ab	3.4ab	273.5
	F3	248.7bc	2.9bc	133.2	179.0b	3.6b	140.3	427.7b	3.2b	273.5
	F4	249.3bc	2.9bc	133.2	181.8b	3.6b	140.3	431.1b	3.2b	273.5
	S1	243.5bc	2.9bc	133.2	201.1a	4.0a	140.3	444.7b	3.3ab	273.5
	S2	277.6a	3.3a	133.2	181.6b	3.6b	140.3	459.2ab	3.4ab	273.5
	S3	261.4ab	3.1ab	133.2	177.2b	3.5b	140.3	438.6b	3.2b	273.5
	S4	229.7c	2.7c	133.2	216.6a	4.3a	140.3	446.4b	3.3ab	273.5
2017	F1	224.5ab	3.0ab	186.4	185.2bc	2.9cd	260.8	409.7a	3.0a	447.2
	F2	211.5b	2.8bc	186.4	187.8bc	3.0c	260.8	399.3a	2.9a	447.2
	F3	207.8b	2.8c	186.4	182.5bc	2.9cd	260.8	390.3a	2.8a	447.2
	F4	221.3ab	3.0ab	186.4	187.0bc	3.0c	260.8	408.2a	3.0a	447.2
	S1	170.1c	2.3d	186.4	226.7a	3.6a	260.8	396.8a	2.9a	447.2
	S2	212.2b	2.8bc	186.4	180.8bc	2.9cd	260.8	393.0a	2.8a	447.2
	S3	209.6b	2.8bc	186.4	202.9b	3.2b	260.8	412.5a	3.0a	447.2
	S4	232.3a	3.1a	186.4	169.3c	2.7d	260.8	401.6a	2.9a	447.2

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.5 不同株行距连作春玉米产量及水分利用效率变化

7 月下旬至 8 月上旬干燥度对玉米产量和水分利用效率有显著影响(图 3)。干燥度过低或过高均会降低玉米产量和水分利用效率。株行距配置对春玉米产量和水分利用效率影响显著,对春玉米多年产量综合分析表明(表 3、表 4),年份间差异极显著

($P<0.01$),行距间没有显著差异($P>0.05$),密度间差异极显著($P<0.01$),年份与行距互作效应下差异达极显著水平($P<0.01$),年份与密度 2 因素互作、行距与密度 2 因素互作以及年份、行距和密度 3 因素互作效应均没有显著差异($P>0.05$)。试验年内春玉米产量随株行距配置变化而变化,年际间春玉米

产量受降水量和干燥度变化而变化。2014 年、2015 年 S4 处理产量均为最高,2014 年产量其次为 S3 和 S2,2015 年产量其次为 F4 和 S3;2016 年 F4 处理产量最高,其次为 F3 和 S3;2017 年 S3 产量最高,其次为 F2 和 S2。密度由低到高平均产量 S 行距处理较 F 行距处理分别增加 2.2%,5.8%,4.1%和 3.0%。

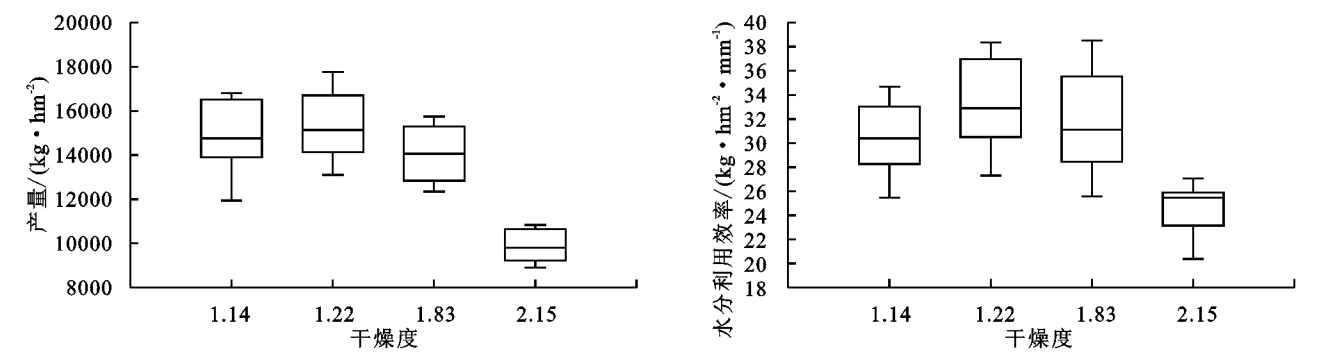


图 3 7 月下旬至 8 月上旬干燥度对玉米产量和水分利用效率影响

表 3 不同株行距配置春玉米产量和水分利用效率变化

处理	产量/(kg·hm ⁻²)					CV/%	平均水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	平均		
F1	11942d	14098c	12468c	8914c	11856±2165b	18.3	26.1±5.3c
F2	14121c	14245bc	14045b	10707ab	13279±1717ab	12.9	28.9±2.3bc
F3	14982abc	14862bc	15546a	9780abc	13793±2692a	19.5	31.5±4.3ab
F4	14536bc	17106ab	15752a	9364abc	14189±3384a	23.8	32.8±6.4a
S1	13838cd	13106c	12348c	9171bc	12116±2055b	17.0	26.4±2.5c
S2	16282ab	15412abc	13977b	10503ab	14043±2545a	18.1	30.6±2.6ab
S3	16585a	15509abc	14519ab	10835a	14362±2498a	17.4	31.6±3.9ab
S4	16810a	17774a	14086b	9815abc	14621±3565a	24.4	32.3±5.9ab

表 4 年份、行距和种植密度对玉米产量及水分利用效率方差分析

变异来源	自由度	P 值	
		产量	水分利用效率
年份(A)	3	0.0013	0.0115
行距(B)	1	0.0896	0.4007
密度(C)	3	0.0001	0.0001
A×B	3	0.0047	0.0155
A×C	9	0.1138	0.0328
B×C	3	0.6466	0.5349
A×B×C	9	0.6526	0.0728

不同株行距配置对春玉米水分利用效率影响显著(表 4),水分利用效率年份间差异显著($P<0.05$),行距变化没有显著影响($P>0.05$),密度间差异极显著($P<0.01$),年份和行距互作效应显著($P<0.05$),年份和密度互作效应显著($P<0.05$),行距和密度 2 因素互作及年份、行距和密度 3 因素互作效应对水分利用效率影响不显著($P>0.05$)。平均水分利用效率由高到低分别为 F4>S4>S3>F3>S2>F2>S1>F1。通过株行距调整下进行多年种植试验表明,密度提升能够显著提高平均水分利用效率。密度由 6.0 万株/hm² 提升到 9.0 万株/hm²,相同种植密

从试验 4 年平均产量来看,产量由高到低分别为 S4>S3>F4>S2>F3>F2>S1>F1。除 F1 和 S1 外,其余株行距配置处理之间产量差异不显著($P>0.05$),除 F4 和 S4 处理外变异系数较大稳产性较差,其余株行距配置处理不同年度间变异系数较小具有较好的稳产性。

度下 S 行距处理平均水分利用效率总体高于 F 行距处理,但当密度提升至 10.5 万株/hm² 时 S 行距处理水分利用效率低于 F 行距处理,S 行距处理种植密度 6.0 万株/hm² 至 10.5 万株/hm² 水分利用效率较 F 行距处理分别增加 1.1%,5.9%,0.3%和-1.5%。

3 讨论

通过株行距调整可以显著改变玉米行间小气候,影响玉米植株生长发育,对地膜覆盖条件下土壤水分蓄集和消耗产生影响^[22-23]。本研究连续多年连作定位试验结果表明,2 种行距种植条件下连作均未造成土壤剖面干层形成,但不同年份间 75 cm(S)行距土壤剖面低湿区较 55 cm(F)行距有不同程度上升。7 月下旬至 8 月上旬是春玉米生长发育的重要时期,该时期降水量与干燥度对春玉米农田水分变化有显著影响。黄土旱塬春玉米在 7 月下旬至 8 月上旬处于灌浆期,该时期水分消耗强度较大,大量降水能够对土壤水分进行有效补给,2014 年、2015 年该时期干燥度较低气候湿润,降水对玉米生长消耗水分进行有效补充;2016 年、2017 年同期干燥度升高,玉米生长发育对土壤水分产生过度消耗,虽未使土壤剖面形成干

层,但使土壤低湿区上移,土壤剖面土壤水分整体显著降低,这与樊廷录等^[17]、白翔斌等^[24]的研究结论一致。2017 年 8 月下旬土壤低湿区由于受大量降水充分补给逐渐下移并消失。

由于地膜覆盖抑制土壤与大气的水气交换,阻抑水分蒸发,土壤水分消耗主要为玉米生长对土壤水分的蒸腾消耗。本试验结果表明,不同株行距调整下土壤剖面土层水分垂直变化显著。玉米农田多年连作条件下,55 cm(F)行距和 75 cm(S)行距不同密度种植模式土壤剖面土层水分垂直变化趋势相同。0—20 cm 土壤表层水分变异相对较小,20—120 cm 土壤土层水分变化剧烈,120 cm 以下土壤土层水分变化呈现减小趋势。2 种行距在 6.0 万株/hm² 密度种植条件下 2015 年、2016 年全生育期耗水量有显著差异,在其余密度种植条件下无显著差异。耗水强度受年份影响显著,播种期至抽雄期,2014 年 10.5 万株/hm² 密度种植条件下 55 cm(F)行距和 75 cm(S)行距差异显著,2016 年、2017 年 6.0 万株/hm² 密度种植条件下差异显著,7.5,9.0 万株/hm² 密度种植条件下各年份 2 种行距调整耗水强度均没有显著差异。抽雄期至成熟期,受 7 月下旬至 8 月上旬干燥度影响,2014—2016 年 7.5,9.0 万株/hm² 密度种植条件下各年份 2 种行距调整耗水强度均没有显著差异,2017 年 7.5 万株/hm² 密度种植条件下 2 种行距调整耗水强度没有显著差异。本试验结果表明,55 cm (F)行距和 75 cm(S)行距下合理的株距调整对耗水量和耗水强度不会发生显著影响。

雨养旱作区农田高生产力以过多消耗土壤水分为代价,易形成土壤干层化,影响作物产量的稳产性^[25]。在黄土旱塬雨养农业区有限降水对玉米产量有显著影响,旱作玉米高产稳产的前提是对玉米群体进行合理优化^[26]。本试验结果表明,春玉米连作稳产性种植密度由 6.0 万株/hm² 增加至 10.5 万株/hm² 不同行距变化不同。55 cm 行距处理春玉米稳产性密度由低到高呈抛物线变化趋势,75 cm 行距处理春玉米稳产性随密度增加呈降低趋势,2 种行距处理下 10.5 万株/hm² 种植密度稳产性均最低,6.0~9.0 万株/hm² 均有较好的稳产性。本研究表明,通过株行距配置调整,玉米多年连作平均产量和水分利用效率随种植密度增加而提升,但 7.5,9.0,10.5 万株/hm² 之间产量和水分利用效率没有显著差异。

4 结论

黄土旱塬区覆膜春玉米连作条件下,株行距调整使密度增加获得产量提升后,土壤剖面没有干层形成,土壤水分变化随年份和季节间降水影响呈波动变化。虽然 75 cm 行距处理种植土壤剖面低湿区较 55

cm 行距处理种植有所上移,但降水可以对不同株行距配置春玉米生长季消耗的土壤水分进行有效补充,使春玉米生长对土壤水分高强度消耗引起的土壤剖面低湿区缓解或消失。55,75 cm 行距 7.5,9.0 万株/hm² 种植密度条件下均能够获得理想产量并保持较高的稳产性,而 2 种行距配置条件下 7.5,9.0 万株/hm² 种植密度间产量差异均不显著,综合产量、水分利用效率及稳产性多方面因素,55,75 cm 行距配置下连作覆膜春玉米耐密品种 7.5 万株/hm² 密度种植是可以在土壤剖面不产生干层的前提下,提高水分利用效率和稳产的株行距配置措施。

参考文献:

- [1] 陈志君,孙仕军,张旭东,等. 东北雨养区覆膜和种植密度对玉米田间土壤水分和根系生长的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(1):224-235.
- [2] 孔令聪,曹承富,叶震. 紧凑型玉米的高产栽培技术[J]. 安徽农学通报,1995,1(1):50-51.
- [3] Maddonno G A, Chelle M, Drouet J L, et al. Light interception of contrasting azimuth canopies under square and rectangular plant spatial distributions: Simulations and crop measurements[J]. Field Crops Research,2001,70(1):1-13.
- [4] 高英波,陶洪斌,黄收兵,等. 密植和行距配置对夏玉米群体光分布及光合特性的影响[J]. 中国农业大学学报,2015,20(6):9-15.
- [5] 李新彦,李有明,马现斌,等. 不同株行距配置对玉米产量的影响[J]. 江苏农业科学,2014,42(7):87-88.
- [6] 何冬冬,杨恒山,张玉芹. 扩行距、缩株距对春玉米冠层结构及产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2018,26(3):397-408.
- [7] 关心,陈皆辉,周立权,等. 春玉米密度、株行距配置的产量效应[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版),2016,31(3):225-231.
- [8] 李尚中,樊廷录,赵刚,等. 旱地玉米不同覆盖栽培模式的土壤水热特征及产量品种效应[J]. 草业学报,2018,27(4):34-44.
- [9] 任小龙,贾志宽,丁瑞霞,等. 我国旱区作物根域微集水种植技术研究进展及展望[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(3):83-89.
- [10] 徐宗贵,孙磊,王浩,等. 种植密度对旱地不同株型春玉米品种光合特性与产量的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(13):2463-2475.
- [11] Xie Z K, Wang Y J, Li F M. Effect of plastic mulching on soil water use and spring wheat yield in arid region of northwest China[J]. Agricultural Water Management,2005,75(1):71-83.
- [12] 胡伟,陈豫. 黄土高原半干旱区旱作农田土壤干燥化研究[J]. 河南农业科学,2013,42(4):75-79.
- [13] 王同朝,卫丽,王燕,等. 夏玉米垄作覆盖对农田土壤水分及其利用影响[J]. 水土保持学报,2007,21(2):129-132.

- 与治理[J]. 中国水土保持, 2009(1): 31-34.
- [4] 张信宝. 崩岗边坡失稳的岩石风化膨胀机理探讨[J]. 中国水土保持, 2005(7): 10-11.
- [5] 魏玉杰, 吴新亮, 蔡崇法. 崩岗体剖面土壤收缩特性的空间变异性[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 153-159.
- [6] 张佩佩, 张文太, 贾宏涛, 等. 新疆北部地区与其他地区变性土壤线性膨胀系数的差异及矿物学机制[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(6): 1074-1080.
- [7] 张同娟, 王益权, 刘军, 等. 黄土地区影响土壤膨胀性的因子分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(6): 185-189.
- [8] 范本贤, 黄英, 孙书君, 等. 云南红土的循环胀缩特性研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 120-127.
- [9] 章李坚, 郭永春, 代聪, 等. 含水率对膨胀土胀缩性能影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(增刊 1): 108-112.
- [10] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, (11): 1936-1941.
- [11] 李志清, 余文龙, 付乐, 等. 膨胀土胀缩变形规律与灾害机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 270-275.
- [12] 吕殿青, 邵明安. 土壤收缩特征曲线的实验研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 471-474.
- [13] 吴珺华, 袁俊平, 杨松, 等. 干湿循环下膨胀土胀缩性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 62-65.
- [14] Hillel. Effect of plate impedance, wetting method, and aging on soil moisture retention[J]. Soil Science, 1966, 102(2): 135-139.
- [15] 武科, 赵闯, 张文, 等. 干湿循环作用下膨胀土表观胀缩变形特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 121-127.
- [16] Lin J S, Huang Y H, Wang M K, et al. Assessing the sources of sediment transported in gully systems using a fingerprinting approach: An example from South-east China[J]. Catena, 2015, 129: 9-17.
- [17] 阮伏水. 福建崩岗沟侵蚀机理探讨[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 1996(增刊 1): 24-31.
- [18] 牛德奎, 郭晓敏, 左长清, 等. 我国南方红壤丘陵区崩岗侵蚀的分布及其环境背景分析[J]. 江西农业大学学报, 2000, 6(2): 204-208.
- [19] 国家标准. 土工试验方法标准(GB/T 20123—1999)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [20] 东南大学. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [21] 李献民, 王永和, 肖宏彬, 等. 击实膨胀土胀缩速度特性的对比研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(2): 115-120.
- [22] 侯龙清, 黎剑华. 土力学试验[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [23] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [24] 曾召田. 膨胀土干湿循环效应与微观机制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2007.
- [25] 唐大雄. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- (上接第 86 页)
- [14] 侯慧芝, 高世铭, 张绪成, 等. 旱地全膜覆土穴播春小麦的耗水特征及其对产量的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 202-210.
- [15] 李世清, 李东方, 李凤民, 等. 半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应[J]. 西北农林科技大学学报, 2003, 31(5): 21-29.
- [16] 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.
- [17] 樊廷录, 李永平, 李尚中, 等. 旱作地膜玉米密植增产用水效应及土壤水分时空变化[J]. 中国农业科学, 2016, 49(19): 3721-3732.
- [18] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 853-861.
- [19] 张海萍, 陈利顶, 王晓燕, 等. 海伦地区水热耦合特征及其对大豆产量的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(1): 131-138.
- [20] 汪勇, 付俊, 徐海军. 浙江省桐庐县将水特征及变化趋势分析[J]. 黑龙江水专学报, 2005, 32(1): 26-29.
- [21] 王磊, 李雅文, 樊廷录, 等. 适宜机械收获株行距对黄土旱塬春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 363-370.
- [22] 谢军红, 李玲玲, 张仁陟, 等. 覆膜、沟垄作对旱作农田玉米产量和水分利用的叠加效应[J]. 作物学报, 2018, 44(2): 268-277.
- [23] 李军, 蒋斌, 胡伟, 等. 黄土高原不同类型旱区旱作粮田深层土壤干燥化特征[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2124-2134.
- [24] 白翔斌, 岳善超, 李世清, 等. 不同栽培模式旱作春玉米农田土壤水分时空动态和产量效应[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 164-170.
- [25] 董翠云, 黄明斌, 李玉山. 黄土塬区旱作农田高生产力的水分环境效应与产量波动性[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3): 204-206.
- [26] 齐华, 梁熠, 赵明, 等. 栽培方式对玉米群体结构的调控效应[J]. 华北农学报, 2010, 25(3): 134-139.