

不同模拟雨量下耕作措施对夏玉米水分利用效率和产量的影响*

陈宇 温晓霞 廖允成**

(西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 基于西北夏玉米生产实际和降雨特征,用自制模拟降雨器,于2010年6—9月研究了250、350和450 mm模拟雨量下翻耕、免耕、免耕覆盖对夏玉米农田水分利用效率及产量的影响.结果表明:在6—9月250 mm雨量下免耕水分利用效率比翻耕高26%,产量比翻耕高16.5%;350 mm雨量下免耕水分利用效率和产量分别比翻耕高17.6%和6.1%;在450 mm雨量下免耕的蓄水效应低于翻耕,水分利用效率比翻耕低1.1%,产量比翻耕低0.6%.免耕覆盖克服了免耕在雨量充沛时水分蓄积量低于翻耕的缺点,在3种雨量下均可有效抑制裸间蒸发,减少翻耕地表裸露造成的无效水分消耗,增加土层贮水量,增大蒸腾量占水分消耗的比例,250 mm雨量下免耕覆盖水分利用效率比翻耕高48.6%,产量比翻耕高32.9%;350 mm雨量下免耕覆盖水分利用效率比翻耕高51.6%,产量比翻耕高27.1%;450 mm雨量下免耕覆盖水分利用效率比翻耕高23.7%,产量比翻耕高13.1%.综上,免耕夏玉米在250和350 mm雨量下相对于翻耕有增产和提高水分利用效率的优势,免耕覆盖夏玉米在250、450 mm雨量下产量和水分利用效率显著高于翻耕.

关键词 模拟雨量 保护性耕作 夏玉米 水分利用效率 产量

文章编号 1001-9332(2013)08-2211-11 **中图分类号** S513 **文献标识码** A

Effects of tillage mode on water use efficiency and yield of summer maize under different simulated rainfalls. CHEN Yu, WEN Xiao-xia, LIAO Yun-cheng (*College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(8): 2211-2221.

Abstract: Based on the tillage practices of summer maize and the rainfall pattern in Northwest China, and by using self-made simulated rainfall device, a field experiment was conducted on the effects of plowing, no-tillage, and no-tillage plus mulching on the water use efficiency (WUE) and yield of summer maize under rainfalls 250, 350 and 450 mm from June to September, 2010. Compared with plowing, no-tillage increased the WUE and yield under rainfall 250 mm by 26% and 16.5% and under rainfall 350 mm by 17.6% and 6.1%, respectively. Under rainfall 450 mm, the water storage was smaller in treatment no-tillage than in treatment plowing, and the WUE and yield in treatment no-tillage were 1.1% and 0.6% lower than those in treatment plowing, respectively. No-tillage plus mulching overcame the disadvantage of no-tillage in lesser water-storing under sufficient rainfall than plowing. Under the three rainfalls, no-tillage plus mulching could effectively inhibit the soil evaporation between plants, decrease the invalid water consumption of bare soil, and increase the soil water storage and the rate of evapotranspiration to water consumption. Compared with plowing, no-tillage plus mulching increased the WUE and yield under rainfall 250 mm by 48.6% and 32.9%, under rainfall 350 mm by 51.6% and 27.1%, and under 450 mm rainfall by 23.7% and 13.1%, respectively. In sum, relative to plowing, no-tillage showed its superiority in increasing WUE and yield under rainfalls 250 and 350 mm, whereas no-tillage plus mulching increased the WUE and yield significantly under rainfalls 250 and 450 mm.

Key words: simulated rainfall; conservation tillage; summer maize; water use efficiency; yield.

* 陕西省“13115”科技创新工程重大科技专项计划项目(2010ZDKG-09)和国家自然科学基金项目(30971721)资助。

** 通讯作者. E-mail: yunchengliao@163.com

2012-11-14 收稿, 2013-06-05 接受。

我国西北旱区年平均降水量在 550 mm 以下,大部分属半干旱与干旱地区,其耕地面积占全国的 22%,但其粮食单产低,粮食总产量只占全国的 11%,制约西北旱区农业的主要限制因子是水资源短缺,同时由于西北地区气候干旱、蒸发强烈以及农业用水的过度消耗,造成了严重的生态环境问题^[1-2]. 玉米是我国仅次于水稻的主要粮食作物,发展保护性耕作将有利于提高玉米单产及水分利用效率,并具有良好的生态环境效应^[3]. 传统的翻耕播种破坏了表层土壤结构,加剧了土壤水分蒸发,加重水分短缺,降低了水分利用效率^[3-4]. 在一年两熟或两年三熟的复种地区,前茬作物收获后翻耕播种夏玉米费工、耗时,不利于农事操作^[5]. 提高夏玉米对水资源的利用效率,是当前夏玉米栽培迫切需要解决的问题,也是减少玉米生产需水,缓解环境压力的一种有效措施.

免耕播种省工节本,但免耕夏玉米产量受降雨量的影响较大^[6-9],关于翻耕与免耕的保水效果,一种观点认为免耕能够保持土壤水分^[10-11],增加土壤蓄水能力^[12]和贮水量^[13],另一种观点则认为免耕加剧了土壤水分蒸发^[14]. 前人关于免耕有蓄水保墒优越性的雨量阈值的研究较少;同时关于雨量对免耕秸秆覆盖夏玉米产量和水分利用效率的影响也缺乏研究.

西北地区种植夏玉米的大部分地区年降雨量在 400 ~ 750 mm,夏玉米主要生长期(6—9月)降雨量(250 ~ 450 mm)占全年降雨量的 60%. 本研究针对西北夏玉米生产实际,模拟了夏玉米生育期降雨量(分别为 250、350 和 450 mm). 通过对 3 种模拟雨量下土壤水分、地温及夏玉米产量和水分利用效率的测定,研究免耕和免耕覆盖对雨量的响应机制,为充分利用降雨,提高产量和水分利用效率,完善与当地雨量相适应的保护性耕作技术体系提供理论依据和技术支撑.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

试验于 2010 年 6—10 月在西北农林科技大学作物标本区遮雨棚进行,棚高 3 m,呈“人”字型,棚顶用透光塑料遮蔽,棚侧通风. 该试验点近 30 年年均降雨量 588 mm,年均气温 12.9 °C,最高气温 42 °C,最低气温 -19.4 °C,年均日照时数 2196 h,无霜期 220 d,属暖温带半湿润偏旱型气候. 为保证各小区底墒一致,在 6 月 2 日测定各小区土层贮存水量,

6 月 5 日模拟降雨保证各小区土层贮水量一致. 试验土壤质地为黄绵土,播种前 0 ~ 40 cm 耕层土壤容重 1.25 g · cm⁻³,田间持水量 21.6%,有机质 11.97 g · kg⁻¹,全氮 1.31 g · kg⁻¹,全磷 0.83 g · kg⁻¹,全钾 6.18 g · kg⁻¹,速效氮 53.12 mg · kg⁻¹,速效磷 22.34 mg · kg⁻¹,速效钾 97.37 mg · kg⁻¹,pH 7.6. 试验点 2000—2010 年连续 10 年降水量分布情况见表 1,试验区降雨集中在夏季(6—9月),占全年降水量的 58.2% ~ 74.0%,6—9 月降雨量在 243.8 ~ 669.9 mm 波动. 可见,夏玉米生育期处于雨季,其自然降水与作物生长季节相符,在该区最大限度地减少夏秋降雨损失,是提高降水有效利用率和作物产量的技术关键.

1.2 试验设计

模拟雨量的设计如表 2 所示. 自制模拟降雨器

表 1 2010 年玉米生育期内主要气象数据

Table 1 Meteorological data during maize growth stage in 2010

月份 Month	降雨量 Precipitation (mm)	平均气温 Average temperature (°C)	平均风速 Average wind speed (m · s ⁻¹)
6	30.8	23.8	1.2
7	78.8	26.5	1.2
8	245.3	24.2	0.7
9	147.7	20.0	0.8

表 2 3 种不同模拟雨量降雨时间设置

Table 2 Timing and amount of the three simulated precipitation

月份 Month	日期 Date	模拟雨量 Simulated precipitation (mm)		
		250	350	450
6	06-20	15	20	25
	06-26	15	20	25
	总和 Sum	30	40	50
7	07-02	15	20	30
	07-07	15	20	25
	07-12	15	20	25
	07-17	15	20	25
	07-23	15	20	25
	07-28	10	20	25
	总和 Sum	85	120	155
8	08-03	15	20	25
	08-08	15	20	30
	08-13	15	20	25
	08-18	15	20	25
	08-23	15	20	25
	08-28	15	20	25
	总和 Sum	90	120	155
9	09-02	15	20	25
	09-08	10	20	25
	09-13	10	15	20
	09-18	10	15	20
	总和 Sum	45	70	90

由供水和降雨系统两部分组成,供水系统由储水箱、外接水管、水表等组成,降雨系统由 3 个长 2 m、宽 0.5 m、高 0.1 m 的底部密布(每 2 cm×2 cm 一孔) 0.5 mm 孔径的铝皮水箱及装有滑轮的铁制支架组成,由可伸缩的支杆来调节高度,最高可以达到 2.5 m,通过控制水位可获得 30~40 mm·h⁻¹ 的中型雨强,单次雨量 10~30 mm,单次降雨间隔 5~6 d,全生育期不补充灌溉。

供试夏玉米品种为巡天 19,于 2010 年 6 月 10 日在西北农林科技大学农学院标本区旱棚播种,该棚内有 36 个水泥池,每池长 2 m、宽 1.5 m、深 2.5 m,四周用水泥封闭,可有效防止小区内水分发生侧漏。试验采用双因素随机区组设计,以不同模拟雨量(分别为 250、350 和 450 mm)为 A 因素,其雨量的设置梯度主要参照试验地自然降雨量(1980—2010 年)而定。以不同耕作模式为 B 因素,分别为:翻耕、免耕和免耕秸秆覆盖(覆盖量为 9000 kg·hm⁻²,根据已有研究结论^[15-16]确定)。玉米播种行距 50 cm,株距 30 cm,施氮肥 225 kg N·hm⁻²,钾肥 70 kg K₂O·hm⁻²,磷肥 80 kg P₂O₅·hm⁻²。于 4 月 20 日测定各小区内 1 m 土层贮水量,根据各小区底墒的差值通过模拟降雨补充各小区贮水量差值,保证底墒一致,在小区内免耕播种油菜,于 6 月 5 日油菜拔除后立即平整土地,测定各小区底墒,底墒基本接近,于 2010 年 6 月 8 日对翻耕小区进行翻耕,翻耕深度 20 cm,将小麦秸秆切成 3~5 cm 长度,于 2010 年 6 月 10 日播种后按照试验设计量进行免耕秸秆覆盖。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 大气温度和表土地温 用直管温度计(±0.1℃)测定 5、10、15、20 cm 地温,温度计长 40 cm,量程 0~50℃,在玉米播种期(6 月 10—12 日)、拔节期(7 月 6—8 日)、大喇叭口期(7 月 27—29 日)、吐丝期(8 月 7—9 日)、灌浆期(8 月 22—24 日)和成熟期(10 月 3—5 日)的 8:00—20:00 测定大气温度、地温,每隔 2 h 记录 1 次数据,连续测定 3 d。

1.3.2 日棵间蒸发量测定 棵间蒸发采用小型蒸发器测量,小型棵间蒸发器由外桶(白色聚氯乙烯管,外桶外径 160 mm,厚度 2 mm,高度 150 mm,外桶不封底)和内桶(内桶外径 110 mm,厚度 2 mm,高度 150 mm,内桶装入原状土,用折叠好的塑料薄膜封底)两部分组成,材料为 PVC 管,每个小区放置 5 个蒸发器,为保证每次操作不破坏周围主体结构,将内桶称量后放入预先设置于田间的外套桶中,使土柱顶面与土面齐平。从播种起,每天 8:00 称量,3~4 d

更换 1 次原状土,雨后重新取原状土;同时在桶上覆盖与试验小区相同的覆盖材料和覆盖量。棵间蒸发量计算公式为:

$$E_i = 10 \times (M_i - M_{i+1}) / S$$

式中: E_i 为第 i 天土面蒸发量(mm·d⁻¹); M_i 为小型蒸发器第 i 天 8:00 测量的总质量(g); M_{i+1} 为小型蒸发器第 $(i+1)$ 天 8:00 测量的总质量(g); S 为蒸发器内土面面积(cm²)^[17]。

1.3.3 蒸腾量测定 用水量平衡法(棵间蒸发量和土层贮水量)计算蒸腾量:

$$T + E = WS_i - WS_j$$

式中: T 为 $(j-i)$ 天内植株蒸腾量(mm); E 为 $(j-i)$ 天内小型棵间蒸发器测定的棵间蒸发量; WS_i 、 WS_j 分别为 i 日和 j 日的土层贮水量(mm)。

1.3.4 不同土层含水率测定及贮水量的计算 采用烘干法测定土壤含水率。在夏玉米播种期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期、灌浆期和成熟期各处理随机选 3 点,用土钻取样,每次取完土样,用周围田间手感湿度相似的土壤回填,以避免取土对小区造成破坏,0~40 cm 土层每 10 cm 取 1 个土样,40~100 cm 土层每 20 cm 取 1 个有代表性的新鲜土样,刮去土钻中的上部浮土,将土钻中部约 20 g 土壤迅速装入已测质量的铝盒内,盖紧,带回室内,将铝盒外表擦拭干净在分析天平上称量,准确至 0.01 g,然后置于已预热至 105℃的烘箱中烘至恒量。取出,盖好,在干燥器中冷却至室温,立即称量,做 3 次平行测定。测定公式为:

$$b = (m_1 - m_2) / (m_2 - m_0) \times 100\%$$

式中: b 为土壤含水率(%); m_0 为烘干空铝盒质量; m_1 为烘干前铝盒及土样质量; m_2 为烘干后铝盒及土样质量。

容重测定采用环刀法,用体积为 100 cm³的环刀,分 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 采集原状土样,重复 3 次。用修土刀修平土壤剖面,按剖面层次分层采样,每层重复 3 个。具体操作:在环刀内壁涂上凡士林,把环刀托放在已知质量的环刀上,将环刀刃口向下垂直压入土中,直至环刀筒中充满样品为止,环刀压入要平稳、用力一致。用修土刀切开环刀周围的土样,取出环刀,削去环刀两端多余的土,擦净外面的土,将装有土的环刀两端立即加盖。然后,将装有土的环刀烘干称量,105℃烘至恒量,在密闭烘箱中冷却后称质量(M_1),洗去内壁土壤,烘干称量(M_0),土壤体积质量(ρ ,g·cm⁻³)为: $\rho = (M_1 - M_0) /$

$V^{[18]}$. 土壤贮水量的计算公式为:

$$W = \rho \times h \times b \times 10$$

式中: W 为土壤贮水量 (mm); ρ 为土壤体积质量 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为土层深度 (cm); b 为土壤含水率 (%)^[19].

土壤耗水量的计算公式为:

$$ET = P + I + W_1 - W_2 - D + \varepsilon$$

式中: ET 为实际蒸散量 (mm); P 为降水量 (mm); I 为灌溉水量 (mm); W_1 为播前土壤贮水量 (mm); W_2 为成熟后的土壤贮水量 (mm); D 为地表径流量 (mm); ε 为计算误差 (mm)^[20]. 因试验在早棚进行模拟降雨, 无灌溉和地表径流, 土壤贮水量及耗水量均以 100 cm 土层含水量计算. 水分利用效率 ($WUE, \text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$) 计算公式:

$$WUE = Y / ET$$

式中: Y 为作物单位面积产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

1.3.5 干物质积累和产量测定 成熟期选取小区内与群体长势一致的 4 株植株, 按照叶、茎鞘、穗轴 (含颖壳)、籽粒等器官分样, 105 °C 下杀青 1 h, 80

°C 烘至恒量, 用精度为 0.01 g 的天平测量. 在成熟期, 每个小区选取 4 株玉米考种, 测定穗行数、行粒数、百粒质量, 每处理 4 次重复, 取平均值.

1.3.6 播种期的土壤理化性质测定 耕层有机质采用重铬酸钾容量法, 全氮采用半微量开氏扩散法, 全磷采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法, 全钾采用 NaOH 熔融-火焰光度法, 速效氮采用还原蒸馏法, 速效磷采用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法, 速效钾采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法, pH 值用 pH 计测定^[19].

1.4 数据处理

用 DPS 6.55 软件对试验数据进行统计分析, 采用多重比较法 (LSD) 进行方差分析和差异显著性检验 ($\alpha = 0.05$), 用 Sigmaplot 11.0 软件作图.

2 结果与分析

2.1 不同模拟雨量和耕作措施对夏玉米生育期地温的影响

由于同一耕作措施在不同雨量下土层温度差异小, 所以图 1 所列为各耕作措施下 5~20 cm 土层在

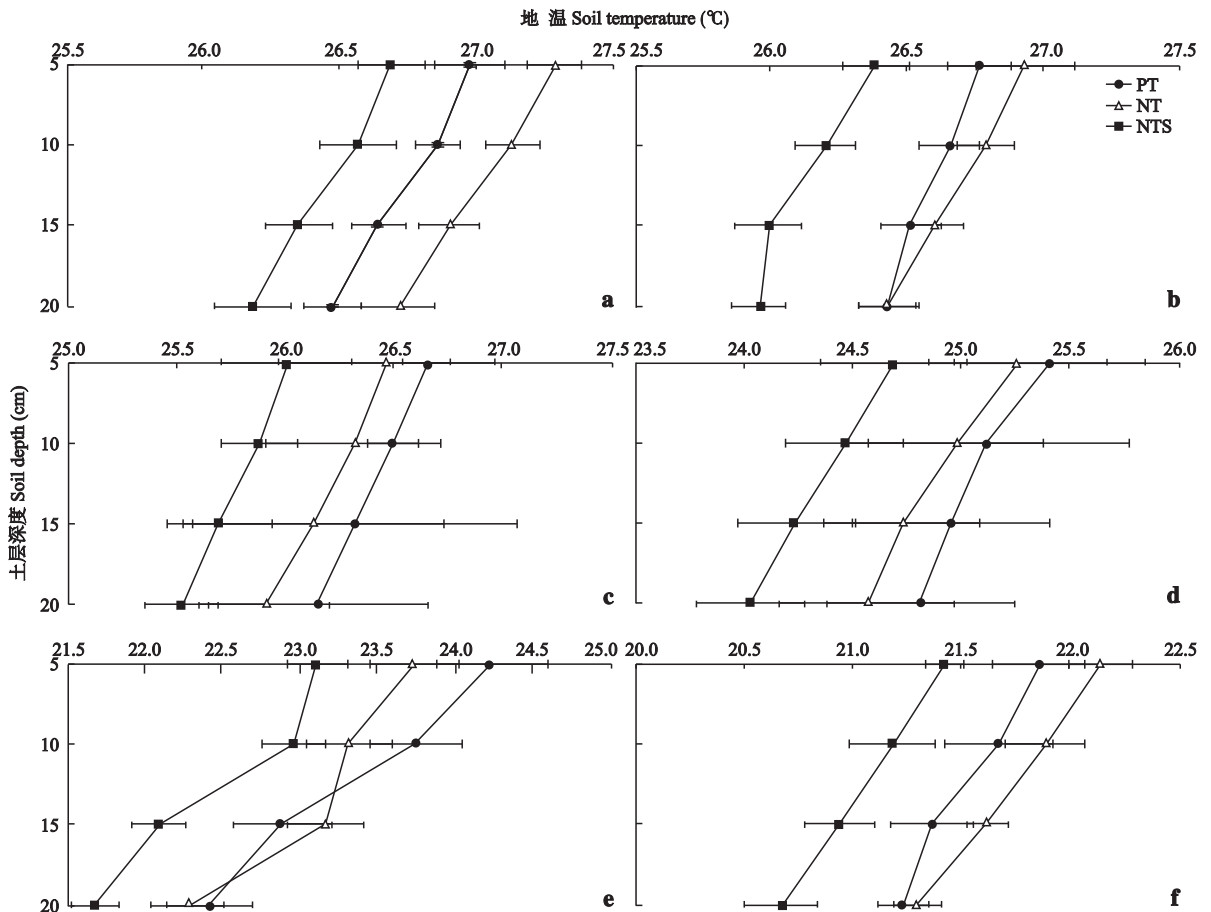


图 1 夏玉米各生育期不同土层日平均地温

Fig. 1 Average soil temperature in different layers at different growth stages of summer maize.

a) 播种期 Seeding stage; b) 拔节期 Jointing stage; c) 大喇叭口期 Flare opening stage; d) 吐丝期 Silking stage; e) 灌浆期 Filling stage; f) 成熟期 Mature stage. PT: 翻耕 Plowing tillage; NT: 免耕 No-tillage; NTS: 免耕覆盖 No-tillage with mulching. 下同 The same below.

3 个雨量下的日均地温. 3 种耕作措施下, 5、10、15 cm 土层地温受日照强度的影响大于 20 cm 土层, 免耕相对于翻耕增加或降低地温的效应受日照的影响, 免耕覆盖夏玉米 5~20 cm 土层地温受日照和气温的影响较小, 在全生育期均表现出降低地温的效应.

从播种到拔节期玉米叶面积较小, 日光直射地表, 免耕覆盖各土层日均地温显著低于免耕, 播种期翻耕土层地温显著低于免耕, 拔节期翻耕 5~10 cm 土层地温显著低于免耕, 翻耕 15~20 cm 土层地温低于免耕但差异不显著.

从大喇叭口期到灌浆期叶面积较大, 日光不能直射到地表, 大喇叭口期、吐丝期和灌浆期免耕覆盖 4 个土层日均地温显著低于免耕, 大喇叭口期免耕 4 个土层地温低于翻耕但差异不显著, 吐丝期免耕 5、10 cm 土层地温低于翻耕但差异不显著, 吐丝期免耕 15、20 cm 土层地温低于翻耕且差异显著, 灌浆期免耕 5、10 cm 土层地温高于翻耕且差异显著, 免耕 15 cm 土层地温高于翻耕但差异不显著, 灌浆期免耕 20 cm 土层地温低于翻耕但差异不显著. 在成熟期, 叶片枯黄, 部分日光直射地表, 免耕 5~15 cm 土层日均地温显著高于翻耕, 免耕 20 cm 土层日均地温高于翻耕但差异不显著.

2.2 不同模拟雨量和耕作措施对夏玉米棵间蒸发的影响

在模拟降雨后玉米棵间蒸发急剧增加, 除降雨量外, 耕作措施也显著影响棵间蒸发量. 在 6—9 月 250 和 350 mm 雨量下, 翻耕日棵间蒸发量高于免耕和免耕覆盖; 在 450 mm 雨量下, 免耕日棵间蒸发量高于翻耕和免耕覆盖. 玉米苗期日棵间蒸发量高, 在吐丝期降到最低, 吐丝到灌浆期日棵间蒸发量增加, 在成熟期因为表土层含水量低, 日棵间蒸发量减少. 250 mm 雨量下, 翻耕、免耕和免耕覆盖播种期到吐丝期的棵间蒸发量占全生育期的比例分别为 66.5%、67.0% 和 60.4%; 350 mm 雨量下, 翻耕、免耕和免耕覆盖播种期到吐丝期的棵间蒸发量占全生育期的比例分别为 62.5%、62.4% 和 54.8%; 450 mm 雨量下, 翻耕、免耕和免耕覆盖播种期到吐丝期的棵间蒸发量占全生育期的比例分别为 59.5%、61.0% 和 54.2%. 从 250 到 450 mm 模拟雨量, 3 种耕作处理夏玉米播种期到吐丝期的棵间蒸发量占全生育期的比例均下降(图 2).

250 mm 雨量下, 免耕和免耕覆盖播种期到吐丝期的棵间蒸发量比翻耕减少 6.9% 和 47.4%; 免耕

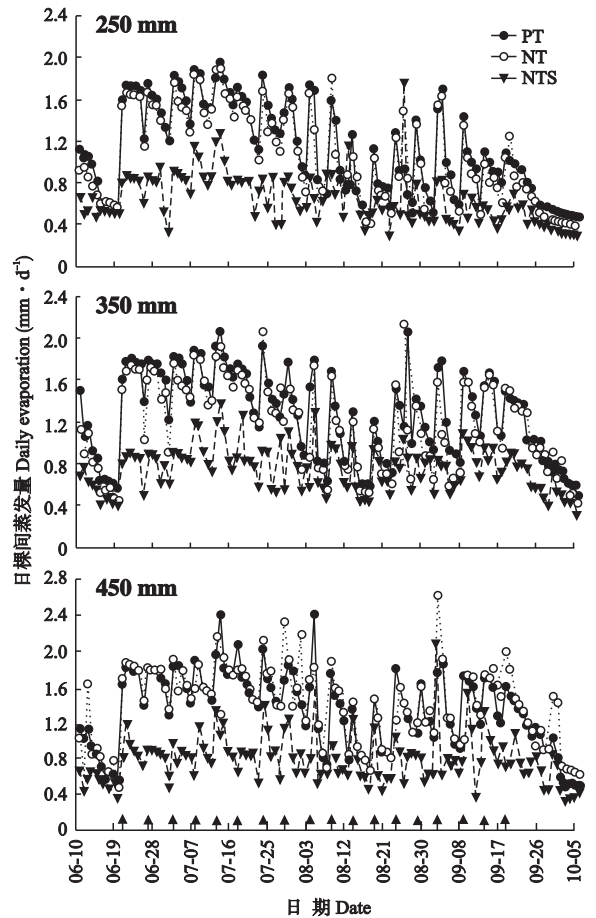


图 2 3 种不同模拟雨量下翻耕、免耕和免耕覆盖日棵间蒸发量动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil daily evaporation under plowing tillage, no-tillage, no-tillage with mulching under three simulated precipitation.

和免耕覆盖全生育期的棵间蒸发量比翻耕减少 7.6% 和 42.1%. 350 mm 雨量下, 免耕和免耕覆盖播种期到吐丝期的棵间蒸发量分别比翻耕减少 5.7% 和 47.2%; 免耕和免耕覆盖全生育期的棵间蒸发量比翻耕分别减少 5.7% 和 39.8%. 450 mm 雨量下, 免耕播种期到吐丝期的棵间蒸发量比翻耕增加 4.9%, 免耕覆盖播种期到吐丝期的棵间蒸发量比翻耕减少 46.3%; 免耕全生育期的棵间蒸发量比翻耕增加 2.3%, 免耕覆盖全生育期的棵间蒸发量比翻耕减少 41.1%.

与 250 mm 雨量相比, 450 mm 雨量下各耕作处理的棵间蒸发量在 6—9 月均呈上升趋势, 免耕增幅为 33.6%, 高于翻耕(增幅 22.6%) 和免耕覆盖(增幅 20.7%). 250 和 350 mm 雨量下, 与翻耕相比, 免耕抑制了棵间蒸发, 450 mm 雨量下免耕棵间蒸发量高于翻耕, 而免耕覆盖一直表现出较好的水分保持效应. 随雨量增大和免耕、免耕覆盖技术的使用, 吐

丝前棵间蒸发量占全生育期的比例减少,有利于增加产量和水分利用效率。

6—9月250和350mm雨量下,翻耕蒸发蒸腾量在各生育时期高于免耕(图3),450mm雨量下翻耕蒸发蒸腾量低于免耕,免耕覆盖蒸发蒸腾量最低。播种期至拔节期和灌浆期至成熟期期间,翻耕和免耕棵间蒸发量占蒸发蒸腾量的大部分,水分无效消耗大;秸秆覆盖减少了棵间蒸发蒸腾量,减少了翻耕地表裸露造成的无效水分消耗,提高了水分利用效率。250mm雨量下翻耕、免耕、免耕覆盖棵间蒸发量占蒸发蒸腾量的比例分别为48.6%、48.7%和31.4%;350mm雨量下翻耕、免耕、免耕覆盖棵间蒸发量占蒸发蒸腾量的比例分别为42.1%、45.4%和30.2%;450mm雨量下翻耕、免耕、免耕覆盖棵间蒸发量占蒸发蒸腾量的比例分别为39.0%、39.4%和25.4%。250mm雨量下相同耕作措施的棵间蒸发量占蒸发蒸腾量的比例高于350和450mm雨量下;

相同雨量下,免耕夏玉米的棵间蒸发量占蒸发蒸腾量的比例高于翻耕和免耕覆盖。

2.3 夏玉米生育期0~100cm土层贮水量动态

由图4可以看出,6—9月,在播种期,免耕覆盖0~100cm土层土壤含水率低于翻耕;在拔节期,免耕覆盖0~10cm土层土壤含水率高于翻耕,10cm以下土层土壤含水率低于翻耕;在大喇叭口期,250和350mm雨量下免耕覆盖0~100cm土层土壤含水率高于翻耕,450mm雨量下免耕覆盖0~10cm表土层含水率高于翻耕,10cm以下土层含水率低于翻耕;在吐丝期,3种雨量下免耕覆盖各土层含水率均高于翻耕。在播种期,免耕夏玉米0~100cm土层含水率低于翻耕;6—9月250mm雨量下免耕土层含水率在拔节期接近翻耕;350mm雨量下免耕土层含水率在大喇叭口期接近翻耕;450mm雨量下免耕夏玉米成熟期0~40cm土层含水率高于翻耕,免耕40~100cm土层含水率低于翻耕。

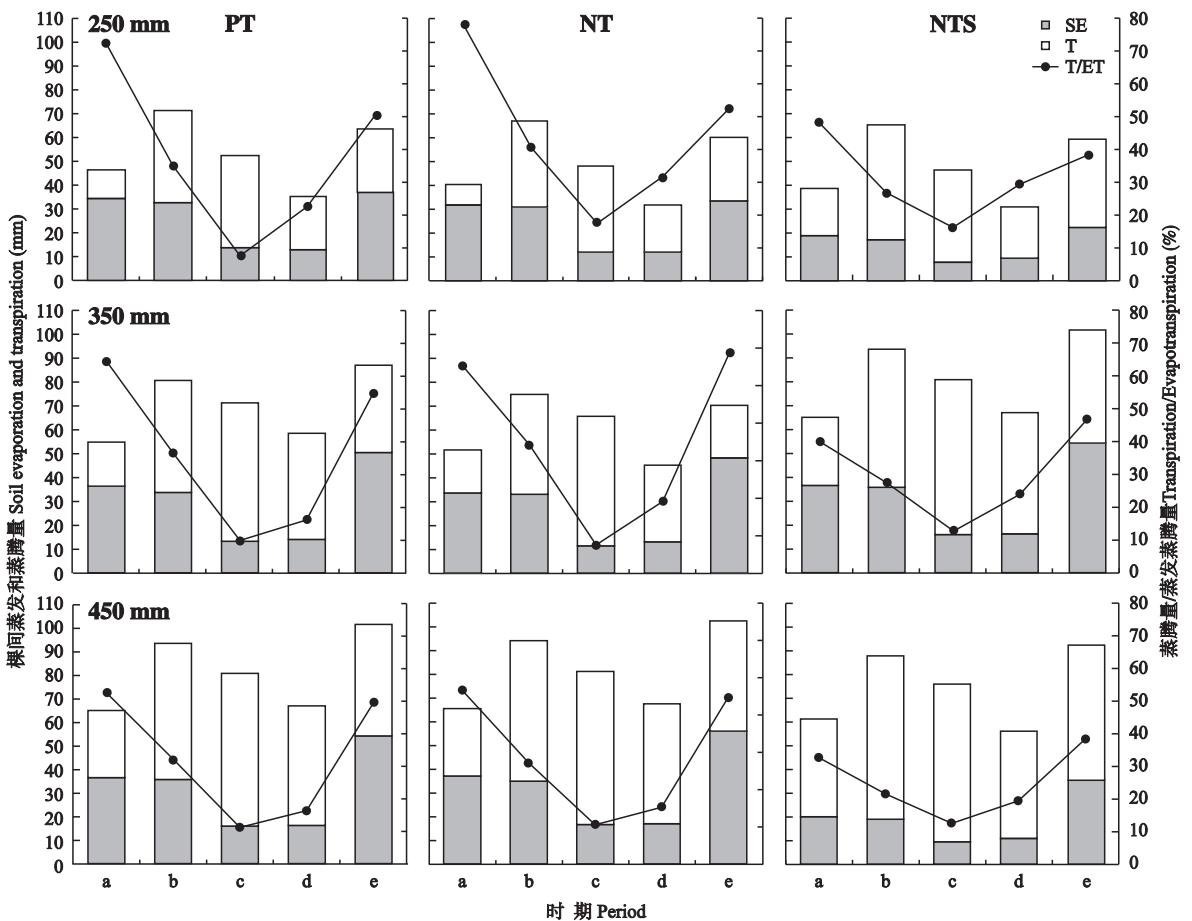


图3 3种不同模拟雨量下翻耕、免耕和免耕覆盖棵间蒸发量占蒸发蒸腾量的比例

Fig. 3 Rate of soil evaporation to evapotranspiration under plowing tillage, no-tillage and no-tillage with mulching in three simulated precipitation.

SE: 棵间蒸发量 Soil evaporation between plants; T: 蒸腾 Transpiration; ET: 蒸发蒸腾量 Evapotranspiration.

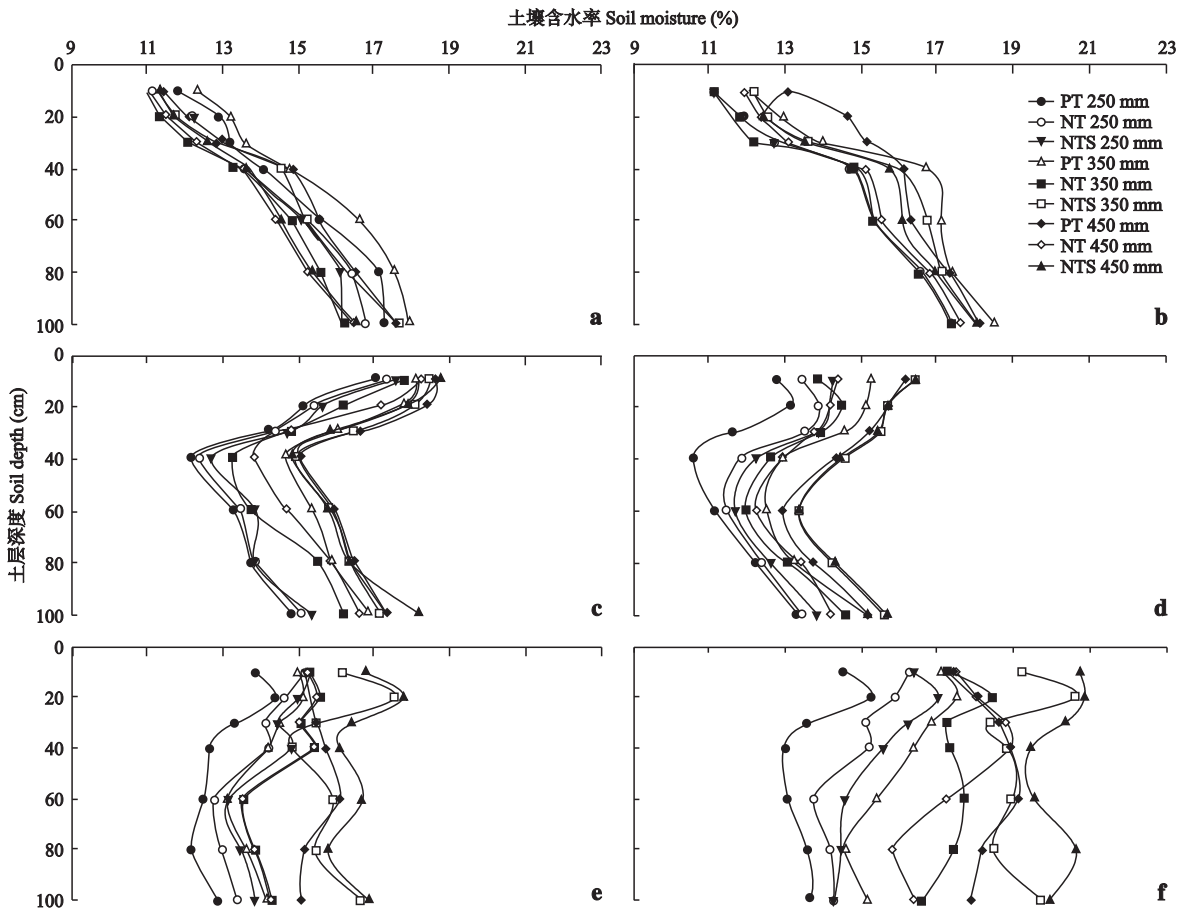


图 4 夏玉米各生育期 0~100 cm 土层土壤含水量剖面分布

Fig. 4 Vertical distribution of soil moisture in 0-100 cm layer at different growth stages of summer maize.

由图 5 可以看出,免耕覆盖夏玉米土层贮水量从拔节期起高于翻耕.在播种期,免耕贮水量低于翻耕;由于 6—9 月 250 mm 雨量下免耕土层含水率在拔节期已接近翻耕,350 mm 雨量下免耕土层含水率在大喇叭口期已接近翻耕,免耕 0~40 cm 土层容重高于翻耕,250 mm 雨量下免耕 0~100 cm 土层贮水量从拔节期起高于翻耕,350 mm 雨量下免耕 0~

100 cm 土层贮水量从大喇叭口期起高于翻耕;6—9 月 450 mm 雨量下免耕 0~100 cm 土层贮水量在各生育期均低于翻耕.

2.4 不同模拟雨量和耕作措施下夏玉米成熟期各器官干物质质量及比例

在 6—9 月 250 和 350 mm 雨量下免耕和免耕覆盖夏玉米地上部干物质显著高于翻耕(表 3);在 450 mm 雨量下免耕和翻耕地上部干物质无显著差异,两者显著低于免耕覆盖.在 6—9 月 250 和 350 mm 雨量下免耕和免耕覆盖果穗干物质显著高于翻耕;450 mm 雨量下免耕和翻耕果穗干物质无显著差异,两者显著低于免耕覆盖处理.与 250 mm 雨量下相比,翻耕、免耕和免耕覆盖玉米地上部干物质在 450 mm 雨量下分别增加 34.5%、24.4% 和 21.5%.在 250 和 350 mm 雨量下,免耕玉米地上部干物质显著高于翻耕;450 mm 雨量下免耕玉米地上部干物质与翻耕无显著差异,免耕覆盖地上部干物质相对于翻耕的增幅减缓.

250 mm 雨量下,翻耕、免耕、免耕覆盖夏玉米消

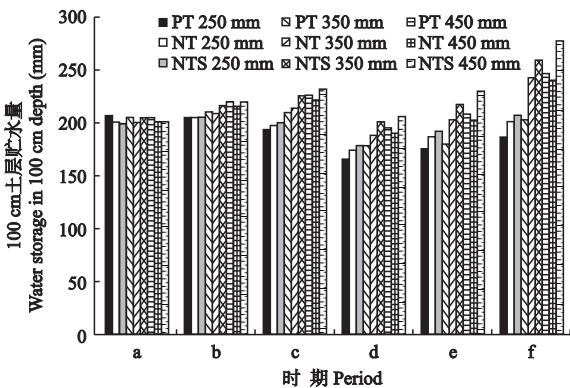


图 5 夏玉米各生育期 0~100 cm 土层贮水量和行间蒸发量

Fig. 5 Water storage of 0-100 cm soil layer and evaporation at different growth stages of summer maize.

表 3 夏玉米成熟期各器官干物质量及比例

Table 3 Dry matter and its proportion of each organ of summer maize at mature stage

模拟降雨量 Simulated precipitation (mm)	耕作模式 Tillage pattern	单株生物量 Biomass per plant (g)	干物质量 Dry matter (g)				耗水量 Water consumption (mm)	单位面积干物 质量/耗水量 Rate of dry biomass per unit area to water consumption (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)
			叶 Leaf	茎秆 Stem	苞叶 Bract	果穗 Ear		
250	PT	213.4h	26.4f	91.6h	6.2e	89.2f	270.3g	52.6e
	NT	230.7g	28.2e	96.3g	6.6e	99.6e	249.6h	61.6c
	NTS	256.8e	29.8c	105.2e	7.2d	114.6d	242.1i	70.7a
	平均 Average	233.6	28.1	97.7	6.7	101.1	254.0	61.6
350	PT	252.8f	28.0e	102.8f	6.5e	115.5d	352.2d	47.9f
	NT	263.8d	29.1d	106.1d	7.4cd	121.2c	317.8e	55.3d
	NTS	293.2b	33.2a	112.0b	7.9bc	140.1b	295.6f	66.1b
	平均 Average	269.9	30.1	107.0	7.3	125.6	318.5	56.1
450	PT	287.1c	31.1b	107.2c	8.3ab	140.5b	408.3b	46.9g
	NT	287.0c	31.3b	107.5c	7.7cd	140.5b	411.0a	46.6g
	NTS	312.0a	33.7a	114.1a	8.5a	155.7a	373.5c	55.7d
	平均 Average	295.4	32.0	109.6	8.2	145.6	397.6	49.7
<i>F</i> 值	雨量 Precipitation	11753.0**	163.4**	1442.1**	513**	8892.7**	90924.8**	1074.1**
<i>F</i> value	耕作 Tillage	4316.6**	159.7**	963.1**	17	2301.3**	7036.7**	1751.6**
	雨量×耕作 Precipitation×tillage	123.1**	9.7**	39.2**	42	64.0**	781.0**	91.9**

PT: 翻耕 Plowing tillage; NT: 免耕 No-tillage; NTS: 免耕覆盖 No-tillage with mulching. 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同 The same below.

耗水分生产干物质的效率分别为 52.6、61.6、70.7 kg · hm⁻² · mm⁻¹; 350 mm 雨量下分别为 48.9、56.0、66.1 kg · hm⁻² · mm⁻¹; 450 mm 雨量下分别为 46.9、46.5、55.7 kg · hm⁻² · mm⁻¹. 在 250 mm 雨量下, 免耕和免耕覆盖干物质蒸腾效率分别比翻耕高 17.1% 和 34.4%; 350 mm 雨量下分别比翻耕高 15.4% 和 38.0%; 450 mm 雨量下免耕比翻耕低 0.6%, 免耕覆盖比翻耕高 18.8%, 说明各模拟雨量下免耕覆盖有利于促进玉米植株干物质积累. 450 mm 雨量下 3 种耕作措施的果穗干物质占单株干物质的比例高于 250 mm 雨量下, 免耕覆盖和免耕消耗水分生产干物质的效率比 250 mm 雨量下增幅减缓, 免耕夏玉米在雨量充足时消耗水分生产干物质的效率低于翻耕.

2.5 不同模拟雨量和耕作措施下夏玉米产量和水分利用效率

从产量构成因素分析(表 4), 由于玉米行株距已定, 不同处理产量差异的主要因素是穗粒数, 相同雨量下免耕覆盖穗粒数最高, 随雨量增大免耕夏玉米穗粒数由显著高于翻耕变为差异不显著. 与翻耕相比, 免耕和免耕覆盖夏玉米产量在 6—9 月 250 mm 雨量下分别为 16.4% 和 33.1%, 350 mm 雨量下分别为 6.1% 和 27.2%, 450 mm 雨量下免耕覆盖产

量比翻耕增加 13.2%, 免耕产量比翻耕减少 0.5%, 说明随雨量增大保护性耕作比翻耕的增产幅度减缓, 免耕产量在 450 mm 雨量下低于翻耕. 250 mm 雨量下, 免耕和免耕覆盖夏玉米生物产量比翻耕分别增加 8.1% 和 20.3%; 350 mm 雨量下分别增加 0.1% 和 13.6%; 450 mm 雨量下免耕覆盖比翻耕增产 8.7%, 但免耕比翻耕减产 0.04%.

250 mm 雨量下免耕和免耕覆盖水分利用效率比翻耕分别增加 3.8 和 7.1 kg · hm⁻² · mm⁻¹, 增加幅度分别为 26.0% 和 48.6%; 350 mm 雨量下分别增加 3.4 和 8.2 kg · hm⁻² · mm⁻¹, 增加幅度分别为 17.6% 和 51.6%; 450 mm 雨量下免耕水分利用效率比翻耕减少 0.2 kg · hm⁻² · mm⁻¹, 减少幅度为 1.1%, 免耕覆盖比翻耕增加 4.2 kg · hm⁻² · mm⁻¹, 增加幅度为 23.7%. 可以看出, 与翻耕相比, 在 250 mm 雨量下免耕的水分利用效率增幅达到最高, 随雨量增大, 免耕和免耕覆盖增幅减缓, 450 mm 雨量下免耕夏玉米水分利用效率甚至低于翻耕, 3 种模拟雨量下免耕覆盖水分利用效率均高于翻耕. 方差分析结果表明, 雨量、耕作及两者的互作效应使夏玉米产量和生物产量有显著差异, 其中雨量间产量和生物产量的变异幅度高于耕作间的变异幅度.

表 4 不同处理下夏玉米产量构成因素、生物产量、收获指数及水分利用效率

Table 4 Components of yield, biomass yield, harvest index and WUE of summer maize under different treatments

模拟降雨量 Simulated precipitation (mm)	耕作模式 Tillage pattern	穗粒数 Kernel numbers per spike	百粒重 100-kernel mass (g)	产量 Yield (t · hm ⁻²)	生物产量 Biomass (t · hm ⁻²)	收获指数 Harvest index (%)	水分利用效率 WUE (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)
250	PT	213.0c	27.79a	3.95c	14.23c	27.7b	14.6c
	NT	247.4b	27.85a	4.60b	15.38b	29.9a	18.4b
	NTS	282.2a	27.92a	5.25a	17.12a	30.7a	21.7a
	平均 Average	247.5	27.85	4.60	15.58	29.4	18.2
350	PT	301.3c	27.88a	5.60c	17.21b	33.2b	15.9c
	NT	319.4b	27.90a	5.94b	17.23b	33.8b	18.7b
	NTS	380.6a	28.08a	7.12a	19.55a	36.5a	24.1a
	平均 Average	333.8	27.95	6.22	18.00	34.5	19.6
450	PT	387.3b	27.99a	7.23b	19.14c	37.8b	17.7b
	NT	385.2b	28.01a	7.19b	19.13c	37.6b	17.5b
	NTS	436.2a	28.13a	8.18a	20.80a	39.3a	21.9a
	平均 Average	402.9	28.04	7.53	19.69	38.2	19.0
F 值	雨量 Precipitation	19726.7**	1.8	67684.3**	5.4*	7843.2**	31.6**
F value	耕作 Tillage	3805.3**	1.4	13392.4**	0.6	704.6**	770.8**
	雨量×耕作 Precipitation×tillage	135.9**	0.06	477.5**	0.3	74.3**	37.9**

3 讨 论

3.1 不同模拟雨量下保护性耕作对玉米产量的影响

挖掘夏玉米单株生产力是获得高产的重要途径^[21],关于耕作措施对玉米产量的影响机理研究较少.本研究表明,在6—9月250 mm雨量下免耕夏玉米生物产量显著高于翻耕,350和450 mm雨量下免耕夏玉米生物产量与翻耕无显著差异;3种雨量下免耕覆盖生物产量均高于翻耕.

雨量和耕作对夏玉米产量形成有显著影响,有研究认为夏玉米收获指数在0.38~0.60^[22].本研究中,6—9月250 mm雨量下夏玉米收获指数低;250~450 mm雨量下免耕覆盖收获指数显著高于翻耕和免耕,250~350 mm雨量下免耕收获指数显著高于翻耕,450 mm雨量下免耕收获指数与翻耕无显著差异.说明雨量不足可减小收获指数,翻耕夏玉米收获指数随雨量增大而增加的幅度高于免耕覆盖和免耕.与250 mm雨量相比,翻耕处理450 mm雨量下产量增加幅度高于免耕和免耕覆盖处理,说明翻耕随雨量增大的增产幅度最高.6—9月250 mm雨量下免耕覆盖和免耕比翻耕增产幅度高,450 mm雨量下免耕覆盖比翻耕增产幅度低,免耕夏玉米产量低于翻耕.

从产量构成因素对产量的影响来看,有研究认为密度对玉米产量的影响最高,其次是穗粒数^[23-24].本研究表明,3种雨量下免耕覆盖的穗粒数

最高,250和350 mm雨量下免耕玉米穗粒数高于翻耕,450 mm雨量下翻耕玉米穗粒数高于免耕.这表明在雨量是夏玉米产量限制因子的地区,单位面积株数一定时,玉米穗粒数是造成产量差异的主要原因,提高夏玉米产量的农艺措施应主要围绕提高穗粒数展开.说明免耕夏玉米在6—9月250~350 mm雨量下及免耕覆盖在250~450 mm雨量下与翻耕相比具有增产优势.试验点近10年6—9月雨量中,有1年低于250 mm,3年在250~350 mm之间波动,2年在350~450 mm之间波动,4年高于450 mm.可见,6—9月250、350、450 mm雨量较好地模拟了不同的雨量年景.

3.2 不同模拟雨量下保护性耕作对玉米水分利用效率的影响

免耕覆盖具有良好的保水蓄水作用,其100 cm土层贮水量在3种雨量下均最高.250 mm雨量下免耕贮水量在拔节期已高于翻耕;350 mm雨量下免耕贮水量在大喇叭口期开始高于翻耕;450 mm雨量下免耕在成熟期0~40 cm土层贮水量高于翻耕,40~100 cm土层贮水量低于翻耕.所以,在250和350 mm雨量下免耕比翻耕有保水优势,450 mm雨量下免耕蓄水量低于翻耕,该结论与前人观点较一致,即免耕在降雨多的年份保墒效果不好^[25],在降雨少的年份保墒效果好,而翻耕在降雨少的年份加剧了水分蒸发,雨量充沛时可以促进土壤水分贮存^[26-27].

在夏玉米需水关键期(吐丝期)^[28],250和350 mm雨量下免耕和免耕覆盖100 cm土层贮水量高

于翻耕,免耕保水作用优于翻耕,水分利用效率高于翻耕,有利于改善土壤水分条件和增加产量;450 mm 雨量下免耕 100 cm 土层贮水量低于翻耕,免耕覆盖对土壤贮水量的增加优势也不如 250 mm 雨量下明显,免耕的水分利用效率低于翻耕.其主要原因可能是:在夏玉米全生育期降水偏少的情况下,水分是限制玉米生长的关键因子,此时只要增加少量的水分就会明显促进玉米的生长,而免耕在夏玉米生长前期增加了贮水量并调节了地温,改善了玉米生长的水热环境,有利于玉米对水分的利用,从而提高了玉米的水分利用效率.然而在玉米生育期雨量达到 450 mm 时,水分不足已经不是影响玉米生长的最主要因素,或者说在此雨量下,免耕增加了土壤水分蒸发,翻耕处理贮水量已经与免耕处理相当,翻耕玉米的水分利用效率甚至高于免耕.免耕覆盖无论在何种雨量处理下均能提高玉米水分利用效率,其主要原因可能是:在 250 ~ 350 mm 雨量下,免耕覆盖减少了夏玉米苗期耗水量,增加了大喇叭口期以后的耗水量,在 450 mm 雨量下,减少了土壤棵间蒸发占蒸发蒸腾量的比例,增加了作物蒸腾量占蒸发蒸腾量的比例,变非生产性耗水为有效耗水,有利于提高夏玉米水分利用效率.

在本试验条件下,尽管 3 种雨量模拟是依据试验地点 1980—2010 年夏玉米生育期降雨量而定,能够反映当地的生产实际,但是不同雨量条件下温、湿度的变化以及不同地力条件下土壤特性是无法模拟的,因此,以后将在不同降雨区或不同生态类型区进行相关大田试验,以验证该模拟试验的准确性.

4 结 论

与翻耕相比,免耕夏玉米水分利用效率和产量受降雨量的影响较大,250 ~ 350 mm 雨量下免耕和免耕覆盖与翻耕相比抑制了土壤水分蒸发,提高了土壤贮水量,改善了土壤水分条件,提高了产量和水分利用效率,在 450 mm 雨量下免耕夏玉米水分利用效率与翻耕无显著差异,产量甚至低于翻耕处理;与翻耕相比,免耕覆盖可显著增加夏玉米产量、土壤贮水量和水分利用效率,且随雨量的增加,夏玉米产量显著增加,但雨量对水分利用效率的影响较小.综合本试验结果,适宜采用免耕的夏玉米生育期雨量阈值是 350 mm,免耕覆盖夏玉米在 250 ~ 450 mm 雨量下均表现出较高的产量和水分利用效率,增产效应明显,说明其适用范围较广,是适宜推广的保护性耕作措施.

参考文献

- [1] Zhang Y-F (张义丰), Wang Y-F (王又丰), Liu L-X (刘录祥), *et al.* Research progress on arid-land agriculture in Northern China. *Geographical Research* (地理研究), 2002, **21**(3): 1-8 (in Chinese)
- [2] Xu C (徐超), Yang X-G (杨晓光), Li Y (李勇), *et al.* Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. III. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in Northwest Arid Area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(3): 763-772 (in Chinese)
- [3] Wang X-B (王小彬), Cai D-X (蔡典雄), Hoogmoed WB, *et al.* Developments in conservation tillage in rainfed regions of North China. *Soil and Tillage Research*, 2007, **93**: 239-250 (in Chinese)
- [4] Liu W-G (刘晚苟), Shan L (山仑). Effect of soil bulk density on maize growth under different water regime. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(11): 1906-1910 (in Chinese)
- [5] Hong X-Q (洪晓强), Li L-K (李立科), Zhao E-L (赵二龙), *et al.* Experimental study of no tillage with straw mulching for corn sowing in Guanzhong Irrigation Area of Shaanxi Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2010, **30**(5): 115-127 (in Chinese)
- [6] Lai R, Reicosky DC, Hanson JD. Evolution of the plow over 10000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research*, 2007, **93**: 1-12
- [7] Lei J-Y (雷金银), Wu F-Q (吴发启), Wang J (王健), *et al.* Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, **24**(10): 40-45 (in Chinese)
- [8] Xie R-Z (谢瑞芝), Li S-K (李少昆), Jin Y-Z (金亚征), *et al.* The trends of crop yield responses to conservation tillage in China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008, **41**(2): 397-404 (in Chinese)
- [9] Wang Y-R (王毅荣), Wang X-W (王锡稳). Analyses on spatial-temporal change characteristics of rainfall over Chinese Loess Plateau from April to October. *Plateau Meteorology* (高原气象), 2006, **25**(4): 737-742 (in Chinese)
- [10] Imaz MJ, Virto I, Bescansa P, *et al.* Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. *Soil and Tillage Research*, 2010, **107**: 17-25
- [11] Yu H-Y (余海英), Peng W-Y (彭文英), Ma X (马秀). Effects of no-tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semiarid region of North China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(1): 99-104 (in Chinese)
- [12] Zhou H-P (周怀平), Yang Z-P (杨治平), Li H-M (李红梅), *et al.* Effect of straw return to field and fertilization in autumn on dryland corn growth and on water

- and fertilizer efficiency. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(7): 1231–1235 (in Chinese)
- [13] Jiang X-D (江晓东), Li Z-J (李增嘉), Hou L-T (侯连涛), *et al.* Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil NO_3^- -N content and water use efficiency of winter wheat/summer corn cultivation. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2005, **21**(7): 20–24 (in Chinese)
- [14] Kimura R, Liu Y, Takayama N, *et al.* Heat and water balances of the bare soil surface and the potential distribution of vegetation in the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2005, **63**: 439–457
- [15] Cai T-Y (蔡太义), Jia Z-K (贾志宽), Meng L (孟蕾), *et al.* Effects of different rates of straw mulch on soil moisture and yield of spring maize in Weibei Highland area of China. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27**(3): 43–48 (in Chinese)
- [16] Zhang P (张 鹏), Jia Z-K (贾志宽), Wang W (王维), *et al.* Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in Southern Ningxia of China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2012, **45**(8): 1513–1520 (in Chinese)
- [17] Hu S (胡 实), Xie X-L (谢小立), Wang K-R (王凯荣). Influence of straw mulching on soil evaporation in summer maize field and meteorological elements close to ground. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2008, **29**(2): 170–173 (in Chinese)
- [18] Bao S-D (鲍士旦). *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 22–114 (in Chinese)
- [19] Li R (李 荣), Wang M (王 敏), Jia Z-K (贾志宽), *et al.* Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(2): 106–113 (in Chinese)
- [20] Dong Q-G (董勤各), Feng H (冯 浩), Du J (杜健), *et al.* Effects of chemical fertilizer combined with crushed straw application on soil evaporation of winter wheat. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2011, **27**(1): 33–38 (in Chinese)
- [21] Zhao M (赵 明), Zhang B (张 宾), Dong Z-Q (董志强), *et al.* The compensatory mechanism in exploring crop production potential. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2006, **32**(10): 1566–1573 (in Chinese)
- [22] Xie G-H (谢光辉), Han D-Q (韩东倩), Wang X-Y (王晓玉), *et al.* Harvest index and residue factor of cereal crops in China. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2011, **16**(1): 1–8 (in Chinese)
- [23] Wang K (王 凯), Wang K-R (王克如), Wang Y-H (王永宏), *et al.* Effects of density on maize yield and yield components. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2012, **45**(16): 3437–3445 (in Chinese)
- [24] Liu W (刘 伟), Lü P (吕 鹏), Su K (苏 凯), *et al.* Effects of planting density on the grain yield and source-sink characteristics of summer maize. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(7): 1737–1743 (in Chinese)
- [25] Peng W-Y (彭文英), Peng M-L (彭美丽), Wu X-Z (吴晓展). No-tillage effects on crop yield. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2011, **29**(2): 95–98 (in Chinese)
- [26] Debaeke P, Aboudrare A. Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy*, 2004, **21**: 433–446
- [27] Qin H-L (秦红灵), Gao W-S (高旺盛), Ma Y-C (马月存), *et al.* Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage for two years. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008, **7**(1): 88–95 (in Chinese)
- [28] Recep C. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Research*, 2004, **89**: 1–16

作者简介 陈 宇,男,1982年生,博士研究生.主要从事高效耕作制度研究. E-mail: chenyu20060902@163.com

责任编辑 张凤丽
