

不同耕作措施对旱地作物生育期农田耗水结构和水分利用效率的影响

彭正凯, 李玲玲, 谢军红, 邓超超, EUNICE Essel,
王进斌, 颀健辉, 沈吉成, 康彩睿

(甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃农业大学农学院, 兰州 730070)

摘要: 陇中黄土高原旱农区降水有限、水分利用效率低下是导致该区作物生产力水平低而不稳的主要原因。发展保护性耕作是保护水土资源、提高水分利用效率的重要途径。为揭示耕作措施影响水分利用效率的机制, 2015—2016 年在陇中黄土高原旱农区研究了不同耕作措施对土壤棵间蒸发、农田耗水量、作物蒸腾量、棵间蒸发与蒸散的比例、产量及水分利用效率的影响。试验设置传统耕作(T)、免耕秸秆覆盖(NTS)、免耕(NT)、传统耕作+秸秆翻入(TS)、传统耕作+覆膜(TP)、免耕覆膜(NTP)6 个处理, 春小麦和豌豆年间轮作。结果表明: (1) 春小麦和豌豆全生育期棵间蒸发量 NTS、TP、NTP 比 T 显著减少 6.52%~50.81%, NTS 降低棵间蒸发量的作用主要在小麦开花后和豌豆结荚后, 地膜覆盖在各个生育时期基本上都显著减少了棵间蒸发。(2) NTS 对全生育期耗水量无显著影响, NTP 的耗水量只在小麦地显著高于 T。相比 T, NTS 显著提高了小麦开花—收获和豌豆结荚—收获期间的阶段耗水量及其占总耗水的比例。(3) NTS、TP、NTP 均显著提高了春小麦和豌豆的蒸腾量, 降低了田间的蒸发占蒸散的比例, 降低了水分的无效损耗。(4) 各年份春小麦和豌豆的产量 NTS、TP、NTP 比 T 提高了 7.64%~62.79%, 水分利用效率比 T 提高了 0.43%~50.88%。因此, 在陇中黄土高原旱农区, 免耕秸秆覆盖、地膜覆盖等保护性耕作措施均能提高水分利用效率及小麦和豌豆的产量。免耕秸秆覆盖通过降低作物生长后期棵间蒸发量, 提高作物生长后期耗水量, 降低蒸发与蒸散的比例, 从而提高春小麦和豌豆的水分利用效率及产量。而地膜覆盖处理主要是通过减少全生育期棵间蒸发量, 增加作物全生育期蒸腾量, 降低蒸发与蒸散的比例, 从而实现作物水分高效利用, 提高作物产量。

关键词: 保护性耕作; 土壤棵间蒸发量; 农田耗水量; 蒸腾量; 蒸发量占蒸散量的比例

中图分类号: S152.5; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0214-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.035

Effects of Different Tillage Practices on Water Consumption Structure and Water Use Efficiency During Crop Growth Period in Arid Farmland

PENG Zhengkai, LI Lingling, XIE Junhong, DENG Chaochao, EUNICE Essel,

WANG Jinbin, XIE Jianhui, SHEN Jicheng, KANG Cairui

(Gansu Key Laboratory of Arid Land Crop Sciences, Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: The limited rainfall and low water use efficiency are the main causes of the low and unstable crop productivity in arid agricultural area of the Loess Plateau in Long Zhong. Developing conservation tillage practices is an important way to protect water and soil resources and improve water use efficiency. The aim of the study was to determine the underlying mechanisms of different tillage practices in improving yield and water use efficiency. The effect of different tillage practices on soil evaporation, field water consumption, crop transpiration, ratio of evapotranspiration to evaporation, yield and water use efficiency were studied from 2015 to 2016. The study was conducted in a long-term tillage experimental field located in the arid farmland of Long Zhong. The experiment included six treatments, which were conventional tillage with no straw (T), no-till with straw cover (NTS), no-till with no straw cover (NT), conventional tillage with straw incorporated (TS), conventional tillage with plastic mulch (TP) and no-till with plastic mulch (NTP),

收稿日期: 2018-04-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(31460337, 31660373, 31761143004); 甘肃省教育厅项目(2017C-12); 甘肃省委组织部陇原创新人才扶持计划项目

第一作者: 彭正凯(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事雨养农业区保护性耕作理论和技术研究。E-mail: 1073573363@qq.com

通信作者: 李玲玲(1977—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事雨养农业区保护性耕作理论和技术研究。E-mail: lill@gsau.edu.cn

all the fields were used for the rotation of spring wheat and pea. The results showed that: (1) Compared with T treatment, the evaporations of spring wheat and field pea in NTS, TP and NTP treatments significantly reduced by 6.52%~50.81% during the whole growth period, and the effect of NTS to reduce the evaporation was mainly after the flowering of wheat and the pod of the pea, and the plastic mulching could significantly reduced the evaporation in each growth period. (2) NTS treatment had no significant effect on water consumption during the whole growth period, and the water consumption in NTS treatment was significantly higher than that in T treatment in wheat fields. Compared with traditional tillage, NTS treatment significantly increased the amount of water consumed and the proportion of total water consumption in the stages of wheat flowering to harvest and pea podding to harvest. (3) NTS, TP and NTP significantly increased the transpiration of spring wheat and pea, reduced effectively the proportion of evaporation to evapotranspiration in the field, and the ineffective loss of water. (4) Compared with T treatment, the yield of spring wheat and pea in NTS, TP and NTP treatment increased by 7.64%~62.79% in each year, and the water use efficiency increased by 0.43%~50.88%. Therefore, the conservation tillage measures, such as no-tillage straw mulching and plastic mulching, could improve the water use efficiency and yield of wheat and pea in the arid agricultural area of the Loess Plateau in Long Zhong. No-till with straw cover could improve the water use efficiency and yield of spring wheat and pea by reducing the evaporation and increasing the water consumption in the later period of crop growth, and reducing the ratio of evaporation to evapotranspiration. The plastic mulching was mainly to reduce the evaporation during the whole growth period, increase the total transpiration of the crop and reduce the proportion of evaporation to evapotranspiration, so as to realize efficient use of water and increase crop yield.

Keywords: conservation tillage; evaporation of soil; water consumption; transpiration; ratio of evaporation to evapotranspiration

陇中黄土高原地区是我国重要的半干旱雨养农业区,降水有限,水土流失严重,加之传统农业休闲期裸露,蒸发损失严重,水分利用效率(WUE)低,导致生产力水平低而不稳,因此提高 WUE 是解决该地区土地生产力水平低而不稳的关键^[1]。保护性耕作是 20 世纪 30 年代美国发生黑风暴以后逐渐研究和发展起来的,是一种有利于保持水土、减轻土壤侵蚀的新型耕作技术^[2-5]。保护性耕作通过地表覆盖、减少耕作对土壤的扰动,可以蓄水保墒,减少水蚀和风蚀,提高水分利用效率^[6-7]。为此,黄土高原半干旱农业区自 2001 起也建立了长期不同耕作措施的定位试验,开始进行相关研究^[8]。十多年研究发现,适宜的保护性耕作措施降低了土壤容重、增加了总孔隙度和土壤饱和导水率^[9-10],提高水分利用效率和作物产量^[11-15]。但是,有关保护性耕作提高水分利用效率的机制尚不明晰。WUE 受 SPAC 系统中不同界面(大气土壤界面、根土界面、叶气界面)水分传输和转化效率的影响,蒸腾和蒸发是这些界面水分转化的两个重要过程。因此,从蒸腾量、蒸发量及其比例关系入手是探究耕作措施影响 WUE 机制的重要途径。为此,本研究依托 2001 年在陇中黄土高原旱农区建立的长期不同耕作措施的定位试验,于 2015—2016 年研究了春小麦和豌豆农田的耗水量、土壤裸间蒸发量、作物蒸腾量、WUE 和产量对不同

耕作措施的响应,探讨了保护性耕作措施高效用水的机制,以期为陇中黄土高原旱农区保护性耕作推广应用提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托于 2001 年在陇中黄土高原地区建立的不同耕作措施的长期定位试验,于 2015—2016 年度实施。该试验布设在位于定西市安定区李家堡镇的甘肃农业大学旱作农业综合实验站。该区属中温带半干旱偏旱区,多年平均日照时间 2 476.6 h,太阳辐射量为 592.9 kJ/cm²;年均气温 6.4 ℃,≥0 ℃积温为 2 933.5 ℃,≥10 ℃积温为 2 239.1 ℃,年均无霜期 140 d;多年平均降水量 390.9 mm,年际、年内变化率大,80%保证率的降水量为 365 mm,年蒸发量达到 1 531 mm,为降水量的 3~4 倍,变异系数为 24.3%。试验区热量和水分只能满足一年一熟作物的要求,为典型的雨养农业区。试区土壤为黄绵土,土质较绵软,质地较均匀,贮水性能良好(表 1)。2015 年降水量为 340.1 mm(春小麦和豌豆生育期降水量分别为 261.8,225.8 mm),少于多年平均降水量 50.8 mm,2016 年降水量 300.2 mm(春小麦和豌豆生育期降水量为 239.4,204.0 mm),少于多年平均降水量 90.7 mm(图 1)。

表 1 土壤物理和水分特征(2001 年)

土层 深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	土壤排水	小麦有效水	豌豆有效水
		上限(DUL)/ (cm ³ ·cm ⁻³)	分下限(CLL)/ (cm ³ ·cm ⁻³)	分下限(CLL)/ (cm ³ ·cm ⁻³)
0—5	1.29	0.27	0.09	0.10
5—10	1.23	0.27	0.09	0.10
10—30	1.32	0.27	0.09	0.10
30—50	1.20	0.27	0.09	0.10
50—80	1.14	0.26	0.09	0.12
80—110	1.14	0.27	0.11	0.15
110—140	1.13	0.26	0.11	0.26
140—170	1.12	0.26	0.12	0.26
170—200	1.11	0.26	0.13	0.26

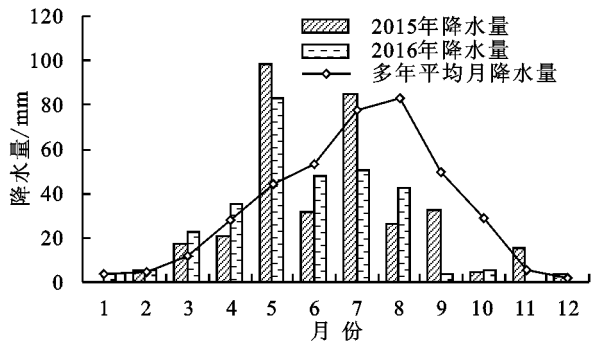


图 1 研究区 2015—2016 年月降水量

1.2 试验设计

本研究所依托的长期定位试验采用单因素随机

区组设计,共设 6 个处理(表 2),4 个重复,为了加快研发进程并消除年份效应,保证两种作物在同一年都出现,采取“春小麦—豌豆”双序列轮作设计,共 48 个小区,小区大小为 4 m×20 m。供试春小麦和豌豆品种分别为当地主栽品种定西 40 号和绿农 2 号。春小麦播种量为 187.5 kg/hm²,行距 20 cm,各处理均施纯 P₂O₅ 105 kg/hm²(过磷酸钙 656.25 kg),纯 N 105 kg/hm²(尿素 226.29 kg);豌豆播种量为 180 kg/hm²,行距 24 cm,各处理施纯 N 20 kg/hm²(尿素 43.10 kg),施纯 P₂O₅ 105 kg/hm²(过磷酸钙 656.25 kg)。2015 年春小麦于 3 月 25 日播种,8 月 1 日收获;豌豆于 4 月 9 日播种,7 月 25 日收获。2016 年春小麦于 3 月 27 日播种,7 月 25 日收获;豌豆于 4 月 9 日播种,7 月 14 日收获。各小区单收计产,作物生育期田间杂草人工去除,作物收获后用 2,4-D 丁酯与草甘膦除去。

1.3 测定指标和方法

- 1.3.1 降雨量的测定 用雨量筒测定研究区日降水量。
- 1.3.2 土壤含水量的测定 播前、收获后,测深 200 cm。测定时,0—5,5—10 cm 采用烘干法;10—200 cm 用 TRIME(TRIME—PICO TDR,德国)测定,层次分为 10—30,30—50,50—80,80—110,110—140,140—170,170—200 cm 每个小区设 1 个测定点。

表 2 试验处理及代码描述

代码	处理	具体操作
T	传统耕作	前茬作物收获后至土壤冻结前,试验地进行三耕两耨,秸秆不还田
NTS	免耕+秸秆覆盖	整个试验期采取完全免耕,免耕播种机一次性完成施肥和播种,从 8 月至第 2 年 3 月地面覆盖前茬作物秸秆。前茬作物收获的所有秸秆脱粒后立即还原小区。但 2001 年所有的小区都用铡过的麦草(6 750 kg/hm ²)。所有试验地 2000 年作物均为胡麻
NT	免耕	试验整个阶段都免耕,但不覆盖,播种时用免耕播种机一次性完成施肥和播种
TS	传统耕作+秸秆翻入	耕作方式同 T,但随第 1 次耕作将所有前茬作物秸秆翻入土壤
TP	传统耕作+地膜覆盖	耕作方式同 T,但在 10 月最后 1 次耨后覆盖塑料薄膜,膜宽 40 cm,膜侧种作物,因此该处理作物宽窄行种植,宽行 40 cm,窄行 10 cm,平均 25 cm
NTP	免耕+地膜覆盖	整个试验阶段采取免耕,覆膜及播种方式同 TP

1.3.3 棵间蒸发量的测定 用 PVC 管自制的微型蒸发器取小区原状土测定^[16],其高度 15 cm、内口径 11 cm,每个小区安装 1 个,常规观测为早上 7:00 田间取原状土用保鲜膜封底,用感量为 0.01 g 的电子天平称质量,然后置于田间,次日 7:00 测 1 次土壤质量。其损失量即为该时段的棵间蒸发量(每 1 g 的变化相当于 0.105 1 mm),每 3 天换 1 次蒸发器内部的土,雨后及时换土,其目的是为了保证微型蒸发器内部的土壤水剖面与周围土壤相一致。生长阶段棵间蒸发量的计算是根据该生长阶段测定天数内棵间蒸发量的单日平均值乘以该时段不下雨的天数。生育期棵间蒸发量是各生育时段棵间蒸发量之和。

1.3.4 产量的测定 测产以小区为单位,在作物成

熟后剔除边行,收获计产。

1.3.5 计算公式

(1)农田耗水量(ET)

$$ET=P+W_1-W_2$$
 (1)

式中:ET 为农田耗水量(mm);P 为时段内降水量(mm);W₁、W₂ 分别为该时段前后 0—200 cm 土层内的贮水量(mm)。

(2)作物蒸腾量(T)

$$T=ET-E$$
 (2)

式中:T 为作物蒸腾量(mm);ET 为农田耗水量(mm);E 为棵间蒸发量(mm)。

(3)水分利用效率(WUE)

$$WUE=GY/ET$$
 (3)

式中:WUE 为籽粒产量水分利用效率($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$);GY 为籽粒产量(kg/hm^2);为农田耗水量(mm)。

1.4 统计分析

采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析、显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施对作物生长期棵间蒸发量的影响

由表 3、表 4 可知,2015 年的作物生长期棵间蒸

发量普遍高于 2016 年,说明越是干旱的年份棵间蒸发也越少。2015 年和 2016 年不同保护性耕作措施下小麦和豌豆农田的生长期棵间蒸发量均差异显著,TP 和 NTP 蒸发量最低,NTS 次之,T 最高。TP 与 NTP 之间差异不显著,NTS 与 TP 和 NTP 之间差异显著,TP 和 NTP 比 T 显著减少 38.86%~50.81%,NTS 比 T 显著减少 6.52%~16.27%。

表 3 不同耕作措施对春小麦生长期棵间蒸发量的影响 单位:mm

年份	处理	播种—分蘖	分蘖—拔节	拔节—抽穗	抽穗—开花	开花—收获	全生育期
2015	T	42.63a	12.67a	14.03a	11.67a	47.55a	128.54a
	NTS	39.55a	11.04b	13.10a	9.91b	36.38c	110.00b
	NT	45.71a	11.87ab	13.76a	12.01a	42.82b	126.16a
	TS	39.92a	12.45ab	12.79a	11.26a	38.21c	114.64b
	TP	22.82b	7.28c	7.80b	6.84c	24.96d	69.70c
	NTP	26.96b	6.36c	7.50b	6.58c	22.00d	69.41c
2016	T	16.13a	13.17a	10.79a	6.80a	44.37a	91.26a
	NTS	11.84b	12.61a	8.18b	6.83a	38.57b	78.04c
	NT	15.29a	12.84a	9.26ab	7.44a	43.62a	88.45ab
	TS	14.09a	12.75a	8.91b	7.48a	42.51a	85.75b
	TP	7.71c	7.56b	5.61c	3.74b	20.33c	44.95d
	NTP	10.12b	8.27b	5.07c	4.00b	19.60c	47.06d

注:2015 年和 2016 年春小麦播种、分蘖、拔节拔节、抽穗、开花、收获期起始时间分别为 3 月 25 日,5 月 9 日,5 月 24 日,6 月 7 日,6 月 25 日,8 月 1 日和 3 月 27 日,4 月 30 日,5 月 20 日,5 月 30 日,6 月 15 日,7 月 25 日;同一列不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

表 4 不同耕作措施对豌豆生长期棵间蒸发量的影响 单位:mm

年份	处理	播种—分枝	分枝—现蕾	现蕾—开花	开花—结荚	结荚—收获	全生育期
2015	T	15.60ab	14.95a	13.77b	31.11a	29.98a	105.41a
	NTS	14.60b	12.91b	13.29b	26.76ab	20.70c	88.26c
	NT	16.98a	13.84ab	16.54a	26.87ab	20.88c	95.10b
	TS	16.32a	14.19ab	14.79b	26.30b	24.17b	95.76b
	TP	8.88c	7.36c	9.03c	15.00c	11.57e	51.85d
	NTP	9.26c	7.23c	8.28c	13.84c	14.08d	52.69d
2016	T	21.59a	4.60ab	13.64a	4.42a	10.62a	54.87ab
	NTS	21.62a	4.52ab	10.59b	4.50a	10.06a	51.29b
	NT	20.59a	5.12a	11.58ab	4.09a	9.71a	51.10b
	TS	22.39a	5.77a	13.81a	4.36a	10.80a	57.14a
	TP	13.81b	3.22b	7.72c	2.86b	5.95b	33.55c
	NTP	12.45b	3.19b	6.79c	2.45b	5.22b	30.09c

注:2015 年和 2016 年豌豆播种、分枝、现蕾、抽穗、开花、结荚、收获期起始时间分别为 4 月 9 日,5 月 9 日,5 月 24 日,6 月 15 日,7 月 10 日,7 月 25 日和 4 月 9 日,5 月 16 日,5 月 30 日,6 月 15 日,6 月 28 日,7 月 14 日。下同。

2015 年,在春小麦阶段棵间蒸发量中,TP 和 NTP 比 T 显著减少了 36.76%~49.80%,且 TP 和 NTP 之间差异不显著。NTS 在小麦的分蘖—拔节、抽雄—开花、开花—收获这 3 个阶段的棵间蒸发量显著比 T 减少 4.25%~15.08%,NTS 显著高于 TP 和 NTP 的阶段棵间蒸发量(表 3)。在豌豆阶段棵间蒸发量中,TP 和 NTP 比 T 显著减少了 34.42%~61.41%,TP 与 NTP 差异不显著。NTS 在分枝—现蕾、结荚—收获两个阶段的棵间蒸发量比 T 显著减少 13.65%~30.95%,且 NTS 的阶段棵间蒸发量显著高于 TP 和 NTP(表 4)。2016 年,春小麦和豌豆阶段棵间蒸发量随耕作措施的变化趋势与 2015 年基本相同。

综上,2015—2016 年,TP、NTP 和 NTS 均比 T

显著降低了作物生长期棵间蒸发量,地膜覆盖处理效果更好。NTS 降低棵间蒸发量的作用主要在小麦开花后、豌豆结荚后。地膜覆盖在各个生育时期基本上都显著减少了棵间蒸发。

2.2 不同耕作措施对作物各生育阶段耗水量的影响

由表 5、表 6 可知,在小麦田中,2015 年度和 2016 年度的 NTP 的作物耗水量最高并显著高于 T,NTS 次之但与 T 差异不显著,但 NTP 和 NTS 两者无显著差异。在豌豆田中,2015 年度 NTS 的耗水量最高,TS 最小。但各处理间差异不显著,2016 年度 TS 的耗水量显著高于 T,其他处理间差异不显著。总之,NTS 的生育期耗水量虽高于 T,但与 T 差异不显著。NTP 的耗水量只有在小麦地显著高于 T。

在春小麦地,两年的阶段耗水量趋势不一致,耗水量及占总耗水比例最高的阶段为开花—收获生长阶段,2015 年,分蘖—拔节生长阶段,NTS 的耗水量高于其他处理,占总耗水量的比例同样高于其他处理 1.41%~3.24%,在抽穗—开花生长阶段也有相似结果,而在 2016 年,NTS 的耗水量在开花—收获阶段的耗水量最大,占总耗水量的比例显著高于其他处理 7.71%~35.95%。

在豌豆地,两年的阶段耗水量趋势基本相似,耗

水量和占总耗水比例最高的阶段为开花—结荚生长阶段,2015 年,结荚—收获生长阶段,NTS 的耗水量显著高于其他处理,占总耗水量的比例同样高于其他处理,2016 年也有相似结果。

总之,NTS 对全生育期耗水量无显著影响,NTP 的耗水量只在小麦地显著高于 T。相比 T,NTS 显著提高了小麦开花—收获和豌豆结荚—收获期间的阶段耗水量及其占总耗水的比例。

表 5 不同耕作措施对春小麦各生育阶段耗水量的影响

年份	处理	播种—分蘖		分蘖—拔节		拔节—抽穗		抽穗—开花		开花—收获		全生育期 ET
		ET1	ET1/ET	ET2	ET2/ET	ET3	ET3/ET	ET4	ET4/ET	ET5	ET5/ET	
2015	T	45.43a	18.28a	23.50b	9.47ab	62.97ab	25.27ab	41.10bc	16.51ab	75.91a	30.47a	248.91b
	NTS	43.04a	16.02a	32.42a	12.04a	51.26b	18.99b	55.22a	20.55a	87.07a	32.40a	269.01ab
	NT	49.34a	18.34a	25.75b	9.64ab	63.15ab	23.65ab	38.80bc	14.42b	91.33a	33.95a	268.36ab
	TS	44.13a	16.58a	28.32ab	10.63ab	65.39ab	24.62ab	38.20c	14.34b	90.76a	33.83a	266.81ab
	TP	27.00b	10.74b	23.41b	9.39ab	62.12ab	24.72ab	45.74abc	18.17ab	94.36a	36.98a	252.63b
	NTP	31.29b	10.87b	25.40b	8.80b	83.32a	28.95a	52.27ab	18.03ab	96.14a	33.35a	288.42a
2016	T	20.20a	7.59a	23.32b	8.72b	54.91a	20.28ab	48.80c	18.33b	120.45b	45.08b	267.67bc
	NTS	18.41a	6.43a	22.42b	7.82b	49.69a	17.41b	37.24c	12.98b	159.40a	55.36a	287.16ab
	NT	20.92a	7.87a	23.07b	8.68b	53.75a	20.24ab	54.78c	20.59b	113.22b	42.62b	265.74bc
	TS	18.98a	7.40a	22.22b	8.81b	50.27a	19.48ab	42.54c	16.66b	122.83b	47.65ab	256.84c
	TP	19.37a	7.51a	28.83b	11.09ab	61.97a	23.89a	93.00b	35.72a	56.31c	21.80c	259.49c
	NTP	18.87a	6.31a	37.63a	12.68a	64.06a	21.48ab	120.04a	40.12a	58.47c	19.41c	299.07a

注:ET1、ET2、ET3、ET4、ET5 分别为不同时期耗水量,单位为 mm;ET1/ET、ET2/ET、ET3/ET、ET4/ET、ET5/ET 分别为耗水量占全生育期耗水量比例,单位为%。下同。

表 6 不同耕作措施对豌豆各生育阶段耗水量的影响

年份	处理	播种—分枝		分枝—现蕾		现蕾—开花		开花—结荚		结荚—收获		全生育期 ET
		ET1	ET1/ET	ET2	ET2/ET	ET3	ET3/ET	ET4	ET4/ET	ET5	ET5/ET	
2015	T	17.99a	9.44ab	19.06a	10.00a	40.67b	21.31a	78.32a	40.84bc	35.14b	18.41b	191.18a
	NTS	17.31a	8.35bc	17.78a	8.58ab	44.97ab	21.65a	74.68a	36.02c	52.54a	25.40a	207.29a
	NT	19.45a	9.85ab	17.57a	8.88ab	45.50ab	23.02a	82.76a	41.65abc	32.87bc	16.60bc	198.15a
	TS	18.87a	10.50a	17.78a	9.94a	41.35b	22.99a	75.50a	41.81abc	26.55bc	14.77bc	180.04a
	TP	12.10b	6.29d	14.59b	7.63b	54.50a	28.69a	85.19a	43.98ab	28.51bc	14.17bc	194.89a
	NTP	13.00b	7.07cd	14.98b	8.11b	46.17ab	24.97a	90.34a	48.64a	23.05c	12.13c	187.53a
2016	T	27.29a	14.36a	15.08ab	7.94ab	38.76abc	20.41ab	63.55c	33.42a	45.43b	23.87ab	190.11b
	NTS	26.14a	12.85a	15.85ab	7.81ab	34.26abc	16.74ab	68.22abc	33.25a	60.21a	29.34a	204.69ab
	NT	27.32a	13.88a	12.71b	6.46b	47.26a	23.98a	66.73bc	33.91a	42.90b	21.78b	196.92ab
	TS	26.25a	12.30a	10.21b	4.82b	44.53ab	21.30ab	81.61ab	38.55a	50.67ab	23.86ab	213.27a
	TP	25.87a	13.31a	23.54a	11.88a	24.91c	12.75b	70.54abc	36.18a	50.62ab	25.88ab	195.47ab
	NTP	28.57a	13.58a	25.19a	11.96a	27.40bc	13.06b	85.27a	40.29a	44.31b	21.11b	210.74ab

2.3 不同耕作措施对作物生育期蒸腾量的影响

不同保护性耕作措施不同程度提高了作物生育期蒸腾量(图 2),2015 年度小麦的蒸腾量 NTS、TP、NTP 比 T 差异增加,NTS、TP 与 NTP 差异显著、NTS 和 TP 差异不显著。2015 年度豌豆的作物蒸腾量 TP、NTP、NTS 比 T 差异显著,NTS 与 TP、NTP 差异显著,TP 与 NTP 差异不显著。2016 年度小麦豌豆的蒸腾量与 2015 年小麦豌豆的趋势基本一致。因此,免耕+秸秆覆盖、传统耕作+地膜覆盖、免耕+地膜覆盖均显著提高了作物的蒸腾量。

2.4 不同耕作措施对小麦豌豆蒸发蒸散比的影响

与传统耕作相比,保护性耕作措施显著降低了蒸发与蒸散量的比例(图 3)。在小麦田中,2015 年 E/ET 值的大小顺序为 T>NT>TS>NTS>TP>NTP,5 种保护性耕作措施的 E/ET 与 T 差异显著,NTS 与 TP 和 NTP 差异显著,TP 和 NTP 差异不显著,2016 年 E/ET 值的趋势基本与 2015 年度基本一致;在豌豆田中,2015 年度 E/ET 值的大小顺序为 T>TS>NT>NTS>NTP>TP,NTS、NT、TP、NTP 与 T 差异显著,NTS 与 TP 和 NTP 差异显著,

TP 与 NTP 差异不显著。在 2016 年度 E/ET 值的大小顺序与 2015 年相似。总之,免耕+秸秆覆盖、传统耕作+地膜覆盖、免耕+地膜覆盖有效降低了田间的蒸发与蒸散的比例,降低了水分的无效损耗。

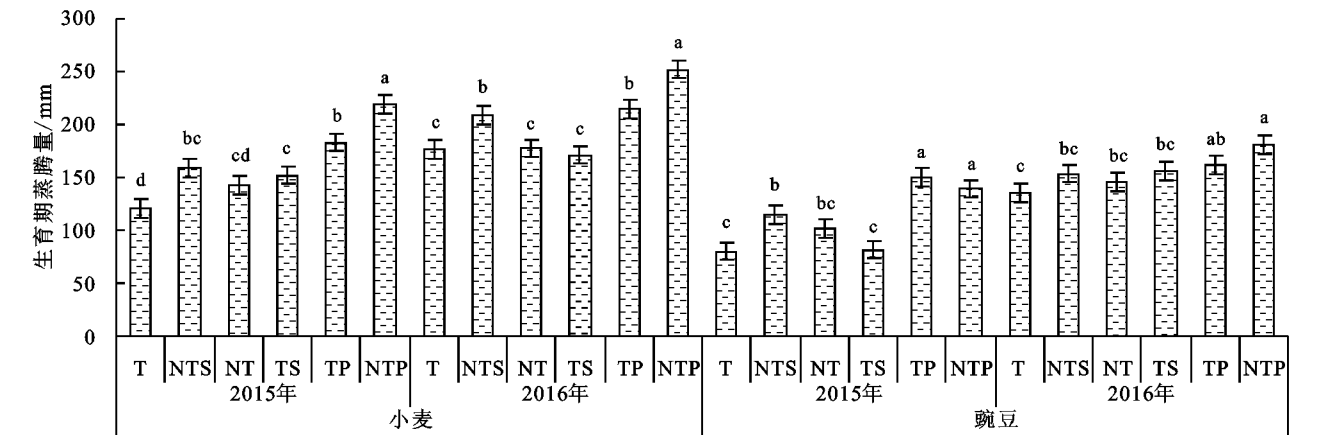


图 2 不同耕作措施对作物生育期蒸腾量的影响

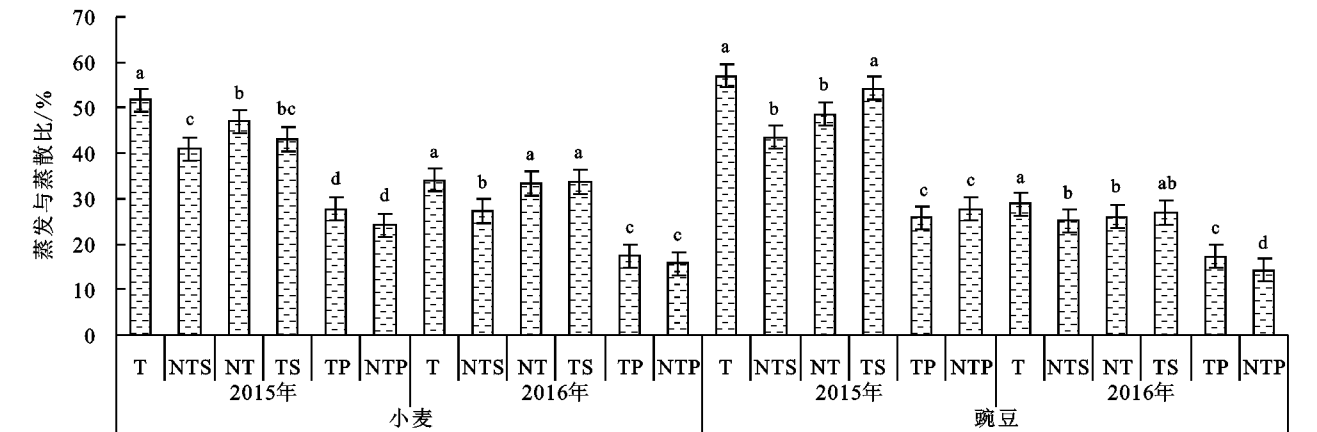


图 3 不同耕作措施对作物蒸发与蒸散的比值的影响

2.5 不同耕作措施对产量及水分利用效率的影响

由表 7 可知,2015 年和 2016 年的小麦产量基本保持在同一水平,但是 2016 年的豌豆产量远高于 2015 年的豌豆产量,这是因为在豌豆播种后,连续多日无有效降水,造成出苗率较低,导致产量下降。2015 年小麦产量为 NTS 最高,T 最小,NTS 与 NTP 差异不显著,NTS 和 NTP 分别比 T 显著增加了 62.79%,55.76%,豌豆产量为 NTS、TP、NTP 比 T 分别显著增加了 9.49%,7.64%,16.46%,NTS、NTP 二者无显著差异;2016 年小麦产量为 NTS 最高,NTP 次之,TP 第 3,

NTS、TP、NTP 三者无显著差异,分别比 T 显著增加了 30.03%,17.97%,23.42%。豌豆产量 NTS 最高,NTS 与 NTP 差异不显著,NTS 和 NTP 分别比 T 显著增加了 38.73%,27.91%。不同保护性耕作措施对水分利用效率的影响基本与产量一致。NTS、TP、NTP 的水分利用效率分别比 T 显著增加 0.43%~50.88%,5.91%~22.20%,14.74%~34.83%。

总之,2015—2016 年,免耕+秸秆覆盖、传统耕作+地膜覆盖、免耕+地膜覆盖均比传统耕作提高了春小麦和豌豆的产量和水分利用效率。

表 7 不同耕作措施对作物产量及水分利用效率的影响

处理	春小麦				豌豆			
	2015 年		2016 年		2015 年		2016 年	
	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
	(kg·hm ⁻²)	(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
T	1273.81b	5.11c	1429.48c	5.36bc	1323.20d	6.96bc	706.48b	3.72bc
NTS	2073.67a	7.71a	1858.78a	6.48ab	1448.80ab	6.99bc	980.10a	4.78a
NT	1344.67b	5.01c	1216.02d	4.50c	1345.21cd	6.81bc	684.73b	3.48c
TS	1978.64a	7.42ab	1560.19bc	6.13ab	1085.95e	6.06c	753.06b	3.54c
TP	1361.86b	5.43c	1686.39ab	6.55a	1424.31bc	7.38ab	768.69b	3.94bc
NTP	1984.10a	6.89b	1764.28a	6.15ab	1540.95a	8.33a	903.67a	4.31ab

3 讨论

3.1 耕作措施对产量和水分利用效率的影响

Huang 等^[17]、冯福学等^[18]在绿洲灌区研究得出免耕秸秆覆盖提高了冬小麦的产量和水分利用效率,但是谢瑞芝等^[19]统计了保护性耕作中减产的数据占 10.92%;在历年平均降雨量在 600 mm 左右的半湿润易旱地区的杨凌和渭北旱塬的彬县,冬小麦田秸秆覆盖不增产,甚至显著减产^[20]。可见,保护性耕作对作物产量的影响因不同气候区而异,在干旱地区增产,在湿润地区可能会减产。而本研究所依托定位试验始于 2001 年,2001—2014 年的研究发现,免耕秸秆覆盖和地膜覆盖都有利于作物产量和水分利用效率的提高^[12-13]。本研究发现,2015—2016 年不同作物中免耕秸秆覆盖、传统耕作+覆膜、免耕覆膜的水分利用效率比传统耕作提高 0.43%~50.88%,产量比传统耕作提高 7.64%~62.79%。因此,无论降雨和耕作年限如何,不同耕作措施应用年限的长短,免耕+秸秆覆盖、传统耕作+地膜覆盖、免耕+地膜覆盖都有利于陇中旱农区主要作物高效用水,提高产量。更好地佐证了保护性耕作在干旱地区增产的理论。

3.2 耕作措施提高水分利用效率的机制

已有研究^[12-13]表明,相比传统耕作,免耕秸秆覆盖和地膜覆盖虽然增加了作物生长期的农田耗水量,但水分利用效率高于传统耕作。本研究发现,在 2015—2016 年,即不同耕作措施实施的第 15 年和第 16 年,免耕秸秆覆盖对作物生长期总耗水量无显著影响。免耕覆膜的总耗水量只在小麦地显著高于传统耕作。在作物生长发育的不同阶段,相比传统耕作,免耕秸秆覆盖显著提高了小麦开花—收获和豌豆结荚—收获期间的阶段耗水量及其占总耗水的比例。2015 年和 2016 年降水量分别为 340.1、300.2 mm,略低于前期各年的最低降水量(344.5、564.5mm)。由此看来,随不同耕作措施应用年限的延长及降水年型的变化,保护性耕作提高水分利用效率的机制是不同的。

农田土壤水分消耗包括棵间蒸发量和作物蒸腾消耗,土壤棵间蒸发量是农田土壤水分消耗中的无效损耗,降低这种无效损耗将是提高作物水分利用率的有效途径^[21]。而在该定位试验 2010 年(生育期降雨量为 290.42 mm)的研究表明,免耕秸秆覆盖能够有效保蓄土壤水分,减少棵间蒸发量^[21],本研究发现,2015 年和 2016 年(作物生育期降雨量为 204.0、261.8 mm)免耕秸秆覆盖、传统耕作加覆膜、免耕覆膜对作物生长期棵间蒸发的比传统耕作显著减少 6.52%~50.81%。因此,不论生育期干旱与否,免耕

秸秆覆盖、覆膜等保护性耕作措施均能减少作物生长期棵间蒸发,减少农田土壤水分的无效损耗,这可能与免耕秸秆覆盖处理降低了作物生育期土壤温度、地膜阻断了水分蒸发有关^[22]。进一步分析发现,免耕秸秆覆盖降低棵间蒸发量的作用主要在小麦开花后、豌豆结荚后,而地膜覆盖在各个生育时期基本上都显著减少了棵间蒸发。这可能与免耕秸秆覆盖降低生育期土壤温度^[23],增大了后期叶面积指数^[24],从而增加遮荫度有关。

作物蒸腾量指作物有效利用的水分,蒸腾量越大,作物的生物量越多^[25]。在本研究中得出,相比传统耕作,免耕覆膜、传统耕作+覆膜、免耕秸秆覆盖都显著提高了作物生育期蒸腾量。蒸发与蒸散的比值能够很好地反映出不同处理下农田耗水中无效水的占比情况。在本研究中得出,免耕秸秆覆盖、传统耕作+覆膜、免耕覆膜有效降低了田间的蒸发与蒸散的比例,降低了农田土壤水的无效损耗。因此,免耕秸秆覆盖提高 WUE 的主要机制是降低作物生长后期棵间蒸发量,提高作物生长后期耗水量及降低蒸发与蒸散的比例。而地膜覆盖则主要是通过减少全生育期棵间蒸发量,增加作物全生育期蒸腾量,降低蒸发与蒸散的比例,实现作物水分高效利用。

4 结论

在陇中黄土高原旱农区,年降水量 300.2~564.5 mm 各种耕作年限免耕秸秆覆盖、地膜覆盖等保护性耕作措施均能提高水分利用效率及小麦和豌豆的产量。但不同耕作年限提高水分利用效率的机制不同,在相对比较干旱的年份,免耕秸秆覆盖通过降低作物生长后期棵间蒸发量、提高作物生长后期耗水量,降低蒸发与蒸散的比例,从而提高春小麦和豌豆的水分利用效率及产量;而地膜覆盖处理主要是通过减少全生育期棵间蒸发量,增加作物全生育期蒸腾量,降低蒸发与蒸散的比例,从而实现作物水分高效利用,提高作物产量。

参考文献:

- [1] 黄高宝,郭清毅,张仁陟,等. 保护性耕作条件下旱地农田麦—豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1176-1185.
- [2] 李玲玲,黄高宝,秦舒浩,等. 保护性耕作对绿洲灌区冬小麦产量形成的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(3): 514-520.
- [3] Vanoost K, Govers G, Dealba S, et al. Tillage erosion: A review of controlling factors and implications for soil quality [J]. Progress in Physical Geography, 2006, 30(4): 443-466.
- [4] Tiessen K H D, Elliott J A, Yarotski J, et al. Conventional

- and conservation tillage: Influence on seasonal runoff, sediment, and nutrient losses in the Canadian Prairies [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(3): 964-80.
- [5] Mannering J V, Fenster C R. What is conservation tillage? [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(3): 140-143.
- [6] Uri N D. Conservation practices in US agriculture and their implication for global climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 256(1): 23-38.
- [7] Afzalnia S, Ziaee A R. Effect of conservation tillage and irrigation methods on the cotton yield and water use efficiency [J]. *Acta Horticulturae*, 2014, 1054: 119-126.
- [8] Huang G B, Zhang R Z, Li L L. Productivity and sustainability of a spring wheat-field pea rotation in a semi-arid environment under conventional and conservation tillage systems [J]. *Field Crops Research*, 2008, 107(1): 43-55.
- [9] 武均, 蔡立群, 罗珠珠, 等. 保护性耕作对陇中黄土高原雨养农田土壤物理性状的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 112-117.
- [10] 蔡立群, 罗珠珠, 张仁陟, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤水分保持及入渗性能的影响研究[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(5): 1362-1368.
- [11] 郭清毅, 黄高宝, Li G D, 等. 保护性耕作对旱地麦—豆双序列轮作农田土壤水分及利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 165-169.
- [12] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(9): 2326-2332.
- [13] 陈亮亮, 黄高宝, 李玲玲, 等. 不同耕作措施对小麦水分利用的影响及机制[J]. *甘肃农业大学学报*, 2014, 49(1): 48-53.
- [14] 张仁陟, 黄高宝, 蔡立群, 等. 几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 61-69.
- [15] 王克鹏, 张仁陟, 董博, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤水分及作物叶水势的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3752-3761.
- [16] 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]. *水利学报*, 1998(10): 36-39.
- [17] Huang G B, Chai Q, Feng F X, et al. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in arid northwest China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(8): 1286-1296.
- [18] 冯福学, 黄高宝, 于爱忠, 等. 不同保护性耕作措施对武威绿洲灌区冬小麦水分利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(5): 1060-1065.
- [19] 谢瑞芝, 李少昆, 李小君, 等. 中国保护性耕作研究分析: 保护性耕作与作物生产[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1914-1924.
- [20] 高亚军, 李生秀. 秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 15-19.
- [21] 王晓娟, 黄高宝, 李卿沛, 等. 不同耕作措施下旱地春小麦田和豌豆田的蒸发蒸腾特性及产量效应[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(5): 172-177.
- [22] 李静静, 李从锋, 李连禄, 等. 苗带深松条件下秸秆覆盖对春玉米土壤水温及产量的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(10): 1787-1796.
- [23] 黄高宝, 李玲玲, 张仁陟, 等. 免耕秸秆覆盖对旱作麦田土壤温度的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(5): 1-4, 19.
- [24] 练宏斌. 不同耕作措施对旱地春小麦光合生理生态特性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [25] 刘贤赵. 土壤水分与遮阴对作物水分利用的影响机理与效应研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- (上接第213页)
- [26] 赵玉皓, 张艳杰, 李贵春, 等. 长期不同施肥下褐土有机碳储量及活性碳组分[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(7): 1826-1833.
- [27] 宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 525-533.
- [28] 赵亚南. 长期不同施肥下紫色水稻土有机碳变化特征及影响机制[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [29] 李海波, 韩晓增, 王凤, 等. 不同土地利用下黑土密度分组中碳、氮的分配变化[J]. *土壤学报*, 2008, 45(1): 112-119.
- [30] 顾鑫, 杨丽, 任翠梅, 等. 土壤有机碳物理组分研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2017(6): 120-124.
- [31] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 等. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2907-2913.
- [32] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 等. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 359-365.
- [33] 王改玲, 李立科, 郝明德. 长期施肥和秸秆覆盖土壤活性有机质及碳库管理指数变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 20-26.