

DOI: 10.5846/stxb201211061556

王克鹏, 张仁陟, 董博, 谢军红. 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. 生态学报, 2014, 34(13): 3752-3761.

Wang K P, Zhang R Z, Dong B, Xie J H. Effect of long-term conservation tillage on soil water regimes and leaf water potential of crops in rainfed areas of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3752-3761.

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

王克鹏¹, 张仁陟^{1,*}, 董 博¹, 谢军红²

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070)

摘要:通过长期定位试验研究了黄土高原西部旱农区, 传统耕作方式和 5 种保护性耕作措施对豌豆-小麦 (P→W) 和小麦-豌豆 (W→P) 轮作序列的耕层土壤水分和作物叶水势的影响。结果表明, 与传统耕作 (T) 处理相比, 保护性耕作都能不同程度地提高 0—30 cm 土层土壤含水量, 增幅为 3.29%—28.67%, 其中免耕+秸秆覆盖 (NTS) 处理的土壤含水量在整个生育期内均为最高。豌豆和春小麦在不同生育期, 叶水势的日变化趋势大致相同, 均为清晨 6:00 最高, 然后随着时间的推移而下降, 大约在 12:00—14:00 之间达到最低, 随后逐渐回升。春小麦各处理在拔节期和抽穗期的叶水势相对较高, 孕穗期和开花期次之, 灌浆期最低; 叶片相对含水量在拔节期和抽穗期最高, 开花期次之, 灌浆期最低。豌豆各处理的叶水势均在出苗期和孕蕾期达到了最大值, 分枝和开花期结荚期次之, 灌浆成熟期相对较低; 叶片相对含水量均随生育期的进程而呈下降趋势。整个生育期春小麦和豌豆各处理 10:00 的叶水势与 0—30 cm 平均土壤含水量之间显著相关, 当土壤水分含量较低时, 春小麦和豌豆叶水势与耕层土壤含水量的相关性达极显著水平。与传统耕作 (T) 相比, 免耕+秸秆覆盖 (NTS)、免耕+地膜覆盖 (NTP)、免耕 (NT)、传统耕作+秸秆还田 (TS)、地膜覆盖 (TP) 5 种保护性耕作措施能不同程度的提高作物叶水势、叶片相对含水量和作物产量, 其中免耕+秸秆覆盖 (NTS) 的优势最明显。

关键词:保护性耕作; 秸秆还田; 地膜覆盖; 土壤水分; 叶水势

Effect of long-term conservation tillage on soil water regimes and leaf water potential of crops in rainfed areas of the Loess Plateau

WANG Kepeng¹, ZHANG Renzhi^{1,*}, DONG Bo¹, XIE Junhong²

1 College of Resource and environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2 Gansu Province, State Key Laboratory of arid land crop science, Lanzhou 730070, China

Abstract: Based on long-term field experiments in the west of the Loess Plateau, this paper discusses the effects of conventional tillage (T) on soil water regimes and leaf water potential of crops for five conservation agricultural patterns, comprising conventional tillage with stubble incorporation (TS); no-till and no-stubble retention (NT); no-till with stubble retention (NTS); conventional tillage with plastic mulching (TP); and no-till with plastic mulching (NTP). The rotation systems of pea-wheat (P→W) and wheat-pea (W→P) under rainfed farming were studied. The results show that conservation tillage could increase surface (0—30cm) soil moisture content at sowing, and soil moisture content of conservation tillage are significantly higher than T, showing an increase of between 3.29%—28.67%. The NTS pattern for spring wheat and field pea soil water content were the highest over all growing stages. The leaf water potential of the field pea was obviously higher than that of spring wheat, but their daily dynamics were similar to each other over all growing

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (31360148); 甘肃农业大学盛彤笙科技创新基金资助项目 (GSAU-STS-1230)

收稿日期:2012-11-16; **修订日期:**2014-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangrenzhi@gsau.edu.cn

stages. It was highest in the early morning at 6:00, and then decreased over time reaching a minimum at between 12:00—14:00, before gradually increasing again. At 18:00, the leaf water potentials were nearly restored to the level recorded at 9:00. As for spring wheat, the maximum leaf water potential appeared at the jointing and heading stage followed by the booting and flowering stage. The minimum leaf water potential appeared at the filling stage. The leaf relative water content of spring wheat was highest at the heading stage, followed by the jointing and flowering stages, reaching a minimum at filling stage. As for the field pea, maximum leaf water potential was achieved at seedling stage and pregnant bud stage, followed by branching and blossom podding stage. The minimum appeared at the grouting mature stage. The dynamics of water saturation deficiency was just the opposite to that of relative water content. The leaf relative water content of the field pea was reduced along with the growing stages under different tillage practices. Over all the growing stages, the leaf water potential of both spring wheat and field pea measured at 10:00 had a significant correlation with the average soil water content at 0—30cm. When the soil moisture content was relatively low, leaf water potential of spring wheat or field pea had a very significant correlation with soil water content. Compared with T, the five conservation agricultural patterns can increase the leaf water potential and leaf relative water content of crops, of which the effect of NTS is shown to be the most significant. Furthermore, osmotic regulation and turgor pressure maintenance could allow crops to achieve a high yield.

Key Words: conservation tillage; stubble retention; plastic mulching; soil moisture; leaf water potential

水资源短缺是黄土高原旱地农业高效持续发展的主要限制因素。如何减少地表径流和蒸发散失,增加“土壤水库”的蓄水保墒作用是旱地农业研究的重要课题^[1-2]。水势是表示植物水分状况或水分亏缺程度的一个直接指标^[3-4],在植物各部位的水势中,叶水势是反映植物体内水分亏缺最灵敏的生理指标^[5-6],反映了植物各种生理活动受环境水分条件的制约程度^[7]。目前有关植物叶水势的研究,主要集中在不同灌水措施和施肥处理对植物叶水势的影响方面^[8],针对雨养农业区不同耕作措施下作物叶水势的研究较少。本文在田间条件下研究了黄土高原半干旱雨养农业区,不同耕作措施下春小麦和豌豆叶水势的变化特征,并对两种作物的叶片相对含水量的变化规律进行了探讨,旨在为该区保护性耕作模式的推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验设在陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区的甘肃农业大学定西旱农生态综合试验站。试区属中温带半干旱区,平均海拔 2000 m,年均太阳辐射 592.5 kJ/cm²,日照时数 2476.6 h,年均气温 6.4 ℃,≥0 ℃积温 2933.5 ℃,≥10 ℃积温 2239.1 ℃,无霜期 140 d。多年平均降水量 390.9 mm,年蒸发量 1531.0 mm,干燥度 2.53,80%保证率的降水量为 365 mm,变

异系数为 24.3%,为黄土高原西部典型的半干旱雨养农业区。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

试验共设 6 个处理,如表 1 所示。结合小麦豌豆的年间轮作,为加快研究进程,研究设计了小麦→豌豆(2002 年小麦→2003 年豌豆→2004 年小麦→2005 年豌豆→2006 年小麦→2007 年豌豆→2008 年小麦→2009 年豌豆→2010 年小麦→2011 年豌豆,简称 W→P→W)和豌豆→小麦(2002 年豌豆→2003 年小麦→2004 年豌豆→2005 年小麦→2006 年豌豆→2007 年小麦→2008 年豌豆→2009 年小麦→2010 年豌豆→2011 年小麦,简称 P→W→P)2 个轮作序列,4 次重复,共 48 个小区,小区面积 4 m×20 m,随机区组排列。2001 年 8 月开始布置试验,所有秸秆还田处理均覆盖小麦秸秆 4500 kg/hm²(秸秆铡短至 15 cm),之后每年收获后的所有秸秆((秸秆铡短至 15 cm))全部还原小区。供试作物为春小麦和豌豆。其中春小麦品种为“定西 35”,播种量 187.5 kg/hm²;豌豆品种为“绿农 1 号”,播种量 100 kg/hm²。T、NT、TS、NTS 处理用中国农业大学研制的免耕播种机播种,春小麦行距 20 cm,豌豆行距 24 cm,播深均为 7 cm。春小麦播期为 3 月中旬,豌豆为同年 3 月下旬。小麦各处理均施纯 N 105 kg/hm²,纯 P₂O₅ 105 kg/hm²(尿素+磷酸二铵);豌豆各处理均施 N 20

kg/hm², 纯 P₂O₅ 105 kg/hm²(磷酸二铵+过磷酸钙), 所有肥料都作为基肥在播种时同时施入。

表 1 试验处理描述

Table 1 Treatments description of the experiment

处理代码 Code	处理 Treatment	耕作方法 Description
T	传统耕作 Conventional tillage	试验地在前茬收获后三耕两耨,这是定西地区典型的传统耕作方式;8月份收获后马上进行第1次耕作,8月底和9月分别进行第2、3次耕作,耕深依次为20 cm、10 cm和5 cm。9月份第3次耕后耨1次,10月份冻结前再耨1次
NT	免耕 No-till with no-stubble retention	全年不耕作,播种时用免耕播种机一次性完成施肥和播种,秸秆不还田
TS	传统耕作秸秆还田 Conventional tillage with stubble incorporating	耕作方式同处理T,但结合第1次耕作将所有前作秸秆铡短至15 cm翻埋入土
NTS	免耕秸秆覆盖 No-till with stubble retention	播种方法同NT处理,收获脱粒后将全部前作秸秆铡短至15 cm覆盖在原小区
TP	传统耕作地膜覆盖 Conventional tillage with plastic mulching	试验地耕耨同处理T(三耕两耨),但在10月份最后一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,秸秆不还田
NTP	免耕地膜覆盖 No till with plastic mulching	全年不耕作,覆膜及播种时间和方式同TP处理,为避免前茬秸秆挂坏薄膜,收获后用剪草机剪平或耨平残茬,秸秆不还田

1.2.2 采样与试验分析

(1) 土壤水分

在各生育期测定0—30 cm 土层土壤水分,其中0—10 cm 土层采用土钻取土烘干称重法测定,10 cm 以下用中子水分仪测定。共3层:依次为0—5 cm, 5—10 cm, 10—30 cm。

(2) 叶水势

采用PMS压力室水势仪(Plant Moisture Stress, Corvallis, Oregon, USA)测定。在作物不同生育期,选择晴朗天气进行观测,从6:00至18:00每隔2h测定1次,小麦抽穗前测倒二叶,抽穗期及抽穗后测旗叶,豌豆取上部完全展开叶片。每次在各小区随机抽样30个叶片,取平行测定值的均值代表小区的叶水势。

(3) 作物叶片相对含水量

用烘干法在10:00测定,叶片的选择与叶水势测定时相同,每个小区取6片叶子,在称鲜重后将叶

片浸入水中12 h,取出,用吸水纸擦干叶片表面水分并称重,再将叶片浸入水中1 h,取出,擦干,称重,直至叶片恒重,即得叶片饱和重量,接着于105℃下杀青0.5 h后,然后在80℃下烘至恒重,计算叶片相对含水量。

叶片相对含水量(%) = (初始鲜重 - 干重) / (饱和鲜重 - 干重) × 100

(4) 数据分析

采用SPSS19.0软件对数据进行差异显著性检验、相关分析、回归分析。

2 结果与分析

2.1 试验区降雨量分布

本试验区为雨养农业区,年内季节降雨分布的差异是造成旱地农田水土流失及作物生长关键期干旱缺水的主要原因之一。试验期间春小麦和豌豆不同生育期降雨分布情况如表2所示。

表 2 春小麦和豌豆生育期内降雨分布

Table 2 Distribution of rainfall growing stages of spring wheat and field pea

春小麦生育阶段 Development stage of spring wheat	分蘖-拔节 Tillering-jointing	拔节-孕穗 Jointing-booting	孕穗-抽穗 Booting-heading	抽穗-开花 Heading-flowering	开花-成熟 Flowering-maturing
降雨量 Rainfall/mm	7.1	9.9	57.9	1.6	32.3
豌豆生育阶段 Development stage of pea	出苗期 Seedling stage	分枝期 Branching stage	孕蕾期 Pregnant bud stage	开花结荚期 Blossom podding stage	灌浆成熟期 Grouting Mature stage
降雨量 Rainfall /mm	7.1	20.7	50.8	6.1	8.3

2.2 不同耕作措施对土壤含水量的影响

2.2.1 春小麦生育期 0—30 cm 土壤含水量的变化

农田土壤水分垂直变化随气候类型区、年降水量及不同土壤耕作措施而表现出一定的变化,其中 0—30 cm 耕层土壤水分受降雨、气温、蒸散、土壤耕作、覆盖及作物根系的影响明显,土壤水分变化剧烈,而且不同生育时期,由于作物长势的不同,不同耕作措施的土壤含水量也表现出不同的变化趋势^[1,7]。

从不同耕作措施下春小麦和豌豆不同生育期 0—30 cm 土壤含水量的变化情况(表 3)可以看出,春小麦拔节期 NTS 处理的土壤含水量为 12.61%,较常规耕作增加 28.67%,各处理土壤含水量排列顺序为 NTS>TS>NTP>NT>TP>T, NTS 处理土壤含水量与其它处理之间均差异显著, NTP、NT 和 TS 处理间土壤含水量差异不显著,但明显高于 TP 和 T 处理;孕穗期 NTS 处理土壤含水量为 11.17%,较常规耕作增加 13.17%,各处理含水量排列顺序为 NTS>NTP>NT>TS>TP>T, NTS、NTP、NT 和 TS 处理显著高于 TP、T 处理,而 NTS、NTP、NT 和 TS 处理间,TS 与 TP 处理间差异不显著;抽穗期各处理 0—30 cm 土层土壤含水量迅速增加,这与测定前期 6 月上旬的降水有很大关系,NTS 处理土壤含水量为 22.58%,较常规耕作增加 3.63%,各处理含水量排列顺序为 NTS>TS>NTP>NT>TP>T, NTS、TS、NTP、NT、NP 和 TP 处理间均差异不显著,但各处理的土壤含水量均显著高于 T 处理;开花期 NTS 处理土壤含水量为 19.56%,较常规耕作增加 8.61%,各处理含水量排列顺序为 NTS>NTP>NT>TS>TP>T, NTS、NTP 和 NT 处理土壤含水量显著高于 TS、TP 和 T 处理,TS、TP 处理土壤含水量显著高于 T 处理。NTS、NTP、NT 处理和 TS、TP 处理间差异均不显著;灌浆期 NTS 处理土壤含水量为 13.51%,较常规耕作增加 16.58%,各处理含水量排列顺序为 NTS>NTP>TS>NT>TP>T, NTS 处理土壤含水量显著高于 NTP、TS 处理, NTP、TS 处理土壤含水量显著高于 NT、TP 处理,NT、TP 处理土壤含水量显著高于 T 处理,而 NTP 与 TS 处理之间,NT、TP 处理间差异不显著。

2.2.2 豌豆生育期 0—30 cm 土壤含水量的变化

豌豆出苗期 NTS 处理 0—30 cm 土层土壤含水量为 12.70%,较常规耕作增加 27.38%,各处理土壤

含水量排列顺序为 NTS>TS>NTP>NT>TP>T, NTS 处理与其它 5 个处理之间土壤含水量差异显著,NT 与 TS、NTP、TP 处理间差异不显著,但 TS、NTP、NT 处理土壤含水量显著高于 T 处理;分枝期 NTS 处理 0—30 cm 土层土壤含水量为 13.54%,较常规耕作增加 27.74%,各处理含水量排列顺序为 NTS>NTP>TS>NT>TP>T。NTS 处理与 TS、NT、TP、T 处理之间差异显著, NTP 与 TS、NT 处理间差异不显著,但所有保护性耕作措施的土壤含水量都显著高于 T 处理;孕蕾期 NTS 处理土壤含水量为 22.61%,较常规耕作增加 3.29%,各处理含水量排列顺序为 NTS>TS>NTP>NT>TP>T,其中 NTS 处理显著高于 T 处理, NT、TS、NTP、TP、T 处理间差异均不显著;开花结荚期 NTS 处理 0—30 cm 土层土壤含水量为 13.60%,较常规耕作增加 28.30%,显著高于其它 5 个处理,各处理含水量排列顺序为 NTS>NTP>TS>TP>NT>T,其中 NTP 与 TS 处理间差异不显著,TS、TP 和 NT 处理间差异不显著,但它们显著高于 T 处理;灌浆成熟期 NTS 处理土壤含水量为 12.75%,较常规耕作增加 10.49%,各处理含水量排列顺序为 NTS>TS>NTP>NT>TP>T,但 NTS 处理与 TS、NTP、NT 处理间土壤含水量差异不显著,而显著高于 TP 和 T 处理。

从表 3 中各个时期作物的土壤含水量可以看出,保护性耕作都能不同程度地提高土壤含水量,其中 NTS 处理条件下,春小麦和豌豆的耕层土壤含水量在整个生育期内均为最高,显著高于 T 处理,增幅分别为 3.63%—28.67%和 3.29%—28.30%。这是因为免耕+秸秆覆盖在土壤表面留有作物残茬,减少了土壤蒸发,增加了土壤的蓄水保墒作用。在气候干旱,土壤含水量较低时,保护性耕作措施的保水效应表现得更为明显,这表明,保护性耕作措施在黄土高原干旱地区有较明显的优势。

2.3 不同耕作措施下春小麦、豌豆叶水势的变化规律

2.3.1 不同生育期春小麦和豌豆的叶水势变化

由表 4 可以看出,10:00 测定的春小麦和豌豆叶水势均值在不同生育期的变化规律。春小麦各处理的叶水势在拔节期和抽穗期均相对较高,孕穗期和开花期次之,灌浆期最低;豌豆各处理的叶水势均在出苗期和孕蕾期均相对较高,分枝期和开花结荚期次之,灌浆成熟期最低。这是因为随着植株生长,生

命活动旺盛,蒸腾耗水不断增加,作物无法通过对体内水分的调节来满足蒸腾的需要,从而叶水势降低,以便形成较大的水势梯度,有利于从土壤中吸水,这也是植物对土壤干旱胁迫的适应性反映。春小麦孕穗和豌豆分枝期,叶水势相对较低是因为天然降水为本试验地区土壤水分的主要来源,在当季作物生长前期降雨量少,土壤含水量较低。春小麦抽穗和豌豆孕蕾期叶水势升高是由于当地 6 月上旬降雨较多,土壤含水量较高,作物从土壤吸收水分比较容易,从而使作物保持较高的叶水势。

表 3 不同耕作措施下春小麦和豌豆不同生育期 0—30 cm 土壤含水量变化/%

Table 3 Dynamics of 0—30 cm soil water content at different growing stages of spring wheat and field pea under different tillage patterns

处理 Treatments	春小麦 Spring wheat				
	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage
T	9.80c	9.87c	21.79b	18.01c	11.27d
TS	11.28b	10.79ab	22.56a	18.36b	12.72b
NT	11.09b	10.96a	22.35ab	19.37a	11.95c
NTS	12.61a	11.17a	22.58a	19.56a	13.51a
TP	9.86c	10.12bc	22.31ab	18.25bc	11.65c
NTP	11.15b	10.97a	22.45a	19.45a	13.01b

处理 Treatments	豌豆 Pea				
	出苗期 Seedling stage	分枝期 Branching stage	孕蕾期 Pregnant bud stage	开花结荚期 Blossom podding stage	灌浆成熟期 Grouting Mature stage
T	9.97c	10.60d	21.89b	10.6d	11.54c
TS	11.17b	12.43b	22.43ab	12.43bc	12.27ab
NT	11.12b	11.97bc	22.35ab	11.81c	12.13abc
NTS	12.70a	13.54a	22.61a	13.60a	12.75a
TP	10.86bc	11.80c	22.33ab	11.85c	11.77bc
NTP	11.16b	12.96ab	22.37ab	13.00b	12.18abc

不同小写字母代表 0.01 水平的显著性

表 4 不同耕作措施下春小麦和豌豆叶水势在不同生育期的变化/MPa

Table 4 Dynamics of leaf water potential of spring wheat and field pea at different growing stages under different tillage patterns

处理 Treatments	春小麦 spring wheat				
	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage
T	-1.73c	-1.83c	-1.75c	-2.24c	-2.50c
TS	-1.51b	-1.61b	-1.56ab	-2.11ab	-2.32b
NT	-1.46ab	-1.60b	-1.61b	-2.11ab	-2.36b
NTS	-1.36a	-1.51a	-1.46a	-1.95a	-2.23a
TP	-1.68c	-1.80c	-1.69bc	-2.19bc	-2.40c
NTP	-1.48ab	-1.65b	-1.61b	-2.02ab	-2.35b

处理 Treatments	豌豆 Pea				
	出苗期 Seedling stage	分枝期 Branching stage	孕蕾期 Pregnant bud stage	开花结荚期 Blossom podding stage	灌浆成熟期 Grouting Mature stage
T	-1.12c	-1.23c	-1.16c	-1.43c	-1.62c
TS	-1.03b	-1.11b	-1.09ab	-1.38ab	-1.55ab
NT	-1.06b	-1.15b	-1.12ab	-1.37ab	-1.56ab
NTS	-0.92a	-1.04a	-1.02a	-1.31a	-1.49a
TP	-1.08bc	-1.19bc	-1.15bc	-1.40bc	-1.58bc
NTP	-1.06b	-1.13b	-1.10ab	-1.39ab	-1.54a

同一列不同小写字母表示不同处理在 5%水平上差异显著

2.3.2 春小麦和豌豆叶水势的日变化

从不同处理来看,在整个生育期内,NTS 处理条件下春小麦和豌豆叶水势的日均值要明显高于 T 处理($P<0.05$);在小麦的孕穗期和灌浆期,NTS 处理小区春小麦叶水势的日均值要明显高于 TS、NT、NTP、TP 处理;在豌豆的出苗期和分枝期,NTS 处理小区豌豆叶水势的日均值要明显高于 TS、NT、NTP、TP 处理。这是由于保护性耕作措施能有效地减少表层土壤水分的蒸发,具有较好的保墒功能,特别是 NTS 处理为作物提供了适宜的生长环境,改善了土壤的供水条件,从而使作物保持较高的叶水势,在一定程度上缓解了干旱胁迫,可见保护性耕作措施在黄土高原干旱

地区优势明显。

由图 1、图 2 可见,不同耕作措施下春小麦和豌豆的叶水势在不同生育期的日变化趋势大致相同,均为 6:00 最高,然后随着时间的推移而逐渐下降,大约在 12:00—14:00 左右降到最低,持续一段低谷后逐渐回升,18:00 时的作物叶水势值大致与 9:00 的叶水势值相近,均未能恢复到 6:00 的水平。这是因为清晨气温低,光照弱,空气湿度大,蒸腾耗水少,因而叶水势较高。之后,随着气温升高,光照的增强,空气湿度的下降,蒸腾强度增大、作物光合作用不断增强,生理耗水加大,造成植物体含水量下降。

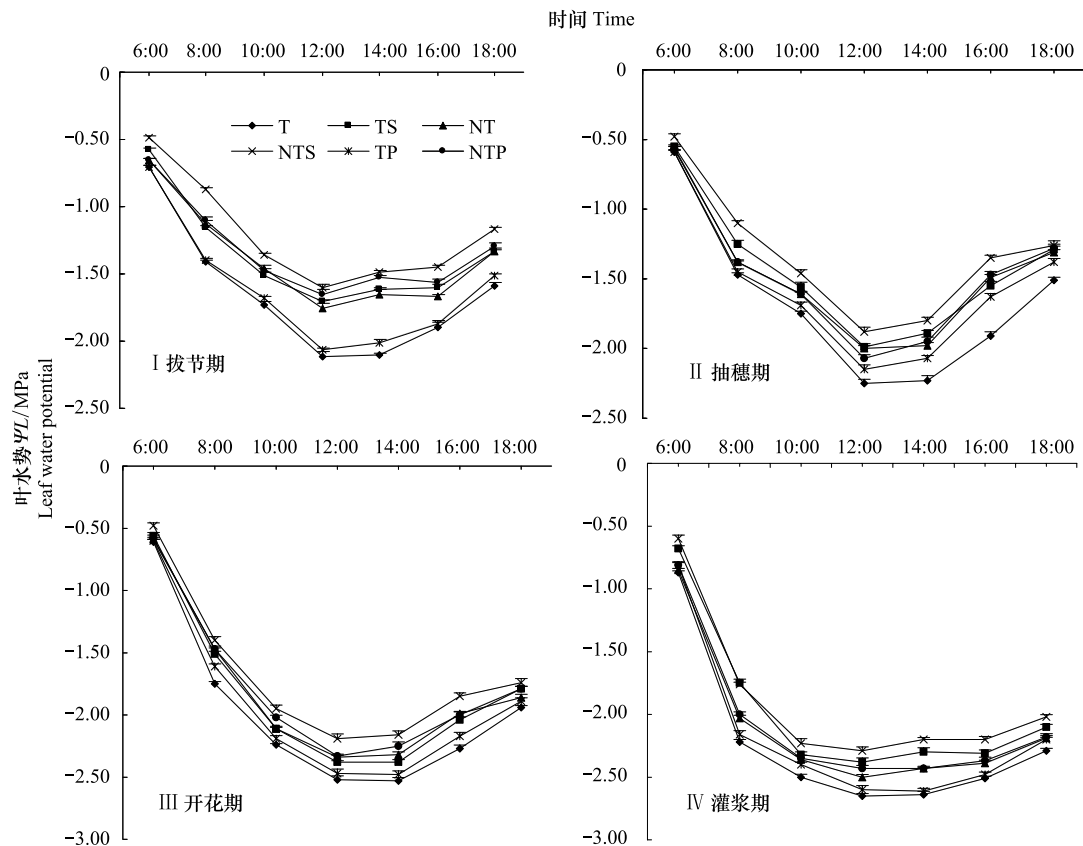


图 1 不同耕作措施下春小麦叶水势在不同生育期的日变化

Fig.1 Daily dynamics in leaf water potential of spring wheat in different growing stages under tillage practices

2.4 作物叶水势与土壤含水量的关系

在 SPAC 系统中,水分由土壤经植物蒸发到大气中,土壤含水量的变化直接对叶水势产生影响^[9-10]。土壤水势降低时,叶水势随着土壤水势的降低而降低,同样当外界条件的变化引起蒸腾速率的改变时,即使土壤水分没有改变,叶水势也随之发生变化^[11-12]。在用叶水势作为作物水分亏缺程度的

判定指标时,必须区分是土壤水分变化还是外界条件变化引起的叶水势变化,区分两者引起的作物叶水势变化规律时,首先应以充分供水条件下的叶水势随外界条件变化的规律为基础^[4,13]。对不同处理条件下春小麦和豌豆不同生育期各小区 10:00 的叶水势(Ψ_L , MPa)与对应生育期各小区 0—30 cm 平均土壤含水量(SWC V%)的相关性进行分析,用二项

式方程表示(表5),结果表明,整个生育期春小麦和豌豆各处理的叶水势与土壤含水量之间显著正相关,无论是春小麦还是豌豆,土壤含水量越低,叶水势和土壤水分的相关性越高,土壤含水量较高时,叶水势与土壤含水量的相关性较低。在本实验中,小麦的拔节期、灌浆期,豌豆的出苗期、分枝期、灌浆成

熟期土壤水分较低,作物叶水势与土壤含水量的相关性均达极显著水平。这表明在充分供水条件下叶水势仅与气象条件有关,但当土壤水受限制时,作物根系吸水满足不了蒸腾需要,此时叶水势与土壤含水量密切相关。

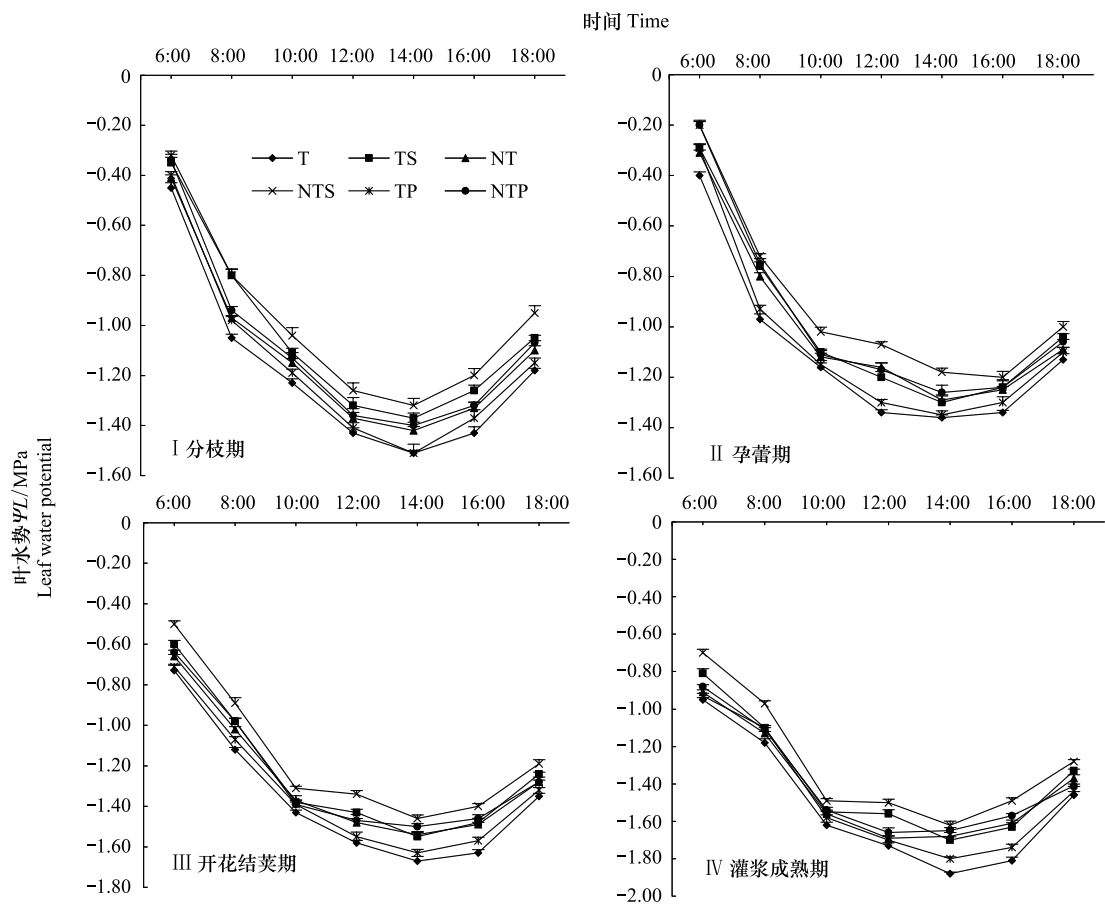


图2 不同耕作措施下豌豆叶水势在不同生育期的日变化

Fig.2 Daily dynamics in leaf water potential of field pea in different growing stages under tillage practices

表5 不同耕作措施下作物叶水势(MPa)与土壤含水量(SWC,V%)的关系

Table 5 Relationship between leaf water potential of crops and soil water content under different tillage practices			
作物 Crop	生育期 Growing stage	回归方程 Regression equation	R
春小麦 Spring wheat	拔节期	$\Psi L = -0.029SWC^2 + 0.781SWC - 6.547$	0.982 **
	孕穗期	$\Psi L = 0.085SWC^2 - 1.564 SWC + 5.294$	0.968 *
	抽穗期	$\Psi L = 0.007SWC^2 - 0.003SWC - 4.995$	0.864 *
	开花期	$\Psi L = 0.004SWC^2 - 0.006SWC - 0.363$	0.875 *
	灌浆期	$\Psi L = -0.015SWC^2 + 0.462SWC - 5.789$	0.915 **
豌豆 Field pea	出苗期	$\Psi L = 0.01SWC^2 - 0.152SWC - 0.600$	0.987 **
	分枝期	$\Psi L = 0.008SWC^2 - 0.130SWC - 0.738$	0.946 **
	孕蕾期	$\Psi L = 0.004SWC^2 - 0.005SWC - 2.976$	0.799 *
	开花结荚期	$\Psi L = 0.004SWC^2 - 0.077SWC - 1.104$	0.834 *
	灌浆成熟期	$\Psi L = -0.002SWC^2 + 0.141SWC - 3.023$	0.980 **

* 代表 0.05 水平的显著性, ** 代表 0.01 水平的显著性

2.5 不同耕作措施对植物叶片相对含水量的影响

相对含水量(*RWC*)是组织水重占饱和和组织水重的百分率,它反映了组织细胞壁的紧张程度^[3]。在干旱地区,由于土壤和大气干旱,水分胁迫经常而持久地影响植物体内的水分状况,当水分亏缺达到一定程度时,植物就会出现不可逆的伤害,甚至死亡^[16-19]。

2.5.1 春小麦叶片相对含水量的变化

从不同生育期春小麦叶片相对含水量(表6)可以看出,各处理的叶片相对含水量在抽穗期最高,拔节和开花期次之,灌浆期最低。拔节期 NTS 处理下的叶片相对含水量最高,为 85.89%,显著高于其它 5 个处理,NT 处理次之,且与 TS、NTP 处理间的差异不显著,但显著高于 T 处理;抽穗期 NTS 处理的叶片相对含水量为 87.25%,NTS, NT 处理间的叶片相对

含水量差异不显著,NT、TS、NTP 处理间的叶片相对含水量差异不显著,但是均显著高于 TP、T 处理;开花期 NTS 处理的叶片相对含水量为 80.10%,显著高于其它处理,而 NT, TS 和 NTP 处理间的叶片相对含水量差异不显著,但显著高于 T 处理;灌浆期 NTS、TS 处理之间的差异未达到显著水平,但显著高于其他 4 个处理。NTP、NT 处理叶片相对含水量差异不显著,都显著高于 T 处理。从表 6 的分析可以看出,在小麦的整个生育期,NTS 处理的叶片相对含水量始终大于 TP 和 T 处理,且差异显著。说明免耕加秸秆覆盖的耕作方式,在黄土高原干旱或半干旱条件下能显著提高作物的叶片相对含水量,这对作物在干旱生境中维持正常的生理活动能起到一定的作用。

表 6 不同耕作措施下春小麦和豌豆不同生育期叶片相对含水量

Table 6 Relative water content in leaves of spring wheat and field pea under different tillage patterns (mean $\pm$ SD)

处理 Treatment	春小麦叶片相对含水量 Relative water content in spring wheat/%			
	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage
T	78.97 $\pm$ 1.01c	81.26 $\pm$ 1.16c	75.99 $\pm$ 0.85d	68.70 $\pm$ 0.94c
TS	82.04 $\pm$ 1.02b	86.16 $\pm$ 1.08b	77.31 $\pm$ 1.02c	74.19 $\pm$ 1.19a
NT	82.19 $\pm$ 0.99b	86.38 $\pm$ 0.99ab	77.96 $\pm$ 1.06bc	69.17 $\pm$ 1.30bc
NTS	85.89 $\pm$ 1.00a	87.25 $\pm$ 1.01a	80.10 $\pm$ 1.13a	75.01 $\pm$ 1.28a
TP	79.03 $\pm$ 0.58c	80.87 $\pm$ 0.87c	77.67 $\pm$ 1.06bc	69.00 $\pm$ 1.37bc
NTP	81.93 $\pm$ 0.87b	86.09 $\pm$ 0.95b	78.37 $\pm$ 1.25b	70.16 $\pm$ 1.06b

处理 Treatment	豌豆 叶片相对含水量 Relative water content in field pea			
	分枝期 Branching stage	孕蕾期 Pregnant bud stage	开花结荚期 Blossom pudding stage	灌浆成熟期 Grouting Mature stage
T	83.04 $\pm$ 1.01c	84.97 $\pm$ 1.30c	79.97 $\pm$ 1.04c	66.50 $\pm$ 0.57c
TS	85.52 $\pm$ 0.97b	87.29 $\pm$ 0.99b	84.78 $\pm$ 1.37a	69.51 $\pm$ 0.44b
NT	85.40 $\pm$ 0.82b	87.19 $\pm$ 1.09b	80.14 $\pm$ 1.11bc	68.76 $\pm$ 0.39bc
NTS	87.61 $\pm$ 0.89a	89.79 $\pm$ 0.58a	85.58 $\pm$ 1.27a	73.21 $\pm$ 0.82a
TP	83.56 $\pm$ 1.19c	84.67 $\pm$ 0.61c	80.17 $\pm$ 1.03c	66.51 $\pm$ 0.67c
NTP	85.39 $\pm$ 1.16b	87.30 $\pm$ 1.07b	81.09 $\pm$ 0.96b	69.57 $\pm$ 1.01b

平均值 $\pm$ 标准差 Mean $\pm$ SD;同一列不同小写字母表示不同处理在 5%水平上差异显著

2.5.2 豌豆叶片相对含水量的变化

从不同生育期豌豆叶片相对含水量(表6)可以看出,豌豆各处理的叶片相对含水量均在孕蕾期最高,灌浆成熟期最低。在分枝期和孕蕾期 NTS 处理叶片相对含水量较高,分别为 87.61%和 89.79%,显著高于其它处理。TS 和 NT 处理次之,并且差异不显著,但是显著高于 T 处理。开花结荚期 NTS 和 TS 处理的叶片相对含水量显著高于其他 4 个处理,NTP

和 NT 处理间差异不显著,但它们显著高于 T 和 TP 处理,而且 T 和 TP 处理叶片相对含水量差异未达显著水平。灌浆成熟期 NTS 处理同样显著高于其它 5 个处理,TS、NT、NTP 处理处理间差异不显著,但明显高于 TP 和 T 处理。

总体来看,在整个生育期内 NTS 处理小区春小麦和豌豆的叶片相对含量最高,T 处理最低,说明在黄土高原干旱或半干旱条件下,免耕加秸秆覆盖能

使豌豆保持较高的叶片相对含水量,这对作物在干旱生境中维持正常的生理活动,缓解受旱程度,提高抗旱能力可起到积极地作用。

3 不同耕作措施对春小麦和豌豆产量的影响

从表 7 可以看出,无论春小麦还是豌豆,免耕+秸秆覆盖的小区产量显著高于传统耕作。春小麦 NTS 处理的产量显著高于其他处理,NTS 处理的

产量高达 980.01 kg/hm²,比 T 处理高 388.38 kg/hm²,增幅达 65.16%,而其他处理间差异不显著。豌豆 NTS 处理的产量同样显著高于其他各处理,NTS 处理的产量高达 527.10 kg/hm²,比 T 处理高 305.61 kg/hm²,增幅高达 72.47%,NTP、TS、NT 处理显著高于 T 处理,TP 处理与 T 处理间未达到显著水平。综上所述,免耕+秸秆覆盖对提高作物水势和产量的作用是非常明显的。

表 7 不同耕作措施对春小麦和豌豆产量的影响

Table 7 Effects on yield of spring wheat and field pea under different tillage practices

作物 Crop	处理 Treatments					
	T	TS	NT	NTS	P	NTP
春小麦 Spring wheat/(kg/hm ²)	596.16b	617.58b	628.05b	980.01a	609.01b	638.09b
豌豆 Field pea/(kg/hm ²)	305.61c	378.57b	359.66b	527.10a	329.98bc	389.03b

同一行不同小写字母表示不同处理在 5%水平上差异显著

4 结论与讨论

4.1 结论

不同生育时期,由于降雨和作物长势的不同,在黄土高原旱作农业区不同耕作措施的土壤含水量也表现出不同的变化。与传统耕作(T)处理相比,保护性耕作都能不同程度地提高 0—30 cm 土层平均土壤含水量,增幅为 3.29%—28.67%,其中免耕+秸秆覆盖(NTS)处理的土壤含水量在整个生育期内均为最高。这是因为免耕+秸秆覆盖在土壤表面留有作物残茬,减少了土壤蒸发,具有良好的蓄水保墒作用。

豌豆和小麦在不同生育期,叶水势的日变化趋势大致相同,均为 6:00 最高,然后随着时间的推移而下降,大约在 12:00—14:00 之间达到最低,随后逐渐回升,到 18:00 时,叶水势恢复到接近 9:00 的水平。豌豆在整个生育期内叶水势都明显高于春小麦。

春小麦各处理在拔节期和抽穗期的叶水势均相对较高,孕穗期和开花期次之,灌浆期最低;叶片相对含水量在抽穗期最高,拔节和开花期次之,灌浆期达到了最低。豌豆各处理的叶片相对含水量均在出苗期和孕蕾期最高,分枝和开花结荚期次之,灌浆成熟期相对最低。与其 T 和 TP 处理相比,在小麦和豌豆的整个生育期,免耕+秸秆覆盖(NTS)处理显著提高了作物叶水势。

在整个生育期,春小麦和豌豆各处理 0—30 cm 平均土壤含水量与 10:00 的叶水势之间显著正相关,无论是春小麦还是豌豆,土壤含水量越低,叶水势和土壤水分的相关性越高,土壤含水量较高时,叶水势与土壤含水量的相关性较低。当土壤水分含量较低时,春小麦和豌豆 10:00 的叶水势与 0—30 cm 平均土壤含水量之间的相关性均达极显著水平。

与传统耕作(T)相比,免耕+秸秆覆盖(NTS)、免耕(NT)、传统耕作+秸秆还田(TS)、免耕+地膜覆盖(NTP)、传统耕作+地膜覆盖(TP)5 种保护性耕作措施能不同程度的提高作物叶水势、叶片相对含水量,其中免耕+秸秆覆盖(NTS)的优势最明显。

4.2 讨论

在旱作条件下,叶水势与测定时的土壤水分条件关系很大^[20]。本实验所得结果只能是反映实验年份特定条件下的一个变化规律,又由于叶片水势的变化受包括作物本身调节作用在内的多种因素的影响,因此,今后应对不同降雨年份作物的水分生理作进一步的深入探讨,要全面、正确地认识植物的生态生理学特性及机理还需要做大量的土作。

尽管在植物各部分的水势中,叶水势尽管是水分状况的最佳度量,但是水分在植物体内的运输决定于各组织水势的高低。因此,应加强植物不同部位水势的研究,以便全面系统的掌握水分在不同部位的运输与存储机理。

References:

- [1] Fu A H, Chen Y N, Li W H. Analysis on dominant factors influencing water potential of *Phragmites australis* in extremely arid area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(3) 163-170.
- [2] Li L L, Huang G B, ZHANG R Z, Jin X J, Guangdi LI, Kwong Yin CHAN. Effects of conservation tillage on soil water regimes in rainfed areas of the North China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2326-2332
- [3] Lampurlane's, Gantero-Marty' nez C. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. *Soil & Tillage Research*, 2005.
- [4] Chu P F, Yu Z W, Wang D, Zhang Y L, Shi Y. Soil water and nitrogen dynamics in dryland cropping systems of Washington States, USE. *Soil & Tillage Research*, 2003, 71: 33-47.
- [5] Donovan L A, Grise D J, West J B, Bezdicsek D F. Predawn disequi-librium between plant and soil water potentials in two cold-desert Shrubs. *Oecologia*, 1999, 120: 209-217.
- [6] Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil & tillage Research*, 2002, 66: 197-205.
- [7] Chu P F, Yu Z W, Wang D, Zhang Y L, Shi Y. Effect of Tillage Mode on Diurnal Variations of Water Potential and Chlorophyll Fluorescence Characteristics of Flag Leaf after Anthesis and Water Use Efficiency in Wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(6): 1051-1061.
- [8] Mrema A F, Granhall U. Sennerby-forsse plant growth, leaf water potential, nitrogenase activity and nodule anatomy in *Leucaena leucocephala* as affected by water stress and nitrogen availability. *Trees-Structure and Function*, 1997, 12(1): 42-48.
- [9] Tomar V S, Toole J C. A field study on leaf water potential, transpiration and plant resistance to water flow in rice. *Crop Science*, 1992, (22): 5-9.
- [10] Zhu C G, Chen Y N, Li W H, Fu A H, Yang Y M. Effect of Drought Stress on Photochemical Efficiency and Dissipation of Excited Energy in Photosystem II of *Populus euphratica*. *Chinese Bulletin of Botany*: 2011, 46(4): 413-424.
- [11] Wang Z, Zerihum D, Feven J. General irrigation efficiency for field water management. *Agricultural Water Management*, 1996, 30: 123-132.
- [12] He Y M, Zhang R Z, Zhang L H. Effects of different tillage practices on fungi community structure and ecologic characteristics in loess soils of the North China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 113-119
- [13] Li D C, Velde B, Delerue J F. Image analysis of development of cultivated soil structures under Non-Tillage system. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 214-220.
- [14] Baumhardt R L, Jones O R. Residue management and tillage effects on soil-water storage and grain yield of dryland wheat and sorghum for a clay loam in Texas. *Soil & Tillage Research*, 2002, 68: 71-82.
- [15] Licht A Mark, Al-Kaisi Mahdi. Strip-tillage effect on seed bed soil temperature and other soil physical properties. *Soil & Tillage Research*, 2005, 80: 233-249.
- [16] Ruan C J, Li D Q, Leaf Water Potential of Sea buckthorn and Influence Factors in the Semiarid Loess Hilly Region, Shanxi Forest Science and Technology
- [17] Zeng F J, Zhang X M, Li X M. A review on the water physiological characteristics of *Tamarix* and its prospect, *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5): 611-614.

参考文献:

- [1] 付爱红,陈亚宁,李卫红.极端干旱区旱生芦苇叶水势变化及其影响因子研究. *草业学报*, 2012, 21(3) 163-170.
- [2] 李玲玲,黄高宝,张仁陟,晋小军, Guangdi LI, Kwong Yin CHAN.不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响. *生态学报*, 2005, 25(9): 2326-2332.
- [7] 褚鹏飞,于振文,王东,张永丽,石玉.耕作方式对小麦开花后旗叶水势与叶绿素荧光参数日变化和水分利用效率的影响. *作物学报*, 2012, 38(6): 1051-1061.
- [10] 朱成刚,陈亚宁,李卫红,付爱红,杨玉海.干旱胁迫对胡杨 PSII 光化学效率和激能耗散的影响. *植物学报*, 2011, 46(4): 413-424
- [12] 何玉梅,张仁陟,张丽华,谢开治.不同耕作措施对土壤真菌群落结构与生态特征的影响. *生态学报*, 2007, 27(1): 113-119.
- [13] 李德成, Velde B, Delerue J F, 张桃林.免耕制度下耕作土壤结构演化的数字图像分析. *土壤学报*, 2002, 39(2): 214-220.
- [16] 阮成江,李代琼.半干旱黄土丘陵区沙棘叶水势及其影响因子. *陕西林业科技*, 2000, 11(1): 1-4.
- [17] 曾凡江,张希明,李小明.怪柳的水分生理特性研究进展. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 611-614.