

# 不同保护性耕作方式对冬小麦叶片 水平水分利用效率的影响

王利立<sup>1</sup>, 黄高宝<sup>1</sup>, 郭清毅<sup>1</sup>, 侯慧芝<sup>2</sup>, 朱永永<sup>1</sup>, 乔海军<sup>3</sup>

(1. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学资源与环境学院,  
甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学理学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 比较河西灌区传统耕作方式和 4 种保护性耕作方式对冬小麦抽穗期旗叶叶片水平水分利用效率以及与之相关生理生态因子的影响, 探索高产节水、保护耕地的冬小麦栽培措施。结果表明: 秸秆翻压(TIS)、免耕(NT)和免耕覆盖(NTS)的耕作方式使冬小麦的叶片水分利用效率( $WUE_l$ )日变幅缩小, 而免耕立茬耕作方式(NTSS)使冬小麦  $WUE_l$  日变幅加大; NT、NTS 和 TIS 的日光合量均明显高于传统耕作, 但由于它们的日蒸腾量也明显高于传统耕作(T), 使得这三种耕作方式的日累积水分利用效率和日平均水分利用效率都低于 T。NTSS 和 T 耕作方式的叶片水平水分利用效率在 11:00~13:00 的高峰区有可能就是  $P_n$  和  $T_r$  达到优化组合的一种状态。免耕覆盖可以减少棵间蒸发, 缓慢释放  $CO_2$ , 使植株间的  $CO_2$  浓度升高, 从而提高作物的水分利用效率; RHin 是冬小麦水分利用效率(WUE)变化的一个重要值, 在生产实践中采用各种提高 RHin 的生产措施, 都能有效地提高作物叶片水平 WUE。

**关键词:** 叶片水平水分利用效率; 日光合量; 日蒸腾量; 日累积水分利用效率

**中图分类号:** S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)01-0090-07

植物水分利用效率 (Water use efficiency, WUE), 是指植物消耗单位水量生产出的同化物质。单叶 WUE 与植物生理功能有最直接的关系, 可反映植物气体 ( $CO_2/H_2O$ ) 代谢功能及植物生长与水分利用之间的数量关系<sup>[1]</sup>, 特别是旗叶的水分利用效率, 它是提高大田水分利用效率 (经济产量/蒸腾量) 的生理基础<sup>[2]</sup>。植物在吸收  $CO_2$  进行光合作用的同时, 蒸腾释放一定数量的水汽, 单叶水平上, 一般采用光合速率 ( $P_n$ ) 和蒸腾速率 ( $T_r$ ) 之比来表示植物的  $WUE_l$ <sup>[3,4]</sup>。植物在不同生育期和一天的不同时段, 其周围生态环境因素不断改变, 直接或间接地影响着植物光合和蒸腾作用的过程, 改变  $WUE_l$  和自身的生理活动。

耕作方式对小麦生长发育的影响主要是通过土壤水分差异和土壤温度不同而作用的<sup>[5]</sup>。保护性耕作 (Conservation tillage) 方式改传统的精耕细作对土壤的过度加工为少耕或免耕, 同时采用秸秆、残茬或其它植被覆盖地表, 以减少雨水和风对土壤侵蚀, 降低蒸发<sup>[6]</sup>。多项研究证明, 保护性耕作方式可以改善土壤结构, 提高土壤含水量和水分利用效

率<sup>[7~10]</sup>, 而且麦秸覆盖保温而不增温, 能减少土壤日温差<sup>[11]</sup>。

抽穗—乳熟期是影响小麦穗粒数的一个重要时期, 此时环境条件直接影响结实率和籽粒重。本文采用同步测定和相关分析方法, 对不同耕作方式下抽穗期冬小麦旗叶水分利用效率, 以及相关生理生态指标日变化进行研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区基本情况

试验于 2005 年 10 月~2006 年 7 月在甘肃省武威市凉州区黄羊镇甘肃农业大学试验场进行。该区年日照时数 2 968.2 h, 年平均气温 7.8℃,  $\geq 10^\circ C$  积温为 2 985.4℃, 年降水量 163.22 mm, 年蒸发量 2 019.9 mm<sup>[12,13]</sup>。农业生产完全依赖灌溉, 粮食生产以春小麦为主, 近年来恢复冬小麦生产以缓解用水矛盾, 调整品种结构和保护生态。

### 1.2 试验材料与处理

田间试验小区面积 108 m<sup>2</sup> (27 m × 4 m), 采用随机区组设计, 设置 5 个处理 (见表 1), 3 次重复。

收稿日期: 2007-02-23

基金项目: 教育部博士点基金 (20050733003); 甘肃省科学技术攻关计划项目 (2GS042-A41-002-01)

作者简介: 王利立 (1980-), 女, 甘肃庆阳人, 在读硕士研究生, 主要从事冬小麦保护性耕作的研究。E-mail: wanglili227@yahoo.com.cn。

通讯作者: 黄高宝 (1965-), 男, 甘肃天水人, 教授, 主要从事多熟种植、耕作制度、水肥高效利用和宏观农业教学及研究。E-mail: Huanggb@gsau.edu.cn。

表 1 试验处理  
Table 1 Treatments description

代号 Code	处理 Treatment	操作方法 Description
T	传统耕作 Conventional tillage	前作收后秋深耕耙耱一次,播种前旋耕耙耱一次。 Deep-ploughing and raking after harvesting the previous crop, rotary ploughing and raking before sowing.
TIS	秸秆还田 Tillage with straw returned	传统耕作,结合秋深耕将长度 5 cm 的秸秆 6 750 kg/hm <sup>2</sup> 翻入土壤(第一年),以后每年将所收获秸秆全部还田。 Conventional tillage, turning over 6 750 kg/hm <sup>2</sup> of 5 cm-straw into soil(in the first year), then turning over all the straw into soil every year.
NT	免耕 No-tillage	前作收后免耕,播种时用免耕播种机一次完成播种和施肥。 No tillage after harvesting the previous crop, completing sowing and fertilizing at the same time.
NTS	免耕覆盖 No tillage with straw mulch	前作收后免耕,地表均匀覆盖长度 5 cm 的秸秆 6 750 kg/hm <sup>2</sup> (第一年),以后每年将所收获秸秆全部归还小区。 No tillage after harvesting the previous crop, mulching the field with 6 750 kg/hm <sup>2</sup> of 5 cm-straw (in the first year), then turning over all the straw into soil every year.
NTSS	免耕立茬 No tillage and stubble standing	前作收后免耕,立秆留茬 25~30 cm(第一年播种前无留茬)。 No tillage after harvesting the previous crop, leaving 25~30 cm-stubble in the field(No stubble before sowing in the first year).

供试材料为张掖农科所提供的繁 13 强冬性冬小麦品种,于 2005 年 9 月 16 日采用甘肃农业大学工学院研制的 2BMFS-5/10 型免耕覆盖施肥播种机播种。

施肥:基肥施肥量为施纯氮 19.19 kg/hm<sup>2</sup>、五氧化二磷 13.79 kg/hm<sup>2</sup>,拔节初期结合灌头水追施磷二铵 14.99 kg/hm<sup>2</sup>,尿素 22.49 kg/hm<sup>2</sup>。

灌水:冬水 170.91 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>(2005 年 11 月 5 日),拔节水 119.94 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>(2006 年 5 月 7 日)。

### 1.3 测定方法

于 2006 年 5 月 26 日抽穗后期进行测定。

旗叶叶片含水量和叶片相对含水量的测定:吸水烘干称重法,按下式计算。测定时间与光合同日。

$$\text{叶片含水量}(\%) = \frac{\text{初始鲜重} - \text{干重}}{\text{初始鲜重}} \times 100\%$$

$$\text{叶片相对含水量}(\%) = \frac{\text{初始鲜重} - \text{干重}}{\text{饱和鲜重} - \text{干重}} \times 100\%$$

旗叶水势( $\Psi_w$ )的测定:采用美国产 WP4 型水势仪测定。日变化从 8:00~18:00,每隔 2 h 测定一次。

旗叶光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $Tr$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )、气孔阻力( $R_s$ )、叶室进口相对湿度(RH<sub>in</sub>)、叶温( $T_l$ )、气温( $T$ )和光合有效辐射( $PAR$ )等的测定:采用英国产 CI-310 型光合仪测定。日变化测定时间与叶水势同步。

土壤温度( $T_s$ )的测定:采用水银地温计测定。各处理分 0、5、10、15、20、25 cm 共 6 个层次读数。日变化读数时间与水势仪、光合仪同步。

### 1.4 旗叶日光合量、日蒸腾量计算

日光合量(DPC, Diurnal photosynthetic capacity)以  $\sum P_n = 1/2 \sum_{i=1}^{n-1} (P_i + P_{i+1}) \times t_i$  进行积分计算,其中  $\sum P_n$  为日累积光合量值,简称日光合量 [ $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ],  $P_i$  和  $P_{i+1}$  分别为第  $i$  次和第  $i+1$  次实测净光合速率值,  $t_i$  为第  $P_i$  次和  $P_{i+1}$  次观测间隔时间(h),  $n$  为测定次数<sup>[2]</sup>。日蒸腾量(DTC, Diurnal transpiration capacity)计算与日光合量计算方法相同。

### 1.5 叶片水分利用效率计算

$$\text{叶片水分利用效率}(WUE_l) = \frac{\text{光合速率}(P_n)}{\text{蒸腾速率}(Tr)}$$

### 1.6 分析方法

采用 DPS、SPSS 软件对试验数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 抽穗期不同耕作方式下冬小麦旗叶光合、蒸腾作用及水分利用效率日变化

结果如图 1 显示,5 种耕作方式的  $P_n$  日变化基本上都呈双峰曲线,而且低峰均出现在下午两点,最高峰出现在 11:00~13:00,下午 4 时的峰值低于上午的峰值。NT 耕作方式的初始光合值最高,具有最大的峰值光合速率,峰值较陡;NTS 耕作方式初始光合值较低,但午休时的  $P_n$  绝对值最高,并且具有最高下午峰值;NTSS 耕作方式上午光合速率值趋于水平,午休时迅速下降,16 时后又保持水平直至傍晚;TIS 耕作方式具有较高的峰值光合速率,午休后恢复较慢,到 16 时峰值不明显,属于长睡不起

型;传统耕作方式 T 的初始光合值较低,最高值与初始值相差不大,峰值较平缓,午休时的  $P_n$  绝对值明显低于其它保护性耕作方式。

但  $T_r$  表现不同(图 2),在 5 种耕作方式中,  $T_r$  值都有上、下午 2 个峰值,但峰值出现的时间和大小却不相同。在 NT 和 TIS 耕作方式中,  $T_r$  上午峰值明显高于下午峰值,而 NTS、NTSS 和传统耕作方式 T 的  $T_r$  峰值却是下午峰明显高于上午;

NTSS 和 TIS 的峰值分别出现在 9:00~11:00 和 13:00~15:00,但 NT 的峰值分别出现在 11:00~13:00 和 15:00~17:00,传统耕作方式 T 的峰值却出现在 9:00~11:00 和 15:00~17:00。在各处理的  $T_r$  值中,上午峰值为  $NT > TIS > NTS > NTSS > T$ ; 下午峰值最高的仍为 NT,其次是 NTS、TIS 和 NTSS,最低的仍是传统耕作方式 T。

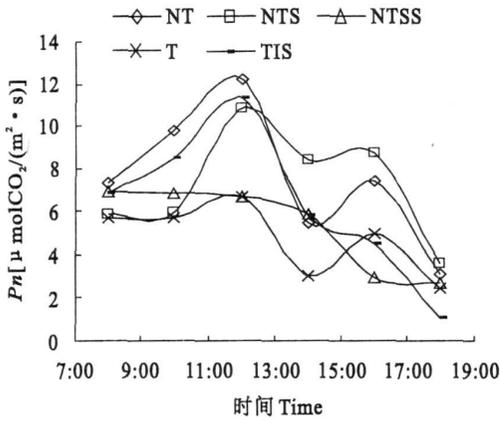


图 1 不同耕作方式下冬小麦旗叶光合速率( $P_n$ )日变化  
Fig.1 Diurnal change of  $P_n$  of winter wheat under different tillage

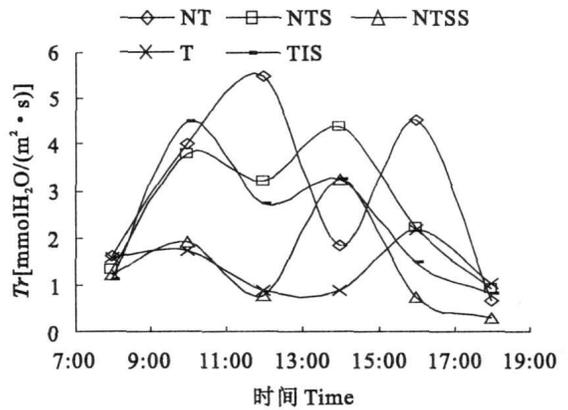


图 2 不同耕作方式下冬小麦旗叶蒸腾速率( $T_r$ )日变化  
Fig.2 Diurnal change of  $T_r$  of winter wheat under different tillage

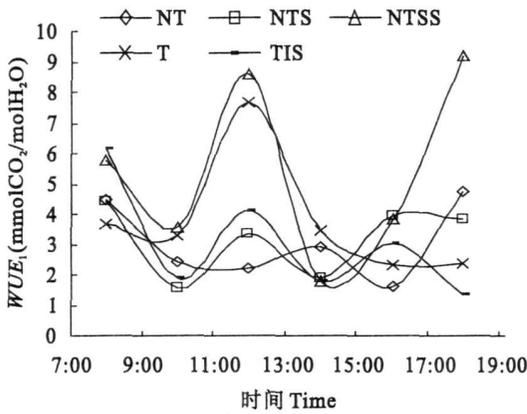


图 3 不同耕作方式下冬小麦叶片水分利用效率( $WUE_l$ )的日变化  
Fig.3 Diurnal change of  $WUE_l$  of winter wheat under different tillage

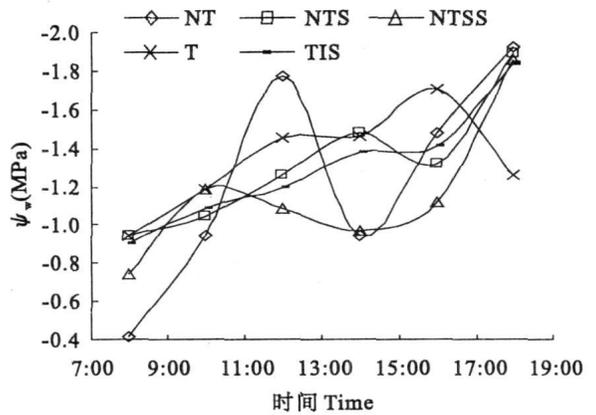


图 4 不同耕作方式下冬小麦叶水势( $\Psi_w$ )的日变化  
Fig.4 Diurnal change of leaf water potential ( $\Psi_w$ ) under different tillage

同传统耕作方式(T)相比,其它耕作方式的  $P_n$  和  $T_r$  日变幅都较大,而且明显增高,说明耕作方式差异同时影响着光合和蒸腾作用。相比而言,对  $T_r$  的影响程度要大于  $P_n$ ,这是因为采用了保护性耕作措施的农田,能降低土壤水分的无效蒸散,而增加作物的有效蒸腾,通过有效蒸腾动力使相应的光合速率提高( $P_n$  与  $T_r$  相关系数  $0.710^{**}$ ),这在 NT 耕作方式上表现尤为突出,其  $T_r$  和  $P_n$  值分别较 T

耕作方式增加 272.69%和 115.37%;TIS 耕作方式分别增加 183.08%和 142.76%;NTS 耕作方式增加 165.38%和 71.80%;NTSS 耕作方式增幅较小,分别为 129.23%和 1.66%。

从图 3 看出,不同耕作方式下冬小麦  $WUE_l$  日变化趋势差异较大,但各耕作方式下  $WUE_l$  日变化均是先降低后升高。在 10:00 之前,它们之间差别较小,之后差别迅速增大,到 12:00 左右,NTSS 和

传统耕作方式 T 的  $WUE_l$  值明显高于其它 3 种耕作方式。然后,随着光合进入午休,NTSS 和传统耕作方式 T 的  $WUE_l$  值迅速下降;15:00 后,传统耕作方式 T 的  $WUE_l$  保持水平,而 NTSS 耕作方式的  $WUE_l$  值在午休后又迅速回升,并于傍晚时达到全天最大值。TIS、NTS 和 NT<sup>3</sup> 种耕作方式的  $WUE_l$  日变化曲线则较为平缓。

比较不同耕作方式  $WUE_l$  日变幅可知,NT、NTS 和 TIS 耕作方式的  $WUE_l$  日变比较接近,变幅极差值分别比传统耕作方式 T 减少了 41.81%、46.81%和 10.57%;但在 NTSS 耕作方式中  $WUE_l$  反应不同,变幅极差值比传统耕作方式 T 增多了 36.85%。比较而言,秸秆翻压、免耕不覆盖和免耕+秸秆覆盖的耕作方式使冬小麦的  $WUE_l$  日变幅缩小,而免耕+立茬耕作方式使冬小麦  $WUE_l$  日变幅加宽。

## 2.2 抽穗期不同耕作方式下冬小麦旗叶日光合量、日蒸腾量及日累积水分利用效率

不同耕作方式的旗叶日光合量、日蒸腾量及日水分利用效率如表 2 所示。对于日光合量,传统耕作方式 T 最低,与保护性耕作方式 NT、NTS、TIS 和 NTSS 间的差异达到显著水平,并且与 NT、NTS

和 TIS 3 种保护性耕作方式间的差异达到极显著水平。不同耕作方式间的日蒸腾量差异与日光合量差异类似,但 NTSS 与 T 耕作方式间差异在 5%水平不显著。日累积水分利用效率 NTSS 耕作方式的最高,T 次之,但 T 与 NTSS 间差异不显著,而与其它耕作方式间的差异达到极显著水平。在日平均  $WUE_l$  的比较中,NTSS 耕作方式仍最高,T 次之,T 与 NTSS 耕作方式间差异达到极显著,NTS、NT 和 TIS 间差异不显著,但与 T 耕作方式间差异显著,并且 TIS 耕作方式与 T 耕作方式差异达到极显著水平。

保护性耕作方式 NT、NTS 和 TIS 的日光合量都明显高于传统耕作方式 T,但由于它们的日蒸腾量也明显高于 T 耕作方式使得这 3 种耕作方式的日累积水分利用效率和日平均水分利用效率都低于 T。如表 3 的相关分析所示,  $WUE_l$  与  $P_n$  无显著相关性,而  $WUE_l$  与  $T_r$  达到极相关水平,这也表明,引起不同耕作方式间  $WUE_l$  差异的是  $T_r$ 。因此,采取降低蒸腾作用的措施,如喷施抗蒸腾剂等将有助于提高保护性耕作方式的叶片水平水分利用效率。

表 2 抽穗期不同耕作方式下冬小麦旗叶日光合量、日蒸腾量及日水分利用效率

Table 2 DPC、DTC and diurnal  $WUE_l$  of winter wheat under different conservation tillage during heading

处理 Treatments	日光合量 Photosynthetic capacity [ $\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]	日蒸腾量 Transpiration capacity [ $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]	日累积水分利用效率 DPC/DTC Water use efficiency ( $\text{mmol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ )	日平均水分利用效率 Average water use efficiency ( $\text{mmol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ )
NT	80.05 <sup>aA</sup>	34.07 <sup>aA</sup>	2.35 <sup>cB</sup>	3.08 <sup>cBC</sup>
NTS	77.27 <sup>aA</sup>	29.47 <sup>bAB</sup>	2.64 <sup>bB</sup>	3.18 <sup>cBC</sup>
NTSS	54.10 <sup>cC</sup>	14.83 <sup>dC</sup>	3.65 <sup>aA</sup>	5.47 <sup>aA</sup>
T	48.97 <sup>dC</sup>	13.84 <sup>dC</sup>	3.54 <sup>aA</sup>	3.81 <sup>bB</sup>
TIS	67.79 <sup>bB</sup>	25.77 <sup>cB</sup>	2.64 <sup>bB</sup>	3.05 <sup>cC</sup>

注:同一列上的不同小写字母表示不同耕作方式间在 5%水平上的显著差异,不同大写字母表示在 1%水平上的显著差异。

Note: Different lowercase in the same line represents significant difference at  $P \leq 0.05$  between tillages and different majuscule represents significant at  $P \leq 0.01$ .

## 2.3 抽穗期不同耕作方式下与冬小麦叶片水平水分利用效率日变化相关的生理生态因素

### 2.3.1 气孔导度( $G_s$ )

叶片光合作用与蒸腾作用是两个同时进行的气体交换过程,气孔是  $\text{CO}_2$  和水蒸汽交换的通道。气孔作为气体交换的重要门户,其行为调节和控制着植物的蒸腾和光合生理过程,影响  $WUE_l$  的变化。通过相关分析表明,  $G_s$  与  $P_n$  和  $T_r$  均呈正相关关系,相关系数为 0.679<sup>\*\*</sup> 和 0.585<sup>\*\*</sup>。

如光合、蒸腾速率的日变化图(图 1、2)所示。

在同一耕作方式中,当气孔导度发生变化时,叶片光合速率与蒸腾速率表现出不同的变化趋势,导致  $WUE_l$  和光合速率不是单纯的线形增减关系。这是因为光合作用与蒸腾作用是两个完全不同的生理过程,  $\text{CO}_2$  和水蒸汽在叶片中的扩散性质不同<sup>[14,15]</sup>,正是由于  $\text{CO}_2$  和水蒸汽的这种扩散差异,造成在同一耕作方式中光合速率和蒸腾速率对气孔导度的不同响应,导致冬小麦抽穗期 NT、NTS 和 TIS 耕作方式虽然有较高的光合速率,却得不到相应的高叶片水分利用效率。

Cowan<sup>[16]</sup>和 Kramer<sup>[14]</sup>都提出过关于气孔调节的优化理论,认为通过对气孔的优化控制,可以达到以最小的  $T_r$  获得最大  $P_n$ ,这就预示着实现对水分的最优利用,即  $WUE_l$  优化的可能性。在本试验中,NTSS 和 T 耕作方式的叶片水平水分利用效率在 11:00~13:00 的高峰区有可能就是  $P_n$  和  $T_r$  达到优化组合的一种状态。

2.3.2 叶水势 ( $\Psi_w$ ) 叶水势是作物在一定环境

条件下植株水分状况的适宜指标。水是光合作用的原料之一,也是蒸腾作用的主要成分。因此,代表植株水分能量状况的  $\Psi_w$  与  $P_n$ 、 $T_r$  也有密切的联系。相关分析表明,  $\Psi_w$  与  $P_n$  和  $T_r$  无显著相关性,但  $\Psi_w$  与  $G_s$  呈极显著相关,说明水势是通过调节气孔导度来影响冬小麦光合和蒸腾速率日变化的。

表 3 抽穗期不同耕作方式下与冬小麦叶片水平  $WUE_l$  相关的生理生态因素相关分析

Table 3 Correlative coefficient among physio-ecological factors of winter wheat under different tillage during heading

$WUE_l$				$P_n$		$T_r$
$P_n$	$T_r$	RHIn	PAR	$G_s$	$C_i$	PAR
-0.092	-0.619**	0.494**	0.466**	0.679**	-0.517**	0.460*
$T_r$		$G_s$			$C_i$	
$G_s$	$P_n$	$\Psi_w$	$C_i$	Tleaf	RHIn	RHIn
0.585**	0.710**	0.463**	-0.496**	-0.506**	0.573**	-0.599**

注: \*\* 表示在  $P=0.01$  水平上的相关显著; \* 表示在  $P=0.05$  水平上的相关显著。

Note: \*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); \* correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

如图 4 所示,5 种耕作方式的  $\Psi_w$  日变幅都较大,且不同耕作方式中差别也较大,但总体来说水势日平均值  $NT > NTSS > NTS > TIS > T$ ,且  $\Psi_w$  初始值均为其全天最大值。冬小麦蒸腾耗水,降低水势,从而拉动输导组织里的水柱,使水在土壤—作物—大气连续体系中移动。根据黄明斌<sup>[17]</sup>对冬小麦叶水势与蒸腾速率的研究,发现它们之间不是简单的线性或非线性关系,而存在滞后效应,试验中叶片水势与相应的蒸腾速率在同一时间段表现不一致就是这种原因。但它们的日平均值大小基本一致,都是 NT 耕作方式最高,其次是 NTSS、NTS 和 TIS,传统耕作方式 T 最低。

2.3.3 胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 一天中,随着光合作用的进行,通过气体交换,胞间  $CO_2$  浓度逐渐升高,这将直接减少气孔的开张,降低气孔导度(本试验中  $G_s$  与  $C_i$  相关系数  $R = -0.496^{**}$ ),从而减少叶片水分散失<sup>[18]</sup>。保护性耕作方式中的秸秆覆盖不仅可以减少棵间蒸发,还能缓慢释放  $CO_2$ ,使植株间的  $CO_2$  浓度升高<sup>[19]</sup>,从而提高作物的水分利用效率。

2.3.4 与冬小麦叶片水平水分利用效率日变化相关的其它生理生态因素 冬小麦  $WUE_l$  日变化主要由  $P_n$  和  $T_r$  的日变化决定,但影响  $P_n$  和  $T_r$  日变化的除了叶水势和气孔导度外,还有其它生理生态因素。在生产实践中,重要的目标是达到节水增产、保护耕地,即较高  $WUE_l$  和高产、优良的耕作方式的统一。从表 3 中可以看出,叶片水平  $WUE_l$ 、 $P_n$  和  $T_r$  变化与叶水势 ( $\Psi_w$ )、气孔导度 ( $G_s$ ) 和胞间

$CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 等生理因素相关,同时与光合有效辐射(PAR)、叶室进口相对湿度(RHIn)、土壤温度 ( $T_s$ )、土壤含水量等生态因素也有关系。

PAR 对  $P_n$  的影响明显大于  $T_r$ ,因为,PAR 对  $P_n$  的作用是直接的,而对  $T_r$  则是间接的。PAR 是气孔运动的主要调节因素,它的增强引起气温 ( $T_a$ ) 和叶温 ( $T_l$ ) 提高,从而使气孔开放加速,同时提供能量,增加气孔导度 ( $G_s$ ),促进  $P_n$ 。

冬小麦叶片  $WUE_l$  与 RHIn 呈极显著正相关 ( $R = 0.494^{**}$ ),即  $WUE_l$  随 RHIn 增加明显提高,这与黄占斌<sup>[20]</sup>等的研究结果一致。从不同耕作方式下 RHIn 日平均值的方差分析中发现,4 种保护性耕作方式的 RHIn 均高于传统耕作方式 T,而且除 NTS 耕作方式外差异都达到极显著水平。这表明 RHIn 是冬小麦  $WUE_l$  变化的一个重要因素。

气孔导度 ( $G_s$ ) 与植物叶温 ( $T_l$ ) 密切相关,一般随温度的上升而增大。在  $30^\circ C$  左右气孔导度最大,超过  $30^\circ C$  或在低于  $10^\circ C$  的低温下,气孔部分张开或关闭<sup>[19]</sup>。叶温 ( $T_l$ ) 与土壤温度 ( $T_s$ ) 紧密相关,同步升高(表 4)。相关分析发现,叶片水平  $WUE_l$  与叶温 ( $T_l$ ) 呈紧密负相关 ( $R = -0.412^*$ );叶水势 ( $\Psi_w$ )、气孔导度 ( $G_s$ ) 和胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 也与不同层次的土壤温度呈显著负相关关系(表 4)。

事实上,  $T_l$  对  $P_n$  和  $T_r$  的影响性质、程度不同。光合作用是一个复杂的生化过程,它对温度有一个适宜范围要求;而蒸腾作用是一个水分运动与相态转换的物理过程,为了维持一定的  $T_l$ ,  $T_r$  会随

之发生相应的变化。相关分析中  $WUE_l$  与  $Tl$  负相关,有可能是  $P_n$  与  $T_r$  都随  $Tl$  的升高而增加,但  $T_r$  增大的强度大于  $P_n$ ;也可能是  $T_r$  随  $Tl$  的升高增大,而  $P_n$  却降低了。根据试验中全天叶温  $15.7 \sim 42.05^\circ\text{C}$  的范围以及  $P_n$ 、 $T_r$  的变化趋势来看,这两种可能是依次进行的。不同耕作方式造成的土壤温度差异是引起各耕作方式  $WUE_l$  差异的又一个重要原因。因此,在生产中凡采用能保持土壤温度、降低叶温日差值的耕作措施,都能有效地提高作物水平的  $WUE_l$ 。

表 4 各生理生态因素与土壤温度相关分析

Table 4 Correlative coefficient among physio-ecological factors soil temperature

项目 Items	$\Psi_w$	$G_s$	$C_i$	$Tl$
$T_s$ 0 cm	-0.397**	-0.634**	-0.421*	0.605**
$T_s$ 5 cm	-0.638**	-0.619**	-0.664**	0.796**
$T_s$ 10 cm	-0.707**	-0.646**	-0.736**	0.750**
$T_s$ 15 cm	-0.592**	-0.553**	-0.516**	0.606**
$T_s$ 20 cm	-0.734**	-0.562**	-0.706**	0.580**
$T_s$ 25 cm	-0.478**	-0.575**	-0.444*	0.307

叶片蒸腾速率直接影响着叶片水分状况,蒸腾速率大,则叶片水分含量降低。叶片含水量、叶片相对含水量是反映叶片水分容纳程度的重要指标。叶片含水量与相应耕作方式 0~10 cm 土壤含水量相关性最显著,而对叶片相对含水量影响最大的是 20~30 cm 土壤含水量(表 5)。

表 5 叶片含水量、叶片相对含水量与土壤含水量相关分析  
Table 5 Correlative coefficient among leaf moisture content and leaf relative moisture content and soil moisture content

项目 Items	叶片含水量 Water content of leaf	叶片相对含水量 Relative water content of leaf
叶片相对含水量 Relative water content of leaf	0.748**	—
土壤含水量 0~10 cm Soil water content	-0.960**	-0.615**
土壤含水量 10~20 cm Soil water content	-0.588**	-0.546**
土壤含水量 20~30 cm Soil water content	-0.601**	-0.815**

### 3 结 论

本试验通过对抽穗期不同耕作方式下冬小麦  $WUE_l$  以及与之日变化相关的生理生态因素的相

关分析和方差分析,发现不同耕作方式间叶片水平水分利用效率有明显差异。

1) 耕作方式对  $T_r$  的影响程度大于  $P_n$ ,造成耕作方式间  $WUE_l$  差异的是  $T_r$ ;保护性耕作措施能增加作物的有效蒸腾,从而提高相应的光合速率;保护性耕作方式中的秸秆覆盖使植株间的  $\text{CO}_2$  浓度升高,从而提高作物的水分利用效率;NTSS 和 T 耕作方式的叶片水平水分利用效率在 11:00~13:00 的高峰区有可能就是  $P_n$  和  $T_r$  达到优化组合的一种状态;采取喷施抗蒸腾剂等措施将有助于提高保护性耕作方式的叶片水平水分利用效率。

2) RHin 是冬小麦  $WUE_l$  变化的一个重要因素,在生产实践中采用各种提高 RHin 的生产措施,如通过农田防护林网降低风速、实施喷灌,以及少免耕、秸秆还田、立茬等的保护性耕作方式,都能有效提高作物叶片水平  $WUE_l$ ;土壤温度差异是引起各耕作方式  $WUE_l$  差异的又一个重要原因,立茬、秸秆覆盖等保护性耕作措施能保持土壤温度、降低叶温日差值,有效提高作物水平的  $WUE_l$ 。

### 参 考 文 献:

- [1] 上官周平,周 维.栽培条件对冬小麦叶片水分利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,1998,4(3):231-236.
- [2] 魏爱丽,王志敏.小麦叶片日光合高值持续时间基因型差异的初步研究[J].西北植物学报,2004,24(8):1493-1496.
- [3] Bierhuizen J F, Slatyer R O. Effect of atmospheric concentration of water vapour and  $\text{CO}_2$  in determining transpiration-photosynthesis relationships of cotton leaves[J]. Agric Meteorology, 1965, (2):259-270.
- [4] Fischer R A, Turner N C. Plant productivity in the arid and semi-arid zones [J]. Ann. Rev. Plant Physiol, 1978, 29: 277-317.
- [5] 黄 明,李友军,吴金芝.保持耕作对小麦生长发育、产量及水分利用的影响[J].河南科技大学学报(自然科学版),2005,26(2):73-75.
- [6] 吴崇友,金诚谦,魏佩敏,等.保护性耕作的本质与发展前景[J].中国农机化,2003,(6):8-11.
- [7] Gao Zhiqiann, Yin Jun. Effects of Tillage and Mulch Methods on Soil Moisture in Wheat fields of Loess Plateau, Chinas[J]. Pedosphere, 1999, 9(2): 161-168.
- [8] 王树楼,丁玉川,王 筋.旱地玉米免耕秸秆半覆盖耕作技术研究[J].耕作与栽培,1994,14(4):11-14.
- [9] 付增光,杜世平,廖允成.渭北留茬深松膜侧沟播耕作技术体系研究[J].干旱地区农业研究,2003,21(2):12-16.
- [10] 赵印英,王瑞芬,刘 威,等.麦秸秆覆盖节水增产机理探讨[J].山西水利科技,1998,15(3):33-34.
- [11] 姚生勤.麦秸覆盖冬小麦节水增产效果分析[J].山西水利科技,2002,(2):78-80.
- [12] 贡小虎.武威市灌区春小麦灌溉制度调查分析[J].甘肃农业

- 科技, 1995, (2): 7-9.
- [13] 徐士蕊. 武威市凉州区水资源利用现状及近期展望[J]. 甘肃水利水电技术, 2005, 41(1): 47-48.
- [14] Kramer P J. Water Relations of Plant [M]. New York: Academic Press, 1978. 291-413.
- [15] Dennis D. Baldocchi, Shashi B. Verma and Norman J. Water use efficiency in a soybean field; influence of plant water stress [J]. Agric. For. Meteorol., 1985, 34: 53-65.
- [16] Cowan IR. Stomata behavior and environment [J]. Adv Bot Res., 1988, 4: 117-228.
- [17] 黄明斌, 邵明安. 冬小麦叶水势-蒸腾速率关系的滞后效应 [J]. 科学通讯, 1996, 40(12): 1137-1139.
- [18] Dugal A, Yelle S, Glosselin A. Influence of CO<sub>2</sub> enrichment and its method of distribution on the evolution of gas exchange in greenhouse tomatoes [J]. Canadian Journal of plant Science, 1990, 70: 345-356.
- [19] 王 忠. 植物生理学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 181, 70.
- [20] 黄占斌, 山 仑. 春小麦水分利用效率日变化及其生理生态基础的研究 [J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 263-269.

## Effects of different tillage on leaf water use efficiency of winter wheat

WANG Li-li<sup>1</sup>, HUANG Gao-bao<sup>1</sup>, GUO Qing-yi<sup>1</sup>, HOU Hui-zhi<sup>2</sup>, ZHU Yong-yong<sup>1</sup>, QIAO Hai-jun<sup>3</sup>

(1. Faculty of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Faculty of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** The study on flag leaf water use efficiency and the physio-ecological factors were conducted at the heading stage of winter wheat under traditional tillage and four kinds of conservation tillage in Hexi irrigation area. The way that not only increased crop yield but also protected field land of winter wheat was discovered by the experiment. The results showed that the change range of water use efficiency (*WUE*) of winter wheat could be decreased by conventional tillage with straw incorporating (TIS), no-tillage (NT) and no-tillage with straw cover (NTS), but increased by no-tillage with stubble standing (NTSS). The diurnal photosynthetic capacity of NT, NTS and TIS were higher than that of T significantly. But their diurnal leaf water use efficiency and diurnal average leaf water use efficiency were lower than that of T because of their higher diurnal transpiration capacity. *WUE* at leaf level of NTSS and T reached to the highest point at 11:00~13:00. It may be because *Pn* and *Tr* were at their best optimized combination state. The evaporation of soil would be decreased and CO<sub>2</sub> concentration increased by NTS. While the leaf water use efficiency could be increased. The relative humidity (%) at the inlet of the analyzer (RH<sub>in</sub>) was very important for diurnal leaf water use efficiency of winter wheat. It could decrease transpiration rate and increase the leaf water use efficiency through keeping soil temperature, increasing RH<sub>in</sub> and CO<sub>2</sub> concentration, decreasing leaf water potential ( $\Psi_w$ ) and leaf temperature (*Tl*) and adjusting stomatal conductance (*Gs*). If we want to enhance the leaf *WUE*, we should take efficient measures to increase RH<sub>in</sub> in practice in future.

**Key words:** leaf water use efficiency; diurnal photosynthetic capacity; diurnal transpiration capacity; diurnal water use efficiency