文章编号:1000-7601(2016)05-0120-09

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2016.05.19

气象因子对黄土高原间套作豌豆和 春小麦叶片水势的影响

王彩斌¹,王克鹏²,王彦武²

(1.甘肃省白银市农业技术服务中心,甘肃白银 730900; 2.甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃兰州 730070)

摘 要:在甘肃省农业科学院会宁农业试验站,对春小麦和豌豆间套作模式下,不同气象因子对春小麦和豌豆叶水势的影响进行了田间对比观测。结果表明:在半干旱地区,春小麦和豌豆的叶水势与气象因子的关系在不同生育期的表达式不同,与大气温度呈线性关系,与太阳辐射、大气相对湿度、大气水势均呈二次方程模型,与综合气象因子也呈良好的线性关系。不同气象因子对作物叶水势影响的通径分析表明,影响春小麦叶水势日变化作用最强的气象因子是大气水势,其次是大气相对湿度、大气温度和太阳辐射。大气相对湿度、大气温度和太阳辐射对春小麦叶水势日变化的直接影响小于它们通过大气水势的间接影响。对豌豆叶水势日变化直接影响最大的气象因子是大气温度,其次是大气水势、太阳辐射和大气相对湿度。大气水势、太阳辐射和大气相对湿度的直接通径系数均小于各自通过大气温度的间接通径系数,这三者对豌豆叶水势日变化的直接影响小于它们通过大气温度的间接影响。

关键词:半干旱地区;气象因子;叶水势 中图分类号: S344.3 **文献标志码:** A

Effects of meteorological factors on leaf water potential of spring wheat and field pea in Loess Plateau

WANG Cai-bin¹, WANG Keng-peng², WANG Yan-wu²

(1. Gansu Baiyin Center of Agricultural Technology Extension, Baiyin, Gansu 730900, China;
2. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effects of meteorological factors on the leaf water potential (Ψ_L) of spring wheat and field pea in Loess Plateau. The results showed that the relationship between leaf water potential and four meteorological factors changed with the growth stages of spring wheat and field pea. Leaf water potential exhibited a linear relationship with air temperature (T_a) and a quadratic relationship with solar radiation (R), air relative humidity (RH_a) and air water potential (Ψ_a) . A good linear relationship was observed between leaf water potential and the integrated meteorological factors. Among the four meteorological factors, air water potential had the strongest effect on the leaf water potential of spring wheat, followed by air relative humidity, air temperature and then solar radiation. The direct path coefficients of air relative humidity, air temperature and R were smaller than their respective indirect path coefficients via air water potential, indicating that the direct effects of these three factors on diurnal variations in the leaf water potential of spring wheat were less than their respective indirect effects via air water potential. A highly significant correlation between air temperature and spring wheat leaf water potential was found, indicating a minor direct effect on leaf water potential. Airtemperature was not the primary cause for diurnal variations in the leaf water potential of spring wheat but acted as the primary factor for variations in air water potential. Air temperature had the strongest direct effect on diurnal variations in the leaf water potential of field pea, followed by air water potential, solar radiation and then air relative humidity. Solar radiation and air relative humidity were both smaller than their respective indirect path coefficients via air temperature, indicating that the direct effects of these three factors on diurnal variations in pea leaf water

收稿日期:2015-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(31360148)

作者简介:王彩斌(1964—),男,甘肃白银人,高级农艺师,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: wlf8769216@163.com。

potential were less than their indirect effects via air temperature.

Keywords: semi-arid region; meteorological factors; leaf water potential

近年来,国内外学者围绕间套作种植模式,尤其 是对豆科作物与禾本科作物的间套作种植模式进行 了深入的研究,对间套作种植条件下,作物对光、热 资源的竞争补偿,对水分、养分的吸收、利用及转移 进行了大量研究,为间套作种植模式的广泛应用奠 定了坚实的理论基础^[1]。刘素慧和马海燕等人研究 发现,长期连作种植会破坏土壤结构,降低土壤酶活 性,造成农田土壤的微生态环境严重失衡^[2-3]。张 凤云等人的研究表明,间套作能够促进植物根系对 农田水分的充分利用,有利于增加根层土壤的贮水 量,在不增加农田灌溉水的同时大幅度提高单位面 积产量,促进作物水分利用效率明显提高^[4]。苏本 营等人的研究发现,合理的间套作能够充分利用有 限资源,提升单位面积物质产出,同时还具有多重其 他生态效益,是一种基于生物多样性的可持续农业 发展范式[5]。安瞳昕等人的研究表明,甜玉米与不 同蔬菜间套作的总产量和总产值均高于蔬菜单作, 有利于提高农作物的经济效益^[6]。李隆等人的研究 表明,利用间套作农业生态工程种植技术可以充分 挖掘土壤累积态磷素,减少农田磷肥投入,对于维持 磷素资源和土壤肥力的可持续性,防控农田面源污 染,具有重要的现实意义^[7]。实行间套作可以充分 利用光能、土地面积、作物间的竞争与互补关系, 豌 豆和春小麦带状套作模式已成为西北干旱地区作物 种植的主要方式之一^[8]。叶水势是影响作物许多生 理过程的重要因素^[9],它的高低随环境因素的变化 而变化,并与产量密切相关^[10],是反映作物体内水 分亏缺最灵敏的生理指标[11]。干旱地区土壤水分 含量少,植物始终处于水分逆境中,因此植物水势的 变化可以反映植物适应干旱环境的能力[12],分析叶 水势与环境因素的关系对于建立环境因子与作物生 理指标的定量关系,模拟叶水势的动态变化具有重 要的作用^[13]。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,干旱地区气象因子对作物叶水势的影响研究 较少[14-15]。为此,本试验在田间条件下研究了中 国西北半干旱区豌豆和春小麦套作种植条件下,不 同气象因子对作物叶水势的影响,旨在为黄土高原 半干旱区的农业生产提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

试验于 2014 年在甘肃省农业科学院会宁农业

试验站进行。该区属于黄土高原半干旱区,平均海 拔2025 m,日照时数2476.6 h,年均气温9.71℃, ≥0℃积温3018.6℃,≥10℃积温2639.1℃,无霜期 161 d。年平均降水量340.0 mm,年蒸发量1800 mm,干燥度2.68,为西北半干旱雨养农业区。该区 土壤类型为黄绵土,土层深厚,质地均匀,贮水性能 良好。0~200 cm 土壤平均容重为1.28 g·cm⁻³,有 机质11.56 g·kg⁻¹,全氮0.71 g·kg⁻¹,全磷1.58 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用当地的传统耕作模式,设3次重复,小 区面积10m×20m,随机排列。供试作物为春小麦 和豌豆,其中春小麦品种为"甘春24号",播种量270 kg·hm⁻²,豌豆品种为"陇豌1号",该品种属早熟半 无叶型豌豆,生育期85~90d。株高55~65 cm,半 矮茎,直立生长,株蔓粗壮;有限结荚习性,双荚率达 75%以上,荚长7.0 cm,荚宽1.2 cm,不易裂荚;每荚 5~7粒,播种量260 kg·hm⁻²。小麦各试验区每年 播前基施农家肥45 000 kg·hm⁻²,施N100 kg·hm⁻², P₂O₅100 kg·hm⁻²(尿素+二铵);豌豆各试验区每年 播前基施农家肥35 000 kg·hm⁻²,N15 kg·hm⁻²,P₂O₅ 100 kg·hm⁻²(二铵+过磷酸钙),所有肥料都作为基 肥在播种时同时施入。春小麦于2014年3月15日 播种,8月10日收获;豌豆于2014年4月1日播种, 8月1日收获。

1.3 测定项目与方法

采用 PMS 压力室水势仪(Plant Moisture Stress, Corvallis, Oregon, USA)测定作物叶水势。在作物各 生育期选择一个晴朗天气进行观测,从 6:00~18:00 每隔 2 h 测定 1 次,其中小麦抽穗前测定部位为从 上往下第二片叶子,抽穗后(包括抽穗期)为旗 叶^[16];豌豆取上部完全展开叶片,每次在各小区随 机抽取 3~4个叶片,取均值代表该小区的叶水 势^[17]。在测定春小麦和豌豆开花期叶水势的同时, 对相应时刻的气象因子进行测定,用 Decagon Devices, Inc(Pullman, Washington, USA)生产的 Millivolt Input Data Logger TGPR – 1001 测定太阳辐射。

大气相对湿度采用干湿温度计在作物群体中上 部(群体高度 2/3 处)测定;大气温度采用干湿温度 计在作物群体以上 50 cm 处测定^[18];大气水势可由 水势的定义式用大气相对湿度计算^[19]:

 $\psi_a = (RT/V_W) \ln(RH) = 4.6248 \times 10^5 T \ln(RH) \vec{\Xi}$

中: ϕ_a 为大气水势(Pa); R为气体常数; T为空气绝 对温度; V_W 为水的偏摩尔体积; RH为大气相对湿 度。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 绘制图表,采用 spss 软件对数据进行差异显著性检验、相关分析、回归分析以及通径分析。

2 结果与分析

2.1 不同生育期春小麦和豌豆叶水势日变化

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(图 1,图 2),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 左 右降到最低,持续一段低谷期后逐渐回升,但是 18:00时的叶水势值均未恢复到早晨的水平。因为 清晨光照弱,气温低,空气湿度大,蒸腾耗水少,因而 作物的叶水势较高。随着光照增强,气温升高,蒸腾 作用增强,空气湿度下降,光合能力不断加强,生理 耗水增加造成植物体含水量下降,但植物需水量在 增加,叶水势呈下降趋势。在正午过后随光照强度 的减弱,气温降低,蒸腾速率减小,叶水势开始回升。



图 1 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 at different growth stages



图 2 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 at different growth stages under tillage practices

2.2 叶水势与大气温度的关系

2.2.1 不同生育期大气温度变化 由图 3 可以看出,春小麦和豌豆在不同生育期,大气温度的日变化趋势相似,整个生育期内白天的最高气温出现在 14:00—16:00。春小麦拔节和抽穗期的气温在 14:00达到最大值,开花和灌浆期气温在 16:00 达到最大值,并且开花和灌浆期的气温明显高于拔节和抽穗期。豌豆气温日变化大小排序为结荚鼓粒期 > 开花期 > 现蕾期,最高气温出现在 14:00—16:00。 2.2.2 大气温度对春小麦和豌豆叶水势的影响 根据春小麦和豌豆不同生育期内各试验区作物叶水势(Ψ_L , MPa)日变化与对应时间测定的气温 (T_a , \mathbb{C})日变化数据进行回归分析(表 1),结果表 明,各试验区春小麦和豌豆不同生育期的叶水势与 大气温度呈线性关系,并且极显著的负相关。

2.3 叶水势与太阳辐射的关系

太阳辐射既是一个重要的气象因子,同时又对 其它气象因子的变化产生较大的影响^[20]。

2.3.1 不同生育期大气温度变化 从图 4 可以看 出,春小麦和豌豆在不同生育期,晴天太阳辐射日变 化趋势呈现抛物状分布,在整个生育期内最大值出 现在 12:00—14:00,除春小麦拔节期外,在春小麦抽 穗期、开花期和灌浆期,豌豆现蕾期、开花期和结荚 鼓粒期的太阳辐射在绝大部分时刻都较为相近。春 小麦拔节期太阳辐射明显比其它生育期低。



图 3 春小麦和豌豆不同生育期大气温度的日变化

Fig.3 Daily dynamics of air temperature of spring wheat and field pea

表 1 不同耕作措施下作物叶水势(MPa)与气温(℃)的关系

Table 1 Relationships between leaf water potential (MPa) and air temperature ($^{\circ}C$) under different tillage practices

作物 Crops	生长期 Growing stage	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient
	拔节期 Jointing stage	$\Psi_L = -0.1038 T_a + 0.2756$	0.9711 * *
春小麦	抽穗期 Heading stage	$\Psi_L = -0.1027 T_a + 0.6010$	0.9398 * *
Spring wheat	开花期 Flowering stage	$\Psi_L = -0.0918 T_a + 0.5137$	0.9198 * *
	灌浆期 Filling stage	$\Psi_L = -0.0832 T_a + 0.0979$	0.8897 * *
	现蕾期 Squaring stage	$\Psi_L = -0.0601 T_a + 0.0989$	0.9618 * *
豌豆 Field nea	开花期 Flowering stage	$\Psi_L = -0.0526 T_a + 0.0351$	0.9607 * *
i icia pou	结荚期 Podding stage	$\Psi_L = -0.0501 T_a - 0.2087$	0.9636 * *



图 4 春小麦和豌豆不同生育期太阳辐射的日变化



2.3.2 太阳辐射对春小麦和豌豆叶水势的影响 对各试验区,春小麦和豌豆不同生育期的作物叶水 势(Ψ_L, MPa)日变化与对应时间测定的太阳辐射 (*R*,W·m⁻²)数据进行回归分析(表 2),结果表明,春 小麦和豌豆叶水势与太阳辐射形成一定程度的二次 方程关系,叶水势的变化相对于太阳辐射的变化有 滞后作用。在各试验区,春小麦拔节期和开花期,叶 水势与太阳辐射极显著相关,结荚鼓粒期的叶水势 与太阳辐射极显著相关。

2.4 叶水势与大气相对湿度的关系

2.4.1 不同生育期大气相对湿度变化 从图 5 可 以看出,春小麦不同生育期大气相对湿度的日变化 与气温的变化正好相反。在春小麦整个生育期内大 气相对湿度的最低值出现在 14:00—16:00;拔节期 和抽穗期相对湿度在 14:00 达到最低值;开花和灌 浆期在 16:00 达到最低值。各试验区不同生育期, 大气相对湿度的最低值大小依次为:抽穗期大气相 对湿度最高,其次是拔节和开花期,灌浆期最低。

表 2 不同耕作措施下作物叶水势(MPa)与太阳辐射(W·m⁻²)的关系

	· ·		÷ .
作物 Crops	生长期 Growing stage	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient
	拔节期 Jointing stage	$\Psi_L = 3.67 \times 10^{-6} R^2 - 0.0059 R - 0.8319$	0.9637 * *
春小麦	抽穗期 Heading stage	$\Psi_L = 2.48 \times 10^{-6} R^2 - 0.0067 R - 0.6361$	0.9541 * *
Spring wheat	开花期 Flowering stage	$\Psi_L = 4.51 \times 10^{-6} R^2 - 0.0060 R - 0.5411$	0.9499**
	灌浆期 Filling stage	$\Psi_L = 5.60 \times 10^{-6} R^2 - 0.0059 R - 0.9987$	0.8631
-)	现蕾期 Squaring stage	$\Psi_L = 2.12 \times 10^{-6} R^2 - 0.0038 R - 0.4103$	0.9015*
豌豆 Field pea	开花期 Flowering stage	$\Psi_L = 1.89 \times 10^{-6} R^2 - 0.0019 R - 0.3989$	0.9189*
	结荚期 Podding stage	$\Psi_{t} = 1.68 \times 10^{-6} R^{2} - 0.0035 R - 0.8721$	0.9596*









图 6 为豌豆不同生育期大气相对湿度的日变 化。在所有试验区,豌豆不同生育期大气相对湿度 的最低值出现在 14:00—16:00,现蕾和结荚鼓粒期 相对湿度在 14:00 达到最低值,而开花期在 16:00 达到最低值。不同生育期各试验区相对湿度的最低 值大小排序为结荚鼓粒期 > 开花期 > 现蕾期。



图 6 豌豆不同生育期大气相对湿度的日变化

Fig.6 Daily dynamics of air relative humidity of field pea

2.4.2 大气相对湿度对春小麦和豌豆叶水势的影 响 对试验区,春小麦和豌豆不同生育期的作物叶 水势(Ψ_L, MPa)和相应时间测定的作物群体内大气 相对湿度(*RH_a*,%)进行回归分析(表 3),结果表明, 在黄土高原传统耕作方式下,豌豆现蕾期的叶水势 与大气相对湿度相关,但未达到显著水平。在其他 生育时期,春小麦和豌豆的叶水势与大气相对湿度 均显著相关,并且在春小麦开花、灌浆期和豌豆开花 期,作物叶水势与大气相对湿度极显著相关。

2.5 叶水势与大气水势的关系

2.5.1 不同生育期大气水势变化 从图 7 可见,在 春小麦整个生育期内大气水势的最低值出现在 14:00—16:00,拔节和抽穗期相对湿度在 14:00 达 到最低值,而开花和灌浆期在 16:00 达到最低值。 不同生育期各试验区大气水势的最低值大小排序 为:抽穗期>拔节期>开花期>灌浆期。

从图 8 可以看出,豌豆不同生育期内大气水势 的最低值同样出现在 14:00—16:00,现蕾和结荚鼓 粒期大气水势在 14:00 达到最低值,开花期在 16:00 达到最低值,不同生育期各试验区的大气水势最低 值在结荚鼓粒期最高,开花期次之,现蕾期最低。另 外,因豌豆生长前期降雨量少,豌豆长势差,有较多 的裸露地面,群体大气水势较低,而在结荚鼓粒期之 前降雨较多,使得豌豆长势较好,密度增大,群体大 气水势较高。 Table 3

表 3 不同耕作措施下作物叶水势(MPa)与相对湿度(%)的关系

Relationships between leaf water potential and air relative humidity under different tillage practices

	•	-	÷ .
作物 Crops	生长期 Growing stage	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient
	拔节期 Jointing stage	$\Psi_L = 0.0007 RH_a^2 - 0.0281 RH_a - 1.6010$	0.9009*
春小麦	抽穗期 Heading stage	$\Psi_L = 0.0009 RH_a^2 - 0.1017 RH_a + 0.5038$	0.9407*
Spring wheat	开花期 Flowering stage	$\Psi_L = 0.0005 RH_a^2 - 0.0457 RH_a - 1.6510$	0.9701 * *
	灌浆期 Filling stage	$\Psi_L = 0.0008 RH_a^2 - 0.05010 RH_a - 1.7890$	0.9808 * *
	现蕾期 Squaring stage	$\Psi_L = 0.003 RH_a^2 - 0.0066 RH_a - 1.4975$	0.8597
豌豆 Field pea	开花期 Flowering stage	$\Psi_L = 0.0004 RH_a^2 - 0.0189 RH_a - 1.2190$	0.9753 * *
i iciu pea	结荚期 Podding stage	$\Psi_I = 0.0003 RH_a^2 - 0.0118 RH_a - 1.5997$	0.9610 * *



图 7 春小麦不同生育期大气水势的日变化





图 8 豌豆不同生育期大气水势的日变化

Fig. 8 Daily dynamics of air water potential of field pea

2.5.2 大气水势对春小麦和豌豆叶水势的影响 表4结果表明,春小麦和豌豆各试验区的叶水势与 大气水势之间呈二次方程关系,在春小麦开花、灌浆 期和豌豆开花结荚鼓粒期,各试验区的叶水势均与 大气水势显著相关,大气水势也是影响作物叶水势 的主要因素之一。

2.6 叶水势与不同气象因子之间的综合关系及通 径分析

气象因子是影响植物叶水势日变化规律的重要 因素。植物叶水势在一天的变化中呈现先减小后增 大的总体趋势,这种变化规律与大气温度、太阳辐 射、大气相对湿度和大气水势的日变化密切相关。 运用多元线性逐步回归分析方法,重点分析不同生 育期,春小麦和豌豆叶水势与大气温度(T_a)、太阳 辐射(R)、大气相对湿度(RH_a)和大气水势(Ψ_a)4 个气象因子之间的回归关系,回归关系见表5所示。

从表 5,春小麦与大气温度(T_a)、太阳辐射 (R)、大气相对湿度(RH_a)和大气水势(Ψ_a)4个气 象因子之间的回归关系可以看出,春小麦拔节期太 阳辐射对叶水势没有显著效应;开花期大气相对湿 度对试验区的叶水势没有显著效应。在春小麦其他 各个生长时期,叶水势均与4个气象因子显著相关。 豌豆叶水势与大气温度(T_a)、太阳辐射(R)、大气相 对湿度(RH_a)和大气水势(Ψ_a)4个气象因子之间的 回归关系可以看出,除豌豆现蕾期,大气水势对试验 区的豌豆叶水势没有显著影响外,其余生长时期,豌 豆叶水势与4个气象因子均显著相关。表明大气温 度、太阳辐射、大气相对湿度和大气水势是该地区作物叶水势日变化的主要影响因子。

Table 4 Relationships between leaf water potential (MPa) and air water potential (MPa) under different tillage practices

作物 Crops	生长期 Growing stage	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient
	拔节期 Jointing stage	$\Psi_L = 6.87 \times 10^{-5} \Psi_a^2 + 0.0338 \Psi_a - 0.5361$	0.8799*
春小麦 Spring wheat	抽穗期 Heading stage	$\Psi_L = 2.51 \times 10^{-4} \Psi_a^2 + 0.0711 \Psi_a - 0.0367$	0.9208*
	开花期 Flowering stage	$\Psi_L = 1.25 \times 10^{-4} \Psi_a^2 + 0.0315 \Psi_a - 0.3008$	0.9612 * *
	灌浆期 Filling stage	$\Psi_L = 8.57 \times 10^{-5} \Psi_a^2 + 0.0356 \Psi_a - 0.4306$	0.9131*
豌豆 Field pea	现蕾期 Squaring stage	$\Psi_L = 4.01 \times 10^{-5} \Psi_a^2 + 0.0127 \Psi_a - 0.3105$	0.9389*
	开花期 Flowering stage	$\Psi_L = 6.29 \times 10^{-5} \Psi_a^2 + 0.0213 \Psi_a - 0.2987$	0.9701 * *
	结荚期 Podding stage	$\Psi_L = 6.48 \times 10^{-5} \Psi_a^2 + 0.0210 \Psi^a - 0.6108$	0.9602 * *

表 5 不同耕作措施下作物叶水势(MPa)与气象因子的回归关系

Table 5 Correlation analysis between leaf water potential of (MPa) and metrological factors

at different growing stages and under various tillage practices

作物 Crops	生长期 Growing stage	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	自由度 F value	显著水平 Significant level
	拔节期 Jointing stage	$\Psi_L = -0.1302 T_a + 0.0189 RH_a - 0.0106 \Psi_a - 1.2001$	0.9789	21.3017	0.0159
春小麦	抽穗期 Heading stage	$\Psi_L = -0.0217 T_a - 0.0011 R + 0.0679 RH_a - 0.0262 \Psi_a - 6.9012$	0.9797	21.2841	0.0463
Spring wheat	开花期 Flowering stage	$\Psi_L = -0.2295 T_a - 0.0001 R - 0.0091 \Psi_a + 2.2732$	0.9980	181.9002	0.0008
	灌浆期 Filling stage	$\Psi_L = -0.3589 T_a - 0.0016 R + 0.0087 RH_a - 0.0190 \Psi_a + 5.0178$	0.9930	33.8913	0.0289
豌豆	现蕾期 Squaring stage	$\Psi_L = -0.18016T_a - 0.0005R - 0.0510RH_a + 4.9751$	0.9857	26.3652	0.0121
Field	开花期 Flowering stage	$\Psi_L = -0.0363 T_a - 0.0006 R + 0.0258 RH_a - 0.0099 \Psi_a - 2.6016$	0.9894	21.3317	0.04610
pea	结荚期 Podding stage	$\Psi_L = -0.05987 T_a - 0.0007 R + 0.0040 R H_a - 0.0067 \Psi_a - 0.4193$	0.9971	77.2981	0.0137

为了探讨气象因子对作物叶水势影响的综合效 应,对春小麦和豌豆不同生育期各试验区,各时间点 测定的平均叶水势与对应时间测定的气象因子进行 多元线性回归分析。

春小麦不同生育期内叶水势与气象因子的回归 方程为:

 $\Psi_L = -0.08156T_a - 0.0004R + 0.04138RH_a - 0.0167\Psi_a - 2.9865, F 检验表明,此回归模型可信度$ $达到 97.01% (<math>R^2 = 94.06, P < 0.01$),说明春小麦叶 水势日变化的变异平方和有 94.06%是由气象因子 的日变化造成的。变量与自变量的相关性达到极显 著水平,说明它们与叶水势之间的回归关系真实可 靠,是影响春小麦叶水势的主要影响因子。

豌豆不同生育期内叶水势与气象因子的回归方 程为:

 $\Psi_L = -0.0653 T_a - 0.0003 R + 0.0019 RH_a - 0.0065 \Psi_a - 0.0081, F 检验表明,此回归模型可信度$ $达到 98.15% (<math>R^2 = 95.85, P < 0.01$),说明豌豆叶水 势日变化的变异平方和有 95.85% 是由气象因子的 日变化造成的。变量与自变量的相关性达到极显著 水平,说明它们与叶水势之间的回归关系真实可靠, 是影响豌豆叶水势的主要影响因子。

采用通径分析能有效而直观地表示相关变量对 结果的直接效应和间接效应^[21]。4个气象因子对作 物叶水势影响的通径分析表明(表 6),大气水势是 影响春小麦叶水势日变化作用最大的气象因子,其 直接通径系数(-1.3021)最大,其次是大气相对湿 度、大气温度和太阳辐射。大气相对湿度、大气温度 和太阳辐射的直接通径系数均小于各自通过大气水 势的间接通径系数,表明这三者对春小麦叶水势日 变化的直接影响小于它们通过大气水势的间接影 响。由此可见,大气水势在春小麦叶水势日变化中 起主要作用,虽然大气温度与春小麦叶水势极显著 相关,但通径分析结果表明,大气温度的直接通径系 数(-0.8395)较小,说明其对叶水势影响的直接作 用较小,不是叶水势日变化的主要原因,而是引起大 气水势变化的主要因素。

作物 Crop	气象因子 Metrological factor	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect			
			$T_a \rightarrow \Psi_L$	$R \rightarrow \Psi_L$	$RH_a \rightarrow \Psi_L$	$\Psi_a \rightarrow \Psi_L$
	T_a	- 0.8395		-0.1207	- 1.1496	1.1903
春小麦 Spring wheat	R	-0.1558	- 0.6466		- 0.8901	0.8875
	RH_a	1.2662	0.7669	0.11004		- 1.2795
	$arPsi_a$	- 1.3021	0.7698	0.1057	1.2445	
豌豆 Field pea	T_a	- 1.1570		- 0.1539	- 0.1001	0.4497
	R	- 0.2003	- 0.9125		- 0.0826	0.4117
	RH_a	0.1050	1.0127	0.1530		-0.5289
	$oldsymbol{\Psi}_{a}$	-0.5333	0.9768	0.1511	0.1040	

表 6 不同耕作措施下作物叶水势与气象因子的通径系数

Table 6 Path coefficients between leaf water potential of crops and metrological factors under different tillage practices

同样由表6可以看出,对豌豆叶水势日变化直接影响最大的气象因子是大气温度,其直接通径系数(-1.1570)最大,其次是大气水势、太阳辐射和大气相对湿度。大气水势、太阳辐射和大气相对湿度的直接通径系数均小于各自通过大气温度的间接通径系数,表明这三者对豌豆叶水势日变化的直接影响小于它们通过大气温度的间接影响,由此可见,大气温度在豌豆叶水势日变化中起主要作用。

3 讨 论

叶水势的日变化是植物蒸腾作用消耗水分的速 率和根系的水分供应能力之间的差异造成的,气象 因子会通过影响植物的蒸腾作用而影响植物水势的 变化^[22]。一般来说,当植物受到干旱胁迫时,它们 首先通过保持水分吸收和减少水丧失来维持体内的 水分平衡[22-23]。在土壤 - 植物 - 大气连续体中, 作为中间环节的植物,其水势无疑受土壤和大气的 双重影响,因此从十壤和大气两方面着手,分析环境 因素对植物水势的影响,可以了解植物适应环境的 生理变化特征。本试验的研究结果表明,植物叶水 势与大气温度、太阳辐射、大气相对湿度及大气水势 具有显著的相关关系,这与胡守忠等^[24]的研究结果 一致,叶水势日变化的主要气象因子因作物不同而 有所差异。一般来说,当植物受到干旱胁迫时,它们 首先通过保持水分吸收和减少水丧失来维持体内的 水分平衡[22],通过渗透调节和细胞壁的弹性变化来 保持一定的膨压,以提供植物在干旱条件下继续生 长的物质力量^[25]。由于植物的生态生理学特性不 仅受到植物本身遗传因素的控制^[26],也受到外界自 然环境条件的影响[27],而且在植物的发育阶段或生 长季节里,其表现出来的水分生理特性也不尽相 同^[28]。本文虽然建立了春小麦和豌豆叶水势与气 象因子的关系,但是在旱作情况下,叶水势与测定时 的土壤水分条件关系很大,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,又由于作物叶 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,要全面、正确地认识植物的水分 生理、生态生理学特性及机理还需要做大量的工作。

4 结 论

 在半干旱地区,春小麦和豌豆的叶水势与大 气温度呈线性关系,与太阳辐射、大气相对湿度、大 气水势均呈二次方程模型,与综合气象因子也呈良 好的线性关系。

 2)春小麦和豌豆的叶水势与大气温度、太阳辐射、大气相对湿度、大气水势均有显著的相关关系。 影响春小麦和豌豆叶水势日变化最强的气象因子分 别是大气水势和大气温度。

大气水势、太阳辐射和大气相对湿度对豌豆
叶水势日变化的直接影响小于它们通过大气温度的
间接影响。

4) 春小麦和豌豆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,大约在 12:00—14:00 之间达到最低,随后逐渐回升,在 18:00左右,叶水势值约恢复到早晨9:00 的水平。

参考文献:

- [1] Peng X B, Zhang Y Y, Cai J, et al. Photosynthesis, growth and yield of soybean and maize in a tree-based agro forestry intercropping system on the Loess Plateau[J]. Agro forestry Systems, 2009, 76:569-577.
- [2] 刘素慧,刘世琦,张自坤.大蒜连作对其根际土壤微生物和酶活性的影响[J].中国农业科学,2010,43(5):1000-1006.
- [3] 马海燕,徐 瑾,郑成秋,等.非洲菊连作对土壤理化性状的影响[J].中国农业科学,2011,44(8):3733-3742.
- [4] 张凤云,吴普特,赵西宁,等.间套作提高农田水分利用效率的

节水机理[J].应用生态学报,2012,23(5):1400-1406.

- [5] 苏本营,陈圣宾,李永庚,等.间套作种植提升农田生态系统服 务功能[J].生态学报,2013,33(14):4505-4514.
- [6] 安瞳昕,吴伯志,代 平,等.甜玉米蔬菜间套复种模式产值效 益研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(1):42-47.
- [7] 夏海勇,李 隆,张 正.间套作体系土壤磷素吸收优势和机理 研究进展[J].中国土壤与肥料,2015,10(1);1-6.
- [8] 张洁莹,宁堂原,冯宇鹏,等.套作糯玉米对连作菜地土壤特性 及产量的影响[J].中国农业科学,2013,46(10):1994-2003.
- [9] Jongdee B, Fukai S, Cooper M. Leaf water potential and osmotic adjustment as physiological traits to improve drought tolerance in rice[J]. Field Crops Research, 2002,76:153-163.
- [10] 高 鹭,胡春胜,陈素英.喷灌条件下不同灌水处理冬小麦的 叶水势特征[J].土壤,2005,37(4):410-414.
- [11] Dominik Kopec, Dorota Michalska Hejduk, Ewa Krogulec. The relationship between vegetation and groundwater levels as an indicator of spontaneous wetland restoration [J]. Ecological Engineering, 2013, 57:242-251.
- [12] Rimes D W, Yamada H, Hughes S W. Climate-normalized cotton leaf water potentials for irrigation scheduling[J]. Agricultural Water Management, 1987, 12:293-304.
- [13] Mahmoud Raeini Sarjaz, Vida Chalavi. Pulvinus activity, leaf movement and leaf water-use efficiency of bush bean (Phaseplus vulgaris L.) in a hot environment[J]. International Journal of Biometeorology, 2008,52(8):815-822.
- [14] 佟长福,郭克贞,史海滨,等.薛铸环境因素对紫花苜蓿叶水势 与蒸腾速率影响的初步研究[J].农业工程学报,2005,21(12): 152-155.
- [15] 张 鸣,张仁陟,蔡立群.不同耕作措施下春小麦和豌豆叶水 势变化及其与环境因子的关系[J].应用生态学报,2008,19 (7):1467-1474.
- [16] Wen Yuan Kao, Bai Ling Lin. Phototropic leaf movements and photosynthetic performance in an amphibious fern, Marsilea quadrifolia[J]. Journal of Plant Research, 2010,123(5):645-653.
- [17] Santos M G, Ribeiro R V, Machado E C, et al. Photosynthetic parameters and leaf water potential of five common bean genotypes under

mild water deficit [J]. Biologia Plantarum, 2009, 53(2): 229-236.

- [18] Hatem Zgallal, Kathy Steppe. Effects of Different levels of water stress on leaf water potential, Stomatal Resistance, protein and chlorophyll content and certain anti-oxidative enzymes in tomato plants [J]. Journal of integrative plant biology, 2006,48(6):679-685.
- [19] 康绍忠,刘晓明,熊运章.土壤一植物一大气连续体水分传输 理论及其应用[M].北京:水利电力出版社,1994:53.
- [20] 曲 佳,须 晖,王 蕊,等.日光温室番茄群体太阳总辐射量的分布规律及其与光合作用的关系李天来[J].西北农林科技 大学学报,2011,39(6):178-184.
- [21] Wullschleger S D, Dixon M A, Oosterhuis D M. Field measurement of leaf water potential with a temperature-corrected in situ thermocouple psychomotor[J]. Plant Cell and Environment, 2006,11(3):199-203.
- [22] Mahmoud Raeini Sarjaz. Circadian rhythm leaf movement of Phaseolus vulgaris and the role of calcium ions[J]. Plant Signaling & Behavior, 2011,6(7):962-967.
- [23] Björn Fischer, Valeri Goldberg, Christian Bernhofer. Effect of a coupled soil water-plant gas exchange on forest energy fluxes: Simulations with the coupled vegetation-boundary layer model HIRVAC[J]. Ecological Modeling, 2008,214(2-4):75-82.
- [24] 胡守忠,乔冬梅,石海滨,等.盐泽化地区 SPAC 系统不同界面 能态研究[J].干旱区资源与环境,2006,20(5):177-182.
- [25] Guo Lan Liu, Han Wei Mei, Xin Qiao Yu, et al. Panicle water potential, a physiological trait to identify drought tolerance in rice [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2007,49(10):1464-1469.
- [26] Xunyan Wang, Wanjun Zhang, Xiuping Liu. Daily variation in transpiration rate and water potential of Robinia pseudoacacia[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2013,11(1):999-1005.
- [27] Lobna MNIF, Mohamed chaieb. Net photosynthesis and leaf water potential of buffel grass(*Cenchrus ciliaris* L.) accessions, growing in the arid zone of Tunisia[J]. Journal of Biological Research-Thessaloniki, 2010,14(1):231-238.
- [28] Qiang Yu, Shouhua Xu, Jing Wang, et al. Influence of leaf water potential on diurnal changes in CO₂ and water vapour fluxes [J]. Boundary, 2007, 124(2):161-181.