南疆地区棉花叶片水分利用效率的影响因素分析

徐连三[1],杨霄翼[1],刘延锋[1],贾瑞亮[2]
(1.中国地质大学环境学院,湖北 武汉 430074;2.新疆农业大学水利与土木工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘　要:在新疆巴音郭楞蒙古自治州水利管理处国家重点灌溉试验站,利用LCpro+全自动便携式光合仪对覆膜沟灌条件下的棉花光合作用进行系统监测,来分析南疆地区棉花叶片水分利用效率的影响因素,为提高棉花叶片水分利用效率提供科学依据。分析结果显示:棉花叶片水分利用效率的影响因素主要有棉叶温度、气孔导度及胞间CO_2浓度,其中气孔导度与棉叶水分利用效率呈显著正相关,而棉叶温度和胞间CO_2浓度与其呈显著负相关。因此,可通过降低棉叶温度,提高气孔导度,减小胞间CO_2浓度等措施来提高棉叶水分利用效率。

关键词:棉花叶片;水分利用效率;影响因素;南疆地区
中图分类号:S562;S311　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-7601(2012)06-0113-05

植物叶片水分利用效率是指叶片的光合速率与同时期的蒸腾速率之比[1],它可以揭示植物内在耗水机制,为植物合理供水提供科学依据,对极度缺水的干旱区植被恢复和保育十分有益[2]。我国干旱和半干旱地区面积分布广,约占国土面积的52.5%,每年因干旱胁迫带来的减产超过了其他逆境因子的总和[3],水分不足是制约干旱半干旱地区农业生产的主要因素,而提高水分利用效率是面对有限水供给时增加农作物产量的有效方法[4],也是实现缺水地区社会—经济—水资源协调持续发展的关键措施之一。

新疆是我国最大的商品棉生产基地,南疆是新疆棉花的主产区,约占全疆产量的70%[5]。南疆地区干旱少雨,水资源匮乏,提高棉花叶片水分利用效率,是保证和提高棉花产量的关键措施之一。很多学者已经对干旱地区棉花水分利用效率的影响因素进行过研究,涉及到的影响因素主要有土壤水分、土壤氮素含量、叶片温度、胞间CO_2浓度、空气CO_2浓度及光合有效辐射等[6-11],但主要集中于对水分利用效率影响因素的定性阐述或基于某单个因素对棉花水分利用的影响研究,缺少基于长期高时频监测数据的定量多因素综合分析。为了定量研究南疆地区棉花水分利用效率的关键影响因素及其影响程度,在新疆巴音郭楞蒙古自治州水利管理处国家重点灌溉试验站(以下简称巴州水管处重点灌溉试验站),利用LCpro+全自动便携式光合仪对棉花叶片光合作用进行了系统监测。

1　试验与方法

1.1　研究区概况

巴州水管处重点灌溉试验站位于天山南麓塔里木盆地边缘孔雀河冲积平原带上,东经86°10′,北纬41°35′附近,距尉犁县城30 km,交通方便。地形平缓,地面高程为895～903 m,总体趋势为北高南低。区内光热资源丰富,年均总日照时数3 036.2 h,年平均气温11.48℃,干燥少雨、蒸发强烈,年平均降水量53.3～62.7 mm,年平均蒸发量2 273～2 788 mm,蒸降比为43.6,无霜期平均210 d,主导风向东北风,属典型大陆性干旱气候[12]。

1.2　仪器设备

试验采用LCpro+全自动便携式光合仪测定棉花叶片光合速率(Photosynthetic Rate,*Pn*)、蒸腾速率(Transpiration Rate,*Tr*)、叶片温度(Leaf Temperature,T_L)、气孔导度(Stomatal conductance,*Gs*)、光合有效辐射(Photosynthestically Active Radiatio,PAR)和胞间CO_2浓度(Intercellular CO_2 concentration,*Ci*)等指标。其*Pn*测量范围为0～100 μmol/(m^2·s),*Tr*测量范围为0～100 mmol/(m^2·s),PAR测量范围0～3 000 μmol/(m^2·s),T_L测量范围为−5℃～50℃,*Gs*测量范围0～100 mol/(m^2·s),*Ci*测量范围0～2 000 mg/kg。

1.3　监测和分析方法

试验区内土壤岩性主要为砂壤土及砂土,以膜

收稿日期:2012-06-12
基金项目:国家自然科学基金(40802056);国家自然科学基金项目(51069016);新疆自治区水文学及水资源重点学科基金(xjswszyzdkk20101202)
作者简介:徐连三(1987—),男,湖北赤壁人,在读硕士,主要从事土壤水盐运移及植物水分生理过程研究。E-mail:xuliansan@sina.com。
* **通信作者**:刘延锋(1975—),男,山东莒县人,副教授,主要从事水资源评价和水盐运移模拟研究。E-mail:newmanliu@163.com。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下种植棉花，灌溉方式为膜间沟灌，棉花品种为新陆中21号。棉花于2010年4月29日播种，播种前施底肥，尿素、磷酸二铵、45%硫酸钾、腐植酸钾铵钙和农家肥分别为225、375、300、300、15 kg/hm^2。土壤阳离子以Na^+和Mg^{2+}为主，阴离子以SO_4^{2-}为主。

2010年7月12日至8月29日(棉花的花铃期)间对试验田内同一棉株主茎第2展开叶至第5展开叶原位进行系统监测，监测光源为太阳光，大气CO_2浓度为340～380 vpm(此处vpm表示1百万体积的空气中所含CO_2的体积数)，大气压约9.10×10^4 Pa，监测期内无大气降水现象，从起始日开始每隔4～5 d实施监测。其中于8月17日8:00～21:00进行了间隔为1 h的监测，日内监测频率8月17日前为2 h，8月17日以后于10:00和16:00左右各测1次。

利用相关分析和回归分析方法来定量分析棉叶*Pn*、*Tr*和*WUE*与其主要影响因素的关系及影响程度，相关计算利用SPSS 13.0完成。

2 结果与分析

2.1 *Pn*、*Tr*和*WUE*特征

对监测期内同株棉花主茎各展开叶生理指标变化特征进行统计分析(表1)，各生理指标值变化范围均较大，其中*Pn*的变化区间为1.21～23.5 μmol/(m^2·s)，各展开叶变幅在20.64～22.19 μmol/(m^2·s)，且第5展开叶的变幅最大；*Tr*变化区间在1.97～17.28 mmol/(m^2·s)，变幅13.65～14.8 mmol/(m^2·s)，以第5展开叶变幅为最大；棉叶*WUE*变幅为0.34～4.10 mmol/mol，变幅2.13～3.68 mmol/mol，各展开叶*WUE*变幅及均值呈自上至下依次减小的趋势。

2.2 棉叶*WUE*的影响因素

棉叶*WUE*即为棉叶*Pn*和*Tr*之比，由棉叶光合作用CO_2吸收同化与蒸腾作用水分散失两个生理过程控制，因而任何影响这两个过程的因素都会不同程度地影响*WUE*。

利用相关分析和回归分析定量分析棉叶生理指标(*Pn*、*Tr*和*WUE*)与其主要影响因素(T_L、*Gs*、*Ci*和*PAR*)的关系。分别计算*Pn*、*Tr*、棉叶*WUE*与T_L、*Gs*、*Ci*和*PAR*的线性相关系数(表2)，并建立棉花生理指标(*Pn*、*Tr*和*WUE*)与主要影响因素的线性回归模型(表3)。

2.2.1 叶面温度

T_L对单叶*WUE*的影响是因它对*Pn*和*Tr*的影响不同所致[13]。由表2及图1可看出，研究区内棉叶*Tr*随T_L升高而增大，二者呈极显著线性正相关，相关系数达到0.80；但棉叶*Pn*与T_L的关系并不显著，相关系数仅为0.12；导致棉叶*WUE*呈现随T_L升高而显著降低的趋势(图1)，二者呈极显著负线性相关，各指标与T_L的关系式如表3所示。可见T_L主要是通过影响棉叶*Tr*来改变棉叶*WUE*。

表1 花铃期棉叶*Pn*、*Tr*与*WUE*的特征值

Table 1 Statistical characteristic value of *Pn*, *Tr* and *WUE* of the cotton leaf during flowering and boll-setting period

棉花叶片 Cotton leaf	特征值 Characteristic value	*Pn* (μmol·m^{-2}·s^{-1})	*Tr* /(mmol·m^{-2}·s^{-1})	*WUE* /(mmol·mol^{-1})
第2展开叶 The second leaf	最小值 Minimum	1.64	2.71	0.42
	最大值 Maximum	22.70	17.28	4.10
	平均值 Average	14.25	8.47	1.81
第3展开叶 The third leaf	最小值 Minimum	2.86	2.96	0.79
	最大值 Maximum	23.50	16.61	3.67
	平均值 Average	15.00	9.29	1.70
第4展开叶 The fourth leaf	最小值 Minimum	2.04	2.11	0.43
	最大值 Maximum	23.17	16.54	2.90
	平均值 Average	12.41	9.05	1.40
第5展开叶 The fifth leaf	最小值 Minimum	1.21	1.97	0.34
	最大值 Maximum	23.4	16.77	2.47
	平均值 Average	10.69	9.23	1.18

表2 棉叶生理指标与其影响因素的相关分析

Table 2 Correlation coefficient between physiological indices and the influence factors

相关关系 Correlation	*WUE*	*Pn*	*Tr*
T_L	−0.62**	0.12	0.80**
Gs	0.36**	0.86**	0.58**
PAR	0.09	0.61**	0.58**
Ci	−0.24**	−0.68**	−0.55**

注：相关分析样本数为209，**指显著性水平$P=0.01$。

Note: The number of samples in correlative analysis is 209, and ** means correlation at the 0.01 level.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　棉叶生理指标与其影响因素的回归分析

Table 3　Regression analysis between physiological indices and the influence factors

影响因素 Influence factor	生理指标 Physiological index	*Pn*	*Tr*	*WUE*
T_L	模型 Model	$Pn=7.68+0.14T_L$	$Tr=-13.05+0.58T_L$	$WUE=4.76-0.09T_L$
	F 检验 *F* test	$F=3.17<F(1,209)=3.89$	$F=369.09>F(1,209)=3.89$	$F=129.68>F(1,209)=3.89$
Gs	模型 Model	$Pn=2.34+27.88Gs$	$Tr=4.47+11.72Gs$	$WUE=1.01+1.35Gs$
	F 检验 *F* test	$F=603.77>F(1,209)=3.89$	$F=107.06>F(1,209)=3.89$	$F=29.78>F(1,209)=3.89$
PAR	模型 Model	$Pn=5.56+0.007PAR$	$Tr=4.49+0.004PAR$	$WUE=1.40+0.0001PAR$
	F 检验 *F* test	$F=120.72>F(1,209)=3.89$	$F=106.23>F(1,209)=3.89$	$F=1.69<F(1,209)=3.89$
Ci	模型 Model	$Pn=44.83-0.13Ci$	$Tr=24.98-0.07Ci$	$WUE=2.86-0.005Ci$
	F 检验 *F* test	$F=176.41>F(1,209)=3.89$	$F=89.70>F(1,209)=3.89$	$F=12.80>F(1,209)=3.89$
逐步回归 Stepwise regression	模型 Model		$WUE=9.91-0.14T_L-0.02Ci+0.89Gs$	
	F 检验 *F* test		$F=391.69>F(3,209)=2.65$	

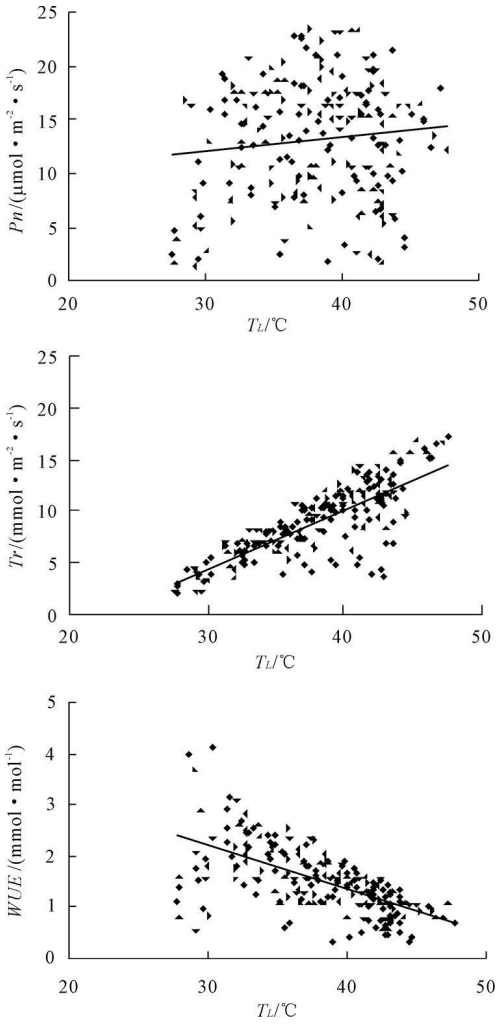

图 1　棉叶生理指标与叶面温度的相关关系

Fig. 1　Correlation coefficient between physiological indices with leaf temperature

2.2.2　气孔导度　气孔是植物叶片与外界进行物质交换的主要通道，*Gs* 反映了气孔张开程度，直接影响叶片对 CO_2 的吸收和水蒸气的逸散。通过表 2 显示，棉叶 *Pn* 和 *Tr* 与 *Gs* 均呈极显著正相关，相关系数分别为 0.86 和 0.58，二者有随 *Gs* 增大而增加的趋势(图 2)。对比二者回归方程系数值发现(表 3)，*Gs* 对 *Pn* 的影响显著大于 *Tr*，当 *Gs* 增大时，棉花叶肉细胞吸收更多的 CO_2，同时水蒸气透过气孔逸散量亦增加，而透过气孔失水量增加的程度要小于叶肉细胞吸收 CO_2 增加的程度，因此一定程度上提高了棉叶 *WUE*，也即棉叶 *WUE* 与 *Gs* 呈显著正相关(图 2)，相关系数为 0.36。

2.2.3　光合有效辐射　*PAR* 是太阳辐射中可以被绿色植物用来进行光合作用的能量，是植物生长所需的基本能源[14]。相关分析表明，*Pn* 和 *Tr* 都与 *PAR* 呈极显著正相关(表 2)，相关系数各为 0.61 和 0.58；由回归方程的系数可知(表 3)，*Pn* 对 *PAR* 变化稍显敏感，这主要是由于 *PAR* 对光合的影响是直接的，对蒸腾是间接的[15]，如图 3 所示，*PAR* 升高 *Pn* 增强，同时引起 T_L 上升提高 *Tr*，*Pn* 上升的幅度稍大于 *Tr* 上升的幅度，从而提高了棉叶 *WUE*，但变化不显著。

2.2.4　胞间 CO_2 浓度　植物进行光合作用的主要原料是 CO_2，*Ci* 是影响 *Pn* 的一个重要因素[16]。由表 2 及图 4 可以看出，棉叶 *Pn* 和 *Tr* 与 *Ci* 呈极显著负相关。*Ci* 越高说明细胞内 CO_2 未被利用量越多，气孔对 *Ci* 很敏感，其浓度的增大常伴随着气孔的关闭和 *Gs* 的降低[17]，*Gs* 降低导致棉叶 *Pn* 和 *Tr* 下降，对比表 3 中回归方程系数，*Ci* 对 *Pn* 的影响比对 *Tr* 的影响更大，因此，当 *Ci* 增加时，*Pn* 比 *Tr* 下降得更

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

快，从而导致棉叶 *WUE* 亦随着 *Ci* 的增大而降低。

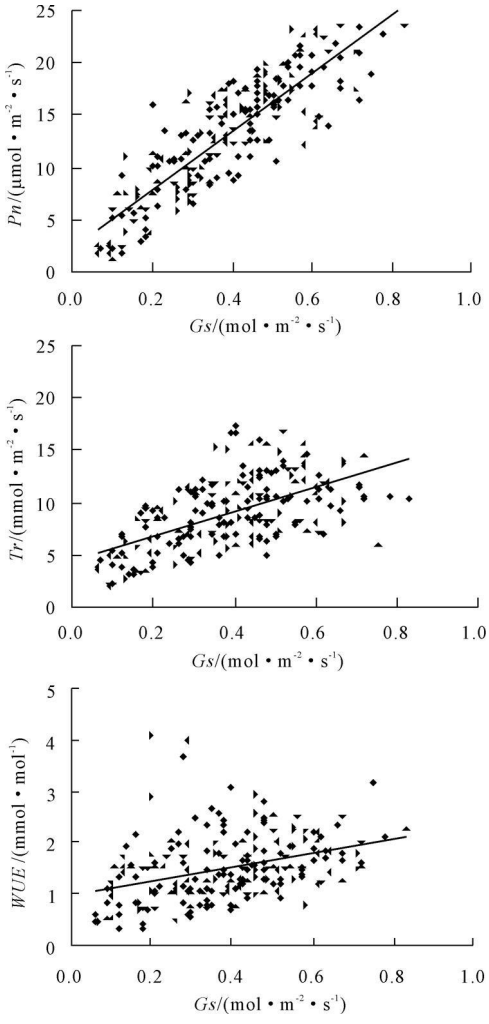

图2 棉叶生理指标与气孔导度的相关关系

Fig.2 Correlation coefficient between physiological indices with stomatal conductance

综上所述，棉叶 *Pn* 除与 T_L 相关性不显著外，与其它因素如 *Gs*、*PAR* 和 *Ci* 均呈极显著线性相关；棉叶 *Tr* 与以上四个因素均呈极显著线性相关；而棉叶 *WUE* 与 T_L、*Gs* 和 *Ci* 均呈不同程度显著线性相关，与 *PAR* 相关性不显著。

利用逐步回归分析，消除各因素之间相互影响可能造成的多重共线性问题，建立的最优回归模型(表3)，在上述四个影响因子中，T_L、*Ci* 与 *Gs* 对棉叶 *WUE* 的变化作用显著；*PAR* 虽与 *Pn* 和 *Tr* 极显著相关，但其对二者的影响程度相近，导致对棉叶 *WUE* 的影响不显著。

3 结论与讨论

南疆地区棉叶光合速率与棉叶气孔导度、光合有效辐射显著正相关，与胞间 CO_2 浓度呈显著负相关，而棉叶温度对棉叶光合速率的影响并不明显；棉叶蒸腾速率与棉叶温度、气孔导度、光合有效辐射呈显著正相关，与胞间 CO_2 浓度显著负相关。

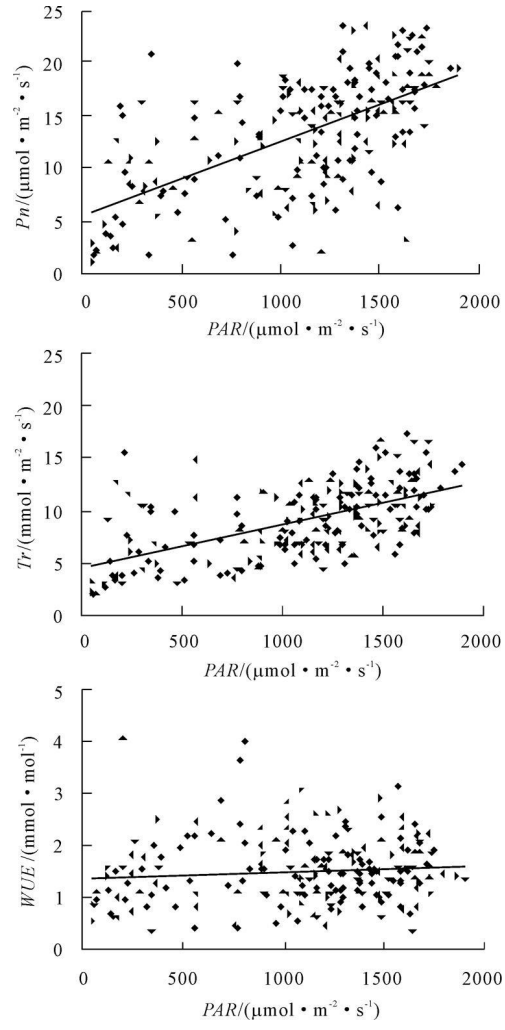

图3 棉叶生理指标与光合有效辐射的相关关系

Fig.3 Correlation coefficient between physiological indices with photosynthestically active radiation

各影响因素对棉叶水分利用效率的影响多是因其对棉叶光合速率及蒸腾速率的影响程度不同所致。南疆地区棉花叶片水分利用效率的主要影响因素有棉叶温度、气孔导度及胞间 CO_2 浓度，其中棉叶水分利用效率与叶片温度、胞间 CO_2 浓度呈显著负相关，而与气孔导度呈显著正相关。因此，可采取一定措施降低棉叶温度，减小胞间 CO_2 浓度，提高叶片气孔导度，最大限度地提升棉叶光合作用，控制棉叶蒸腾速率，来提高棉叶水分利用效率，保证和提高南疆地区棉花产量。因试验监测的数据限于棉花花铃期，且仅对单株棉花进行了监测，缺少不同植株的对比，此外各影响因素间可能存在内在联系，尚需进一步研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

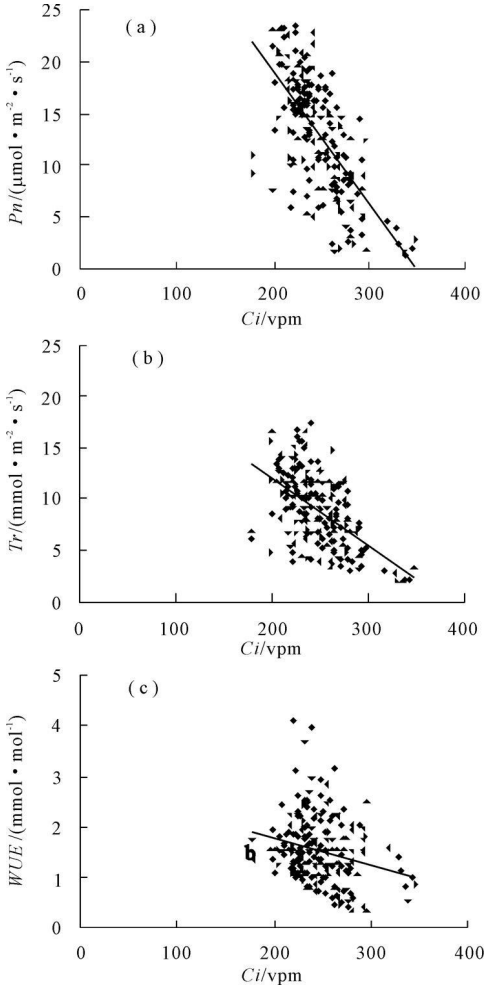

图 4　棉叶生理指标与胞间 CO_2 浓度的相关关系

Fig. 4　Correlation coefficient between physiological indices with intercellular CO_2 concentration

参 考 文 献:

[1] 张正斌,山　仑.作物水分利用效率和蒸发蒸腾估算模型的研究进展[J].干旱地区农业研究,1997,15(1):73-78.

[2] 曹生奎,冯　起,司建华,等.植物叶片水分利用效率研究综述[J].生态学报,2009,29(7):3882-3892.

[3] 刘芝芹,涂　璟.干旱地区植物水分利用效率研究进展[J].湖北林业研究,2009,163(3):36-39.

[4] Richards R A, Rebetzke G J, Condon A G, et al. Breeding opportunities for increasing the efficiency of water use and crop yield in temperate cereals[J]. Crop Science, 2002,42(1):111-121.

[5] 张新宇,刘勇杰.新陆中 36 号选育及推广[J].中国棉花,2011,38(5):29-30.

[6] 李少昆,马富裕,李蒙春,等.棉花叶片水分利用效率及其影响因素的研究[J].棉花学报,1997,9(4):314-317.

[7] 伍维模,董合林,王　萍,等.水分氮素及环境因子对南疆膜下滴灌棉花水分利用效率影响研究[J].新疆农业科学,2006,43(1):34-37.

[8] 马富裕,李蒙春,杨建荣,等.花铃期不同时段水分亏缺对棉花群体光合速率及水分利用效率影响的研究[J].中国农业科学,2002,35(12):1467-1472.

[9] 孙绘建,马富裕,刘　浩,等.花铃期水氮互作对膜下滴灌杂交棉花产量与水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):19-26.

[10] Swarthout D, Harper E, Judd S, et al. Measures of leaf-level water-use efficiency in drought stressed endophyte infected and non—infected tall fescue grasses[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009,66(1):88-93.

[11] XuY, This D, Roman C, et al. Leaf—level water use efficiency determined by carbon isotope discrimination in rice seedlings: genetic variation associated with population structure and QTL mapping[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2009,118(6):1065-1081.

[12] 杨鹏年,董新光,魏光辉,等.干旱区膜下滴灌下土壤积盐特征研究[J].土壤通报,2011,42(2):360-363.

[13] 张岁岐,山　仑.植物水分利用效率及其研究进展[J].干旱地区农业研究,2002,20(4):1-5.

[14] 姚济敏,高晓清,冯　起,等.额济纳地区苜蓿地光合有效辐射(PAR)的基本特征[J].高原气象,2005,24(5):772-776.

[15] 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.

[16] 张　娟,张正斌,谢惠民,等.小麦叶片水分利用效率及相关生理性状的关系研究[J].作物学报,2005,31(12):1593-1599.

[17] 王建林,于贵瑞,房全孝,等.不同植物叶片水分利用效率对光和 CO_2 的响应与模拟[J].生态学报,2008,28(2):525-533.

Influence factors to water use efficiency of cotton leaf in Southern Xinjiang

XU Lian-san[1], YANG Xiao-yi[1], LIU Yan-feng[1], JIA Rui-liang[2]

(1. *School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan* 43007, *China*;
2. *College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*)

Abstract: In order to search for the measures to promote the water use efficiency of cotton, some influence factors to the water use efficiency of cotton leaf was analyzed based on the photosynthesis data measured by LCpro+ portable automatic photosynthetic apparatus in an experimental field in Southern Xinjiang. The results showed that the water use efficiency of cotton leaf was mainly affected by the temperature of cotton leaf, stomatal conductance and intercellular CO_2 concentration. There was a significant positive correlation between water use efficiency of cotton leaf and stomatal conductance, but the water use efficiency of cotton leaf was negatively related to temperature of cotton leaf and intercellular CO_2 concentration. Hence, the water use efficiency of cotton leaf can be promoted by reducing the temperature of cotton leaf, the intercellular CO_2 concentration and increasing the stomatal conductance.

Keywords: cotton leaf; water use efficiency; influence factor; Southern Xinjiang

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net