

干旱和复水对膜下滴灌棉花根系及叶片内源激素含量的影响*

罗宏海¹ 韩焕勇² 张亚黎¹ 张旺锋^{1**}

(¹石河子大学农学院新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆石河子 832003; ²新疆农垦科学院棉花研究所, 新疆石河子 832003)

摘要 新疆气候生态条件下, 采用膜下滴灌技术, 在棉花不同生育时期设置不同程度干旱处理, 研究干旱和复水对棉花根系及叶片内源激素含量和叶片气孔导度的影响. 结果表明: 在不同生育阶段, 随土壤含水率的降低, 根系及叶片脱落酸(ABA)含量显著增加, 玉米素(ZRs)含量减少, 叶片气孔导度(g_s)和光合速率(P_n)显著降低, 以初花-盛花期土壤相对含水率为40%~45%处理降幅较大. 土壤干旱处理结束后复水, 根系及叶片ABA含量并未随土壤水分条件的改善而降低, 根系ZRs含量在复水后1~3 d均可恢复或超过对照, 与叶片 g_s 呈正相关, 其中以盛蕾-初花期土壤相对含水率为50%~55%处理棉株叶片ZRs含量和 g_s 恢复速度快、强度大. 说明干旱后复水根系较高的ZRs含量是导致其叶片 g_s 和 P_n 较高的主要原因.

关键词 干旱 内源激素 气孔导度 棉花 膜下滴灌

文章编号 1001-9332(2013)04-1009-08 **中图分类号** S275.6, S562 **文献标识码** A

Effects of drought and re-watering on endogenous hormone contents of cotton roots and leaves under drip irrigation with mulch. LUO Hong-hai¹, HAN Huan-yong², ZHANG Ya-li¹, ZHANG Wang-feng¹ (¹Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Construction Crops, College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, Xinjiang, China; ²Cotton Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832003, Xinjiang, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(4): 1009–1016.

Abstract: Under the climatic and ecological conditions of Xingjiang, Northwest China, different degrees of drought stress were installed during the growth stages of cotton, and the drip irrigation with mulch was adopted, aimed to study the effects of drought stress and re-watering on the endogenous hormones (abscisic acid, ABA; and zeatins, ZRs) contents of cotton roots and leaves and the stomatal conductance (g_s) of cotton leaves. With the increase of drought stress at different growth stages, the ABA contents of cotton roots and leaves increased, while the ZRs contents of cotton roots and leaves and the g_s and photosynthetic rate (P_n) of cotton leaves decreased, with greater decrements in the treatment of soil moisture content being 40%–45% of field capacity at early flowering–full flowering stage. After re-watering, the ABA contents of cotton roots and leaves did not have a decrease with the improvement of soil moisture regime, while the ZRs contents of cotton roots recovered rapidly or exceeded the control after 1–3 days of re-watering. There was a positive correlation between the ZRs contents of cotton roots and the g_s of cotton leaves. In the treatment of soil moisture content being 50%–55% of field capacity at full budding–early flowering stage, the ZRs contents and g_s of cotton leaves recovered more quickly and with greater increments. It was suggested that the higher ZRs contents of cotton roots after re-watering could be the main cause for the higher stomatal conductance and photosynthetic rate of cotton leaves.

Key words: drought stress; endogenous hormone; stomatal conductance; cotton; drip irrigation with mulch.

* 国家自然科学基金项目(31000675, 30460063)和国家科技支撑计划项目(2007BAD44B07, 2006BAD21B02-1)资助.

** 通讯作者. E-mail: Zhwf_agr@shzu.edu.cn

2012-07-27 收稿, 2013-01-23 接受.

水资源短缺是限制干旱区农业可持续发展的主要因素,如何充分利用有限的水资源,最大限度地促进农业高产高效和可持续发展成为亟需解决的问题^[1-2]. 田间条件下干旱是作物生长普遍存在的逆境,然而干旱并不总是降低作物产量,中度干旱有利于作物水分利用效率的提高^[3-4],且在作物发育的某一阶段施加一定的干旱胁迫,在复水后可以在生理、生长和产量形成上产生补偿效应^[1]. 补偿效应是作物抵御逆境环境的一种自我调节机制,也是作物生长发育期间进行水分调控,实现有限水分高效利用的重要生理依据^[5]. 内源激素是作物生命活动的调节者,在作物遭受干旱胁迫时,可通过内源激素调节某些生理过程以适应干旱^[6-9]. 研究表明,适度干旱后复水叶片气孔导度、光合速率和蒸腾速率等生理功能的迅速恢复是作物产生补偿生长的主要原因^[10-11]. 干旱胁迫下脱落酸(ABA)浓度的升高抑制了作物叶片的生长^[8],同时导致气孔关闭,使叶片光合速率下降^[12],造成减产. 但当作物从干旱逆境转入正常水分供应时,作物内源激素含量将如何变化,内源激素的调节作用对作物气孔行为有何影响? 此外,Radin^[13]通过向干旱胁迫下棉花喷施外源细胞分裂素证明了细胞分裂素在调节气孔行为方面有拮抗 ABA 的作用,但干旱胁迫结束后复水条件下内源细胞分裂素是否有相同的作用及其调节机制尚不清楚. 基于上述原因,本文在新疆生态条件下,采用膜下滴灌的灌溉方式,精确控制供水量,研究不同生育阶段土壤干旱及复水对棉花根系及叶片中内源激素 ABA 和玉米素(ZRs)含量及产量的影响,探讨干旱胁迫及复水条件下内源激素对叶片气孔行为的调控效应,以期完善干旱区棉花高效用水技术体系提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2006—2007年在石河子大学农学试验站进行. 试验地土质为中壤土,0~60 cm 土壤平均物理性黏粒(<0.01 mm)含量43%、容重1.48 g·cm⁻³、孔隙度40.5%、田间持水量24.6%(体积含水量)、pH值7.85、全氮1.53 g·kg⁻¹、速效磷18.9 mg·kg⁻¹、速效钾187 mg·kg⁻¹、总盐3.51 g·kg⁻¹;地下水位埋深10 m以下. 两年平均降雨量199 mm、蒸发量1537.5 mm、气温6.6℃. 两年分别于4月22—24日、4月16—18日布设滴灌带、铺膜,然后膜上人工点播. 全生育期施纯N 276 kg·hm⁻²、

P₂O₅ 207 kg·hm⁻²,其中氮肥40%基施、60%生育期间随水滴施;磷肥100%基施. 供试棉花品种为新疆种植面积较大的新陆早13号. 覆膜宽100 cm,为透光膜,1条膜覆盖4行棉花,棉花行距20 cm+40 cm+20 cm,株距12 cm,南北行向,每公顷留苗1.8×10⁵株左右. 采用“干播湿出”方式播种,即低墒播种、滴水出苗. 整个试验小区都采用滴灌形式. 滴灌管系为北京绿源公司生产的Φ15内镶式滴灌带,滴头间距30 cm,设计滴头流量2.7 L·h⁻¹. 一条膜下铺两条滴灌毛管,均铺在窄行中,即一根毛管控制两行棉花.

1.2 试验设计

将棉花生育期分为4个阶段:S₁(盛蕾-初花期,两年度分别为6月15日—7月9日和6月10日—7月4日)、S₂(初花-盛花期,两年度分别为7月10—30日和7月5—25日)、S₃(盛花-盛铃期,两年度分别为7月31日—8月20日和7月26日—8月15日)和S₄(盛铃-吐絮期,两年度分别为8月21日—9月14日和8月16日—9月9日);每个水分亏缺阶段设置2个亏缺程度:V₁(相对含水率为50%~55%的轻度干旱)和V₂(相对含水率为40%~45%的中度干旱). 分别在上述生育阶段进行干旱处理,方法为每2~3 d采用时域反射仪(TDR, Trime-T3, Germany)监测土壤水分变化,用膜下滴灌和水表精确控制滴水量,使土壤相对含水率在进入干旱处理前达到控水指标. 当进行干旱的生育阶段结束后,加大滴水量至土壤相对含水率为70%~75%(称为复水). 设棉花全生育期土壤相对含水率为70%~75%的处理为对照(CK). 试验共9个处理:S₁V₁、S₁V₂、S₂V₁、S₂V₂、S₃V₁、S₃V₂、S₄V₁、S₄V₂、CK, 试验小区面积为6.0 m×10 m,随机排列,每处理重复4次. 从盛蕾期(2006年6月15日、2007年6月10日)开始进行水分处理,各处理间均设一个150 cm宽的保行,保行种植同一供试品种,其他田间管理措施同大田膜下滴灌棉花.

1.3 测定项目与方法

分别在棉花不同生育阶段土壤干旱处理结束前,选晴朗无云的天气,系统测定棉花主茎功能叶片(打顶前为倒四叶,打顶后为倒三叶)的气孔导度、光合速率及主茎功能叶片、0~100 cm 土层根系中ABA和ZRs含量,然后在恢复到CK水平的第1个滴水周期内,从滴水后1 d连续监测上述参数的变化,至下1个滴水周期为止. 其中,S₁、S₂处理均在滴水后6 d达到下1个滴水周期,S₃由于受到自然降

雨的干扰,仅监测了滴水后 1~5 d 上述参数的变化; S_4 因气温大幅降低,棉株迅速衰老、叶片大量脱落,仅监测了滴水后 1 d 上述参数的变化。

采用 Li 6400 光合测定系统(Licor, USA),在北京时间 10:00—12:00 测定叶片气孔导度、光合速率等参数的变化。测定时叶室温度、湿度依测定时期的变化适当控制,每处理测定 5 片叶,取平均值。每处理选择生长发育一致的棉株 8 株,挖取 20 cm×40 cm×100 cm 土体内根系,自来水冲洗后,用蒸馏水冲洗,再用吸水纸擦干。从根系生长起点算起,按 0~20 cm、20~40 cm 和 40~100 cm,分层剪取侧根,剪碎,待测。用酶联免疫吸附检测法(ELISA)测定根系及叶片中 ABA 和 ZRs 含量^[14],试剂盒由中国农业大学作物化学控制研究中心提供。

成熟前各小区选取代表性植株 20 株考察单株结铃数。收获期取下部第 2 果枝、中部第 4~5 果枝、上部第 6~8 果枝第一果节棉铃各 30 个,供室内考种,以小区实际收获产量记产。水分利用效率采用 Viswanatha 等^[15]的方法计算:水分利用效率($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$)=单位面积总生物学产量或经济产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)/实际耗水量(mm)。

1.4 数据处理

文中数据均为两年的平均值,采用 DPS 软件进

行统计分析,Duncan 法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$);采用 Excel 和 Sigmaplot 软件作图。

2 结果与分析

2.1 干旱和复水对棉花叶片气孔导度(g_s)和光合速率(P_n)的影响

气孔是作物叶片与外界进行气体交换的主要通道,作物通过调节气孔孔径的大小控制植物光合作用中 CO_2 的吸收,气孔导度(g_s)的大小与光合速率(P_n)密切相关。在棉花同一生育阶段土壤干旱期间, g_s 随土壤含水率的减少而显著降低,以 S_2V_2 处理降低幅度最大,达 54.3%。干旱处理结束后复水, g_s 有一个很明显的突增, V_1 处理结束后复水,其不同生育阶段 g_s 均可在复水后 1~4 d 达到或超过 CK,其中 S_1 、 S_3 在复水后 1~2 d 叶片 g_s 分别比 CK 高 21.7% 和 6.2%, S_2 在复水后 3 d 叶片 g_s 才达到 CK 水平; V_2 处理结束后复水, S_1 、 S_2 、 S_3 的 g_s 在测定期内均始终显著低于 CK(图 1)。

叶片光合速率(P_n)的变化趋势与 g_s 基本一致(图 1)。 P_n 与 g_s 的相关分析表明(图 2),两者呈极显著的线性关系,说明干旱和复水后棉花叶片光合能力的大小主要受气孔的调节。

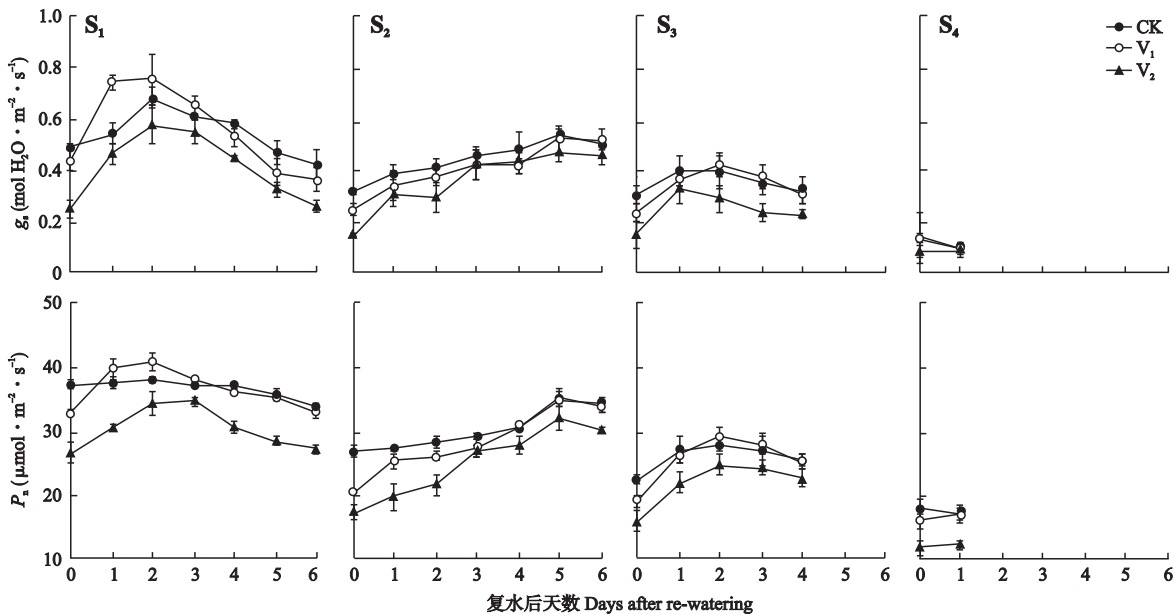


图 1 干旱和复水过程中棉花叶片气孔导度(g_s)和光合速率(P_n)的变化

Fig.1 Changes of stomatal conductance (g_s) and photosynthetic rate (P_n) in leaf of cotton during the course of drought and re-watering.

S_1 :盛蕾-初花期 From full squaring to flowering stage; S_2 :初花-盛花期 From flowering to full flowering stage; S_3 :盛花-盛铃期 From full flowering to full boll stage; S_4 :盛铃-吐絮期 From full boll to boll opening stage. 0 为干旱期间,1、2、3、4、5、6 为干旱处理结束后复水期间天数 0 meant the drought period, 1, 2, 3, 4, 5, 6 meant days after re-watering. 下同 The same below.

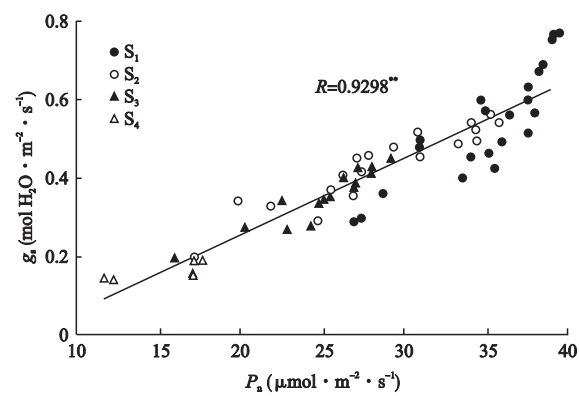


图2 干旱和复水过程中棉花叶片光合速率(P_n)与气孔导度(g_s)的关系

Fig.2 Relationship between net photosynthetic rate (P_n) and stomatal conductance (g_s) of cotton leaves during the course of drought and re-watering.

2.2 干旱和复水对棉花根系和叶片中脱落酸 (ABA) 含量的影响

土壤干旱条件下,植物叶片的气孔行为受来源于根系 ABA 浓度的调控^[16].对根系 ABA 含量的测定结果表明(图3),在棉花同一生育阶段土壤干旱期间,根系 ABA 含量均随土壤含水率的减少而显著增加,表现出与叶片 g_s 变化相反的趋势.干旱处理结束后复水,CK、 S_1 条件下根系 ABA 含量均呈明显增加趋势,且 S_1 增幅低于 CK、 S_2 、 S_3 和 S_4 无明显变化趋势,表明 S_1 在干旱复水期内可通过根系 ABA 含量的升高来调节叶片气孔行为;至测定期结束时,不同水分处理根系 ABA 含量逐渐与 CK 趋同.不同处理根系 ABA 含量在 0 ~ 40 cm 土层表现为: V_1 处理在滴水后 1 ~ 3 d 略低于 CK 或与 CK 无明显差异, V_2 处理则始终保持较高值;40 ~ 100 cm 土层根系中

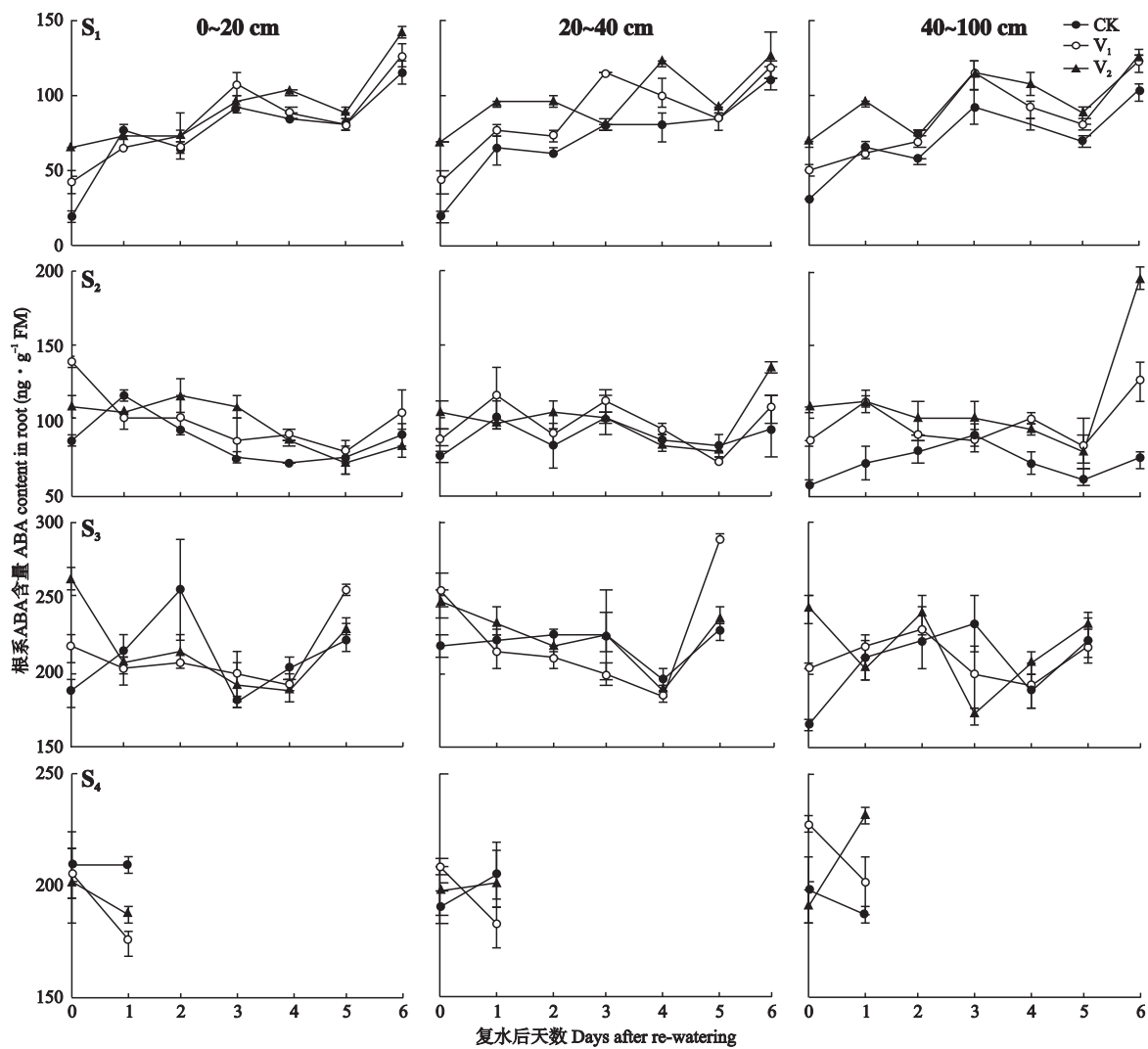


图3 干旱和复水过程中棉花根系 ABA 含量变化

Fig.3 Changes of ABA content in root of cotton during the course of drought and re-watering.

ABA 含量在处理间无明显变化趋势. 可见, 干旱处理结束后复水, 根系 ABA 含量与叶片 g_s 的变化趋势不完全一致, 说明干旱后复水叶片气孔行为除受根系 ABA 的调控外, 可能还受到其他信号物质的调节.

土壤干旱条件下, 根源 ABA 最终会流向叶片, 因此同时测定了叶片 ABA 含量(图 4). 在棉花同一生育阶段内干旱处理期间, 叶片 ABA 含量随土壤含水率的减少而显著增加. 干旱处理结束后复水, 叶片 ABA 含量也呈增加趋势, 不同生育阶段叶片 ABA 含量均表现为: V_1 处理在滴水后 1~2 d 与 CK 无明显差异, V_2 处理则始终保持较高值.

2.3 干旱和复水对棉花根系和叶片中玉米素(ZRs)含量的影响

对不同处理棉花叶片和根系 ZRs 含量进行测定(图 5, 图 6). 结果表明, 在棉花同一生育阶段内进行干旱处理期间, 叶片 ZRs 含量均随土壤含水率的减少而显著降低. 干旱处理结束后复水, V_1 处理叶片 ZRs 含量在 S_1 滴水后 1~2 d、 S_2 滴水后 5~6 d、 S_3 滴水后 2~3 d 均显著高于或与 CK 无明显差异, V_2 处理则基本在低水平上恢复.

在棉花同一生育阶段内干旱处理期间, 根系 ZRs 含量随土壤含水率的减少而显著降低. 干旱处理结束后复水, S_1 和 S_3 条件下, V_1 处理 0~40 cm 土层根系 ZRs 含量在滴水后 1~3 d 保持较高值, V_2 处理在滴水后 4 d 才达到或超过 CK; 40~100 cm 土层根系 ZRs 含量始终在低水平上恢复. S_2 V_1 处理

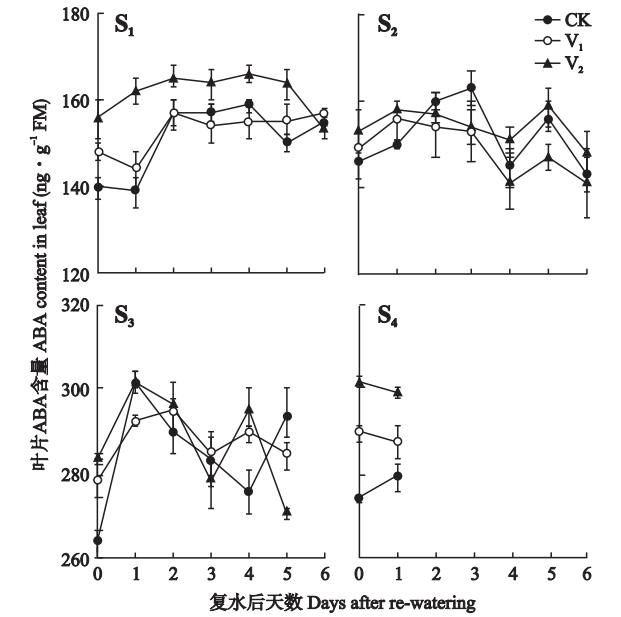


图 4 干旱和复水过程中棉花叶片 ABA 含量变化
Fig. 4 Changes of ABA content in leaves of cotton during the course of drought and re-watering.

20~100 cm 土层根系 ZRs 含量在滴水后 1~3 d 高于 CK, 其后与 CK 无明显差异; V_2 处理的根系 ZRs 含量在滴水后仍显著低于 CK. S_4 根系 ZRs 含量随滴水量的减少逐渐降低, 且随土层加深, V_1 和 V_2 处理均显著低于 CK.

将干旱处理结束后复水根系 ZRs 含量与叶片 g_s 进行相关分析, 结果表明(图 7), S_1 条件下 0~20 cm 土层根系 ZRs 含量, S_2 、 S_3 和 S_4 条件下 20~

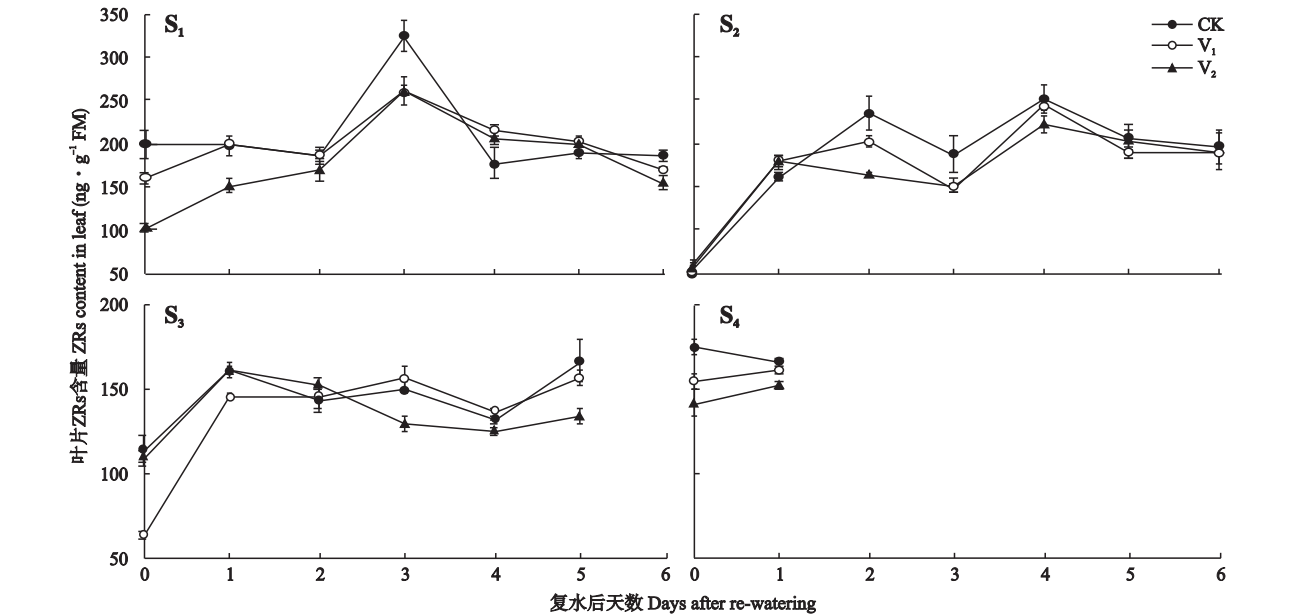


图 5 干旱和复水过程中棉花叶片 ZRs 含量变化
Fig. 5 Change of ZRs content in leaves of cotton during the course of drought and re-watering.

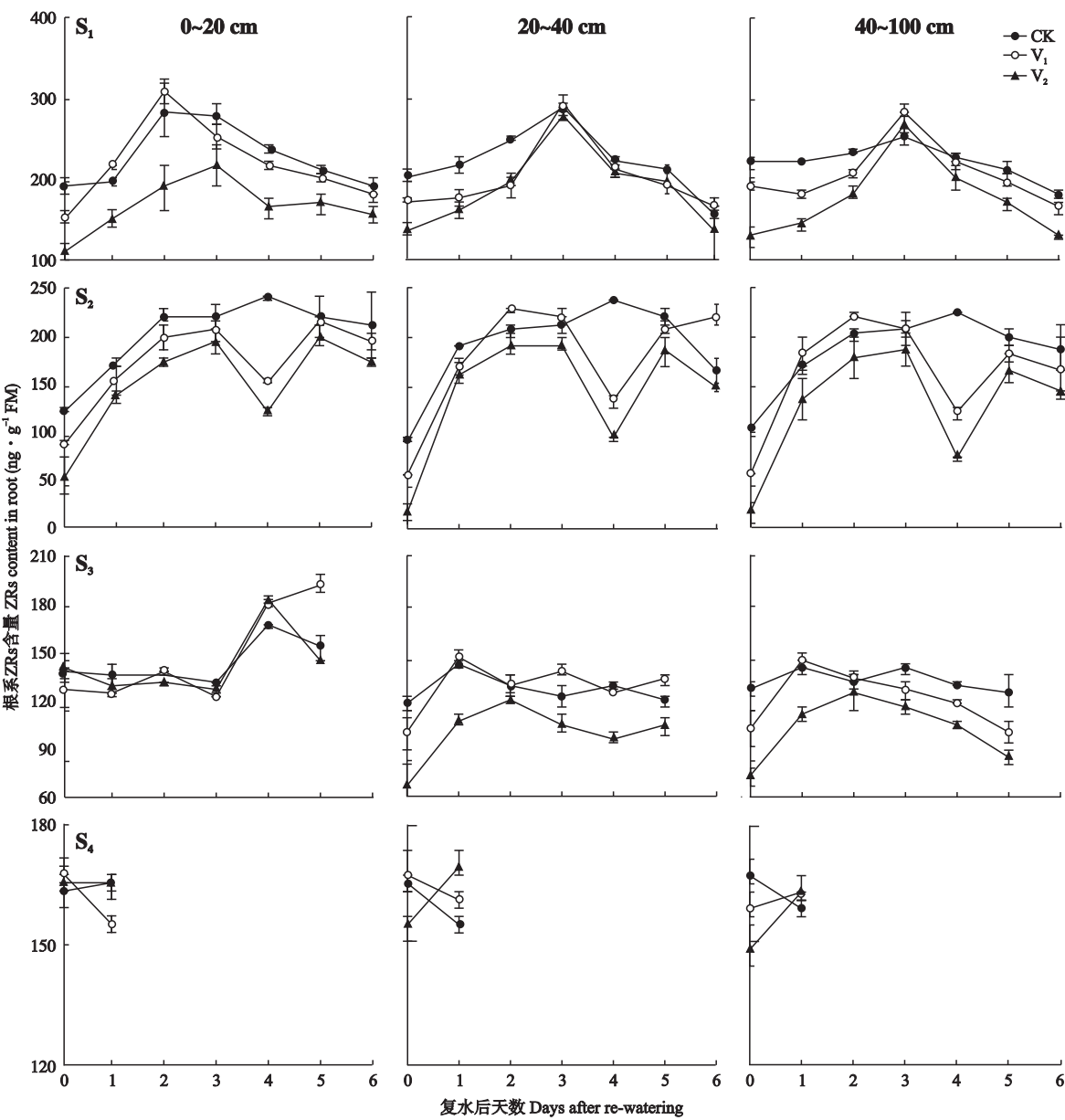


图 6 干旱和复水过程中棉花根系 ZRs 含量变化
Fig. 6 Change of ZRs content in root of cotton during the course of drought and re-watering.

表 1 干旱和复水对棉花产量及水分利用效率的影响
Table 1 Effects of drought and re-watering on yield and water use efficiency of cotton

处理 Treat- ment	单株铃数 Boll numbers per plant	单铃质量 Boll mass (g)	衣分 Lint percent (%)	籽棉产量 Seed cotton yield (kg · hm ⁻²)	皮棉产量 Lint cotton yield (kg · hm ⁻²)	WUE _{ET} (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)	WUE _I (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)
S ₁ V ₁	10. 2a	3. 66a	44. 2a	5962ab	2635a	5. 0a	5. 3a
S ₁ V ₂	7. 2c	3. 56b	42. 5b	4658c	1979c	3. 7c	4. 3bc
S ₂ V ₁	6. 9c	3. 58b	43. 4a	4265c	1851c	3. 2c	3. 8d
S ₂ V ₂	5. 7d	3. 42cd	43. 7a	3155e	1378e	2. 7d	3. 1e
S ₃ V ₁	9. 2ab	3. 32d	42. 9a	4918c	2109bc	4. 0b	4. 4bc
S ₃ V ₂	7. 8c	3. 31d	43. 1a	3666d	1580d	3. 1c	3. 6d
S ₄ V ₁	9. 4ab	3. 48c	43. 3a	5594b	2422b	4. 4ab	4. 7b
S ₄ V ₂	8. 8b	3. 47c	42. 8ab	4735c	2026c	3. 9bc	4. 2c
CK	10. 8a	3. 76a	43. 1a	6260a	2698a	4. 8ab	4. 9a

WUE_{ET}: 总水分利用效率 Total water use efficiency; WUE_I: 灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency. 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$). Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level.

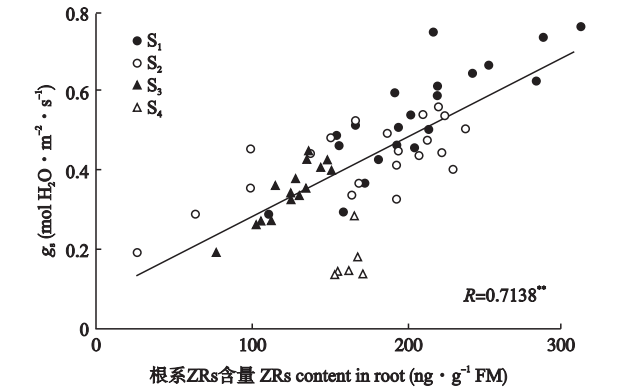


图7 干旱和复水过程中根系 ZRs 含量与 g_s 的关系
Fig.7 Relationship between ZRs content in root and stomatal conductance (g_s) of cotton during the course of drought and re-watering.

40 cm 土层根系 ZRs 含量与叶片 g_s 呈极显著的线性相关. 说明干旱后复水, 棉花通过增加根系 ZRs 的合成来促进叶片气孔开放.

2.4 干旱和复水对棉花产量及水分利用效率的影响

在不同生育阶段进行干旱处理对棉花籽棉产量的影响不同(表1), 与CK相比, S_2 处理减产幅度最大, 达31.9%~49.6%; S_3 处理次之, S_1 和 S_4 处理相对较少, 其中 S_1V_1 处理籽棉产量与CK无明显差异. 各处理中 S_2 处理的水分利用效率最低, 说明此时充足灌溉对提高水分利用效率较关键. S_1 和 S_4 处理减产较少, 水分利用效率较高, 尤其是 S_1V_1 处理的总水分利用效率和灌溉水利用效率分别比CK高4.5%和7.1%, 说明 S_1 是进行节水灌溉最有潜力的阶段. 从产量结构变化看, 单株铃数和单铃质量随土壤含水率的减少而降低, 而衣分有所增加. 从不同生育阶段看, S_1V_2 、 S_2V_1 和 S_2V_2 处理减产是因为单株铃数和单铃质量均下降, 且单株铃数下降幅度更大是其减产的主要原因; S_3 和 S_4 处理虽单株铃数和单铃质量均呈下降趋势, 但单铃质量下降幅度相对更大, 是后期干旱胁迫减产的主要原因.

3 讨 论

Flexas 等^[17] 研究认为, 轻度至中度干旱下叶片光合速率的降低是由于气孔导度的下降, 使叶绿体内 CO_2 的供应受阻, 属气孔限制因素; 重度干旱下, 棉花叶片光合作用的降低是由叶肉细胞气体扩散阻抗增加、 CO_2 溶解度下降、Rubisco 对 CO_2 的亲合力降低等非气孔因素引起的^[18]. 本试验中, 不同生育阶段干旱处理, 棉花叶片 g_s 、 P_n 均显著低于CK(图1); 当棉株从干旱转入正常供水, P_n 持续升高, 此时 P_n

的升高伴随着 g_s 的增大, 且 P_n 与 g_s 呈极显著的线性关系(图2), 因此认为气孔限制因素是影响棉花干旱及复水叶片 P_n 变化的主要原因之一. Acevedo 等^[19] 认为, 作物对干旱后复水的响应方式是, 干旱胁迫解除后存在一个短暂的快速生长, 可部分或完全弥补干旱造成的损失. 陈晓远等^[20] 研究认为, 干旱胁迫解除后补偿生长并不是立刻发生, 而是在一周左右才表现出来, 即干旱对作物生长有滞后效应. 本试验中, 干旱处理结束后复水, 不同生育阶段 V_1 处理的 g_s 均可在复水后1~4 d 达到或超过CK水平(图1), 表现出补偿效应, 以 S_1 恢复的速度快、强度大.

在土壤干旱情况下, 作物根系迅速感知, 以化学信号(ABA)的形式将干旱信息传递到地上部, 在叶片水分状况尚未发生改变时即主动降低气孔开度, 抑制蒸腾作用, 平衡植物的水分利用^[21]. 本试验中, 不同生育时期土壤干旱条件下, 叶片及根系 ABA 含量均随干旱程度加剧而显著增加(图3和图4), 叶片 g_s 、 P_n 显著降低. 表明干旱条件下, 棉花根系通过大量合成 ABA, 从而调节叶片气孔导度, 降低光合速率, 与 Zhang 等^[6] 的研究结果一致. 但当棉株从干旱转入正常供水阶段, S_1 条件下根系 ABA 含量呈明显增加趋势, S_2 、 S_3 和 S_4 无明显变化, 表明 S_1 在复水期内根系生理活性强, 仍可通过根系 ABA 含量的升高调节叶片气孔; 至测定期结束时, 不同处理根系 ABA 含量与CK无明显差异, 且叶片 ABA 含量的变化趋势也与 g_s 不完全一致, 表明干旱胁迫结束后复水条件下, 气孔的行为除受 ABA 调控外, 可能还与其他信号物质的调节有关.

Itai 等^[22] 研究认为, 根系具有感知土壤环境水分变化能力, 当根系遭受干旱胁迫时 CTK 可作为向上部输送的一种信号物质传向地上部, 以减少 ABA 的量来调节地上部生理功能. 本试验中, 不同生育时期干旱条件下, 叶片及根系 ZR 含量随干旱程度加剧而显著降低(图5和图6), 与 Blackman 等^[23] 的试验结果一致, 说明棉花根系及叶片中 ZR 含量对干旱反应较敏感. Radin^[13] 的研究证实了增加棉花叶片 CTK 含量可拮抗 ABA 在关闭气孔方面的作用. 本试验中当棉株从干旱转入正常供水阶段, S_1 条件下0~20 cm 土层根系 ZRs 含量, S_2 、 S_3 和 S_4 条件下20~40 cm 土层根系 ZRs 含量均与叶片 g_s 的变化趋势一致, 且 ZRs 含量均与 g_s 呈极显著正相关关系(图7), 表明干旱胁迫解除后, 根系通过大量合成 ZRs, 在调控气孔行为方面起到拮抗 ABA 的作用. 此外, S_1V_1 处理籽棉产量与CK无显著差异(表1), 总

水分利用效率和灌溉水利用效率高于 CK. 这可能是由于与其他大田作物相比, 棉花具有较强耐旱性且适宜水分亏缺复水后, 通过根系 ZRs 含量的升高来调节叶片气孔行为, 促使 P_n 出现补偿效应的时间早、强度大、持续时间长, 在不显著降低籽棉产量的基础上, 提高了水分利用效率. 因此, 依据本研究结果, 在膜下滴灌棉田灌溉水管理中, 通过控制盛蕾至初花期土壤含水率为 50% ~ 55%、初花至盛铃期土壤含水率为 70% ~ 75%, 并结合化学调控、随水施肥等措施, 充分利用棉花干旱后复水产生的补偿效应可进一步挖掘膜下滴灌技术的节水增产潜力.

参考文献

- [1] Shan L (山 仑), Zhang S-Q (张岁岐). Is possible to save large irrigation water? The situation and prospect of water-saving agriculture in China. *Chinese Journal of Nature* (自然杂志), 2006, **28**(2): 71-74 (in Chinese)
- [2] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment*, 2002, **25**: 239-250
- [3] Huo Z-G (霍治国), Li S-K (李世奎), Bai Y-M (白月明), *et al.* The experimental research on slight and moderate water stress effects on increasing yield and saving water mechanism of winter wheat. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2003, **18**(1): 58-66 (in Chinese)
- [4] Zhao L-Y (赵丽英), Deng X-P (邓西平), Shan L (山 仑). A review on types and mechanisms of compensation effect of crops under water deficit. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(3): 523-526 (in Chinese)
- [5] Shan L (山 仑), Xu M (徐 萌). Water-saving agriculture and its physio-ecological bases. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1991, **2**(1): 70-76 (in Chinese)
- [6] Zhang J, Davies J. Changes in concentration of ABA in xylem sap as a function of changing soil water status can account for changes in leaf conductance and growth. *Plant, Cell and Environment*, 1990, **13**: 277-285
- [7] Yang JC, Zhang JH, Wang ZQ, *et al.* Absciscic acid and cytokinins in the root exudates and leaves and their relationship to senescence and remobilization of carbon reserves in rice subjected to water stress during grain filling. *Planta*, 2002, **215**: 645-652
- [8] Schachtman DP, Goodger JQD. Chemical root to shoot signaling under drought. *Trends in Plant Science*, 2008, **13**: 281-287
- [9] Ha S, Vankova R, Yamaguchi-Shinozaki K, *et al.* Cytokinins: Metabolism and function in plant adaptation to environmental stresses. *Trends in Plant Science*, 2012, **17**: 172-179
- [10] Souza RP, Machadoa EC, Silva JAB, *et al.* Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea during water stress and recovery. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, **51**: 45-56
- [11] Hu T-T (胡田田), Kang S-Z (康绍忠). The compensatory effect in drought resistance of plants and its application in water-saving agriculture. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(4): 885-891 (in Chinese)
- [12] Pettigrew WT. Physiological consequences of moisture deficit stress in cotton. *Crop Science*, 2004, **44**: 1265-1272
- [13] Radin JW. Stomatal responses to water stress and to abscisic acid in phosphorus-deficient cotton plant. *Plant Physiology*, 1984, **76**: 392-394
- [14] He Z-P (何钟佩). Guidance on Experiment in Agricultural Chemistry. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1993: 60-68 (in Chinese)
- [15] Viswanatha GB, Ramachandrapa BK, Nanjappa HV. Soil-plant water status and yield of sweet corn as influenced by drip irrigation and planting methods. *Agricultural Water Management*, 2002, **55**: 85-91
- [16] Liang J, Zhang J, Wong MH. How do root control xylem sap ABA concentration in response to soil drying. *Plant and Cell Physiology*, 1997, **38**: 10-16
- [17] Flexas J, Bota J, Loreto F, *et al.* Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C_3 plants. *Plant Biology*, 2004, **6**: 269-279
- [18] Ennahli S, Earl HJ. Physiological limitations to photosynthetic carbon assimilation in cotton under water stress. *Crop Science*, 2005, **45**: 2374-2382
- [19] Acevedo E, Hsiao TC, Henderson DW. Immediate and subsequent growth response of maize leaves to changes in water stress. *Plant Physiology*, 1971, **48**: 631-636
- [20] Chen X-Y (陈晓远), Luo Y-P (罗远培). The influence of fluctuated soil moisture on growth dynamic of winter wheat. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2001, **34**(4): 403-409 (in Chinese)
- [21] Davies WJ, Zhang J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, **42**: 55-76
- [22] Itai C, Richmond A, Vaadia Y. The role of root cytokinins during water and salinity stress. *Israel Journal of Botany*, 1968, **17**: 187-195
- [23] Blackman PG, Davies WJ. Cytokinins, abscisic acid and the control of plant water balance. *Acta Horticulturae*, 1985, **171**: 255-261

作者简介 罗宏海,男,1979 年生,博士,副教授. 主要从事作物生理生态研究,发表论文 20 篇. E-mail: luohonghai79@163.com

责任编辑 张凤丽