

调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响

孟兆江^{1,2} 段爱旺^{1,2} 王晓森^{1,2} 高阳^{1,2} 申孝军^{1,2}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002; 2. 农业部作物需水与调控重点开放实验室, 新乡 453002)

摘要: 以棉花(*Gossypium hirsutum* L.)为试验材料,采用防雨棚下桶栽土培方法,进行调亏灌溉(RD_I)对棉花根、冠生长的影响研究。试验采用二因素随机区组设计,设置4个水分调亏阶段:苗期(I)、蕾期(II)、花铃期(III)和吐絮期(IV);每个调亏阶段设置3个水分调亏度:轻度调亏(L)、中度调亏(M)和重度调亏(S),土壤相对含水率(占田间持水率的百分数)控制上、下限分别为60%~65% FC(Field capacity)、50%~55% FC和40%~45% FC;另设全生育期保持适宜土壤水分处理作为对照(CK),土壤相对含水率控制下限分别为60% FC(苗期)、60% FC(蕾期)、70% FC(花铃期)和60% FC(吐絮期)。分别在水分调亏期间和复水后测定各处理根系参数和地上干物质质量。试验结果表明,RD_I对植株根、冠生长发育的影响因不同水分调亏阶段和不同水分调亏度而异。水分调亏不改变棉花根系生长的原有总体趋势,但对根系生长速率具有促进作用。棉花各生育阶段的中度水分调亏(50%~60% FC)在调亏期间对根系生长有明显促进效应或维持较高的根质量,复水后有不同程度的根系补偿生长效应或延缓根系衰亡作用,后期仍保持较高的根冠比(R/S),因而是协调棉花根/冠关系的适宜水分调亏处理。RD_I可以有效调控棉花根/冠生长关系。

关键词: 棉花; 调亏灌溉; 根冠生长; 根冠比; 补偿效应

中图分类号: S152.7; S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0099-06

Effect of Regulated Deficit Irrigation on Growth Relation of Root and Shoot in Cotton

Meng Zhaojiang^{1,2} Duan Aiwang^{1,2} Wang Xiaosen^{1,2} Gao Yang^{1,2} Shen Xiaojun^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China
2. Key and Open Laboratory of Crop Water Requirements Regulation, Ministry of Agriculture, Xinxiang 453002, China)

Abstract: The effects of regulated deficit irrigation (RD_I) on growth of roots and shoots of cotton plants were experimentally investigated during the growing seasons of 2013 and 2014 in pot-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L. cv. Meimian 99B) under rain-proof shelter condition in Huang-Huai-Hai Region of China, aiming at offering theoretical basis for the establishment of RD_I model for water-saving, high yield, high quality and efficiency of cotton crops. A two-factor randomize-block design was applied. The first factor was different growth stages of water deficit, including seedling stage (I), budding stage (II), flowering and boll-setting stages (III) and boll-opening stage (IV). Another factor was different degrees of water deficit, which were three levels controlled by soil relative water content, including light deficit (L), moderate deficit (M) and severe deficit (S) at stages of I to IV, corresponding soil relative water content were controlled at 60%~65% FC (Field capacity), 50%~55% FC and 40%~45% FC, respectively. Totally 12 water deficit treatments with six replicates were designed and applied. Additionally, an appropriate irrigation treatment (with soil relative water content controlled at 60%~70% FC at seedling stage, 60%~70% FC at budding stage, 70%~80% FC at flowering and boll-

收稿日期: 2015-08-19 修回日期: 2015-10-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100509)、河南省科技攻关项目(科技攻关-2015)、中国农业科学院科技创新专项资金项目和河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站观测研究及数据信息系统建设项目

作者简介: 孟兆江(1958—),男,研究员,博士,主要从事节水农业基础理论和技术研究,E-mail: zhaojiang_meng@aliyun.com

setting stages and 60% ~70% FC at boll-opening stage) during the whole growing season was designed as control (CK) with 24 replicates. Root system parameters, such as root dry weight, root weight density and total shoot dry matter weight were measured synchronously in all treatments during water stress period and after re-watering, respectively. The results indicated that there were differences in effects of RDI on growth of roots and shoots in cotton due to both phenological stages and degrees of water deficit. Although water deficit didn't change the original trend of root growth in cotton, the growth rate of root was promoted. The growth of root was promoted significantly during moderate water deficit (50% ~60% FC) at some growing stages, and there was a 'super-compensation effect' in root growth or the effect on delaying senescence of root after re-watering, and a higher ratio of root to shoot (R/S) was still retained at later stage of cotton growth. Therefore, it was indicated that moderate water deficit was suitable irrigation treatment for coordinating the relation of root and shoot growth of cotton. The results suggested that RDI should be adopted as an effective approach in regulating the growth of root and shoot in cotton plants.

Key words: cotton; regulated deficit irrigation; growth of root and shoot; ratio of root to shoot; compensatory effect

引言

根与冠是植物结构和功能的基础,二者的相互调节对提高作物水分利用效率具有重要作用。由于作物水分利用效率主要取决于单位叶面积的蒸腾速率和根系吸水能力^[1],因此,如何协调根、冠间的生长关系,使二者的结构和功能达到最优匹配,实现资源的高效利用是一个亟待研究的问题^[2-6]。

协调棉株营养生长和生殖生长之间的关系,即协调根、茎、叶、枝生长与蕾、花、铃发育之间的关系,是“协调生长栽培理论”(即营养生长过旺,抑制生殖生长,表现为疯长或贪青晚熟;营养生长过弱,又限制生殖生长或脱落早衰)的重要内容^[7]。根据棉花的生物学特性,借鉴国内外果树调亏灌溉技术研究成果^[8]与生产经验,实施棉花调亏灌溉研究相对于其它作物的调亏灌溉研究更具科学价值和实践意义。

关于土壤水分对作物根冠生长影响的试验研究已有不少报道^[1,4,9-17]。但是,已有相关研究的条件与方法不同,存在试验的区域性差异,所得结果也不尽一致,并且以棉花为试验对象的相关文献较少。本文以黄淮海平原地区主要经济作物棉花为材料,将水分调亏阶段和水分调亏结束复水后阶段视为一个连续的过程,从根、冠生长的角度分析棉花对不同生育阶段不同程度水分调亏的适应性、水分调亏的正效应、水分调亏的后效性和水分调亏结束复水后的根冠生长补偿效应,为棉花对调亏灌溉(RDI)响应的整体性理论提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

2013年6—10月和2014年6—10月以棉花

(*Gossypium hirsutum* L.)为试验材料,在中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场大型启闭式防雨棚下进行试验。选用品种为美棉99B,由中国农业科学院棉花研究所提供。试验场位于黄淮海平原河南省新乡市东北郊,东经113°53'、北纬35°19',属典型的暖温带半湿润半干旱地区。

1.2 试验设计

采用盆栽土培法,盆为圆柱形,分母、子盆,母盆内径31.0 cm,高38 cm,埋入土中,上沿高出地面5.0 cm;子盆内径29.5 cm,高38 cm。子盆底部铺5 cm厚的砂过滤层,以调节下层土壤通气状况和水分条件。为防止土壤表面水分过量蒸发和土壤板结,子盆两侧各放置直径3 cm的细管用于供水(细管周围有小孔,用纱网包裹以防堵塞)。取大田0~20 cm表土,过筛装盆,每子盆装干土重28 kg,土壤质地为壤土,基础养分含量为有机质9.3 g/kg,全氮0.98 g/kg,碱解氮44.02 mg/kg,速效磷6.2 mg/kg,速效钾112 mg/kg;土壤容重为1.34 g/cm³,田间持水率为26%(质量含水率);每盆混入200 g优质农家肥,全生育期每盆施N 5.6 g, P₂O₅ 2.8 g, K₂O 4.2 g,其中N 1/2基施,1/2追施。精选种子,浸后播种,营养钵育苗,每钵3粒。当棉苗长至5片真叶时由苗床移植至盆中,每盆2株,缓苗后每盆留苗1株,并开始水分处理。采用二因素随机区组设计,设置4个水分调亏阶段:苗期(I)、蕾期(II)、花期(III)和吐絮期(IV);每个水分调亏阶段设置3个水分调亏度:轻度调亏(L)、中度调亏(M)和重度调亏(S),土壤相对含水率(占田间持水率的百分数)控制上、下限分别为60%~65% FC(Field capacity)、50%~55% FC和40%~45% FC;共12个处理,各处理重复6次;另设全生育期适宜土壤水分处理

24 盆作为对照 (CK), 土壤相对含水率控制上、下限分别为 60% ~ 70% FC (苗期)、60% ~ 70% FC (蕾期)、70% ~ 80% FC (花铃期) 和 60% ~ 70% FC (吐絮期); 水分调亏阶段灌水按处理设计水平 (低于下限灌至上限), 其余阶段按对照水平控制。缓苗后开始水分处理, 用电子磅称量法测定土壤含水率, 用水量平衡法确定蒸发蒸腾量, 每天或隔天称量, 当盆内土壤含水率低于设计标准时用量杯加水, 记录每次加水量, 由水量平衡方程计算各时期总的耗水量。试验共用母、子盆各 96 个, 子盆放置于母盆内, 便于称量而不粘泥土。盆栽棉花行距 60 cm, 株距 31 cm, 群体密度 53 763 株/hm²。

1.3 测定项目与方法

(1) 在棉花主要生育期, 各处理选有代表性的植株 3 株 (盆) 挂牌标记, 分别在不同水分调亏阶段复水前和复水后取样, 每个处理每次取 3 次重复, 进行根系参数和干物质质量等观测。

(2) 根系参数调查采用整盆冲洗法, 将盆灌满水浸泡 24 h 后, 冲洗泥土并用 0.50 mm 网筛过滤, 接着浸泡于 1% 刚果红溶液中 3 min, 取出后用冷水冲洗, 再浸泡于 95% 的乙醇溶液中 3 min, 用水冲洗后, 活根染成红色或淡红色, 死根和其它杂质为褐色或无色, 拣出死根和杂质。

(3) 根系干质量采用干燥称量法测定, 将采集的根系样品洗净, 用无氮吸水纸吸干装袋, 并标记密封, 带回实验室, 放入干燥箱, 在 90℃、鼓风条件下干燥 30 min, 然后降温至 75℃ 干燥至质量恒定。

(4) 地上干物质采用干燥称量法测定, 剪取植株地面以上部分, 称鲜质量; 放入干燥箱, 在 105℃

下杀青 30 min; 然后降温至 80℃ 干燥至质量恒定。

1.4 数据处理与分析

将所得试验数据分类整理, 取 2 年平均值, 采用 Excel 2007 和 DPS v7.05 分析软件处理与分析。

2 结果与分析

2.1 水分调亏期间棉花根系参数的响应

水分是影响根系生长的主要环境因子之一。图 1 是不同生育期水分调亏结束前测定的各处理棉花根系参数 (同一水分调亏阶段内的图柱上标有不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) 或差异极显著 ($P < 0.01$), 下同)。从图 1a 可以看出, 不论土壤水分状况如何, 随着棉花生育阶段的推进, 根干质量呈明显递增趋势, 表明水分调亏期间没有改变棉花根系生长的总体趋势。但具体分析各生育阶段显示, 多数水分调亏处理对根系干质量增长速率具有促进作用 (II 期轻度调亏和 IV 期重度调亏除外)。苗期 (I) 的轻度调亏 (L) 根干质量与 CK 接近, 中 (M)、重 (S) 度调亏根干质量分别较 CK 提高 17.9% 和 15.5%, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。蕾期 (II) 的轻度水分调亏根干质量比 CK 下降 21.1%, 差异达显著水平 ($P < 0.05$); 中、重度调亏比 CK 略高。花铃期 (III) 的轻、中、重度水分调亏根干质量分别较 CK 提高 14.1%、8.6% 和 1.0%, 均未达显著水平。吐絮期 (IV) 的轻、中度调亏根干质量分别比 CK 提高 14.3% 和 20.4%, 均达显著水平 ($P < 0.05$); 重度调亏根干质量比 CK 下降 7.9%, 差异不显著。

图 1b 显示, RDI 条件下根质量密度的变化与根干质量呈相似规律。

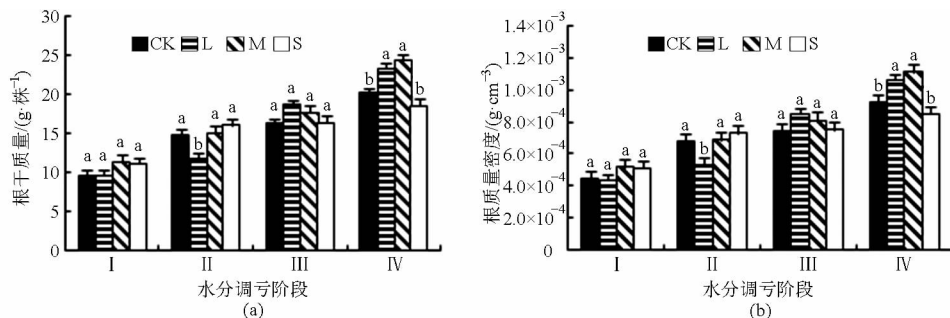


图 1 水分调亏期间棉花根系参数变化

Fig. 1 Variation of root parameters of cotton in water stress period

2.2 水分调亏对棉花根系参数影响的后效性

图 2 是各阶段水分调亏处理复水后 (均恢复充分供水) 于下一阶段水分调亏开始时测定的根系参数。图 2a 显示, 苗期 (I) 的轻度调亏 (L) 根干质量与对照 (CK) 接近, 中 (M)、重 (S) 度调亏根系干质量分别比对照低 25.3% 和 23.5%, 差异达显

著水平 ($P < 0.05$); 这可能是复水后地上部分生长迅速, 抑制了地下部分生长, 因而失去了水分调亏期间促进根系生长的效应。蕾期 (II) 的轻度调亏 (L) 虽有补偿生长, 但根干质量仍比 CK 低 18.7%, 差异显著; 中度调亏 (M) 根干质量比 CK 提高 7.2%, 显示出补偿生长效应, 但差异不显著;

重度调亏(S)根干质量与CK基本接近,表明对根系生长无不利影响。花铃期(III)的轻、中度调亏根干质量分别比CK提高25.7%和24.5%,差异达显著水平($P < 0.05$),显示出较强的补偿生长效应;重度调亏根干质量比CK低21.3%,差异达显著水平。吐絮期(IV)的轻度调亏根干质量比CK低31.8%,差异达极显著水平($P < 0.01$);中度调亏根干质量比CK低21.0%,差异达显著水平;重

度调亏根干质量比CK低8.6%,差异不显著;表明此阶段水分调亏根系后期衰减快,尤其是轻、中度调亏处理,复水后测定结果与调亏期间测定结果相比,根干质量分别减小15.1%和5.8%;但重度调亏复水后补偿生长效应较强,根干质量比调亏期间提高了42.5%。

图2b显示,复水后根质量密度的变化与根干质量呈相似规律。

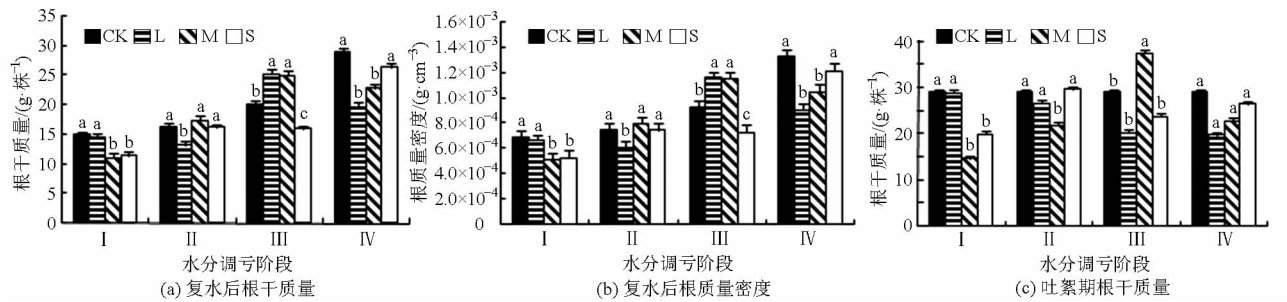


图2 复水后棉花根系参数变化
Fig.2 Variation of root parameters of cotton after re-watering

图2c是吐絮期测定的各处理根干质量。从图中可见,I期的轻度调亏处理根干质量与CK相同;II期的轻度调亏处理根干质量与CK差异不显著,重度调亏处理根干质量略高于CK;III期的中度调亏处理根干质量高于CK,差异达极显著水平($P < 0.01$);其余调亏处理根干质量最终均不同程度低于CK。

综合比较上述结果认为,I期的轻度调亏处理、II期的重度调亏处理、III期的中度调亏处理以及IV期的重度调亏处理,在水分调亏期间对根系生长有明显促进效应或可维持较高的根干质量,复水后有不同程度的根系补偿生长效应或延缓根系衰亡作用,最终保持了较高的根干质量,是调控棉花根系生长的适宜处理。

2.3 RDI对棉花根冠比的调控作用

图3a是各生育期不同水分调亏结束时测定的棉花根和冠的干物质质量之比(R/S)。从总体上看,在花铃期以前各处理的R/S基本上随生育期的推进呈下降趋势,花铃期最低,至吐絮期又略有回

升。这说明随着根系的生长发育,其吸收水分和养分能力增强,促进了地上部生长发育,R/S逐渐下降,直到花铃期降至最小,以形成最大的经济产量。从不同生育阶段看,水分调亏基本可提高R/S,但不同阶段水分变化对干物质在根、冠间分配比例的影响有所不同。在I期,水分调亏增大R/S的效应最为明显,且随水分调亏度加重,R/S呈明显增大趋势;R/S最大值出现在I期的重度调亏(S),比同期CK增加99.8%,差异达极显著水平($P < 0.01$);轻度调亏的R/S比CK增加31.3%,差异达显著水平($P < 0.05$);中度调亏的R/S比CK增加94.2%,差异达极显著水平($P < 0.01$)。II期轻度调亏的R/S比CK降低11.2%,但差异不显著;中、重度水分调亏处理(M,S)的R/S分别比同期CK增加44.8%和67.5%,差异均达极显著水平。III期各水分调亏处理的R/S分别比CK增加40.2%、32.4%和52.4%,差异均达显著水平。IV期轻、中度调亏的R/S较CK分别增加18.1%和23.8%,差异不显著;重度调亏的R/S比CK降低8.6%,差异不显著。这

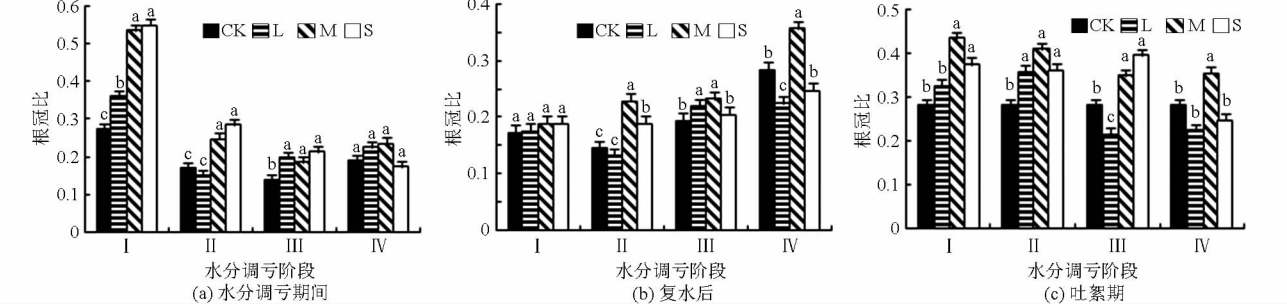


图3 RDI对棉花根冠比的影响
Fig.3 Effect of RDI on ratio of root to shoot in cotton

说明当出现一定程度水分亏缺时,根系吸水困难,根系从土壤中获得的水分被优先保证根系生长发育需求,使根系受害较地上部分轻,故根冠比增大;同时表明在棉花各生育阶段实施适度的水分调亏均有利于增强根系的发育,控制地上部分旺长,提高棉花抗旱能力。

图 3b 是各阶段水分调亏处理复水后(均恢复充分供水)在下一阶段水分调亏开始时测定的根系参数。从图 3 看出,总体上 R/S 随水分调亏阶段推后呈增大趋势,表明不同阶段的水分调亏对根冠生长关系影响的后效性是不同的。苗期(I)轻度调亏(L)的 R/S 与 CK 接近,中(M)、重(S)度调亏 R/S 分别比 CK 高 8.3% 和 8.5%,差异不显著;这可能是复水后地上部分补偿生长占优势,抑制了地下部分生长,因而失去了水分调亏期间促进根系生长的效应。蕾期(II)轻度调亏(L)复水后仍基本保持调亏期间的根冠关系,其 R/S 与 CK 差异不显著;中度调亏(M)复水后促根效应得以强化, R/S 比 CK 提高 57.1%,差异达极显著水平($P<0.01$);重度调亏(S)复水后 R/S 下降,但仍比 CK 高 30.5%,差异达显著水平。花铃期(III)轻、中度调亏复水后 R/S 增加,分别比 CK 提高 13.1% 和 19.6%,差异显著($P<0.05$),但相对于调亏期间促根效应减弱;重度调亏处理复水后 R/S 变化不明显。吐絮期(IV)轻度调亏复水后 R/S 无变化,但比 CK 低 20.9%,差异达显著水平;中度调亏处理复水后促根效应进一步增强, R/S 比 CK 高 25.6%,差异达显著水平;重度调亏复水后 R/S 有明显补偿生长效应,但仍比 CK

低 12.5%,差异不显著。

图 3c 是吐絮后期测定的各处理 R/S 。从图中可见,在棉花吐絮期以前水分调亏处理大多可增大 R/S (III 期轻度调亏除外),其中以 I 期的中度调亏处理优势最为明显, R/S 比 CK 高 54.3%,差异达极显著水平($P<0.01$);其次是 II 期的中度调亏和 III 期的重度调亏, R/S 分别比 CK 高 45.1% 和 39.7%,差异也达极显著水平;其余调亏处理的 R/S 也都比 CK 有不同程度的提高,差异也达显著水平。

3 结论

(1)不论土壤水分状况如何,随着棉花生育阶段的推进,根干质量呈明显递增趋势,表明水分调亏期间没有改变棉花根系生长的总体趋势;但具体分析各生育阶段显示,多数水分调亏处理对根系干质量增长速率具有促进作用(蕾期轻度调亏和吐絮期重度调亏除外)。

(2)从不同生育阶段看,水分调亏基本上可提高 R/S ,但不同阶段水分变化对于物质在根、冠间的分配比例的影响有所不同。在苗期,水分调亏增大 R/S 的效应最为明显,且随水分调亏度加重, R/S 呈明显增大趋势。综合比较复水前后测定结果认为,棉花各阶段的中度水分调亏处理(土壤水分控制下限 60% FC),在调亏期间对根系生长有明显促进效应或可维持较高的根干质量,复水后有不同程度的根系补偿生长效应或有延缓根系衰亡作用,后期仍保持较高的根干质量,是调控棉花根系生长的适宜处理。

参 考 文 献

- 1 马元喜. 小麦的根 [M]. 北京:中国农业出版社,1999: 136 – 139.
- 2 马元喜,王晨阳,周继泽. 小麦根系主要生态效应的研究 [J]. 河南农业大学学报,1994,28 (1):12 – 18.
MA Yuanxi, WANG Chenyang, ZHOU Jize. Study on the main ecological effects of wheat root systems [J]. Acta Agriculturae Universitatis Henanensis, 1994,28 (1):12 – 18. (in Chinese)
- 3 李科江,张西科,刘文菊,等. 不同栽培措施下冬小麦灌浆模拟研究[J]. 华北农学报,2001,16 (2):70 – 74.
LI Kejiang, ZHANG Xike, LIU Wenju, et al. A study on modeling kernel filling of winter wheat with different management [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2001, 16(2): 70 – 74. (in Chinese)
- 4 丰焕平,谭秀山,毕建杰. 不同土壤水分条件下冬小麦根系分布及根冠特性的研究 [J]. 安徽农业科学, 2013,41 (35): 13465 – 13467, 13471.
FENG Huanping, TAN Xiushan, BI Jianjie. Study on the root distribution and root characteristics of winter wheat under different soil and water conditions [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2013,41(35): 13465 – 13467, 13471. (in Chinese)
- 5 ANDERSON E L. Tillage and N fertilization effects on maize root growth and root:shoot ratio [J]. Plant and Soil, 1988,108(2): 245 – 251.
- 6 VYSOTSKAYA L B. Mechanisms coordinating wheat seedling growth response as affected by shoot/root ratio [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2005, 52(5): 679 – 684.
- 7 杨铁钢,谈春松,郭红霞. 棉花营养生长和生殖生长关系研究 [J]. 中国棉花,2003,30(7): 13 – 16.
YANG Tiegang, TAN Chunsong, GUO Hongxia. A study on the relationship between the vegetative growth and the reproductive growth in cotton [J]. Cotton in China,2003,30(7):13 – 16. (in Chinese)
- 8 曾德超,彼得·杰里. 果树调亏灌溉密植节水增产技术的研究与开发 [M]. 北京:北京农业大学出版社,1994: 5 – 6, 13 – 14.

- 9 吕丽华,李谦,董志强,等. 灌水方式和灌溉量对冬小麦根冠结构的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(11):1537-1544.
LÜ Lihua, LI Qian, DONG Zhiqiang, et al. Effects of different irrigation methods and amount on root and canopy structure of winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34 (11):1537-1544. (in Chinese)
- 10 王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 282-289.
WANG Yanzhe, LIU Xiuwei, SUN Hongyong, et al. Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 282-289. (in Chinese)
- 11 武荣,李援农. 水氮耦合对冬小麦根系分布和根冠比及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2013, 44(6):963-967.
WU Rong, LI Yuannong. Effect of water and nitrogen fertilizer coupling on root distribution, root/shoot ratio and yield of winter wheat [J]. Journal of Southern Agriculture, 2013, 44(6): 963-967. (in Chinese)
- 12 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京: 农业出版社, 1996: 162-166.
- 13 孟兆江,段爱旺,王景雷,等. 调亏灌溉对冬小麦根冠生长影响的实验研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(4):37-41.
MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, WANG Jinglei, et al. Effect of regulated deficit irrigation on growth of root and shoot in winter wheat [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(4):37-41. (in Chinese)
- 14 HSIAO T, XU L R. Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(350): 1595-1616.
- 15 杨书运,严平,梅雪英,等. 土壤水分亏缺对冬小麦根系的影响[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(2): 309-313.
YANG Shuyun, YAN Ping, MEI Xueying, et al. Effects of different soil water deficits on roots of winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(2): 309-313. (in Chinese)
- 16 LIU Xiuwei, ZHANG Xiyang, CHEN Suying, et al. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat [J]. Agricultural Water Management, 2015, 154: 59-67.
- 17 汪可欣,付强,姜辛,等. 秸秆覆盖模式对玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 181-186.
WANG Kexin, FU Qiang, JIANG Xin, et al. Effect of straw mulching mode on maize physiological index and water use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 181-186. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 72 页)

- 14 周和平,王少丽,姚新华,等. 膜下滴灌土壤水盐定向迁移分布特征及排盐效应研究[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1380-1388.
ZHOU Heping, WANG ShaoLi, YAO Xinhua, et al. Research on distribution characteristics and salt-discharging effect of direcyional migration of water and salt in soil through drip irrigation under plastic film [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(11): 1380-1388. (in Chinese)
- 15 罗家雄. 新疆垦区盐碱地改良[M]. 北京:水利电力出版社, 1985: 36-37.
- 16 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 179-180.
- 17 LAROCQUE G R. Coupling a detailed photosynthetic model with foliage distribution and light attenuation functions to compute daily gross photosynthesis in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) stands[J]. Ecological Modelling, 2002, 148(3): 213-232.
- 18 RAMANJULU S, SREENIVASALU N, SUDHAKAR C. Effect of water stress on photosynthesis in two mulberry genotypes with different drought tolerance[J]. Photosynthetica, 1998, 35(2): 279-283.
- 19 MULLER M, SANTARIUS K A. Changes in chloroplast membrane lipids during adaption of barely to salinity [J]. Plant Physiology, 1978, 62(3):326-331.
- 20 杨泽粟,张强,郝小翠. 自然条件下半干旱雨养春小麦生育后期旗叶光合的气孔和非气孔限制[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 174-182.
YANG Zesu, ZHANG Qiang, HAO Xiaocui. Stomatal or non-stomatal limitation of photosynthesis of spring wheat flag leaf at late growth stages under natural conditions in semiarid rainfed regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(2): 174-182. (in Chinese)
- 21 FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Physiology, 1982, 33(1): 317-345.