

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 12 期 Vol.33 No.12 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 12 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 森林低温霜冻灾害干扰研究综述 李秀芬, 朱教君, 王庆礼, 等 (3563)
- 碱蓬属植物耐盐机理研究进展 张爱琴, 庞秋颖, 阎秀峰 (3575)

个体与基础生态

- 中国东部暖温带刺槐花期空间格局的模拟与预测 徐琳, 陈效速, 杜星 (3584)
- 长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化 胡启鹏, 郭志华, 孙玲玲, 等 (3594)
- 油松天然次生林居群遗传多样性及与产地地理气候因子的关联分析 李明, 王树香, 高宝嘉 (3602)
- 施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响 张蕊, 王艺, 金国庆, 等 (3611)
- 围封对内蒙古大针茅草地土壤碳矿化及其激发效应的影响 王若梦, 董宽虎, 何念鹏, 等 (3622)
- 干热河谷主要造林树种气体交换特性的坡位效应 段爱国, 张建国, 何彩云, 等 (3630)
- 生物降解对黑碳及土壤上苯酚脱附行为的影响 黄杰勋, 莫建民, 李非里, 等 (3639)
- 3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应 吴芹, 张光灿, 裴斌, 等 (3648)
- 冬小麦节水栽培群体“穗叶比”及其与产量和水分利用的关系 张永平, 张英华, 黄琴, 等 (3657)
- 不同秧苗素质和移栽密度条件下臭氧胁迫对水稻光合作用、物质生产和产量的影响 彭斌, 李潘林, 周楠, 等 (3668)
- 根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响 陶先萍, 罗宏海, 张亚黎, 等 (3676)
- 光照和生长阶段对菖蒲根系泌氧的影响 王文林, 王国祥, 万寅婧, 等 (3688)
- 植物病原菌拮抗性野生艾蒿内生菌的分离、筛选和鉴定 徐亚军, 赵龙飞, 陈普, 等 (3697)
- 不同生物型棉蚜对夏寄主葫芦科作物的选择 肖云丽, 印象初, 刘同先 (3706)
- 性别和温度对中华秋沙鸭越冬行为的影响 曾宾宾, 邵明勤, 赖宏清, 等 (3712)

种群、群落和生态系统

- 基于干扰的汪清林区森林生态系统健康评价 袁菲, 张星耀, 梁军 (3722)
- 洞庭湖森林生态系统空间结构均质性评价 李建军, 刘帅, 张会儒, 等 (3732)

景观、区域和全球生态

- 川西米亚罗林区不同海拔岷江冷杉生长对气候变化的响应 徐宁, 王晓春, 张远东, 等 (3742)
- 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系 穆少杰, 李建龙, 周伟, 等 (3752)
- 地形因子对盐城滨海湿地景观分布与演变的影响 侯明行, 刘红玉, 张华兵, 等 (3765)
- 毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征 周淑琴, 荆耀栋, 张青峰, 等 (3774)
- 贵州白鹇湖沉积物中孢粉记录的 5.5 kaB. P. 以来的气候变化 杜荣荣, 陈敬安, 曾艳, 等 (3783)

典型河谷型城市春季温湿场特征及其生态环境效应..... 李国栋,张俊华,王乃昂,等 (3792)

秦岭南北近地面水汽时空变化特征..... 蒋 冲,王 飞,喻小勇,等 (3805)

露天矿区景观生态风险空间分异..... 吴健生,乔 娜,彭 建,等 (3816)

基于 Holdridge 和 CCA 分析的中国生态地理分区的比较 孔 艳,江 洪,张秀英,等 (3825)

资源与产业生态

中国农业生态效率评价方法与实证——基于非期望产出的 SBM 模型分析 潘 丹,应瑞瑶 (3837)

舟山市东极大黄鱼养殖系统能值评估..... 宋 科,赵 晟,蔡慧文,等 (3846)

不同基因型玉米间混作优势带型配置..... 赵亚丽,康 杰,刘天学,等 (3855)

气候与土壤对烤后烟叶类胡萝卜素和表面提取物含量的影响..... 陈 伟,熊 晶,陈 懿,等 (3865)

城乡与社会生态

成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益 张艳丽,费世民,李智勇,等 (3878)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 长白山南坡的岳桦林——长白山岳桦林位于海拔约 1700—2000m 之间的山坡。这种阔叶林分布在针叶林带的上面,成为山地森林的上缘种类,在世界山地森林中实属罕见。岳桦能够顽强地抗御长白山潮湿、寒冷、强风等恶劣气候因素,在严酷的环境条件下形成纯林,是与其独特的生长发育机理密切相关的。岳桦的枝干颇具韧性,在迎风处,由于风吹雪压,树干成片地向背风侧倾斜,这种特性使它能不畏风雪,顽强生存。随着海拔的升高,岳桦林也逐渐矮化,这是岳桦林保护自身生存,适应大自然的结果。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201207181018

陶先萍, 罗宏海, 张亚黎, 张旺锋. 根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花叶片光合生理特性的影响. 生态学报, 2013, 33(12): 3676-3687.

Tao X P, Luo H H, Zhang Y L, Zhang W F. Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip irrigation. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(12): 3676-3687.

根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花 叶片光合生理特性的影响

陶先萍, 罗宏海, 张亚黎, 张旺锋*

(石河子大学新疆兵团绿洲生态农业重点实验室/农学院, 石河子 832003)

摘要: 在新疆气候生态条件下, 采用管栽方法, 选用棉花新陆早 13 号和新陆早 33 号 2 个品种为供试材料, 通过人工限制根系垂直生长深度和水氮供应, 测定棉花叶片气体交换和叶绿素荧光参数、光合物质积累等, 探讨根域限制及水氮供应对棉花光合生理特性及产量形成的影响。结果表明: 与对照相比, 相同水氮供应条件下, 根域限制处理棉花从开花期至盛絮期叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和光化学猝灭系数(q_p)显著降低, 尤其在盛铃后期至盛絮期表现明显, 但潜在最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率($\Phi PS II$)未受到影响; 盛花期和盛絮期根重均显著降低, 但地上部总干物质、蕾铃干物质积累量及籽棉产量均显著高于对照。同一根域容积不同水氮处理棉花开花期至盛絮期的 P_n 、 G_s 和 F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、 q_p 均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$; 根域限制条件下适量水氮供应处理盛花期和盛絮期地上部总干物质和蕾铃干物质积累量均显著增加, 最终单株铃数、单铃重和籽棉产量均显著高于其它处理。因此, 在膜下滴灌棉花根域容积受限制条件下, 通过优化生育期水氮供应, 能改善叶片光合性能、增加地上部干物质积累量及其向生殖器官分配比例, 是挖掘膜下滴灌棉花产量潜力和提高效益的有效途径。

关键词: 棉花; 根域限制; 水氮供应; 光合速率; 叶绿素荧光; 产量

Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip irrigation

TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, ZHANG Wangfeng*

The Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture of Xinjiang Production and Construction Group / College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, China

Abstract: Cotton (*Gossypium* spp.), which is of tropical origin, is the most economically important textile fiber crop worldwide. Water and nitrogen are two major factors that limit the photosynthetic capacity and yield of cotton. The ability to absorb water and nutrients is closely related to the size and growing space of the root system. In Xinjiang province cotton is often cultivated at a high plant density with under-mulch drip irrigation, a method that saves both water and fertilizer application. In addition, the growing space of the root system is suppressed to a certain degree. The aim of this study was to evaluate the effects of nitrogen and water supply on photosynthesis and yield of cotton with a restricted root space grown with under-mulch drip irrigation. An improved understanding of the physiological mechanisms by which cotton acclimates to water, nitrogen supply and root restriction will be useful to improve the yield potential of cotton cultivated using this method. The experiment was conducted in Xinjiang in northwestern China from March to October, 2011. Two upland cotton cultivars, Xinluzao13 and Xinluzao 33, were selected as the plant material. Plants of both cultivars were grown in soil columns to restrict the depth of the root system and regulate the supply of water and nitrogen. We measured net

基金项目: 国家自然科学基金项目(31000675); 国家科技支撑计划项目(2006BAD21B02, 2007BAD44B07)资助

收稿日期: 2012-07-18; 修订日期: 2013-01-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Zhwf_agr@shzu.edu.cn

photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), photochemical efficiency of PS II ($\Phi PS II$), PS II photochemical quenching (q_p), and the biomass of various organs at different growth stages. Under the same water and nitrogen supply from the flowering stage to the full boll opening stage, the values of q_p , G_s , and P_n of root-restricted cotton plants were significantly lower compared with those of the control. This effect was greater at later growth stages. No differences in F_v/F_m and $\Phi PS II$ were observed between root-restricted and control plants. The root weight of root-restricted plants at the full flowering stage and full boll opening stage was lower than that of the control. However, the dry matter accumulation in the shoot and boll and the seed cotton yield were greater in root-restricted plants than those of the control. From the flowering stage to the full boll opening stage, P_n , G_s , F_v/F_m , $\Phi PS II$, and q_p of plants with the same root system volume but treated with different rates of water and nitrogen supply were ranked in the following order: W_1N_1 (moderate water and nitrogen) > W_0N_1 (water deficiency) > W_1N_0 (nitrogen deficiency) > W_0N_0 (water and nitrogen deficiency). At the full flowering and full boll opening stages, the dry matter accumulation in the shoot and boll of root-restricted plants supplied with moderate water and nitrogen was significantly greater than that in the other treatments. Consequently, the boll number per plant, single boll weight, and seed cotton yield were markedly higher in this treatment than in the other treatments. The root system of plants grown with under-mulch drip irrigation is confined to a limited space. Therefore, effective methods to promote the yield of cotton cultivated with under-mulch drip irrigation include optimization of water and nitrogen supply at all growth stages. Moderate supply of water and nitrogen can strengthen photosynthetic ability, increase dry matter accumulation in the shoot, and increase the photosynthate distribution from shoot biomass to reproductive organs. In practice, given the small drip volume but high frequency of application to cotton plants grown with under-mulch drip irrigation, it is likely that the most effective approach to save water and increase yield simultaneously is to increase plant density and adjust the inter- and intra-row spacing among plants in order to moderately limit root growth.

Key Words: cotton; root restriction; water and nitrogen supply; net photosynthetic rate; chlorophyll fluorescence; seed cotton yield

作物对水分养分的吸收能力与根系大小及其生长空间密切相关。Lilley & Fukai^[1]研究认为根系越大,作物吸收水分、养分的土壤空间加大,能获取更多的水分和养分,最终提高作物产量;Hurley^[2]等研究表明,植物根系生长空间受到过度的限制会阻碍植株生长发育,但是在水肥供应充足条件下,一定的根土空间基本上能够满足植株生长的需求^[3]。Zhang 等^[4]研究发现,在自然生态系统中,根系功能组分存在冗余现象;根系的冗余生长虽然有利于作物吸收水分和养分,但同时也消耗了植株生产的大量光合物质^[5]。已有研究表明,限制根系生长空间会显著降低作物叶片光合能力和冠、根生物量^[6],细胞分裂素(CTK)向叶片的流转速率减慢^[7]。因此,能否通过改变根区水氮供应,适度减少根系冗余,充分利用根系形态发育的可塑性增强水分和养分的吸收能力,进而提高作物光合性能已成为作物逆境生理研究的重点和热点^[8]。水分和氮素是膜下滴灌棉花光合作用和获得高产的主要限制因素^[9],通过水氮综合管理,增强棉株对水分、养分的吸收利用能力,可有效提高棉花的光合效率,调节光合产物的积累和分配,是调控棉花生长发育从而获得高产、稳产的重要措施之一^[10]。

新疆为无灌溉即无农业的干旱区,发展高效、资源节约型的节水灌溉技术是农业可持续发展的根本出路。目前,新疆大面积推广的大田作物膜下滴灌技术属于浅层灌溉,与传统灌溉方式相比,膜下滴灌方式下土壤水分湿润区主要分布在0—60 cm 土层,90%以上的根系集中在耕作层,根系的生长空间受到了一定程度的限制^[11]。与传统灌溉方式相比,膜下滴灌棉花产量提高了30%—50%,打破了“高产需要庞大根系来支撑”的传统观念^[1]。因此,研究膜下滴灌根域容积受限条件下棉花光合作用与产量的适应性及水氮供应的调节效应,对探求以土壤和作物根系关系为中心的农田调控措施具有重要意义。但有关膜下滴灌根域限制下水氮供应对棉花各生育时期光合生理的影响研究相对较少。本试验采用管栽研究方法,人工限制根系垂直生长深

度,利用滴灌技术精确控制耕层水分和氮素供应,分析根域限制下不同水氮供应对棉花光合特性、干物质累积与分配及产量的影响,探讨根域容积及水氮供应对棉花叶片光合生理和产量形成的调节效应与作用机理,为干旱区膜下滴灌栽培条件下棉花水肥管理提供理论和实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2011年4月—10月在石河子大学农学试验站(44°26'N,85°95'E)进行。本地区多年平均气温在6.5—7.2℃之间,无霜期为168—171 d; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温为3570℃—3729℃,年日照时数为2721—2818 h。试验地前茬棉花,土质中壤,平均容重为1.48 g/cm³,田间持水量为24.6% (占干土质量百分比);含有机质1.96%,碱解氮56.7 mg/kg,速效磷15.5 mg/kg,速效钾194.7 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用管栽方法,设置2个管栽深度:限根60 cm(H_0)和对照120 cm(H_1);不同管栽深度下分别设水分和氮素2因素。水分设正常供水处理(0—60 cm 田间持水量为75%, W_1)和水分胁迫处理(0—60 cm 田间持水量为55%, W_0);氮素设不施氮(N_0)和施氮(施氮0.20 g/kg 干土, N_1),组成再裂区试验方案。供试棉花品种为北疆棉花主栽品种新陆早13号和新陆早33号。采用直径30 cm、管壁厚1 cm、长40 cm的硬质PVC管;每3个管子纵向连接成一个整体管,管与管之间用铁环固定,每根管总长为120 cm。在装土的同时,将测定管埋入土柱中,采用电阻式水分张力感应器实时监测土壤水分的变化。选用尿素(含N 46%)做氮肥,其中30%氮肥基施,70%在生育期随水滴施; KH_2PO_4 (含 P_2O_5 22.8%)为磷肥,全部基施,按0.15g P_2O_5 /kg 干土施入;每桶总计施入尿素20g, KH_2PO_4 28 g。

播种前将PVC管排放于事先按尺寸挖好的高120 cm的方型土坑中,排列的尺寸模拟大田常规滴灌种植模式(30+60+30)cm,1膜4行,每处理3个重复,共12个根管,每根管中留苗4株,株距10 cm。土坑中先平铺一层直径约为3—8 cm的石子,并在其上铺100目尼龙网。管内装土模拟大田不同层次的土壤容重,20 cm为一层,挖取不同层次土块,按土壤原层次装入管内。根系生长垂直深度处理采取模拟大田土壤情况,在土柱中装土的过程中,通过网筛为100目尼龙网将土层分隔开的方式,其中限根处理是先将干土装入根管口下60—120 cm,然后再铺上尼龙网,撒上一层2 cm厚的细砂(阻断土壤水分和养分沿土壤毛细管传导),再将根管口下0—60 cm装入干土;对照整个根管中全部装干土。滴灌管系为北京绿源公司生产的 $\Phi 15$ 内镶式滴灌带,滴头间距30 cm,设计滴头流量2.7 L/h。4月21日播种,5月20日定苗。从三叶一心后,进行生育期土壤水分处理,收获期结束。滴水量用水表和球阀控制,其它田间管理措施同大田膜下滴灌棉花生产。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶片气体交换参数

分别在开花期、盛花期、盛铃前期、盛铃后期、吐絮期和盛絮期,采用Li-6400光合测定系统(Licor, USA),在晴朗无云天气10:00—12:00测定气体交换参数,借助人造光源,光强稳定在 $(1800 \pm 50) \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;每处理选取生长一致的棉株5株(5个重复)测定棉花主茎功能叶净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)等,打顶前选取倒四叶、打顶后倒三叶;每处理测定4—6片叶,取平均值。

1.3.2 叶片叶绿素荧光参数

采用PAM2100荧光仪和2030-B光适应叶夹(Walz, Germany)测定叶片的叶绿素荧光参数,测定与气体交换参数同时进行。每处理采用气体交换参数测量的叶片,在凌晨太阳未升起前测量叶片初始荧光(F_0)和最大荧光(F_m),计算最大光化学效率(F_v/F_m),在测量叶绿素荧光参数之前,手动输入对应叶片的 F_0 和 F_m ,随后打开光化光,强度为 $1800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,待荧光信号到达稳态后打开饱和脉冲光,测定任意时间的实际荧光产量(F_t)和光适应下的最大荧光产量(F_m'),计算实际光化学效率(Φ_{PSII})、光化学猝灭系数(q_p)等叶绿素荧光参数。

1.3.3 棉株干物质累积及产量

分别在盛花期和盛絮期,每个处理选取3根根管,先从子叶节处剪去管中植株地上部,分成茎、叶、籽棉、

铃壳等器官,然后将土柱挖出,分层(每 20 cm 为一层)拣取根系,用自来水冲洗,去除杂质后装袋带回实验室,105 ℃ 杀青 0.5 h,80 ℃ 条件下烘干至恒重后称量;以实收产量计产。

1.4 数据分析

数据采用 DPS 软件进行统计分析,作图采用 Sigmaplot 完成。

2 结果与分析

2.1 叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)的变化

从开花期至盛絮期,不同处理条件下 P_n 呈现不断降低的趋势(图 1),其中新陆早 33 号叶片 P_n 显著高于新陆早 13 号;相同水氮供应条件下,限根处理(H_0)的 P_n 均显著低于对照处理(H_1),尤其在盛铃后期以后表现较为明显,表明根域限制影响棉花叶片 P_n 。相同根域容积条件下不同水氮处理从开花期至盛絮期的 P_n 均表现为 W_1N_1 处理显著高于其它处理, W_0N_1 和 W_1N_0 处理间无显著差异,但均显著高于 W_0N_0 处理,表明适宜的水氮供应可显著增强棉花叶片 P_n ,水分亏缺下施氮及氮素亏缺下适宜灌溉均能减轻水氮双重亏缺对 P_n 的影响。根域限制与水氮互作表现为,限根处理开花期至盛铃前期 W_1N_1 、 W_1N_0 、 W_0N_1 和 W_0N_0 的 P_n 分别比对照低 5.19%、2.28%、3.49% 和 8.93%,盛铃后期至盛絮期分别比对照低 18.66%、23.16%、23.73% 和 49.80%,表明盛铃后期至盛絮期根域限制下的叶片 P_n 对水氮供应反应敏感;水氮双重亏缺会加大由根域限

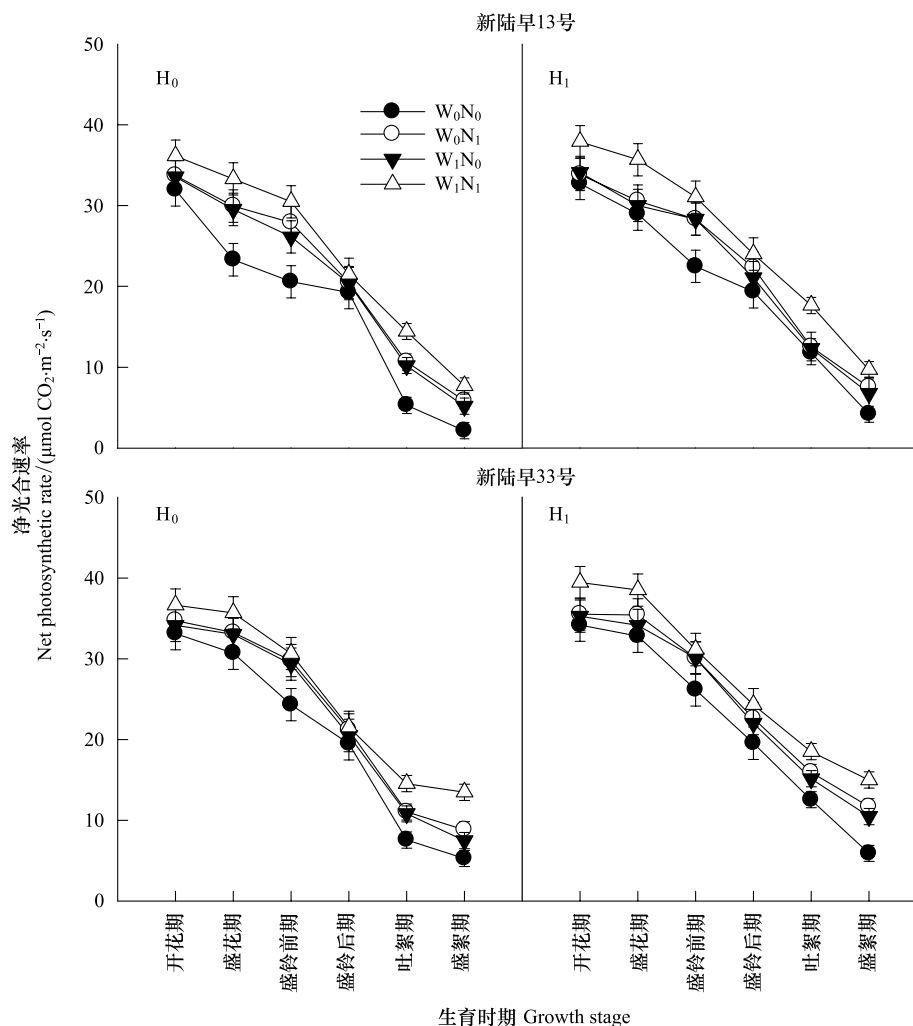


图 1 根域限制下水氮供应对棉花叶片净光合速率(P_n)的影响

Fig.1 Effects of irrigation and nitrogen application regimes on leaves net photosynthetic rate of cotton cultivated under root restriction

H_0 :限根处理, H_1 :对照;开花期 Flowering stage;盛花期 Full flowering stage;盛铃前期 Prophase full boll stage,盛铃后期 Late full boll stage;吐絮期 Boll opening stage;盛絮期 Full boll opening stage

制引起的 P_n 下降程度、适宜的水氮供应可在一定程度上补偿生育期间根域限制对叶片光合功能的负面效应。

本试验条件下,不同处理间 G_s 的变化趋势与 P_n 高度一致(图2),表明根域限制和土壤水氮亏缺均降低了气孔导度;较大的根系生长空间和适量水氮供应均可改善气孔因素,从而有利于 P_n 的提高。

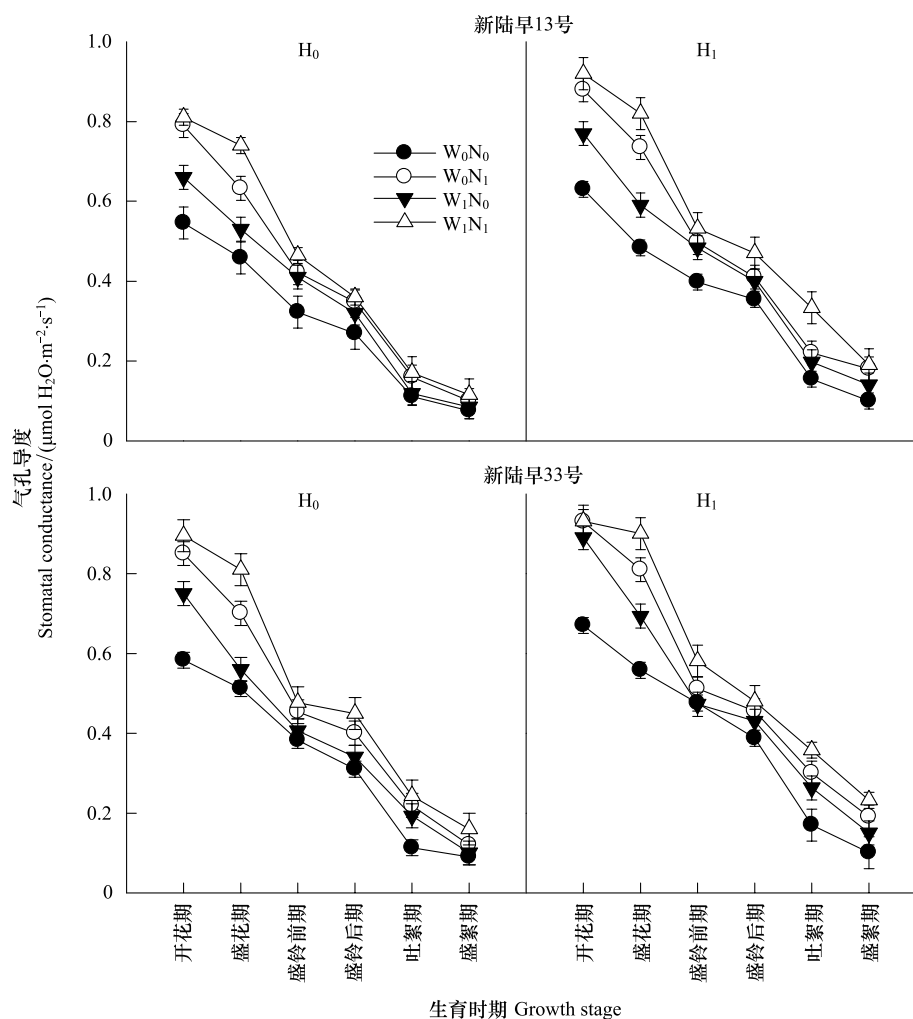


图2 根域限制下水氮供应棉花叶片气孔导度(G_s)的影响

Fig. 2 Effects of irrigation and nitrogen application regimes on leaves stomatal conductance of cotton cultivated under root restriction

2.2 叶片叶绿素荧光参数的变化

试验表明(图3),从开花期至吐絮期,不同处理 F_v/F_m 稳定在 0.78—0.89,进入盛絮期有所降低;相同水氮供应条件下根域容积处理间 F_v/F_m 无明显差异,表明本试验中的根域容积限制并未影响 PS II 的潜在最大光化学效率。无论限根还是对照条件下水氮处理间的 F_v/F_m 均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$,以吐絮期至盛絮期处理间差异较大,表明水分亏缺或氮素亏缺主要影响了生育后期棉花叶片 PS II 的潜在最大光化学效率。

PS II 非环式电子传递效率($\Phi PS II$)反映了 PS II 的实际光化学效率^[12]。试验表明(图4), $\Phi PS II$ 从开花期至盛絮期逐渐降低,其中品种间 $\Phi PS II$ 无明显差异,根域容积处理对 $\Phi PS II$ 亦无影响。无论限根还是对照条件下水氮处理间的 $\Phi PS II$ 均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$,其中 W_1N_1 和 W_0N_0 2 个处理间达显著性差异,表明适宜的土壤水氮供应可有效提高 PS II 的实际光化学效率;土壤水氮双重亏缺显著影响线性电子传递效率,净光合速率下降。

植物叶片的荧光光化学猝灭系数(q_p)是对 PS II 原初电子受体 QA 氧化态的一种量度,反映了 PS II 天线

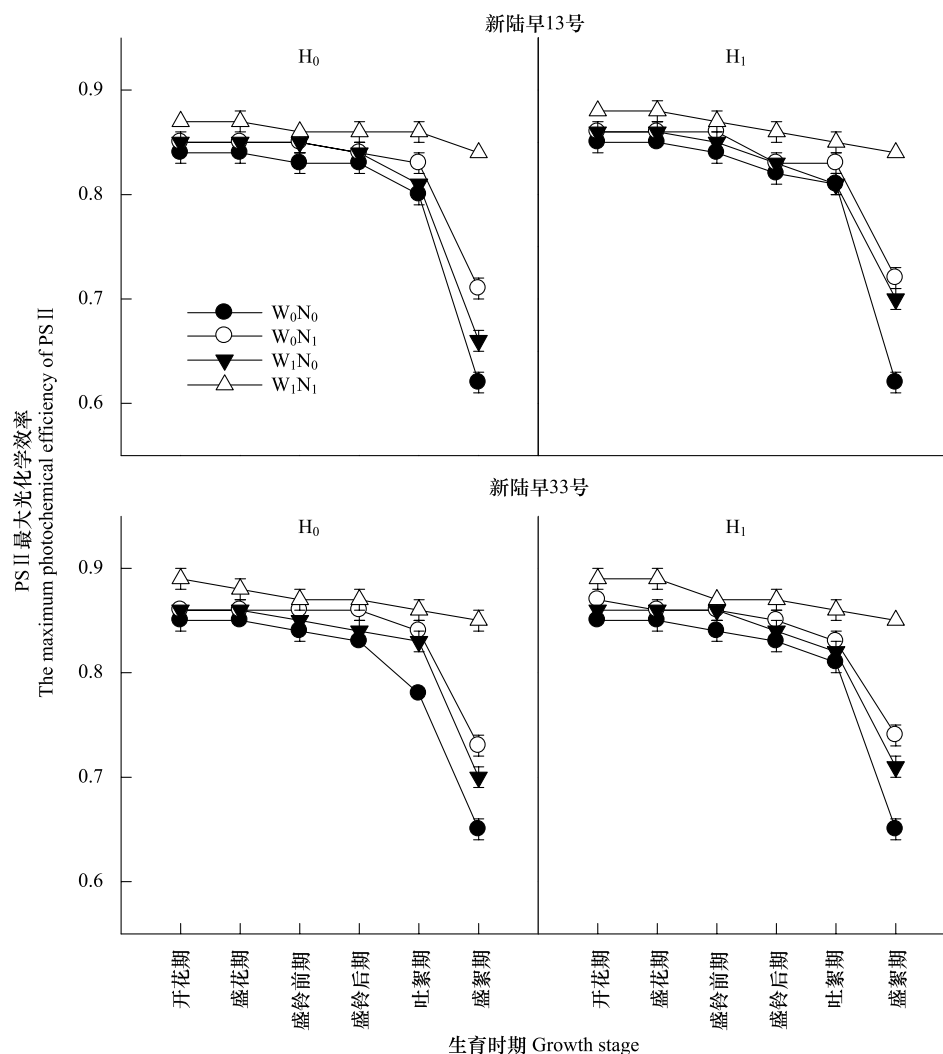


图3 水氮供应对根域限制棉花叶片 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 的影响

Fig. 3 Effects of irrigation and nitrogen application regimes on the maximum photochemical efficiency of leaves of cotton cultivated under root restriction

色素捕获的光能用于光化学电子传递的份额,也反映了 PS II 反应中心的开放程度^[12]。试验表明,从开花期开始 q_p 呈现缓慢降低趋势(图 5),其中新陆早 33 号的 q_p 显著高于新陆早 13 号。相同水氮供应条件下限根处理(H_0)的 q_p 从开花期至盛絮期均显著低于对照(H_1),以吐絮期至盛絮期新陆早 13 号限根处理的 q_p 值下降幅度较大,达到 7.58%,新陆早 33 号的下降幅度为仅为 3.47%。表明根域限制一定程度上降低了 PS II 反应中心开放程度。同一根域容积条件下水氮供应方式对 q_p 的影响均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$,表明适宜的土壤水氮供应能有效提高 PS II 反应中心的开放比例。根域限制与水氮互作表现为在 W_1N_1 、 W_1N_0 、 W_0N_1 和 W_0N_0 水氮供应条件下,限根处理盛铃前期以前的 q_p 分别比对照低 5.15%、1.56%、2.39% 和 5.05%,盛铃后期以后分别比对照低 5.23%、1.94%、3.19% 和 12.45%。可见根域限制下盛铃后期以后的 q_p 对土壤水氮双重亏缺反应较为敏感。

2.3 干物质累积与分配的变化

试验表明,根域限制(H_0)可显著提高地上部总干物质和蕾铃干物质累积量,较对照分别提高 14.29% 和 10.64%,表明适度的根土空间限制会促使棉花光合产物优先向地上部器官分配。相同根域条件下不同水氮处理间的地上部总干物质和蕾铃干物质累积量均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$ (表 1),其中 W_1N_1 处理地上部总干物质累积量分别比其它水氮处理高 33.62%、53.81% 和 90.41%,蕾铃干物质累积量分别比其它水

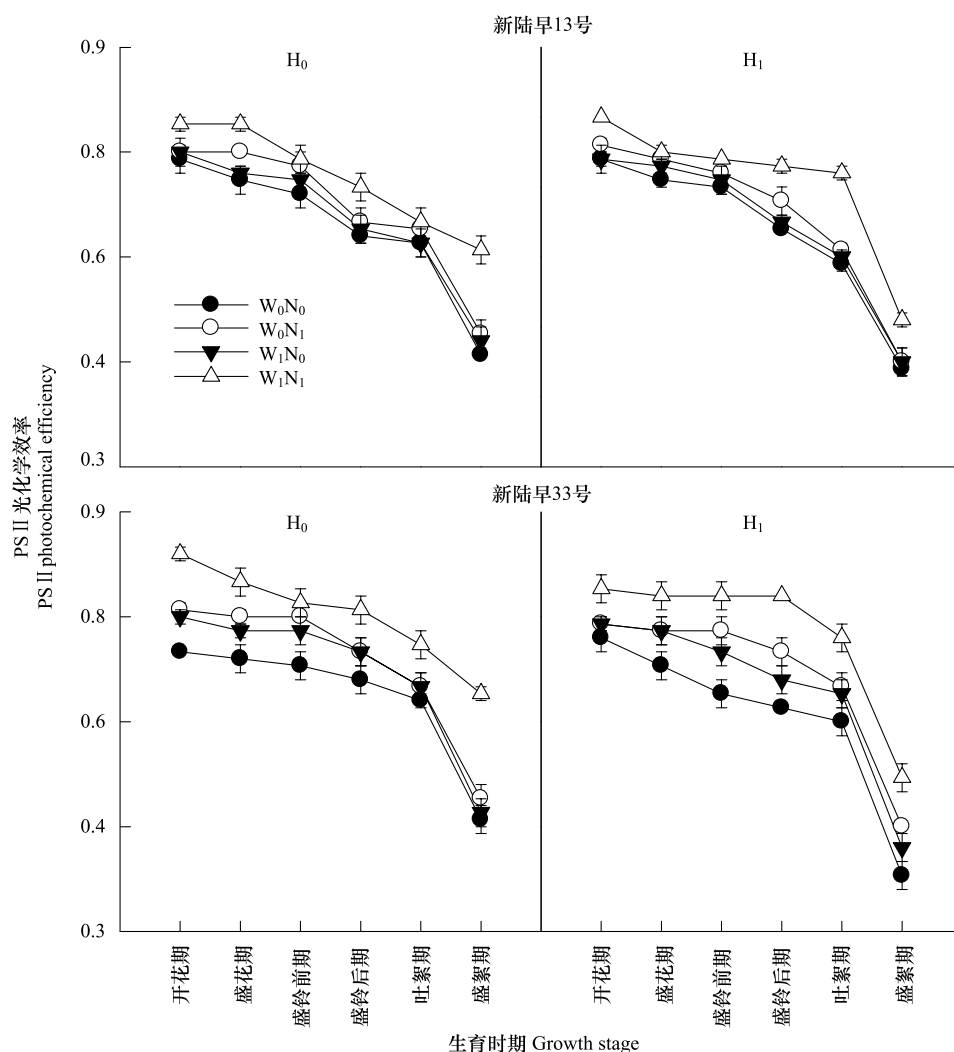


图4 水氮供应对根域限制棉花叶片 PS II 光化学效率 (Φ PS II) 的影响

Fig. 4 Effects of irrigation and nitrogen application regimes on the PS II photochemical efficiency of leaves of cotton cultivated under root restriction

氮处理高 38.84%、65.09% 和 112.38%。说明适宜的水氮供应可有效提高叶片植株地上部总干物质和蕾铃干物质累积量;土壤水分亏缺下施用氮肥可补偿水分亏缺对植株地上部总干物质和蕾铃干物质累积量的影响。根域限制与水氮互作表现为,限根处理的 W_1N_1 、 W_1N_0 、 W_0N_1 和 W_0N_0 的地上部总干物质累积量比对照依次高出 19.41%、12.50%、12.69% 和 12.57%;蕾铃干物质累积量比对照依次高出 11.66%、10.03%、6.08% 和 14.81%;无论在盛花期还是在盛絮期,新陆早 33 号的地上部和蕾铃干物质质量均显著高于新陆早 13 号。

根域限制 (H_0) 显著降低了根干重,降幅达 35.87%。同一根域容积条件下不同水氮处理间根重均表现为 $W_0N_0 > W_1N_0 > W_0N_1 > W_1N_1$ (表 1),表现出与地上部总干物质和蕾铃干物质累积相反的变化趋势, W_0N_0 处理下的根重较其它水氮处理分别高 56.85%、28.88% 和 101.30%。表明水氮亏缺促使光合产物向根系分配较大,导致根重增加。根域限制与水氮互作表现为,限根处理 W_0N_0 、 W_1N_0 、 W_0N_1 和 W_1N_1 水氮供应条件下的根重较对照依次降低 26.23%、27.38%、64.26% 和 25.62%;不同品种间新陆早 33 号的根重始终高于新陆早 13 号。从根冠干物质分配比例看,从盛花期到盛絮期,两品种的根冠比均呈现降低趋势,新陆早 13 号的根冠比高于新陆早 33 号。根域限制 (H_0) 显著降低了根冠比,降幅达 51.90%。同一根域容积条件下不同水氮处理间根冠比均表现为 $W_0N_0 > W_1N_0 > W_0N_1 > W_1N_1$ (表 1),其中 W_0N_0 处理下的根冠比较其它水氮处理分别高

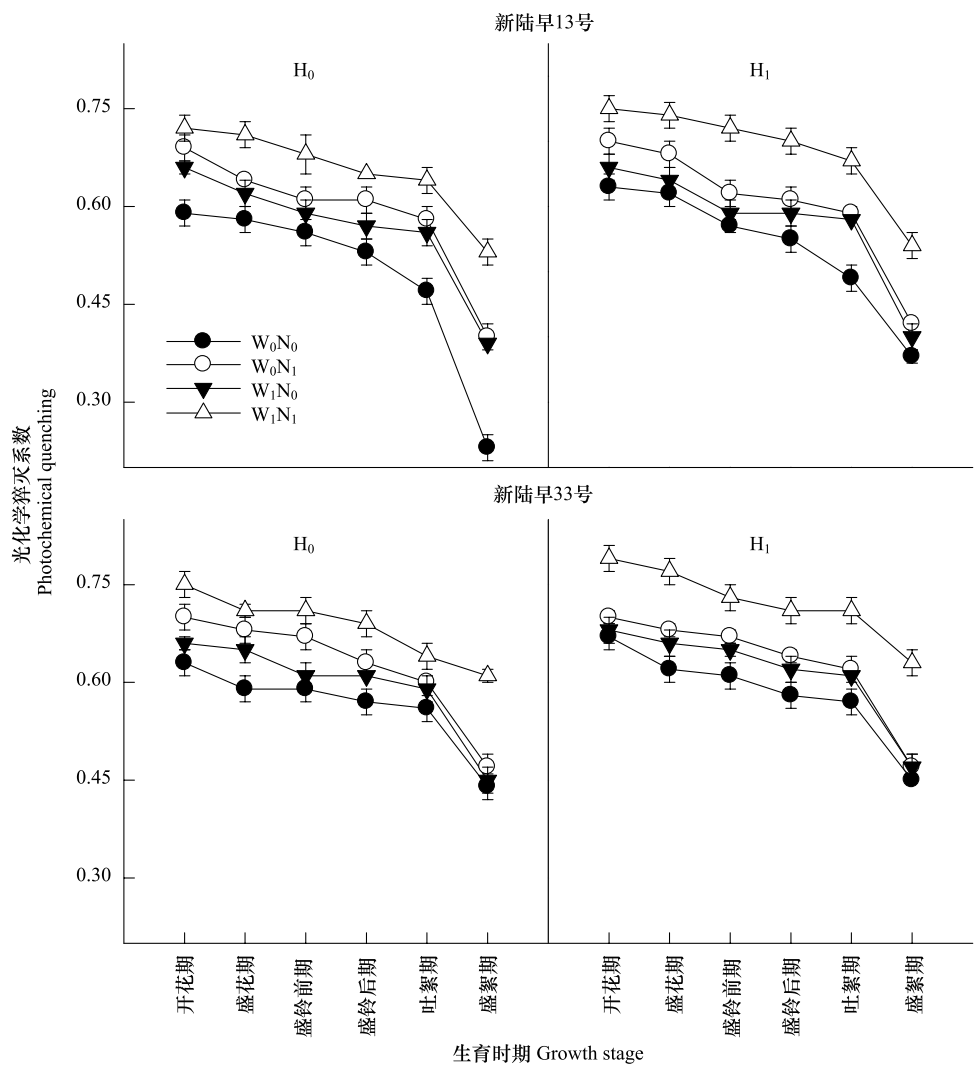


图 5 水氮供应对根域限制棉花叶片光化学淬灭系数(q_p)的影响

Fig. 5 Effects of irrigation and nitrogen application regimes on the PS II photochemical quenching of leaves of cotton cultivated under root restriction

表 1 水氮供应对根域限制棉花干物质累积与分配的影响

Table 1 Effects of irrigation and nitrogen application regimes on accumulation and distribution of dry matter of cotton cultivated under root restriction

生育时期 Growth	品种 Variety	处理 Treatment	茎叶/g Stemleaf	蕾铃/g Boll weight	地上部分/g Shoot weight	根系/g Root weight	根冠比 Root/Shoot
盛花期 Full flowering	新陆早 13 号 Xinluzao 13	H ₀ W ₀ N ₀	16.10±1.92ef	7.81±0.27de	23.91±2.19ef	13.14±0.64b	0.55±0.02b
		H ₀ W ₀ N ₁	25.18±2.82b	11.80±0.51b	36.98±3.33b	10.24±0.60d	0.28±0.01d
		H ₀ W ₁ N ₀	23.09±2.58c	7.86±0.37d	30.95±2.95d	10.58±0.52c	0.34±0.02c
		H ₀ W ₁ N ₁	34.73±3.23a	13.88±0.63a	48.61±3.86a	9.66±0.48e	0.20±0.01e
		H ₁ W ₀ N ₀	15.57±2.54f	7.37±0.37f	22.94±2.91f	18.25±0.85a	0.80±0.07a
		H ₁ W ₀ N ₁	23.01±2.13c	10.93±0.53c	33.94±2.66c	13.14±0.65c	0.39±0.02c
		H ₁ W ₁ N ₀	16.94±2.57e	7.56±0.37ef	24.49±2.94e	13.50±0.64b	0.55±0.02b
		H ₁ W ₁ N ₁	22.03±2.18d	13.77±0.67a	35.80±2.85b	9.89±0.55d	0.28±0.01d
	新陆早 33 号 Xinluzao 33	H ₀ W ₀ N ₀	20.60±1.77f	7.99±0.37e	28.59±2.14f	13.48±0.63c	0.47±0.03c
		H ₀ W ₀ N ₁	25.08±2.04c	13.78±0.63c	38.86±2.67c	10.50±0.50f	0.27±0.01f
		H ₀ W ₁ N ₀	23.87±2.28cd	12.63±0.61cd	36.50±2.89d	12.09±0.74e	0.33±0.01e
		H ₀ W ₁ N ₁	37.67±3.34a	23.32±1.24a	60.99±4.58a	10.12±0.73h	0.17±0.00h

续表

生育时期 Growth	品种 Variety	处理 Treatment	茎叶/g Stemleaf	蕾铃/g Boll weight	地上部分/g Shoot weight	根系/g Root weight	根冠比 Root/Shoot
盛絮期 Full boll opening	新陆早 13 号 Xinluzao 13	H ₁ W ₀ N ₀	15.43±1.51g	7.53±0.27e	22.96±1.78g	18.46±0.87a	0.81±0.03a
		H ₁ W ₀ N ₁	22.95±1.85de	12.57±0.86cd	35.53±2.71de	13.44±0.63d	0.38±0.01d
		H ₁ W ₁ N ₀	22.57±2.43e	11.11±0.58d	33.68±3.01e	18.01±0.83b	0.54±0.02b
		H ₁ W ₁ N ₁	29.80±2.75b	20.14±1.01b	49.94±3.76b	10.99±0.75g	0.22±0.00g
	新陆早 33 号 Xinluzao 33	H ₀ W ₀ N ₀	37.27±4.03d	27.14±1.31f	64.41±5.34e	35.94±1.90b	0.56±0.02b
		H ₀ W ₀ N ₁	47.15±5.88b	38.91±1.98c	86.06±7.86b	18.71±0.88e	0.22±0.01e
		H ₀ W ₁ N ₀	36.29±4.82d	33.09±1.57e	69.38±6.39d	20.06±1.08d	0.29±0.01d
		H ₀ W ₁ N ₁	49.22±5.22ab	44.86±2.82a	94.08±8.04a	11.75±0.73f	0.13±0.00f
		H ₁ W ₀ N ₀	36.43±3.04d	20.86±1.75g	57.29±4.79f	41.40±2.06a	0.72±0.03a
		H ₁ W ₀ N ₁	41.79±4.68c	35.75±1.79d	77.54±6.47c	24.13±1.05c	0.31±0.01c
		H ₁ W ₁ N ₀	35.48±4.14d	32.90±1.69e	68.38±5.83d	38.64±1.87b	0.57±0.02b
		H ₁ W ₁ N ₁	51.06±6.15a	40.98±2.88b	92.04±9.03a	19.03±0.76e	0.21±0.01e
		H ₀ W ₀ N ₀	34.63±4.27g	31.16±1.69e	65.79±5.96g	36.51±1.93b	0.56±0.02b
		H ₀ W ₀ N ₁	54.92±5.25c	41.26±2.91c	96.18±8.16c	19.53±0.94e	0.20±0.01e
		H ₀ W ₁ N ₀	47.49±5.21d	36.57±1.87d	84.06±7.08d	21.60±1.07d	0.26±0.01d
		H ₀ W ₁ N ₁	80.09±5.41a	65.36±3.73a	145.45±9.14a	14.74±0.63g	0.10±0.00g
		H ₁ W ₀ N ₀	33.70±3.71g	26.60±1.92f	60.30±5.63h	41.54±2.18a	0.69±0.03a
		H ₁ W ₀ N ₁	43.42±5.2e	36.29±1.82d	79.72±7.02e	24.27±1.22c	0.31±0.02c
		H ₁ W ₁ N ₀	38.90±4.96f	34.47±1.87de	73.38±6.83f	40.59±2.11b	0.55±0.02b
		H ₁ W ₁ N ₁	69.56±6.06b	54.21±2.71b	123.77±8.77b	19.10±0.83f	0.15±0.00f

表内数据为平均值±标准差;每列数据字母相同者表示差异未达显著水平($P > 0.05$);字母不同者表示差异达显著水平($P < 0.05$)

57.39%、122.44%和275.57%;表明土壤水氮亏缺使作物根冠比增加。根域限制与水氮互作表现为,盛花期限根处理的 W₀N₀、W₁N₀、W₀N₁ 和 W₁N₁ 水氮供应条件下根冠比较对照依次降低 57.73%、61.30%、39.90%和35.88%,盛絮期依次降低 26.81%、105.36%、46.54%和58.84%。可见,在限根条件下,配合水氮供应使根冠比降低的趋势随生育期推进而愈加明显。

2.4 产量及其构成的变化

由表2可以看出,根域限制(H₀)显著提高了棉花的籽棉产量,增幅为18.03%。各水氮处理下籽棉产量均为 W₁N₁>W₀N₁>W₁N₀>W₀N₀,W₁N₁ 处理下的籽棉产量比其它分别高 52.28%、77.08%和220.58%。根域限制与水氮互作表现为在 W₁N₁、W₁N₀、W₀N₁ 和 W₀N₀ 水氮供应条件下,限根处理的产量比对照依次高出 23.71%、9.43%、18.83%和20.14%;新陆早33号的产量显著高于新陆早13号。进一步考察产量构成因素,根域限制(H₀)可显著提高单铃重和单株结铃数,单铃重和单株结铃数分别提高6.50%和13.41%。两品种单铃重和单株结铃数在各水氮处理下均表现为 W₁N₁>W₀N₁>W₁N₀>W₀N₀,在 W₁N₁ 处理下的单铃重分别比后其它处理依次高9.54%、17.73%和21.57%,单株结铃数分别比其它处理高出26.03%、62.87%和168.65%。根域限制与水氮互作表现为在 W₁N₁、W₁N₀、W₀N₁ 和 W₀N₀ 水氮供应条件下,限根处理的单株结铃数比对照依次高出7.08%、16.79%、15.48%和14.29%,单铃重依次高出7.51%、10.93%、3.66%和3.92%。由以上可见,适当限根配合适量水氮供应有利于提高单株结铃数、增强铃库强度,最终提高产量。

3 讨论

3.1 根域限制下棉花叶片光合速率变化及其对水氮的响应

Tschaplinsk^[13]和Will^[14]研究表明,根系生长受限时即使在水肥供应充足条件下也不能提供满足植物生长所需要的养分和水分,认为根域限制减弱了根系吸收水肥的能力,水分胁迫是根域限制下 P_n 降低的主要原因。Thomas和Strain^[15]研究发现,根域限制下 P_n 降低与 G_s 无关;当把棉株从较小根域容积移入较大根域容

积后,光合能力很快恢复,因此认为库限制反馈抑制可能是 P_n 的调节机制。本试验条件下,根域容积限制条件下 P_n 和 G_s 显著低于对照,因此认为根域限制下 P_n 下降可能是由于 G_s 降低造成的^[16]。此外,本研究中限根处理的棉株叶片 P_n 高值持续时间较短,后期 P_n 衰退速度较快,主要是由于限根处理限制了根系在土壤的扩展深度,从而减少了深层土壤的根量,而深层根系对保持叶片叶绿素含量和维持叶片光合功能具有重要作用^[17]。这可能是目前膜下滴灌技术应用后棉花生育后期大面积红叶早衰发生严重^[18]的原因之一。

表 2 水氮供应对根域限制棉花产量及其构成的影响

Table 2 Effects of irrigation and nitrogen application regimes on yield and yield formation of cotton cultivated under root restriction

品种 Variety	处理 Treatment	单株结铃数 Boll number per plant	单铃重 Boll weight/g	籽棉产量 Seed cotton yield/(g/m ²)
新陆早 13 号 Xinluzao 13	H ₀ W ₀ N ₀	3.0±0.1f	4.5±0.1de	192.5±1.1g
	H ₀ W ₀ N ₁	6.0±0.1c	4.9±0.0b	354.1±3.5c
	H ₀ W ₁ N ₀	4.7±0.1d	4.5±0.1d	299.4±2.2e
	H ₀ W ₁ N ₁	7.3±0.1a	5.0±0.0a	453.9±4.1a
	H ₁ W ₀ N ₀	2.3±0.0g	4.2±0.0f	141.8±1.3h
	H ₁ W ₀ N ₁	4.7±0.1d	4.5±0.0de	330.0±2.2d
	H ₁ W ₁ N ₀	4.0±0.0e	4.4±0.0e	276.2±1.1f
	H ₁ W ₁ N ₁	6.6±0.21b	4.7±0.1c	411.8±6.8b
新陆早 33 号 Xinluzao 33	H ₀ W ₀ N ₀	3.0±0.0g	4.6±0.0cd	205.5±1.4g
	H ₀ W ₀ N ₁	7.0±0.2c	5.5±0.1b	448.9±1.1c
	H ₀ W ₁ N ₀	5.3±0.1e	4.8±0.1cd	420.1±6.4d
	H ₀ W ₁ N ₁	8.3±0.3a	6.2±0.4a	881.8±21.6a
	H ₁ W ₀ N ₀	3.0±0.0g	4.6±0.0d	196.5±1.8g
	H ₁ W ₀ N ₁	6.7±0.1d	4.9±0.1c	402.4±2.4e
	H ₁ W ₁ N ₀	4.7±0.1f	4.6±0.0cd	325.0±7.8f
	H ₁ W ₁ N ₁	8.0±0.3b	5.8±0.1b	642.7±13.5b

表内数据为平均值±标准差;每列数据字母相同者表示差异未达显著水平($P > 0.05$);字母不同者表示差异达显著水平($P < 0.05$)

水氮能协调地上部与地下部生长,促进根域限制下作物根系生长,减轻因限根所引起的不良影响^[19]。张永清等研究表明,在根域限制下高粱 P_n 降低,但根系活力及活性吸收面积占总吸收面积的百分数增加^[3]。刘瑞显等研究发现^[20],水氮供应可有效提高盆栽棉花叶片内源保护酶活性、降低膜脂过氧化程度,减少脱落酸含量而增大细胞分裂素、生长素和赤霉素含量,是 P_n 提高的内在生理原因之一。本试验结果显示,各水氮处理间 P_n 和 G_s 均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$,表明根域限制条件下合理水氮供应使 G_s 升高,最大限度地保持光合速率在较高水平^[16]。因此,实际生产中通过播前灌、深施肥等栽培措施延伸根系生长空间的同时,在棉花生育期间通过合理的水氮运筹,是提高棉花叶片光合能力、延长光合功能期的有效途径之一。

3.2 根域限制下棉花叶片叶绿素荧光参数变化及其对水氮的响应

试验表明,不同处理从开花期至盛絮期 F_v/F_m 一直稳定在 0.78—0.89(图 3),说明 0—60 cm 土层根域限制并未对植株生长形成逆境胁迫^[21]。与对照相比,在本试验条件下,根域限制显著降低了 q_p 值(图 5),但对 F_v/F_m 和 $\Phi PS II$ (图 4)均无影响,因此认为根域限制下由于光反应阶段 q_p 下降造成叶片 P_n 降低。不同品种间 F_v/F_m 和 $\Phi PS II$ 无显著差异,但新陆早 33 号的 q_p 显著高于新陆早 13 号,表明新陆早 33 号的光化学猝灭系数明显高于新陆早 13 号。

适量灌水施氮能在一定程度上改善棉花叶片光合性能,维持叶片较高的 PS II 最大光化学效率,提高 PS II 总的光化学量子产量,使叶片所吸收的光能较充分地用于光合作用^[22]。本试验中, F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 和 q_p 在各水氮处理间都表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$,表明合理的水氮供应能够有效提高棉花叶片 PS II 反应中心光能转化效率和光化学猝灭系数,增强光能捕获和利用效率,将更多的光能用于推动光合电子传递,从而提

高光合电子传递能力^[20,23]。

3.3 根域容积和水氮供应对棉花产量形成及其对水氮的响应

李话和张大勇^[24]对 6 个不同年代春小麦品种的研究发现,随着育成年代推进逐渐呈现出根量减小的趋势。蔡昆争等^[25]对 10 个水稻品种的研究发现,根域限制后根冠比的降低对地上部生长影响不大甚至有一定的促进作用。本试验中,棉株地上部总干物质累积量及籽棉产量均表现为限根处理显著高于对照,而根冠比的变化与之相反(表 1,表 2)。可见,根域限制降低了根冠比,能促进光合产物向地上部分分配增加,减少根系的冗余生长和呼吸消耗^[26],这可能是膜下滴灌条件下棉花根系生长受到限制后,经济产量大幅增加的主要原因之一。新陆早 33 号地上部干物质累积量和产量均明显高于新陆早 13 号,而根冠比却低于新陆早 13 号,可能是因为品种演替过程中减少了根系冗余^[27],因此,适合滴灌条件的棉花品种应具有较小的根冠比。

本研究表明,植株地上部总干物质质量、蕾铃干物质质量、籽棉产量在各水氮处理下均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$ (表 1,表 2)。张永清和苗果园^[3]研究认为,在水肥供应良好的栽培条件下,一定的根土空间基本上能够满足高粱植株生长的需求,未限根高粱实际上存在一定的根系冗余生长现象;冗余根系会造成不良根冠比,消耗大量光合产物而使地上部生长受到一定影响^[25];卢彩玉等^[28]研究发现,在水肥等管理水平较高的栽培环境中,根域限制抑制了葡萄树体地上部新梢的旺盛生长,提高了花穗数量和质量。本研究表明,在滴灌条件下水肥供应良好,适当的根域限制会促进棉花地上部的生长,提高光合产物向生殖器官分配比例,经济产量提高。因此,结合膜下滴灌滴水量少、滴水次数频繁的特点,通过增加种植密度、调整株行距配置等措施适度限制棉花根系生长,采用少量多次的滴灌模式可能是实现节水增产的有效途径。

4 结论

棉花根域限制后降低了净光合速率 P_n 、气孔导度 G_s 和光化学猝灭系数 q_p ,对潜在最大光化学效率 F_v/F_m 、实际光化学效率 $\Phi PS II$ 无影响,但地上部总干物质、蕾铃干物质累积量、产量都有所提高。相同根域容积条件下, P_n 、 G_s 、 F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、 q_p 、地上部与蕾铃干物质累积量、产量在各水氮处理下均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$,表明水氮供应改善了气孔因素,并提高了 PS II 的光化学活性和光化学利用效率,增强了光合作用,最终使生物量与产量提高。根域限制与水氮供应表现出互作优势,根域限制下适量水氮供应处理的地上部与蕾铃干物质累积量、单株结铃数、单铃重与产量均明显高于其它各处理。因此,在水肥供应良好的膜下滴灌条件下,适当的根域限制可以降低根冠比、增加地上部光合物质累积,促进光合产物向生殖器官运转,并优化产量结构与形成,最终提高产量。

References:

- [1] Lilley J M, Fukai S. Effect of timing and severity of water deficit on four diverse rice cultivars I. Rooting pattern and soil water extraction. *Field Crops Research*, 1994, 37(3): 205-213.
- [2] Hurley M B, Rowarth J S. Resistance to root growth and changes in the concentrations of ABA within the root and xylem sap during root-restriction stress. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50(335): 799-804.
- [3] Zhang Y Q, Miao G Y. Effects of soil root-growing space on root physiological characteristics and grain yield of sorghum. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 635-639.
- [4] Zhang H, Forde B G. Regulation of Arabidopsis root development by nitrate availability. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 51(342): 51-59.
- [5] Duan S S, Gu W X, Zhang D Y, Li F M. Relationship between root system characteristics and drought resistance of wheat populations in semiarid region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(2): 134-138.
- [6] Kharkina T G, Ottosen C O, Rosenqvist E. Effects of root restriction on the growth and physiology of cucumber plants. *Physiologia Plantarum*, 1999, 105(3): 434-441.
- [7] Yong J W H, Letham D S, Wong S C. Effects of root restriction on growth and associated cytokinin levels in cotton (*Gossypium hirsutum*). *Functional Plant Biology*, 2010, 37(10): 974-984.
- [8] Markewitz D, Devine S, Davidson E A, Brando P, Nepstad D C. Soil moisture depletion under simulated drought in the Amazon: impacts on deep root uptake. *New Phytologist*, 2010, 187(3): 592-607.
- [9] Li P L, Zhang F C. Regulation effect of water and nitrogen on cotton biomass and yield under different drip irrigation patterns. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2814-2820.
- [10] Liu X Y, Tian C Y, Ma Y J, Liu H P. Water consumption characteristics and scheduling of drip irrigation under plastic film for cotton in south

- Xinjiang. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(1): 108-112.
- [11] Wei C Z, Ma F Y, Lei Y W, Li J H, Ye J, Zhang F S. Study on cotton root development and spatial distribution under film mulch and drip irrigation. *Cotton Science*, 2002, 14(4): 209-214.
- [12] Schreiber U, Bilger W, Neubauer C. Chlorophyll fluorescence as a noninvasive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis // Schulze E D, Caldwell M M, eds. *Ecophysiology of Photosynthesis*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1994.
- [13] Tschaplinski T J, Blake T J. Effects of root restriction on growth correlations, water relations and senescence of alder seedlings. *Physiologia Plantarum*, 1985, 64(2): 167-176.
- [14] Will R E, Teskey R O. Effect of elevated carbon dioxide concentration and root restriction on net photosynthesis, water relations and foliar carbohydrate status of loblolly pine seedlings. *Tree Physiology*, 1997, 17(10): 655-661.
- [15] Thomas R B, Strain B R. Root restriction as a factor in photosynthetic acclimation of cotton seedlings grown in elevated carbon dioxide. *Plant Physiology*, 1991, 96(2): 627-634.
- [16] Song H X, Li S X. Effect of nitrogen on some physiological characteristics in relation with photosynthesis of maize under restricted roots. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(4): 28-32.
- [17] Luo H H, Zhang H Z, Du M W, Huang J J, Zhang Y L, Zhang W F. Regulation effect of water storage in deeper soil layers on root physiological characteristics and leaf photosynthetic traits of cotton with drip irrigation under mulch. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(6): 1337-1345.
- [18] Xie Z L, Tian C Y, Bian W G. Effects of water and nitrogen on cotton root architecture under film drip irrigation. *Acta Gossypii Sinica*, 2009, 21(6): 508-514.
- [19] Song H X, Li S X. Effects of root growing space of on maize its absorbing characteristics. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(8): 899-904.
- [20] Liu R X, Wang Y H, Chen B L, Guo W Q, Zhou Z G. Effects of nitrogen levels on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics under drought stress in cotton flowering and boll-forming stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(4): 675-683.
- [21] Johnson G N, Youn G A J, Scholes J D, Horton P. The dissipation of excess excitation energy in British plant species. 1993, 16(6): 673-679.
- [22] Zhang W F, Gou L, Wang Z L, Li S K, Yu S L, Cao L F. Effect of nitrogen on chlorophyll fluorescence of leaves of high-yielding cotton in Xinjiang. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(8): 893-898.
- [23] Gou L, Yan J, Han C L, Zhao R H, Zhang W F, Yang X J. Effects of nitrogen rates on photosynthetic characteristics and yield of high-yielding cotton in Xinjiang. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2004, 10(5): 488-493.
- [24] Li H, Zhang D Y. Morphological characteristics and growth redundancy of spring wheat root system in semi-arid regions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 26-30.
- [25] Cai K Z, Luo S M, Duan S S. The response of the rice root system to nitrogen conditions under-root confinement. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1109-1116.
- [26] Passioura J B. Roots and drought resistance. *Agricultural Water Management*, 1983, 7(1/3): 265-280.
- [27] Zhang D Y, Jiang X H, Zhao X H. Further thoughts on growth redundancy. *Acta Pratacultural Science*, 1995, 4(3): 17-22.
- [28] Lu C Y, Huang C H, Zheng X Y, Jia H J, Lu R G, Teng Y W. Effects of root restriction on visual quality, pigments and inner quality of Jumeigui grape berries. *Journal of Fruit Science*, 2009, 26(5): 719-724.

参考文献:

- [3] 张永清, 苗果园. 根土空间对高粱根系生理特性及产量的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 635-639.
- [5] 段舜山, 谷文祥, 张大勇, 李凤民. 半干旱地区小麦群体的根系特征与抗旱性的关系. *应用生态学报*, 1997, 8(2): 134-138.
- [9] 李培岭, 张富仓. 不同滴灌方式下棉花生物量和产量的水氮调控效应. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2814-2820.
- [10] 刘新永, 田长彦, 马英杰, 刘宏萍. 南疆膜下滴灌棉花耗水规律以及灌溉制度研究. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(1): 108-112.
- [11] 危常州, 马富裕, 雷咏雯, 李俊华, 冶军, 张福锁. 棉花膜下滴灌根系发育规律的研究. *棉花学报*, 2002, 14(4): 209-214.
- [16] 宋海星, 李生秀. 限根条件下供氮对玉米光合作用有关生理特性的影响. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(4): 28-32.
- [17] 罗宏海, 张宏芝, 杜明伟, 黄建军, 张亚黎, 张旺锋. 膜下滴灌下土壤深层水分对棉花根系生理及叶片光合特性的调节效应. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1337-1345.
- [18] 谢志良, 田长彦, 卞卫国. 膜下滴灌水氮对棉花根系构型的影响. *棉花学报*, 2009, 21(6): 508-514.
- [19] 宋海星, 李生秀. 玉米生长空间对根系吸收特性的影响. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 899-904.
- [20] 刘瑞显, 王友华, 郭文琦, 陈兵林, 周治国. 花铃期干旱胁迫下氮素水平对棉花光合作用与叶绿素荧光特性的影响. *作物学报*, 2008, 34(4): 675-683.
- [22] 张旺锋, 勾玲, 王振林, 李少昆, 余松烈, 曹连莆. 氮肥对新疆高产棉花叶片叶绿素荧光动力学参数的影响. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 893-898.
- [23] 勾玲, 闫洁, 韩春丽, 赵瑞海, 张旺锋, 杨新军. 氮肥对新疆棉花产量形成期叶片光合特性的调节效应. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(5): 488-493.
- [24] 李诒, 张大勇. 半干旱地区春小麦根系形态特征与生长冗余的初步研究. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 26-30.
- [25] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻根系在根袋处理条件下对氮养分的反应. *生态学报*, 2003, 23(6): 1109-1116.
- [27] 张大勇, 姜新华, 赵松龄. 再论生长的冗余. *草业学报*, 1995, 4(3): 17-22.
- [28] 卢彩玉, 黄春辉, 郑小艳, 贾惠娟, 卢如国, 滕元文. 根域限制对巨玫瑰葡萄果实外观、色素及内在品质的影响. *果树学报*, 2009, 26(5): 719-724.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 12 Jun. ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research on the disturbance of frost damage to forests LI Xiufen, ZHU Jiaojun, WANG Qingli, et al (3563)
- Advances in salt-tolerance mechanisms of *Suaeda* plants ZHANG Aiqin, PANG Qiuying, YAN Xiufeng (3575)

Autecology & Fundamentals

- Simulation and prediction of spatial patterns of *Robinia pseudoacacia* flowering dates in eastern China's warm temperate zone
..... XU Lin, CHEN Xiaoqiu, DU Xing (3584)
- Response of leaf functional traits of *Betula ermanii* saplings to the altitudinal Variation
..... HU Qipeng, GUO Zhihua, SUN Lingling, et al (3594)
- Analysis of genetic diversity of chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) natural secondary forest populations and correlation with theirs
habitat ecological factors LI Ming, WANG Shuxiang, GAO Baojia (3602)
- Nitrogen addition affects root growth, phosphorus and nitrogen efficiency of three provenances of *Schima superba* in barren soil
..... ZHANG Rui, WANG Yi, JIN Guoqing, et al (3611)
- Effect of enclosure on soil C mineralization and priming effect in *Stipa grandis* grassland of Inner Mongolia
..... WANG Ruomeng, DONG Kuanhu, HE Nianpeng, et al (3622)
- Effects of slope position on gas exchange characteristics of main tree species for vegetation restoration in dry-hot valley of Jingsha
River DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, HE Caiyun, et al (3630)
- Impacts of biodegradation on desorption of phenol adsorbed on black carbon and soil
..... HUANG Jiexun, MO Jianmin, LI Feili, et al (3639)
- Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in three tree species
..... WU Qin, ZHANG Guangcan, PEI Bin, et al (3648)
- The ear-leaf ratio of population is related to yield and water use efficiency in the water-saving cultivation system of winter wheat
..... ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, HUANG Qin, et al (3657)
- Effects of ozone stress on photosynthesis, dry matter production and yield of rice under different seedling quality and plant density ...
..... PENG Bin, LI Panlin, ZHOU Nan, et al (3668)
- Effects of water and nitrogen under root restriction on photosynthetic characters of cotton plants grown with under-mulch drip
irrigation TAO Xianping, LUO Honghai, ZHANG Yali, et al (3676)
- The influence of light and growth stage on oxygen diffusion capacity of *Acorus calamus* roots
..... WANG Wenlin, WANG Guoxiang, WAN Yinjing, et al (3688)
- Isolation, screening and characterization of phytopathogen antagonistic endophytes from wild *Artemisia argyi*
..... XU Yajun, ZHAO Longfei, CHEN Pu, et al (3697)
- Performance of the two host-biotypes of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) on different cucurbitaceous host plants
..... XIAO Yunli, YIN Xiangchu, LIU Tongxian (3706)
- The effects of gender and temperature on the wintering behavior of Chinese merganser
..... ZENG Binbin, SHAO Mingqin, LAI Hongqing, et al (3712)

Population, Community and Ecosystem

- Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the disturbance in Wangqing forestry
..... YUAN Fei, ZHANG Xingyao, LIANG Jun (3722)
- Heterogeneity evaluation of forest ecological system spatial structure in Dongting Lake
..... LI Jianjun, LIU Shuai, ZHANG Huiru, et al (3732)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Climate-growth relationships of *Abies faxoniana* from different elevations at Miyaluo, western Sichuan, China
..... XU Ning, WANG Xiaochun, ZHANG Yuandong, et al (3742)

- Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010 MU Shaojie, LI Jianlong, ZHOU Wei, et al (3752)
- Influences of topographic features on the distribution and evolution of landscape in the coastal wetland of Yancheng
..... HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing, et al (3765)
- Vegetation landscape pattern change and characteristics of spatial distribution in south edge of Mu Us Sandy Land
..... ZHOU Shuqin, JING Yaodong, ZHANG Qingfeng, et al (3774)
- Climate change recorded mainly by pollen from baixian lake during the last 5.5kaB. P.
..... DU Rongrong, CHEN Jing'an, ZENG Yan, et al (3783)
- Characteristics of temperature field, humidity field and their eco-environmental effects in spring in the typical valley-city
..... LI Guodong, ZHANG Junhua, WANG Naiang, et al (3792)
- Spatial and temporal variation of surface water vapor over northern and southern regions of Qinling Mountains
..... JIANG Chong, WANG Fei, YU Xiaoyong, et al (3805)
- Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area WU Jiansheng, QIAO Na, PENG Jian, et al (3816)
- The comparison of ecological geographica regionlization in China based on Holdridge and CCA analysis
..... KONG Yan, JIANG Hong, ZHANG Xiuying, et al (3825)
- Resource and Industrial Ecology**
- Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model PAN Dan, YING Ruiyao (3837)
- The emergy analysis of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) aquaculture system around Dongji island in Zhoushan
..... SONG Ke, ZHAO Sheng, CAI Huiwen, et al (3846)
- Optimum stripe arrangement for inter-cropping and mixed-cropping of different maize (*Zea mays* L.) genotypes
..... ZHAO Yali, KANG Jie, LIU Tianxue, et al (3855)
- Effects of climate and soil on the carotenoid and cuticular extract content of cured tobacco leaves
..... CHEN Wei, XIONG Jing, CHEN Yi, et al (3865)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Carbon sequestration and oxygen release as well as cooling and humidification efficiency of the main greening tree species of
Sha River, Chengdu ZHANG Yanli, FEI Shimin, LI Zhiyong, et al (3878)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 吴文良

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 12 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 12 (June, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元