

# 根域限制下水氮供应对膜下滴灌棉花根系及叶片衰老特性的影响

陶先萍 罗宏海 杨海 丁全盛 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, 新疆石河子 832003

**摘要** 在新疆的气候生态条件下, 选用北疆2个棉花(*Gossypium hirsutum*)主栽品种‘新陆早13号’和‘新陆早33号’为供试材料, 设置限根(RR)与对照(CK)处理, 每个处理设置4个水氮水平: 水氮亏缺( $W_0N_0$ )、水分亏缺( $W_0N_1$ )、氮素亏缺( $W_1N_0$ )与水氮适量( $W_1N_1$ ), 组成再裂区试验方案。采用管栽方法, 通过人工改变根系垂直生长深度和水氮供应, 在棉花产量形成期测定根系及叶片抗氧化保护酶系活性、生物量累积及分配等, 探讨根域限制及水氮供应对棉花根系生长及叶片衰老的影响机理。结果表明: 根域限制条件下, 棉花根系生物量、根系与叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)与过氧化氢酶(CAT)活性、棉株总生物量、根冠比均低于对照, 而地上部生物量与籽棉产量显著高于对照。水氮供应能有效地调节根系及叶片的生长, 不同水氮处理间棉花根系与叶片抗氧化保护酶系活性、叶绿素含量、地上部生物量及籽棉产量均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$ , 根冠比与根系生物量的表现与之相反。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生物量与籽棉产量均明显高于其他处理, 根冠比较低。因此, 在棉花根系生长受限的条件下, 优化生育期间水氮供应, 可以增强根系及叶片的抗氧化保护酶系活性、增加光合产物向地上部的分配比例、增加产量, 是进一步挖掘膜下滴灌棉花增产潜力的有效途径。

**关键词** 抗氧化保护酶系活性, 生物量, 棉花, 根域限制, 水氮供应

## Effects of water and nitrogen supply on parameters of root and leaf senescence in cotton plants grown under root restriction and with under-mulch drip irrigation

TAO Xian-Ping, LUO Hong-Hai, YANG Hai, DING Quan-Sheng, ZHANG Ya-Li, and ZHANG Wang-Feng\*

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

### Abstract

**Aim** Our objective was to evaluate the influence of the water and nitrogen treatments on parameters of root and leaf senescence in cotton plants grown under root restriction and with under-mulch drip irrigation.

**Methods** Our experimental materials were upland cotton cultivars ‘Xinluzao 13’ and ‘Xinluzao 33’, which are the main cultivars grown in the study region of northern Xinjiang, northwestern China. Treatments consisted of root restriction (RR), unrestricted root system (CK, control) and four levels of water and nitrogen supply: water and nitrogen deficiency ( $W_0N_0$ ), water deficiency ( $W_0N_1$ ), nitrogen deficiency ( $W_1N_0$ ) and moderate supply of water and nitrogen ( $W_1N_1$ ). The treatments were applied in a split-split plot design. Cotton plants were cultivated in soil columns to control the vertical depth of root growth and to regulate application of water and nitrogen. We measured the activity of antioxidant enzymes in the root and leaf and the accumulation and distribution of biomass at the yield-determining stages (from flowering to the full boll opening stage).

**Important findings** The root biomass, activity of antioxidant enzymes (superoxide dismutase, guaiacol peroxidase and catalase) in the root and leaf, total plant biomass and the root/shoot ratio under root restriction decreased compared with the control. In contrast, aboveground biomass and cotton yield under root restriction were considerably higher than with the control. The supply of water and nitrogen effectively regulated root and leaf growth. With regard to their effects on antioxidant enzyme activity in the root and leaf, SPAD chlorophyll content, aboveground biomass and cotton yield, the water and nitrogen treatments were ranked as  $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$ . In contrast and with regard to the shoot/root ratio and root biomass, the treatments were ranked as  $W_0N_0 > W_1N_0 > W_0N_1 > W_1N_1$ . Consequently, interaction between root restriction and the applied water and nitrogen

regime had a marked effect on cotton growth and yield. Root restriction in conjunction with a moderate supply of water and nitrogen was the optimal treatment for aboveground biomass and cotton yield, whereas the root/shoot ratio was lowest in this treatment.

**Key words** activity of antioxidant enzyme, biomass, cotton, root restriction, water and nitrogen supply

新疆地处欧亚大陆腹地,属典型大陆性气候,日照充足,热量丰富,绿洲灌溉植棉,具有发展棉花(*Gossypium hirsutum*)的资源优势。近年来,随着棉花高密度栽培技术的应用,特别是膜下滴灌技术的推广,新疆棉花单产水平迅速提高,棉花生产取得了长足发展(胡兆璋,2007)。目前,如何利用膜下滴灌技术的优势,充分挖掘新疆棉区丰富的光热资源,确保棉花单产水平的持续提高,成为人们关注的焦点。膜下滴灌属于局部、浅层灌溉,由于根系的趋水趋肥性,使得棉株90%以上的根系集中在耕作层(危常州等,2002);棉花高密度栽培也缩小了根系的有效土壤空间(Ferree *et al.*, 1992),根系生长受到一定程度的限制(李少昆等,2000)。研究表明,限制根系生长空间会显著降低作物叶片的光合能力(Thomas & Strain, 1991),根系生物量减少(Kimura *et al.*, 1999),细胞分裂素(CTK)向叶片的流转速率减慢(Yong *et al.*, 2010),植株衰老进程加快(Dong *et al.*, 2008),影响产量和品质。良好的栽培措施能使作物维持较高的根系及叶片生理活性,延缓衰老进程,促进叶片制造更多的光合产物优先向生殖器官运输、提高产量和改善品质(刘殿英等,1993)。水分、氮素是棉花生产中人工调控的重要内容。适宜水氮供应可增强花铃期棉株根系活力、提高根系抗氧化保护酶系(超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)与过氧化氢酶(CAT))活性,降低膜脂过氧化程度,提高叶片光合速率与籽棉产量(郭文琦等,2009;刘瑞显等,2009);水氮耦合有利于提高膜下滴灌棉花生育中后期叶片抗氧化保护酶系活性,提高单铃重和籽棉产量(张宏芝等,2010)。因此,通过合理水氮运筹,增强棉株根系活力、延缓植株衰老是调控棉花生长的重要栽培措施。

根域限制下植株吸收水肥的方式发生改变,根系自身通过产生形态与生理的适应性变化,提高水肥吸收和利用能力(Schurr, 1998)。膜下滴灌植棉技术是局部灌溉技术,限制了根系在土壤中的生长范围(危常州等,2002),密植栽培及随水滴肥技术,使根系向土壤表层集中(谢志良等,2009),这些栽培技

术均使根系生长空间受到限制,但棉花产量较常规灌溉方式提高了30%–50% (危常州等,2002)。因此研究棉花根系生长空间受限条件下根系生理特性及与叶片衰老和产量的关系,探明利用滴灌技术控制土壤水氮供应,延缓棉花衰老进程,充分挖掘膜下滴灌节水节肥增产的潜力,对新疆农业可持续发展具有重要意义。本研究采用管栽方法,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氮供应,探讨根域限制下不同水氮供应对棉花根系及叶片抗氧化保护酶系活性、生物量累积与分配的影响,为膜下滴灌棉花高产高效栽培提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

试验于2011年4–10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 °C之间,无霜期为168–171天;≥10 °C的活动积温为3 570–3 729 °C,年日照时数为2 721–2 818 h。

### 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 (RR)和对照120 cm (CK);不同管栽深度下分别设水分和氮素2因素,其中水分设正常供水处理(0–60 cm田间持水量为75%, W<sub>1</sub>)和水分亏缺处理(0–60 cm田间持水量为55%, W<sub>0</sub>);氮素设不施氮(N<sub>0</sub>)和施氮(施氮0.20 g·kg<sup>-1</sup>干土, N<sub>1</sub>),组成再裂区试验方案。供试棉花品种为北疆主栽棉花品种‘新陆早13号’和‘新陆早33号’。试验用根管为直径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总长为120 cm的整体管(图1),连接处用防水胶带密封。采用电阻式水分张力感应器(Watermark, Munich, Germany)实时监测土壤水分的变化,在装土时将水分测定管埋入土柱中,埋深分别为土表以下20、40与60 cm。以尿素为氮源, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>为磷源,其中氮肥30%基施,其余70%在生育期随水滴施。磷肥全部基施,按0.15 g P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·kg<sup>-1</sup>

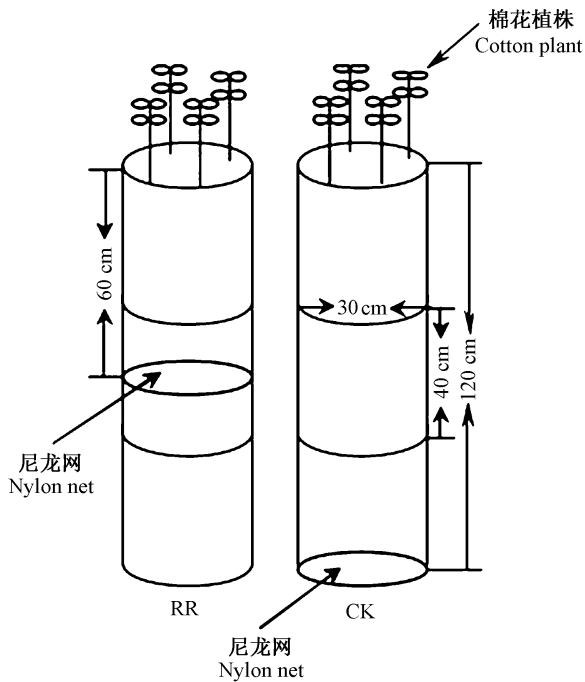


图1 试验装置示意图。CK, 对照; RR, 限根。  
Fig. 1 Sketch diagram of experimental equipment. CK, control; RR, root restriction.

干土施入。每桶总计施入尿素(含纯N 46%) 20 g, 其中基施6 g, 追施14 g;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (含纯 $\text{P}_2\text{O}_5$  22.8%)合计28 g, 全部基施。

播种前将PVC管排放于事先按尺寸挖好的深120 cm的方形土坑中, 排列的尺寸模拟大田棉花常规种植模式(30 + 60 + 30) cm, 每处理3个重复。土坑中先平铺一层厚度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。土壤取自本实验站大田, 土质中壤, 平均容重为 $1.48 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 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 $56.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效磷 $15.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效钾 $194.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根系生长垂直深度处理模拟大田土壤情况, 限根处理为先将干土装入根管口下60–120 cm, 后铺网筛为100目尼龙网, 铺2 cm厚细砂(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; 对照处理是指整个根管中按土壤原层次装入管内。根管装土结束后, 灌水沉实, 所有根管按膜下滴灌方式种植, 铺膜、布管, 1膜4行, 每根管中留苗4株, 株距10 cm; 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

$2.7 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 。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, 其他田间管理措施同大田膜下滴灌棉花生产。

### 1.3 测定项目和方法

#### 1.3.1 土壤含水量

土壤含水量采用电阻式水分张力感应器(Watermark)监测。出苗至盛蕾期每隔3天观测1次, 进入花铃期每隔1天观测1次。当0–60 cm土层的平均土壤含水量低于相应水分调控方案水平的5%时, 滴水至规定的滴水上限, 并在滴水的次日加测土壤含水量。滴水量的计算方法为 $A = (W_p - W_a) \times H$ , 式中 $A$ 为滴水量(mm);  $W_p$ 为规定的滴水上限;  $W_a$ 为实测0–60 cm土层平均土壤含水量( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $H$ 为滴水土层厚度(mm)。

#### 1.3.2 叶片、根系抗氧化保护酶系活性和丙二醛(MDA)含量

在开花期、盛花期、盛铃前期、盛铃后期、吐絮期和盛絮期, 每个处理分别选取长势一致的主茎功能叶(打顶前选取倒四叶、打顶后倒三叶) 5片。在盛花期和盛絮期, 每个处理选取3根根管, 每20 cm为一层(限根处理为0–20、20–40和40–60 cm; 对照处理为0–20、20–40、40–60、60–80和80–120 cm), 分层挖出每层全部土体土, 迅速收集、拣出根段、分置、洗净。将叶片和根系样品置于液氮速冻后存于 $-70 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中, 用于保护酶系活性的测定。用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量, 氮蓝四唑(NBT)法测定SOD活性, 高锰酸钾滴定法测定CAT活性, 愈创木酚法测定POD活性, 硫代巴比妥酸比色法测定MDA含量(李合生, 2000)。

#### 1.3.3 叶片叶绿素含量

在开花期、盛花期、盛铃前期、盛铃后期、吐絮期和盛絮期, 对每个处理分别选取长势一致的主茎功能叶(打顶前选取倒四叶、打顶后倒三叶) 5片, 利用SPAD-502叶绿素含量仪(Minolta, Tokyo, Japan)测量叶绿素含量相对指数。

#### 1.3.4 生物量与产量测定

在盛絮期, 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, 然后将相应的土柱挖出, 拣出土柱内所有根系, 用自来水冲洗, 去除杂质后装袋带回实验室,  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青0.5 h,  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 10.0完成。

## 2 结果和分析

### 2.1 根系生物量的变化

试验表明(图2), 棉花盛花期至盛絮期, 根系生物量明显增加, 品种间‘新陆早33号’高于‘新陆早13号’。与对照(CK)相比, 根域限制(RR)极显著( $p < 0.01$ )降低了根系生物量。相同根域容积条件下各水氮处理间根系生物量均表现为 $W_0N_0 > W_1N_0 > W_0N_1 > W_1N_1$ ,  $W_0N_0$ 比 $W_1N_0$ 、 $W_0N_1$ 和 $W_1N_1$ 分别高出56.85%、28.88%和101.30%。根域限制与水氮互作表现为, 在 $W_0N_0$ 、 $W_1N_0$ 、 $W_0N_1$ 和 $W_1N_1$ 条件下, RR处理的根系生物量分别比CK降低26.23%、27.38%、64.26%和25.62%。可见, 根域限制与水氮供应均使根系生物量降低。

### 2.2 根系丙二醛(MDA)含量的变化

试验表明(图3), 随土层加深, 根系MDA含量不断降低, ‘新陆早13号’高于‘新陆早33号’。相同水氮供应条件下, RR处理的根系MDA含量均显著( $p < 0.05$ )高于CK。相同根域条件下各水氮处理间各土层根系MDA含量均表现为 $W_0N_0 > W_1N_0 > W_0N_1 > W_1N_1$ , 且处理间差异显著。在 $W_0N_0$ 、 $W_1N_0$ 、 $W_0N_1$ 和 $W_1N_1$ 条件下, RR处理的根系MDA含量分别比CK

增加25.58%、21.47%、15.74%和30.52%, 以耕作层(0–40 cm土层)增幅较大。表明土壤水氮双重亏缺加剧了由限根引起的耕层根系MDA含量上升幅度, 适宜的水氮供应使限根条件下根系MDA含量大幅下降, 可延缓根系细胞膜质氧化进程。

### 2.3 根系抗氧化保护酶系活性的变化

#### 2.3.1 SOD活性

由图4可见, 随土层加深, 根系SOD活性呈不断升高的趋势, ‘新陆早33号’高于‘新陆早13号’。相同水氮供应条件下, RR处理的根系SOD活性显著( $p < 0.05$ )低于CK。相同根域容积条件下各水氮处理间各土层根系SOD活性均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$ , 其中 $W_1N_1$ 比 $W_0N_1$ 、 $W_1N_0$ 、 $W_0N_0$ 分别高出22.59%、38.13%和64.26%。在 $W_1N_1$ 、 $W_1N_0$ 、 $W_0N_1$ 和 $W_0N_0$ 条件下, RR处理的根系SOD活性分别比CK低8.42%、12.06%、8.74%和6.45%。表明根系SOD活性对根域限制与水氮互作反应不敏感, 尤其在盛絮期。

#### 2.3.2 POD与CAT活性

试验表明(图5), 随土层加深, 根系POD活性呈现升高趋势, ‘新陆早33号’高于‘新陆早13号’。相同水氮供应条件下, RR处理的根系POD活性极显著( $p < 0.01$ )低于CK处理。相同根域条件下各水氮处理间各土层根系POD活性表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$ , 且处理间差异显著。在 $W_1N_1$ 、 $W_1N_0$ 、 $W_0N_1$ 和 $W_0N_0$ 条件下, RR处理的根系POD活性分别比CK

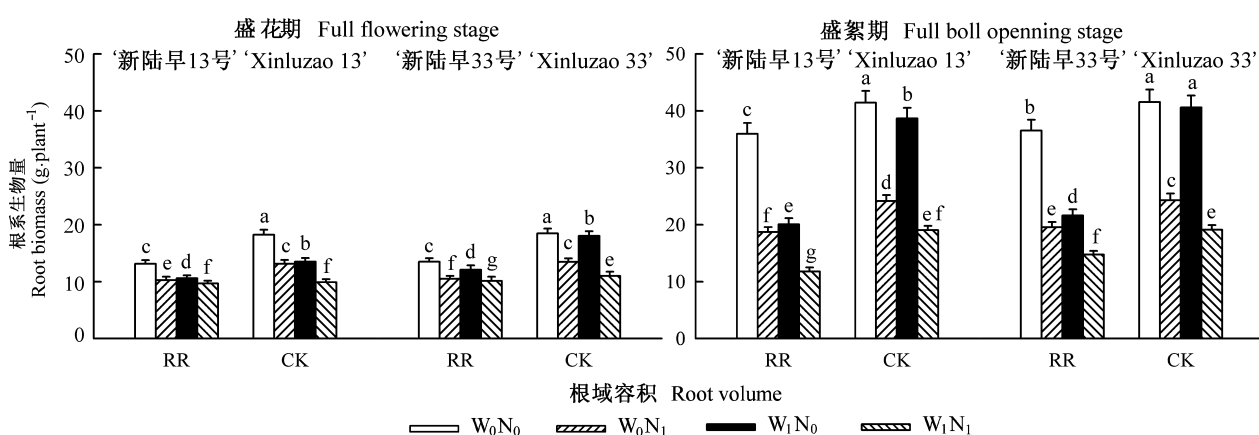


图2 水氮供应对根域限制棉花根系生物量的影响(平均值±标准偏差)。CK, 对照; RR, 限根;  $W_0N_0$ , 水氮亏缺;  $W_0N_1$ , 水分亏缺;  $W_1N_0$ , 氮素亏缺;  $W_1N_1$ , 水氮适量。不同小写字母表示各处理的差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 2 Effects of water and nitrogen application regimes on root biomass of cotton cultivated under root restriction (mean  $\pm$  SD). CK, control; RR, root restriction;  $W_0N_0$ , water and nitrogen deficiency;  $W_0N_1$ , water deficiency;  $W_1N_0$ , nitrogen deficiency;  $W_1N_1$ , moderate supply of water and nitrogen. Different small letters indicate significant difference ( $p < 0.05$ ) among different treatments.

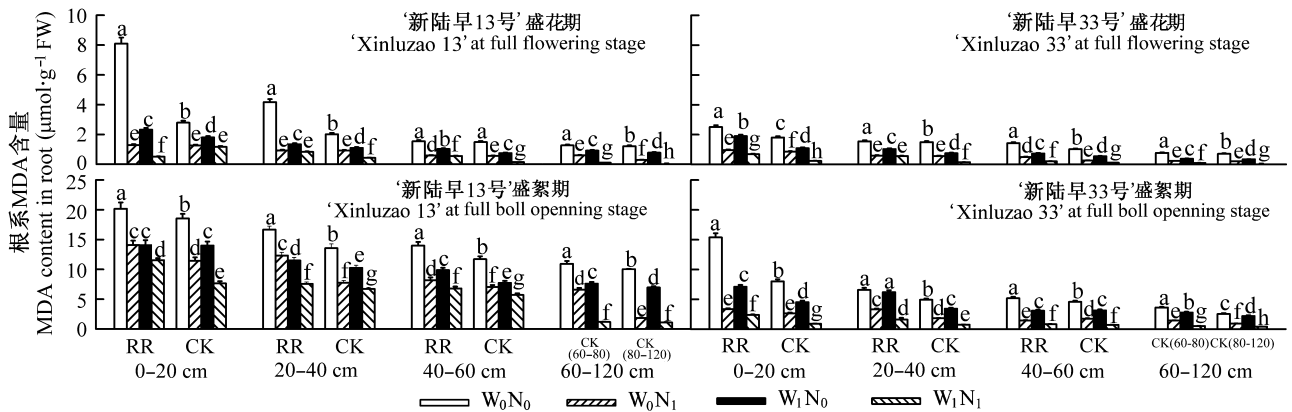


图3 水氮供应对根域限制棉花根系丙二醛(MDA)含量的影响(平均值±标准偏差)。CK, 对照; RR, 限根; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, 水氮亏缺; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, 水分亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, 氮素亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, 水氮适量。不同小写字母表示各处理的差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 3 Effects of water and nitrogen application regimes on malondialdehyde (MDA) content in root of cotton cultivated under root restriction (mean ± SD). CK, control; RR, root restriction; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, water and nitrogen deficiency; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, water deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, nitrogen deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, moderate supply of water and nitrogen. Different small letters indicate significant difference ( $p < 0.05$ ) among different treatments.

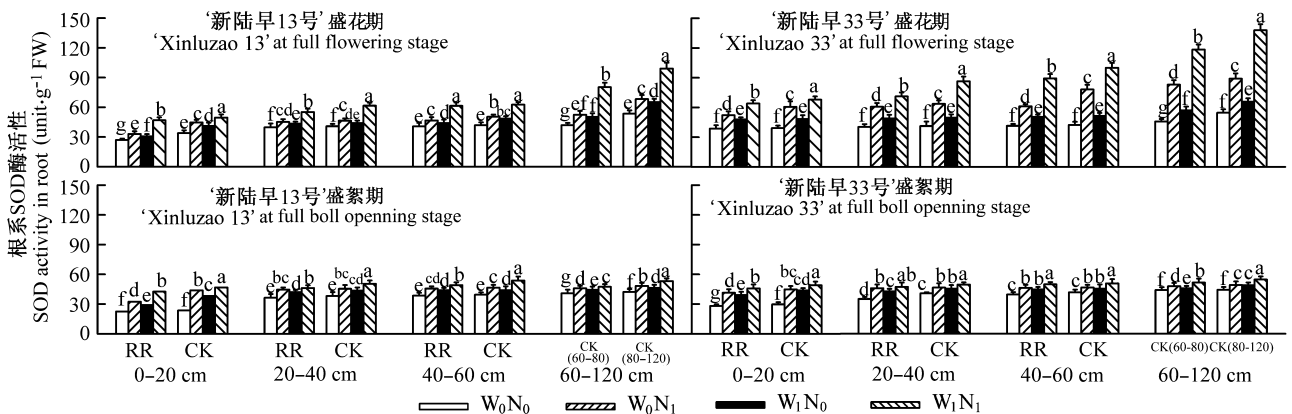


图4 水氮供应对根域限制棉花根系超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响(平均值±标准偏差)。CK, 对照; RR, 限根; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, 水氮亏缺; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, 水分亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, 氮素亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, 水氮适量。不同小写字母表示各处理的差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 4 Effects of water and nitrogen application regimes on superoxide dismutase (SOD) activities in root of cotton cultivated under root restriction (mean ± SD). CK, control; RR, root restriction; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, water and nitrogen deficiency; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, water deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, nitrogen deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, moderate supply of water and nitrogen. Different small letters indicate significant difference ( $p < 0.05$ ) among different treatments.

低33.10%、55.60%、82.02%和122.70%，以0-40 cm 土层降幅较大，达到79.90%。根系CAT活性变化趋势与POD相似(图6)。可见根系POD和CAT较SOD对根域限制与水氮交互作用相对敏感，土壤水氮双重亏缺加剧了限根导致的POD与CAT活性下降幅度，适宜水氮供应使此下降幅度有所减小。

#### 2.4 叶片叶绿素相对含量(SPAD值)的变化

试验表明，从开花期至盛絮期，不同处理条件下叶片SPAD值呈现不断降低的趋势(图7)，‘新陆早33号’显著高于‘新陆早13号’；RR处理的叶片SPAD值始终低于CK处理，但未达到显著性水平。相同根

域容积条件下各水氮处理间的SPAD值均表现为W<sub>1</sub>N<sub>1</sub> > W<sub>0</sub>N<sub>1</sub> > W<sub>1</sub>N<sub>0</sub> > W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>，其中W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>比W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>分别高出7.69%、14.03%和18.65%。表明适宜的土壤水氮供应能有效地提高叶片叶绿素含量，并在生育后期减缓叶绿素降解速率。在W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>和W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>条件下，RR处理的叶片SPAD值分别比CK处理低1.95%、2.05%、1.87%和2.17%。

#### 2.5 叶片丙二醛(MDA)含量的变化

试验表明，从开花期至盛絮期，不同处理叶片的MDA含量呈持续上升趋势(图8)，‘新陆早13号’显

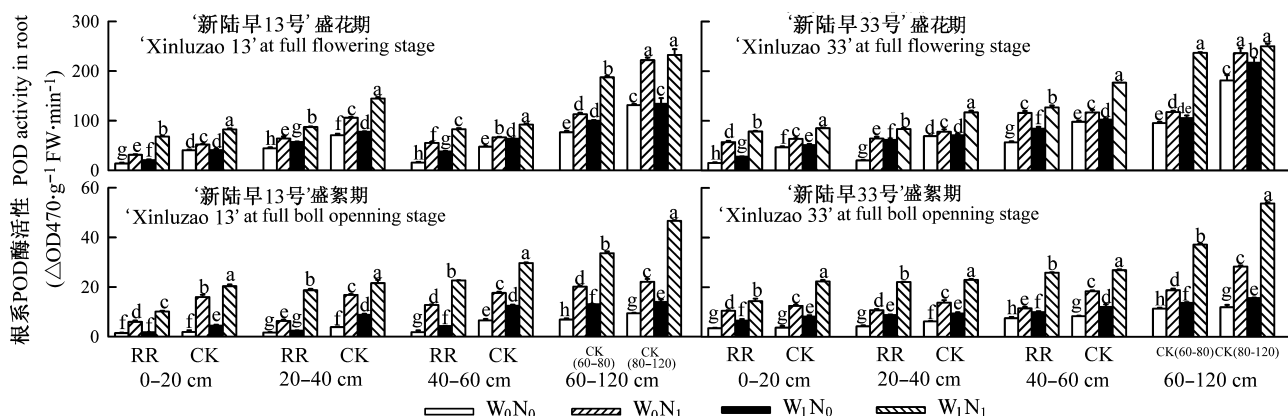


图5 水氮供应对根域限制棉花根系过氧化物酶(POD)活性的影响(平均值±标准偏差)。CK, 对照; RR, 限根; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, 水氮亏缺; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, 水分亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, 氮素亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, 水氮适量。不同小写字母表示各处理的差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 5 Effects of water and nitrogen application regimes on peroxidase (POD) activities in root of cotton cultivated under root restriction (mean  $\pm$  SD). CK, control; RR, root restriction; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, water and nitrogen deficiency; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, water deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, nitrogen deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, moderate supply of water and nitrogen. Different small letters indicate significant difference ( $p < 0.05$ ) among different treatments.

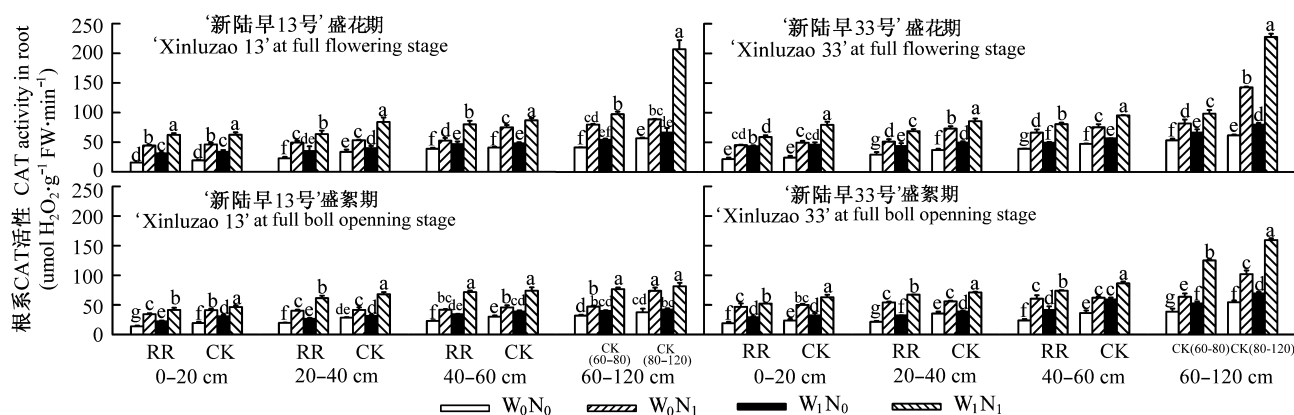


图6 水氮供应对根域限制棉花根系过氧化氢酶(CAT)活性的影响(平均值±标准偏差)。CK, 对照; RR, 限根; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, 水氮亏缺; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, 水分亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, 氮素亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, 水氮适量。不同小写字母表示各处理的差异显著( $p < 0.05$ )。

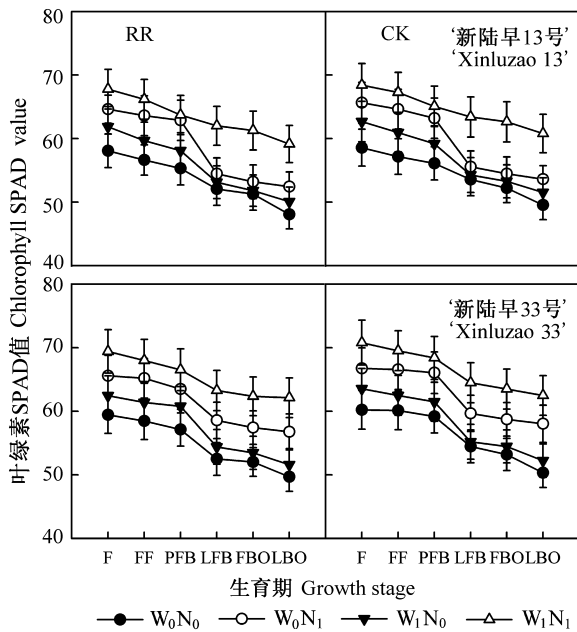
Fig. 6 Effects of water and nitrogen application regimes on catalase (CAT) activities in root of cotton cultivated under root restriction (mean  $\pm$  SD). CK, control; RR, root restriction; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, water and nitrogen deficiency; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, water deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, nitrogen deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, moderate supply of water and nitrogen. Different small letters indicate significant difference ( $p < 0.05$ ) among different treatments.

著高于‘新陆早33号’。RR处理的叶片MDA含量显著( $p < 0.05$ )高于CK处理。同一根域容积条件下各水氮处理间叶片MDA含量均表现为W<sub>0</sub>N<sub>0</sub> > W<sub>1</sub>N<sub>0</sub> > W<sub>0</sub>N<sub>1</sub> > W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, 其中W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>比W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>分别高出9.47%、16.29%和24.90%。在W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>和W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>条件下, RR处理的叶片MDA含量分别比CK处理增加18.60%、20.24%、17.13%和21.81%。可见由根域限制引起的叶片MDA含量上升幅度因土壤水氮双重亏缺而加剧, 生育期间水氮供应可有效地降低根域限制下的叶片MDA含量, 延缓叶片衰老进程。

## 2.6 叶片抗氧化保护酶系活性的变化

### 2.6.1 SOD活性

从开花期至盛絮期, 叶片SOD活性随生育期推进而不断降低(图9); ‘新陆早33号’始终显著高于‘新陆早13号’。RR处理的SOD活性均显著( $p < 0.05$ )低于CK处理。从开花期至盛絮期, 相同根域容积条件下各水氮处理间SOD活性均表现为W<sub>1</sub>N<sub>1</sub> > W<sub>0</sub>N<sub>1</sub> > W<sub>1</sub>N<sub>0</sub> > W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, 其中W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>比W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>分别高出14.82%、29.35%和50.17%。在W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>和W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>条件下, RR处理的叶片SOD活性分别比CK处理低24.25%、24.50%、18.86%和15.37%。



**图7** 水氮供应对根域限制棉花叶片SPAD值的影响(平均值±标准偏差)。CK, 对照; BO, 吐絮期; F, 开花期; FBO, 盛絮期; FF, 盛花期; LFB, 盛铃后期; PFB, 盛铃前期; RR, 限根; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, 水氮亏缺; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, 水分亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, 氮素亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, 水氮适量。

**Fig. 7** Effects of water and nitrogen application regimes on leaf SPAD value of cotton cultivated under root restriction (mean ± SD). CK, control; BO, boll opening stage; F, flowering stage; FBO, full boll opening stage; FF, full flowering stage; LFB, late full boll stage; PFB, prophase full boll stage; RR, root restriction; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, water and nitrogen deficiency; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, water deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, nitrogen deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, moderate supply of water and nitrogen.

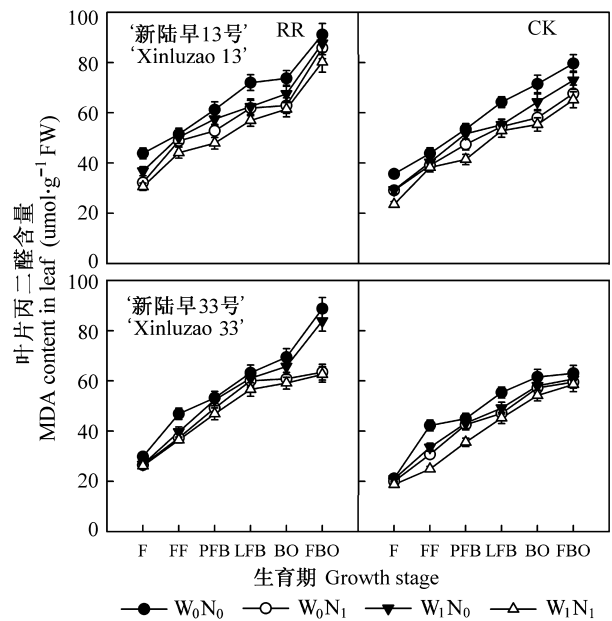
可见水氮双重亏缺使根域限制引起的叶片SOD活性下降程度加重, 水氮供应使此下降程度有所减轻。

### 2.6.2 POD活性

从开花期至盛絮期, 叶片POD活性随生育期推进而不断降低(图10), 盛花期后下降趋势较平缓; ‘新陆早33号’始终显著高于‘新陆早13号’。RR处理的POD活性显著( $p < 0.05$ )低于CK处理。相同根域容积条件下各水氮处理间的POD活性均表现为W<sub>1</sub>N<sub>1</sub> > W<sub>0</sub>N<sub>1</sub> > W<sub>1</sub>N<sub>0</sub> > W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, 其中W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>比W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>分别高出11.90%、27.06%和44.39%。在W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>和W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>条件下, RR处理的叶片POD活性分别比CK处理低15.96%、13.76%、10.70%和14.40%。可见水氮双重亏缺加大了由根域限制引起的叶片POD活性下降程度。

### 2.6.3 CAT活性

从开花期至盛絮期, 叶片CAT活性变化趋势与



**图8** 水氮供应对根域限制棉花叶片丙二醛含量的影响(平均值±标准偏差)。CK, 对照; BO, 吐絮期; F, 开花期; FBO, 盛絮期; FF, 盛花期; LFB, 盛铃后期; PFB, 盛铃前期; RR, 限根; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, 水氮亏缺; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, 水分亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, 氮素亏缺; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, 水氮适量。

**Fig. 8** Effects of water and nitrogen application regimes on malondialdehyde (MDA) content in leaf of cotton cultivated under root restriction (mean ± SD). CK, control; BO, boll opening stage; F, flowering stage; FBO, full boll opening stage; FF, full flowering stage; LFB, late full boll stage; PFB, prophase full boll stage; RR, root restriction; W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, water and nitrogen deficiency; W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>, water deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>, nitrogen deficiency; W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>, moderate supply of water and nitrogen.

SOD、POD相似, 随着生育期推进而不断降低(图11); ‘新陆早33号’始终显著高于‘新陆早13号’。相同水氮供应条件下, RR处理的CAT活性显著显著( $p < 0.05$ )低于CK处理。相同根域容积条件下各水氮处理间CAT活性均表现为W<sub>1</sub>N<sub>1</sub> > W<sub>0</sub>N<sub>1</sub> > W<sub>1</sub>N<sub>0</sub> > W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, 其中W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>比W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>分别高出28.45%、40.95%和80.94%。根域限制与水氮互作表现为在W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>、W<sub>0</sub>N<sub>1</sub>和W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>条件下, RR处理的叶片CAT活性分别比CK处理低29.31%、15.70%、15.95%和23.90%。

### 2.7 棉株生物量累积与分配的变化

试验结果表明(表1), RR处理棉株总生物量均低于CK, 且在W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>条件下处理间达到显著差异( $p < 0.05$ )。各水氮处理间均表现为W<sub>1</sub>N<sub>1</sub> > W<sub>0</sub>N<sub>1</sub> > W<sub>1</sub>N<sub>0</sub> > W<sub>0</sub>N<sub>0</sub>, 且达到极显著水平( $p < 0.01$ )。RR地上部生物量和籽棉产量均高于CK, 且达到极显著

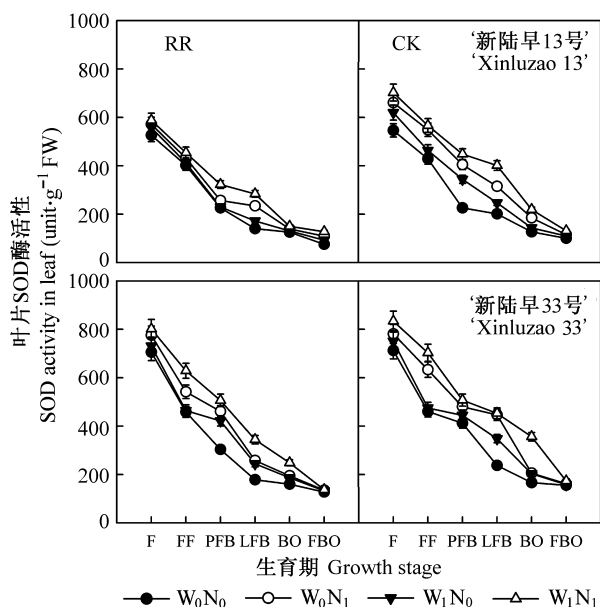


图9 水氮供应对根域限制棉花叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响(平均值 $\pm$ 标准偏差)。CK, 对照; BO, 吐絮期; F, 开花期; FBO, 盛絮期; FF, 盛花期; LFB, 盛铃后期; PFB, 盛铃前期; RR, 限根;  $W_0N_0$ , 水氮亏缺;  $W_0N_1$ , 水分亏缺;  $W_1N_0$ , 氮素亏缺;  $W_1N_1$ , 水氮适量。

Fig. 9 Effects of water and nitrogen application regimes on superoxide dismutase (SOD) activities in leaf of cotton cultivated under root restriction (mean  $\pm$  SD). CK, control; BO, boll opening stage; F, flowering stage; FBO, full boll opening stage; FF, full flowering stage; LFB, late full boll stage; PFB, prophase full boll stage; RR, root restriction;  $W_0N_0$ , water and nitrogen deficiency;  $W_0N_1$ , water deficiency;  $W_1N_0$ , nitrogen deficiency;  $W_1N_1$ , moderate supply of water and nitrogen.

水平( $p < 0.01$ )。各水氮处理间的地上部生物量和籽棉产量均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$ , 各处理间差异均达到极显著水平( $p < 0.01$ )。根域限制与水氮互作表现为在 $W_1N_1$ 、 $W_1N_0$ 、 $W_0N_1$ 和 $W_0N_0$ 条件下, RR处理的地上部生物量较CK依次高出9.87%、15.82%、8.01%和10.77%; 籽棉产量比CK依次高出23.71%、9.43%、18.83%和20.14%。

植株生物量在根冠不同部位的分配表明(表1), 与CK处理相比, RR处理极显著( $p < 0.01$ )降低了根冠比; 同一根域容积条件下各水氮处理间根冠比均表现为 $W_0N_0 > W_1N_0 > W_0N_1 > W_1N_1$ , 各处理间差异均达到极显著水平( $p < 0.01$ )。在 $W_1N_1$ 、 $W_1N_0$ 、 $W_0N_1$ 和 $W_0N_0$ 条件下, RR处理的根冠比较CK依次降低26.81%、105.36%、46.54%和58.84%。表明土壤水氮双重亏缺下根冠比对限根反应不敏感, 以土壤氮素亏缺( $W_1N_0$ )条件下根冠比降幅明显。

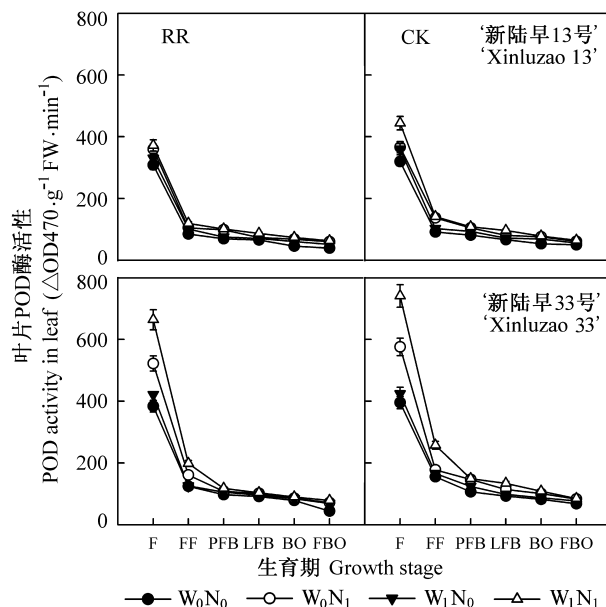


图10 水氮供应对根域限制棉花叶片过氧化物酶(POD)活性的影响(平均值 $\pm$ 标准偏差)。CK, 对照; BO, 吐絮期; F, 开花期; FBO, 盛絮期; FF, 盛花期; LFB, 盛铃后期; PFB, 盛铃前期; RR, 限根;  $W_0N_0$ , 水氮亏缺;  $W_0N_1$ , 水分亏缺;  $W_1N_0$ , 氮素亏缺;  $W_1N_1$ , 水氮适量。

Fig. 10 Effects of water and nitrogen application regimes on peroxidase (POD) activities in leaf of cotton cultivated under root restriction (mean  $\pm$  SD). CK, control; BO, boll opening stage; F, flowering stage; FBO, full boll opening stage; FF, full flowering stage; LFB, late full boll stage; PFB, prophase full boll stage; RR, root restriction;  $W_0N_0$ , water and nitrogen deficiency;  $W_0N_1$ , water deficiency;  $W_1N_0$ , nitrogen deficiency;  $W_1N_1$ , moderate supply of water and nitrogen.

### 3 讨论

#### 3.1 根域限制和水氮供应对棉花根系生理特性的影响

作物地上部衰老与环境因素影响植株根系生理密切相关。研究认为, 逆境胁迫导致植株地下部生理代谢失调, 影响根系功能, 造成地上部叶片产生响应性早衰, 作物产量降低(Yang *et al.*, 2002; 魏道智等, 2004)。本试验中, RR处理0-60 cm土层根系生物量、根系SOD、POD、CAT等抗氧化保护酶系活性在盛花期和盛絮期均明显低于CK, MDA含量显著高于CK ( $p < 0.05$ ), 表明根域限制抑制了根系生长、导致根系衰老加快。水肥调控能有效地提高根系SOD、POD和CAT抗氧化保护酶系的活性, 降低MDA含量, 维持活性氧的代谢与平衡, 保护膜结构(王忠, 2000)。无论根域空间大小如何, 各水氮处



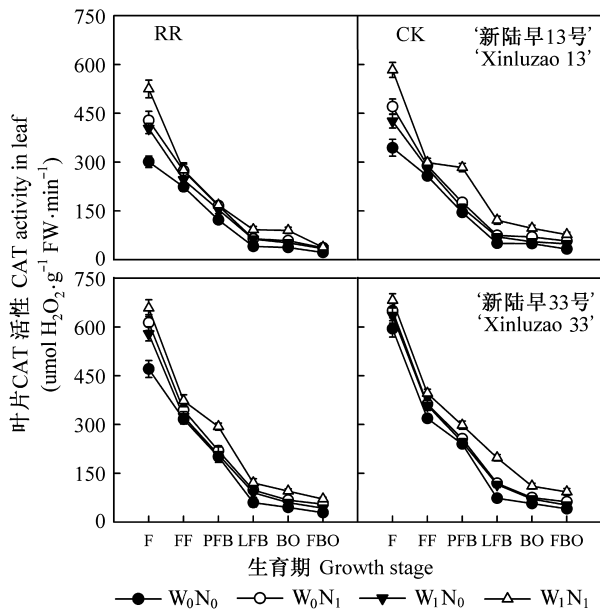


图11 水氮供应对根域限制棉花叶片过氧化氢酶(CAT)活性的影响(平均值±标准偏差)。CK, 对照; BO, 吐絮期; F, 开花期; FBO, 盛絮期; FF, 盛花期; LFB, 盛铃后期; PFB, 盛铃前期; RR, 限根;  $W_0N_0$ , 水氮亏缺;  $W_0N_1$ , 水分亏缺;  $W_1N_0$ , 氮素亏缺;  $W_1N_1$ , 水氮适量。

Fig. 11 Effects of water and nitrogen application regimes on catalase (CAT) activities in leaf of cotton cultivated under root restriction (mean  $\pm$  SD). CK, control; BO, boll opening stage; F, flowering stage; FBO, full boll opening stage; FF, full flowering stage; LFB, late full boll stage; PFB, prophase full boll stage; RR, root restriction;  $W_0N_0$ , water and nitrogen deficiency;  $W_0N_1$ , water deficiency;  $W_1N_0$ , nitrogen deficiency;  $W_1N_1$ , moderate supply of water and nitrogen.

理间各土层棉花根系抗氧化保护酶系活性均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$ , MDA含量则表现为 $W_0N_0 > W_1N_0 > W_0N_1 > W_1N_1$ , 表明适宜水氮供应可减轻活性氧对根系细胞膜质的伤害, 增强根系抗氧化功能, 延缓衰老。

采用根域限制, 根系生长在有限容积内, 通过提高局部土体的水肥供应强度, 使根系功能持续稳定发挥, 从而促进整个植株的生长发育(杨洪强等, 2001)。本试验研究表明, 在 $W_1N_1$ 、 $W_1N_0$ 、 $W_0N_1$ 和 $W_0N_0$ 条件下, RR处理抗氧化保护酶系(POD和CAT)活性显著低于CK ( $p < 0.05$ ), 以 $W_0N_0$  0–40 cm土层降幅较大,  $W_1N_1$  40–60 cm土层降幅较小; 根系MDA含量显著高于CK, 以 $W_0N_0$  0–40 cm土层的增幅较大,  $W_1N_1$  40–60 cm土层的增幅较小。表明水氮双重亏缺会加大由根域限制引起的中上层根系POD、CAT活性下降和MDA含量上升程度, 适宜的

水氮供应可有效地增加根域限制下的土壤深层根系POD、CAT活性、降低根系MDA含量, 延缓根系衰老进程。盛花期和盛絮期根系保护酶活性均表现为上层<中层<下层, MDA含量表现为上层>中层>下层, 与潘庆民等(1999)对管栽小麦(*Triticum aestivum*)的研究结果一致。膜下滴灌为节水灌溉技术, 每次滴灌水分渗透至0–40 cm土层(刘建军等, 2002), 40 cm以下土层水分含量相对稳定, 可能有利于深层根系生理活性的提高。在滴灌棉花生产上, 采取播前灌、深施肥等栽培措施, 增加中、下层根系的数量或比例, 维持中、下层根系较高的生理活性, 对于延缓棉株早衰具有重要意义。

### 3.2 根域限制和水氮供应对棉花叶片衰老特性的影响

作物根系生理功能的变化直接影响地上部分器官生长发育及衰老进程(许明等, 2010), 根系代谢活性的衰退较叶片提前(魏道智等, 2004)。有关棉花根系的研究表明, 根系生长较地上部到达高峰的时间提前, 进入衰老的时间提前是引起棉花地上部早衰的内在原因(李少昆等, 2000)。本研究中, 根域限制下棉花主要生育时期叶片抗氧化保护酶系活性和MDA含量的变化趋势与根系一致, 表明棉花根系生长空间受限后, 根系抗氧化保护酶系活性降低, 衰老速度加快, 影响对水肥的吸收和利用, 进而造成地上部叶片发生响应性早衰。

在作物根系生长受限的逆境中, 植株能通过调节生理代谢过程, 增强对水分和养分的吸收能力, 减缓逆境对植株的伤害(蔡昆争等, 2003; 宋海星和李生秀, 2003; 张永清和苗果园, 2006)。Liu等(2008)和郭文琦等(2009)的研究表明, 水氮供应可显著地增强盆栽棉花根系活力、提高根系抗氧化保护酶系活性, 叶片抗氧化保护酶系活性的提高减轻了膜脂过氧化程度(刘瑞显等, 2008); 根系功能衰退引起的叶片早衰, 可通过水肥调节有所改善(Dodd, 2005)。本试验中不同水氮处理下棉花根系(图4–6)与叶片(图9–11)抗氧化保护酶系活性均表现为 $W_1N_1 > W_0N_1 > W_1N_0 > W_0N_0$ , MDA含量表现与之相反(图3, 图8), 光合速率(另文发表)、叶绿素SPAD值变化趋势(图7)与根叶抗氧化保护酶系活性一致, 表明水氮供应使限根棉花根系与叶片抗氧化保护酶系活性升高, 降低细胞膜脂过氧化程度, 叶绿素降解速率减慢, 能延长叶片功能期。

表1 水氮供应对根域限制棉花生物量累积与分配的影响(平均值±标准偏差)

Table 1 Effects of water and nitrogen application regimes on accumulation and distribution of biomass of cotton cultivated under root restriction (mean ± SD)

品种 Variety	处理 Treatment	地上部分生物量 Shoot biomass (g)	总生物量 Total biomass (g)	根冠比 Root/shoot	籽棉产量 Seed cotton yield (g·m <sup>-2</sup> )
‘新陆早13号’ ‘Xinluzao 13’	RRW <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	59.41 ± 5.34 <sup>e</sup>	91.44 ± 6.24 <sup>e</sup>	0.54 ± 0.02 <sup>b</sup>	192.5 ± 1.1 <sup>g</sup>
	RRW <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	86.06 ± 7.86 <sup>b</sup>	104.77 ± 5.74 <sup>c</sup>	0.22 ± 0.01 <sup>g</sup>	354.1 ± 3.5 <sup>e</sup>
	RRW <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	69.38 ± 6.39 <sup>d</sup>	101.84 ± 4.47 <sup>d</sup>	0.47 ± 0.01 <sup>d</sup>	299.4 ± 2.2 <sup>e</sup>
	RRW <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	94.08 ± 8.04 <sup>a</sup>	113.96 ± 5.77 <sup>b</sup>	0.21 ± 0.00 <sup>g</sup>	453.9 ± 4.1 <sup>a</sup>
	CKW <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	57.29 ± 4.79 <sup>f</sup>	92.69 ± 6.85 <sup>e</sup>	0.62 ± 0.03 <sup>a</sup>	141.8 ± 1.3 <sup>b</sup>
	CKW <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	77.54 ± 6.47 <sup>c</sup>	105.66 ± 5.52 <sup>c</sup>	0.36 ± 0.01 <sup>e</sup>	330.0 ± 2.2 <sup>d</sup>
	CKW <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	68.38 ± 5.83 <sup>d</sup>	102.30 ± 5.70 <sup>d</sup>	0.50 ± 0.02 <sup>c</sup>	276.2 ± 1.1 <sup>f</sup>
	CKW <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	92.04 ± 9.03 <sup>a</sup>	115.71 ± 5.79 <sup>a</sup>	0.26 ± 0.01 <sup>f</sup>	411.8 ± 6.8 <sup>b</sup>
‘新陆早33号’ ‘Xinluzao 33’	RRW <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	65.79 ± 5.96 <sup>e</sup>	100.36 ± 6.89 <sup>e</sup>	0.53 ± 0.02 <sup>b</sup>	205.5 ± 1.4 <sup>g</sup>
	RRW <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	96.18 ± 8.16 <sup>c</sup>	107.02 ± 5.10 <sup>c</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>f</sup>	448.9 ± 1.1 <sup>c</sup>
	RRW <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	84.06 ± 7.08 <sup>d</sup>	103.83 ± 5.15 <sup>d</sup>	0.24 ± 0.01 <sup>e</sup>	420.1 ± 6.4 <sup>d</sup>
	RRW <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	115.45 ± 9.14 <sup>a</sup>	120.19 ± 6.77 <sup>b</sup>	0.04 ± 0.00 <sup>b</sup>	881.8 ± 21.6 <sup>a</sup>
	CKW <sub>0</sub> N <sub>0</sub>	60.30 ± 5.63 <sup>b</sup>	101.67 ± 6.81 <sup>e</sup>	0.69 ± 0.03 <sup>a</sup>	196.5 ± 1.8 <sup>g</sup>
	CKW <sub>0</sub> N <sub>1</sub>	79.72 ± 7.02 <sup>e</sup>	108.06 ± 5.24 <sup>c</sup>	0.36 ± 0.02 <sup>d</sup>	402.4 ± 2.4 <sup>e</sup>
	CKW <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	73.38 ± 6.83 <sup>f</sup>	103.98 ± 5.94 <sup>d</sup>	0.42 ± 0.02 <sup>c</sup>	325.0 ± 7.8 <sup>f</sup>
	CKW <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	113.77 ± 8.77 <sup>b</sup>	122.07 ± 6.60 <sup>a</sup>	0.07 ± 0.00 <sup>g</sup>	642.7 ± 13.5 <sup>b</sup>

每列不同小写字母表示各处理间差异显著( $p > 0.05$ )。

Different small letters of the same list indicate significant difference ( $p < 0.05$ ) among different treatments.

### 3.3 根域限制和水氮供应对棉花生物量累积与分配的影响

蔡昆争等(2003)认为根域限制后水稻根冠比降低,对地上部生长影响不大甚至有一定的促进作用。本试验中,根域限制下棉花根系生物量显著降低(图2),但地上部生物量及籽棉产量增加(表1),这可能与适当减小根系生长空间、减少根系冗余与呼吸消耗有关(张大勇等,1995),有利于地上部生物量积累。不同品种间,‘新陆早33号’地上部生物量和籽棉产量均明显高于‘新陆早13号’,根冠比低于‘新陆早13号’(表1),这可能与品种类型有关,相对于地上部生物量的增长,‘新陆早33号’根量增长相对较少,减少了根系冗余(张大勇等,1995;李话和张大勇,1999);作物根系生长与水分、养分的供应关系密切(Casper & Jackson, 1997)。本试验表明,同一根域容积条件下,各水氮处理间根系生物量与根冠比的变化趋势与地上部生物量、籽棉产量的变化相反(表1),表明在水肥充足条件下,根系生长减慢,生物量下降,有限的光合产物尽可能多地向地上部生殖器官分配。

张永清和苗果园(2006)研究表明,适度根域限制降低了高粱(*Sorghum vulgare*)总根长、旗叶SOD

与POD活性降低,但对产量没有影响,表明高粱存在一定程度的根系冗余现象。本试验条件下,根域限制(RR)较对照(CK)显著( $p < 0.05$ )降低了根系及叶片抗氧化保护酶系活性,棉株总生物产量降低,但籽棉产量显著高于对照(表1)。结合新疆棉花生产实践,膜下滴灌及高密度植棉技术,在产量水平提高的同时,棉花生育后期红叶早衰现象加剧,推测可能是膜下滴灌及高密度栽培使棉株根系生长受到一定程度的限制。Bange和Milroy (2004)研究表明,棉花表现早衰的品种,其生殖生长开始也较早,也较早熟,因此,在无霜期短、生长季节有限的棉区,营养器官适度早衰有利于植株由营养生长为主向以生殖生长为主过渡,有利于光合产物在较短时间向生殖器官运输(魏道智,2004)。通过合理的水肥调控,在提早生育进程的前提下延缓棉株衰老,产量有望进一步提高。本试验结果是在土柱栽培条件下获得的,尽管试验过程中采用了严格的控制方法加以模拟田间环境,但仍与田间试验和大田生产存在较大差异。为此,还需进一步采用其他试验研究方法,深入探讨水氮供应对膜下滴灌棉花生长发育、产量形成的影响机制,为膜下滴灌棉花生产水肥管理提供理论依据。

## 4 结论

根域限制条件下, 棉花根系生物量、抗氧化保护酶系活性(SOD、POD与CAT)显著( $p < 0.05$ )低于对照, MDA含量增加。根域限制影响根系生产, 但促进了地上部生物量累积, 根冠比下降, 叶片较对照提前衰老。水氮供应能有效地调节根系与叶片的生长发育, 延缓植株衰老进程。根域限制下适量水氮供应处理的根冠比较低, 但地上生物量、籽棉产量均明显高于其他各处理。因此, 在根域容积受限条件下, 优化棉花生育期水氮供应, 能增强根系与叶片抗氧化保护酶系活性, 降低根冠比并增加光合产物向生殖器官分配比例, 是延缓棉花衰老、进一步挖掘膜下滴灌技术增产潜力的有效途径。

**基金项目** 国家自然科学基金(31000675和304600-63)和国家科技支撑计划项目(2007BAD44B07)。

## 参考文献

- Bange MP, Milroy SP (2004). Growth and dry matter partitioning of diverse cotton genotypes. *Field Crops Research*, 87, 73–87.
- Cai KZ, Luo SM, Duan SS (2003). The response of the rice root system to nitrogen conditions under-root confinement. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1109–1116. (in Chinese with English abstract) [蔡昆争, 骆世明, 段舜山 (2003). 水稻根系在根袋处理条件下对氮养分的反应. *生态学报*, 23, 1109–1116.]
- Casper BB, Jackson RB (1997). Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28, 545–570.
- Dodd IC (2005). Root-to-shoot signalling: assessing the roles of ‘up’ in the up and down world of long-distance signalling in planta. *Plant and Soil*, 274, 251–270.
- Dong HZ, Niu YH, Li WJ, Zhang DM (2008). Effects of cotton rootstock on endogenous cytokinins and abscisic acid in xylem sap and leaves in relation to leaf senescence. *Journal of Experimental Botany*, 59, 1295–1304.
- Ferree DC, Myers SC, Schupp JR (1992). Root pruning and root restriction of fruit trees-current review. *Acta Horticulturae*, 322, 153–166.
- Guo WQ, Zhao XH, Chen BL, Liu RX, Zhou ZG (2009). Effects of nitrogen on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) root growth under short-term waterlogging during flowering and boll-forming stage. *Acta Agronomica Sinica*, 35, 1078–1085. (in Chinese with English abstract) [郭文琦, 赵新华, 陈兵林, 刘瑞显, 周治国 (2009). 氮素对花铃期短期渍水棉花根系生长的影响. *作物学报*, 35, 1078–1085.]
- Hu ZZ (2007). Implementing actively the base construction of commodity cotton of high quality in Xinjiang production and construction group. *Xinjiang Farmland Science & Technology*, (6), 3–8. (in Chinese) [胡兆璋 (2007). 积极促进兵团优质商品棉基地建设. *新疆农垦科技*, (6), 3–8.]
- Kimura K, Kikuchi S, Yamasaki SI (1999). Accurate root length measurement by image analysis. *Plant and Soil*, 216, 117–127.
- Li H, Zhang DY (1999). Morphological characteristics and growth redundancy of spring wheat root system in semi-arid regions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 10, 26–30. (in Chinese with English abstract) [李话, 张大勇 (1999). 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*, 10, 26–30.]
- Li HS (2000). *Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry Experiment*. Higher Education Press, Beijing. 169–172. (in Chinese) [李合生 (2000). 植物生理生化实验原理和技术. 高等教育出版社, 北京. 169–172.]
- Li SK, Wang CT, Wang CY, Zhang WF (2000). A study on the distributing pattern and construction of high-yield cotton root system in north Xinjiang. *Cotton Science*, 12, 67–72. (in Chinese with English abstract) [李少昆, 王崇桃, 汪朝阳, 张旺锋 (2000). 北疆高产棉花根系构型与动态建成的研究. *棉花学报*, 12, 67–72.]
- Liu DY, Shi LY, Huang BR, Dong QY (1993). Research of cultivation methods on root system root vigor and plant characteristics in winter wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 26, 51–56. (in Chinese with English abstract) [刘殿英, 石立岩, 黄炳茹, 董庆裕 (1993). 栽培措施对冬小麦根系及其活力和植株性状的影响. *中国农业科学*, 26, 51–56.]
- Liu JJ, Chen YH, Li MS (2002). Relationship between soil moisture and cotton transpiration under mulchtrickle irrigation. *Cotton Science*, 14, 200–203. (in Chinese with English abstract) [刘建军, 陈燕华, 李明思 (2002). 膜下滴灌棉花植株耗水率与土壤水分的关系. *棉花学报*, 14, 200–203.]
- Liu RX, Chen BL, Wang YH, Guo WQ, Zhou ZG (2009). Effects of nitrogen on cotton root growth under drought stress and after watering during flowering and boll-forming stages. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 405–413. (in Chinese with English abstract) [刘瑞显, 陈兵林, 王友华, 郭文琦, 周治国 (2009). 氮素对花铃期干旱再复水后棉花根系生长的影响. *植物生态学报*, 33, 405–413.]
- Liu RX, Guo WQ, Chen BL, Zhou ZG (2008). Effects of nitrogen on the antioxidant enzyme activities and endogenous hormone contents of cotton leaf under drought stress

- and after soil re-watering during the flowering and boll-forming stage. *Acta Agronomica Sinica*, 34, 1598–1607. (in Chinese with English abstract) [刘瑞显, 郭文琦, 陈兵林, 周治国 (2008). 氮素对花铃期干旱及复水后棉花叶片保护酶活性和内源激素含量的影响. 作物学报, 34, 1598–1607.]
- Liu RX, Zhou ZG, Guo WQ, Chen BL, Oosterhuis DM (2008). Effects of N fertilization on root development and activity of water-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plants. *Agricultural Water Management*, 95, 1261–1270.
- Pan QM, Yu ZW, Wang YF, Wang RY (1999). Changes of two senescence index and iPAs and ABA contents in wheat root at different soil layer after anthesis. *Plant Physiology Communication*, 35, 449–451. (in Chinese with English abstract) [潘庆民, 于振文, 王月福, 王瑞英 (1999). 小麦开花后不同土层根系的两种衰老指标与iPAs及ABA含量的变化. 植物生理学通讯, 35, 449–451.]
- Schurr U (1998). Xylem sap sampling-new approaches to an old topic. *Trends in Plant Science*, 3, 293–298.
- Song HX, Li SX (2003). Effects of root growing space of on maize its absorbing characteristics. *Scientia Agricultura Sinica*, 36, 899–904. (in Chinese with English abstract) [宋海星, 李生秀 (2003). 玉米生长空间对根系吸收特性的影响. 中国农业科学, 36, 899–904.]
- Thomas RB, Strain BR (1991). Root restriction as a factor in photosynthetic acclimation of cotton seedlings grown in elevated carbon dioxide. *Plant Physiology*, 96, 627–634.
- Wang Z (2000). *Plant Physiology*. China Agriculture Press, Beijing. 422–423. (in Chinese) [王忠 (2000). 植物生理学. 中国农业出版社, 北京. 422–423.]
- Wei CZ, Ma FY, Lei YW, Li JH, Ye J, Zhang FS (2002). Study on cotton root development and spatial distribution under film mulch and drip irrigation. *Cotton Science*, 14, 209–214. (in Chinese with English abstract) [危常州, 马富裕, 雷咏雯, 李俊华, 冶军, 张福锁 (2002). 棉花膜下滴灌根系发育规律的研究. 棉花学报, 14, 209–214.]
- Wei DZ, Ning SJ, Lin WX (2004). Relationship between wheat root activity and leaf senescence. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15, 1565–1569. (in Chinese with English abstract) [魏道智, 宁书菊, 林文雄 (2004). 小麦根系活力变化与叶片衰老的研究. 应用生态学报, 15, 1565–1569.]
- Xie ZL, Tian CY, Bian WG (2009). Effects of water and nitrogen on cotton root architecture under film drip irrigation. *Cotton Science*, 21, 508–514. (in Chinese with English abstract) [谢志良, 田长彦, 卞卫国 (2009). 膜下滴灌水氮对棉花根系构型的影响. 棉花学报, 21, 508–514.]
- Xu M, Jia DT, Ma DR, Wang JY, Miao W, Chen WF (2010). Correlation of root physiology and leaf photosynthesis characteristics in northern Chinese japonica super rice. *Acta Agronomica Sinica*, 36, 1030–1036. (in Chinese with English abstract) [许明, 贾德涛, 马殿荣, 王嘉宇, 苗微, 陈温福 (2010). 北方超级粳稻根系生理、叶片光合性能特点及其相互关系. 作物学报, 36, 1030–1036.]
- Yang HQ, Li LG, Jie YL (2001). Root restriction of horticultural plant and its application. *Acta Horticulturae Sinica*, 28, 705–710. (in Chinese with English abstract) [杨洪强, 李林光, 接玉玲 (2001). 园艺植物的根系限制及其应用. 园艺学报, 28, 705–710.]
- Yang JC, Zhang JH, Wang Z, Zhu Q, Liu L (2002). Abscisic 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*, 215, 645–652.
- Yong JWH, Stuart LD, Chin WS, Farquhar GD (2010). Effects of root restriction on growth and associated cytokinin levels in cotton (*Gossypium hirsutum*). *Functional Plant Biology*, 37, 974–984.
- Zhang DY, Jiang XH, Zhao SL (1995). Further thoughts on growth redundancy. *Acta Pratacultural Science*, (3), 17–22. (in Chinese with English abstract) [张大勇, 姜新华, 赵松龄 (1995). 再论生长的冗余. 草业学报, (3), 17–22.]
- Zhang HZ, Gan XX, Hu XB, Li SL, Luo HH, Zhang WF (2010). Effects of irrigation and nitrogen application regimes on leaf senescence and yield and fiber quality of cotton in plastic mulched/drip irrigated systems. *Journal of Shihezi University Natural Science*, 28, 661–668. (in Chinese with English abstract) [张宏芝, 干秀霞, 虎晓兵, 李善龙, 罗宏海, 张旺锋 (2010). 膜下滴灌水氮运筹方式对棉花叶片衰老及产量和品质的影响. 石河子大学学报(自然科学版), 28, 661–668.]
- Zhang YQ, Miao GY (2006). Effects of soil root-growing space on root physiological characteristics and grain yield of sorghum. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 635–639. (in Chinese with English abstract) [张永清, 苗果园 (2006). 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, 17, 635–639.]

责任编辑: 李彦 责任编辑: 李敏