

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.94174

DPC⁺化学封顶对不同施氮量下棉花叶片光合生理特性的影响

时晓娟¹ 韩焕勇^{2,*} 王方永² 郝先哲¹ 高宏云¹ 罗宏海^{1,*}

¹ 石河子大学农学院, 新疆石河子 832000; ² 新疆农垦科学院棉花研究所, 新疆石河子 832000

摘要: 在北疆气候条件下, 为明确棉花对不同施氮量下增效缩节胺[DPC⁺, 25%甲哌鎓(1,1-dimethyl piperidinium chloride, DPC)水剂]化学封顶效应的响应, 以新陆早 53 号为试验材料, 在 150(N₁)、300(N₂)和 450(N₃) kg hm⁻² 施氮水平下, 以人工打顶(P₀)为对照, 研究 DPC⁺剂量[450(P₁)、750(P₂)和 1050(P₃) mL hm⁻²]对棉花叶绿素含量(Chl)、叶面积(LA)、气体交换参数、叶绿素荧光参数及干物质累积与分配的影响。结果表明, 同一 DPC⁺剂量下, 随施氮量增加, Chl、LA、气体交换参数、叶绿素荧光参数和生殖器官干物质(RODM)均呈现先上升后下降的趋势; 同一施氮量下, 上述参数因 DPC⁺剂量不同呈不同变化趋势, 其中 N₁ 水平下以 P₁ 处理、N₂ 水平下以 P₂ 处理、N₃ 水平下以 P₃ 处理表现出较高的 RODM、Chl、净光合速率(P_n)、实际光化学效率(Φ_{PSII})、电子传递速率(ETR), 较低的非光化学淬灭(NPQ)。DPC⁺与施氮量互作表现为, 与其他处理相比, Chl、P_n、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、Φ_{PSII}、ETR、RODM 在 N₂P₂ 处理下分别提高了 15.52%、29.39%、27.97%、36.77%、23.28%、23.55%、8.41%~22.24%, NPQ 降低了 34.54%。相关分析表明, 干物质累积和 Chl、LA、P_n、G_s、Φ_{PSII} 均呈显著正相关, 与 NPQ 呈极显著负相关。因此, 在喷施 DPC⁺(750 mL hm⁻²)条件下, 适量追施氮肥(300 kg hm⁻²)能改善棉花光合性能, 在增加干物质累积的基础上, 促进了光合产物向生殖器官分配。

关键词: 棉花; 施氮量; DPC⁺; 化学封顶; 干物质累积

Effects of chemical topping with fortified mepiquat chloride on photosynthetic characteristics of cotton leaves under different nitrogen rates

SHI Xiao-Juan¹, HAN Huan-Yong^{2,*}, WANG Fang-Yong², HAO Xian-Zhe¹, GAO Hong-Yun¹, and LUO Hong-Hai^{1,*}

¹ College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; ² Cotton Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, Xinjiang, China

Abstract: This study aims to explore the effects of fortified mepiquat chloride (25% DPC, 1,1-dimethyl piperidinium chloride) on cotton leaf photosynthetic regulation under different nitrogen fertilizations. Field experiments were used Xinluzao 53 and conducted split plot arrangement with three nitrogen (N) fertilizer levels [150 (N₁), 300 (N₂), 450 (N₃) kg hm⁻²] and three DPC⁺ doses [450 (P₁), 750 (P₂), 1050 (P₃) mL hm⁻²]. Chlorophyll content, leaf area, gas exchange, chlorophyll fluorescence parameters and dry matter accumulation were investigated. With the increasing nitrogen application level, the chlorophyll content, leaf area, gas exchange parameters, chlorophyll fluorescence parameters and reproductive organs dry matter accumulation were increased first and then decreased. P₁N₁, P₂N₂, and P₃N₃ treatments had greater reproductive organ dry matter accumulation, chlorophyll content, net photosynthetic rate (P_n), actual photochemical efficiency (Φ_{PSII}), electron transfer rate (ETR), and lower non-photochemical quenching (NPQ). N₂P₂ treatment increased chlorophyll content, P_n, T_r, G_s, Φ_{PSII}, ETR, reproductive organs dry matter accumula-

本研究由国家重点研发计划项目(2017YFD0101600), 新疆兵团重点领域创新团队(2017CB011)和新疆兵团重大专项(2016AA001-2,4)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0101600), the Innovation Team in Key Areas of Xinjiang Production and Construction Crops (2017CB011), and the National Science and Technology Major of Xinjiang Production and Construction Crops (2016AA001-2,4).

* 通信作者(Corresponding authors): 韩焕勇, E-mail: hanhy1@163.com; 罗宏海, E-mail: luohonghai79@163.com

第一作者联系方式: E-mail: 1498975919@qq.com

Received (收稿日期): 2019-11-11; Accepted (接受日期): 2020-04-15; Published online (网络出版日期): 2020-05-06.

URL: http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200506.1326.002.html

tion by 15.52%, 29.39%, 27.97%, 36.77%, 23.28%, 23.55%, 8.41%–22.24% respectively, while reduced NPQ by 34.54%, compared with other counterparts. The correlation analysis showed that the dry matter accumulation was significantly positively correlated with chlorophyll content, leaf area, P_n , G_s , Φ_{PSII} , and significantly negatively correlated with NPQ. In conclusion, the application of nitrogen fertilizer at 300 kg hm⁻² in combination with DPC⁺ (750 mL hm⁻²) improved leaf photosynthetic characteristics and promoted the distribution of photosynthates to reproductive organs due to increased dry matter accumulation.

Keywords: cotton; nitrogen application rate; DPC⁺; chemical topping; dry matter accumulation

棉花是世界上最主要的纺织纤维原料和油料作物^[1-2]。近年来,新疆棉花生产过程已经基本实现全程机械化,但由于棉花打顶的机械化程度不高,每年需要耗费大量人力^[3]。随着劳动力价格的不断上涨^[4-5],植棉的生产成本不断增加,导致植棉效益逐年下降。因此探索棉花打顶机械化、轻简化对新疆棉花高效可持续发展具有重要意义。

打顶是种植棉花过程中的一个重要环节,通过打顶可消除植株的顶端优势,调节植株体内的水分和养分运输,协调植株的营养生长与生殖生长,增加结铃数,减少蕾铃的脱落,进而提高棉花产量^[6-7]。目前采用的人工打顶由于费用高、效率低,很难满足棉花全程机械化、规模化、轻简化和可持续生产的需求^[8-9]。缩节胺(DPC)缓释型水乳剂作为一种新型化学封顶剂,称为增效DPC(DPC⁺),可对棉花幼嫩组织的表皮造成损伤,强制延缓或抑制棉花顶芽的生长,从而达到打顶的效果^[10-11]。杨成勋等^[10]从棉花冠层结构的角度阐明化学封顶可以塑造紧凑株型,改善生育后期冠层的透光性,优化群体质量,提高棉花增产潜力。王谭刚等^[12]研究表明,在相同密度下,与人工打顶相比,化学封顶处理能够促进干物质向生殖器官转运与分配;徐守振等^[13-14]研究发现,在降低滴灌量的基础上,喷施化学封顶剂能合理地调节棉花株型并不显著降低产量。因此,化学封顶替代人工打顶是实现棉花节本增效的关键环节。光合产物是棉花产量形成的物质基础,氮肥是影响棉花光合作用和获得高产的主要限制因素之一。前人研究主要集中在氮肥的施用量^[15-16]、方式^[17]及生育期分配比例^[18]对棉花生长发育、生理特性及产量形成的调节效应,有关化学封顶条件下氮肥施用量对棉花光合生理及产量形成的研究尚缺乏,基础研究的薄弱限制了化学封顶技术稳产增产潜力的发挥。本文通过研究不同施氮量下化学封顶剂对棉花叶片叶绿素、叶面积、气体交换参数、叶绿素荧光参数以及干物质累积与分配等指标的影响,探讨充分挖掘化学封顶技术节本增产潜力的可能途径,为干旱区膜下滴灌棉花轻简化栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于2013—2014年在石河子新疆农垦科学院棉花所试验地(44°19'N, 86°03'E)进行,试验材料为新陆早53号。当年棉花生长季4月至10月份平均气温分别为19.6℃和19.5℃,降雨量为166.5 mm、128.2 mm,日照时数为2142.6 h、2163.2 h, 10℃活动积温为4007.9℃、4040.1℃。试验地前茬为棉花,土壤质地为壤土,含有机质20.1 g kg⁻¹、全氮0.95 g kg⁻¹、水解氮71.7 mg kg⁻¹、速效磷12.1 mg kg⁻¹和速效钾274 mg kg⁻¹。

1.2 试验设计

采用裂区设计,主区为施氮量,副区为DPC⁺剂量。试验中DPC⁺为增效DPC(25%DPC缓释型水乳剂,DPC是应用植物生长延缓剂缩节胺(1,1-二甲基哌啶鎓氯化物),由北京农业技术推广站和中国农业大学植物生长调节剂教育部工程中心共同研发,商品名为“棉花化学打顶剂”,由新疆金棉科技有限责任公司生产并提供。设150(N₁)、300(N₂)和450(N₃) kg hm⁻² 3个施氮量水平,每个施氮量下设450(P₁)、750(P₂)和1050(P₃) mL hm⁻² 3个DPC⁺剂量水平,并以人工打顶(P₀)为对照。小区面积45.6 m²,重复3次。

采用超宽膜(2.05 m)一膜六行(66 cm+10 cm)机采棉模式播种,播幅为4.56 m,株距为0.1 m,滴灌带布置方式为1膜3带。4月18日至20日播种,9月25日至30日收获,收获株数为16.5万株 hm⁻²。氮(N)、磷(P)、钾(K)肥均随水滴施,其中N肥为尿素,P、K肥来源为磷酸二氢钾,用量为P₂O₅ 78 kg hm⁻²和K₂O 51 kg hm⁻²。6月、7月和8月P、K施用比例为25%、55%和20%,N施用比例为15%、65%和15%~20%。各处理第1次滴水时间为6月25日,滴水周期为9~10 d,滴灌定额为600 m³ hm⁻²,滴水总量为4800 m³ hm⁻²。DPC⁺喷施时间为7月4日至5日,与人工打顶同期进行。其他管理措施按当地大田栽培进行。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶面积 分别在盛花期、盛铃期、吐絮期, 采用数字图像处理方法测量叶片面积。从每处理选 3 株代表性植株, 将每植株叶片和面积为 1 cm^2 金属片分别放于白布上, 用较高分辨率的相机垂直拍照获取棉花叶片和金属片的图像后, 用 ImageJ 软件进行图像分析, 计算叶面积。

1.3.2 叶片气体交换参数 于人工打顶时标记各处理植株倒三叶, 分别在盛花期、盛铃期、吐絮期选择晴朗无云天气, 于 10:00—12:00 采用 LI-6400 光合测定系统(LI-COR, USA; 借助人工光源光强稳定在 $1800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)测定标记叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)等参数, 每次测各处理 3~4 片叶。

1.3.3 叶片叶绿素荧光参数 采用 MINI-PAM 荧光仪测定叶片叶绿素荧光参数, 与气体交换参数的测定同时进行。测定叶片与测量气体交换参数相同, 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, 光强稳定在 $1200\sim 1400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 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})等叶绿素荧光参数。

1.3.4 叶绿素含量 分别测定盛花期、盛铃期、吐絮期的叶绿素含量, 测定叶片与测量气体交换参数的叶片相同。将采回的叶片用打孔器(直径为 0.85 cm)打成小圆片, 再用 80%的丙酮溶液浸提。定时振荡至各器官圆片呈白色时, 混匀, 用 UV-2041 型分光光度计(UV-2401, Japan), 于 663、645 和 470 nm 波长下测定 OD 值, 用 80%丙酮作空白对照。参考 Lichtenthaler 等^[19]的方法计算叶绿素含量。

1.3.5 干物质积累与分配 于盛花期、盛铃期、吐絮期从各小区选择有代表性棉株 4 株, 从子叶节处剪取地上部分, 分解成叶片、茎和蕾铃等器官, 分别装入纸袋, 105°C 下杀青 30 min, 80°C 下烘干至恒重后称重。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 软件处理试验数据, 利用 SPSS 21.0 统计软件 LSD 法进行显著性及方差分析, 采用 SigmaPlot 14.0 作图。

2 结果与分析

2.1 DPC⁺剂量对不同施氮量下棉花叶绿素含量的影响

由图 1 可以看出, 从盛花期至吐絮期, 棉花叶片叶绿素含量(Chl)呈现先升高后下降的趋势。随施氮量的增加, Chl 呈现先上升后下降的趋势, 其中以 N_2 处理的 Chl 最高, 分别比 N_1 和 N_3 处理平均高 8.90%和 6.36%。在 N_2 和 N_3 水平下, P_2 、 P_3 处理在盛铃期和吐絮期的 Chl 显著高于 P_0 、 P_1 处理, 其中 P_2 处理的 Chl 平均比 P_0 、 P_1 处理高 9.99%、10.56%。DPC⁺剂量和施氮量互作对棉花 Chl 无显著影响。

2.2 DPC⁺剂量对不同施氮量下棉花叶面积的影响

由表 1 可知, 随施氮量的增加, 棉花叶面积(LA)显著增加; 随 DPC⁺剂量的增加, LA 表现为下降趋势, 且与人工打顶(P_0)相比, 盛花期和盛铃期 P_1 、 P_2 处理间 LA 无显著差异, P_3 处理则显著低于 P_0 处理; 吐絮期 LA 差异不显著(除 2014 年 P_1 处理)。不同施氮水平下, P_3 处理的 LA 分别比 P_0 、 P_1 和 P_2 处理降低 0.14%~9.61%、2.61%~10.79%和 0.32%~8.91%; 在 N_2 水平下, 与 P_0 处理相比, P_2 处理 LA 在盛花期增加 5.08%~5.14%、吐絮期增加 0.07%~0.83%, 说明 DPC⁺剂量和施氮量互作对盛花期的 LA 有显著影响, N_2P_2 处理在棉花生长关键期能够保证较大的光合面积, 且后期衰减较慢。

2.3 DPC⁺剂量对不同施氮量下棉花叶片气体交换参数的影响

由图 2 可知, 施氮量和 DPC⁺剂量在盛铃期和吐絮期对棉花叶片净光合速率(P_n)的影响达到显著水平。在盛花期, N_1 处理的 P_n 显著低于 N_2 和 N_3 处理; 在盛铃期和吐絮期, N_2 处理的 P_n 显著高于 N_1 和 N_3 。DPC⁺剂量在盛花至吐絮期的 P_n 均以 P_2 处理最高, 较 P_0 、 P_1 和 P_3 处理分别提高 14.83%、12.13%和 4.05%。在 N_1 水平下, 盛花期至吐絮期以 P_1 处理最高, 与 P_2 和 P_3 处理无显著差异, 但较 P_0 处理平均增幅为 3.39%; N_2 水平下, 盛花期各处理间无显著差异, 但盛铃期和吐絮期 P_2 处理的 P_n 较 P_0 、 P_1 和 P_3 处理平均提高 25.48%、7.34%和 19.86%; N_3 水平下, P_3 处理的 P_n 较 P_0 、 P_1 和 P_2 处理平均提高 26.39%、40.58%和 15.96%。DPC⁺剂量和施氮量对 P_n 在盛铃期和吐絮期的互作效应达到显著水平, 以 N_2P_2 处理较高。

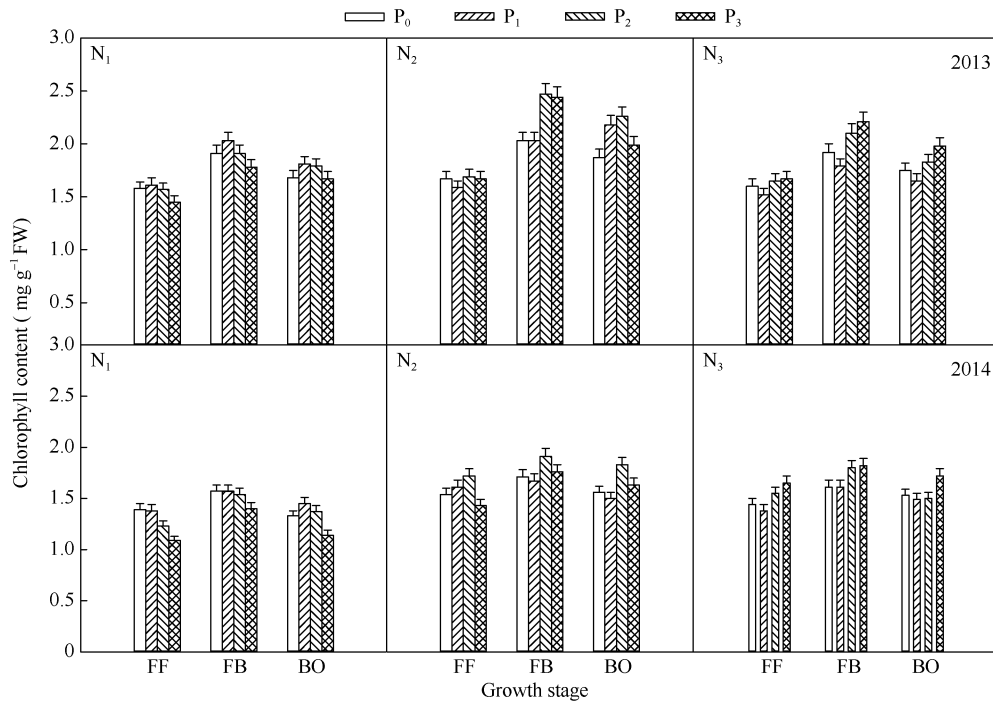


图 1 DPC⁺剂量对不同施氮量下棉花叶绿素的影响

Fig. 1 Effects of chemical capping on cotton chlorophyll contents under different nitrogen rates

FF: 盛花期; FB: 盛铃期; BO: 吐絮期; N₁: 低氮(150 kg hm⁻²); N₂: 中氮(300 kg hm⁻²); N₃: 高氮(450 kg hm⁻²); P₀: 人工打顶; P₁: 低剂量 DPC⁺(450 mL hm⁻²); P₂: 中剂量 DPC⁺(750 mL hm⁻²); P₃: 高剂量 DPC⁺(1050 mL hm⁻²)。

FF: full flowering stage; FB: full bolling stage; BO: boll opening stage; N₁: low N rate (150 kg hm⁻²); N₂: middle N rate (300 kg hm⁻²); N₃: high N rate (450 kg hm⁻²); P₀: artificial topping; P₁: low dose of DPC⁺ (450 mL hm⁻²); P₂: middle dose of DPC⁺ (750 mL hm⁻²); P₃: high dose of DPC⁺ (1050 mL hm⁻²).

表 1 DPC⁺剂量对不同施氮量下棉花叶面积(m² hm⁻²)的影响

Table 1 Effects of chemical capping on cotton leaf area (m² hm⁻²) index under different nitrogen rates

处理 Treatment	2013			2014		
	盛花期	盛铃期	吐絮期	盛花期	盛铃期	吐絮期
	Full flowering	Full boll	Boll opening	Full flowering	Full boll	Boll opening
N ₁	22608 c	38656 c	36204 c	22207 c	38556 c	36604 c
N ₂	27345 b	41950 b	38904 b	26945 b	41900 b	39004 b
N ₃	28409 a	43090 a	40113 a	28298 a	43006 a	40127 a
P ₁	26635 a	42571 a	39506 a	26280 a	42238 a	39650 a
P ₂	26679 a	41392 ab	38495 ab	26398 a	41170 a	38379 b
P ₃	25022 b	39923 c	37555 b	24733 b	39795 b	37781 b
P ₀	26146 a	41041 bc	38072 b	25857 a	41413 a	38502 b
N ₁ P ₀	22399 f	38269 bc	36059 e	21997 fg	38169 fg	36461 de
N ₁ P ₁	23900 e	39967 b	37356 de	23498 e	39766 def	37959 cd
N ₁ P ₂	22768 ef	39074 bc	36091 e	22371 ef	38776 efg	36489 de
N ₁ P ₃	21365 f	37314 c	35307 e	20964 g	37514 g	35508 e
N ₂ P ₀	27337 bcd	42502 a	39209 abcd	26938 cd	42003 abc	38611 bc
N ₂ P ₁	26973 cd	43296 a	39713 abc	26575 cd	43196 ab	39912 abc
N ₂ P ₂	28800 ab	42247 a	39237 abcd	28399 ab	42047abc	38936 bc
N ₂ P ₃	26269 d	39753 b	37456 cde	25870 d	40354 cde	38556 bc
N ₃ P ₀	28901 ab	42351 a	38947 bcd	28635 ab	44069 a	40435 ab

(续表 1)

处理 Treatment	2013			2014		
	盛花期 Full flowering	盛铃期 Full boll	吐絮期 Boll opening	盛花期 Full flowering	盛铃期 Full boll	吐絮期 Boll opening
N ₃ P ₁	29033 a	44451 a	41448 a	28766 a	43750 a	41081 a
N ₃ P ₂	28469 abc	42854 a	40157 ab	28425 ab	42687 ab	39712 abc
N ₃ P ₃	27747 bcd	42702 a	39902 ab	27366 bc	41517 bcd	39280 abc
N	*	*	*	*	*	*
P	*	*	*	*	*	*
N×P	*	ns	ns	*	ns	ns

ns: 表示处理间在 0.05 水平差异不显著。*: 表示处理间在 0.05 水平差异显著。同一列不同字母表示同一年在 0.05 水平差异显著。缩写同图 1。

ns: no significant difference at the 0.05 probability level. *: significant difference at the 0.05 probability level. Values followed by different letters are significant difference at the 0.05 probability level within a column in the same year. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

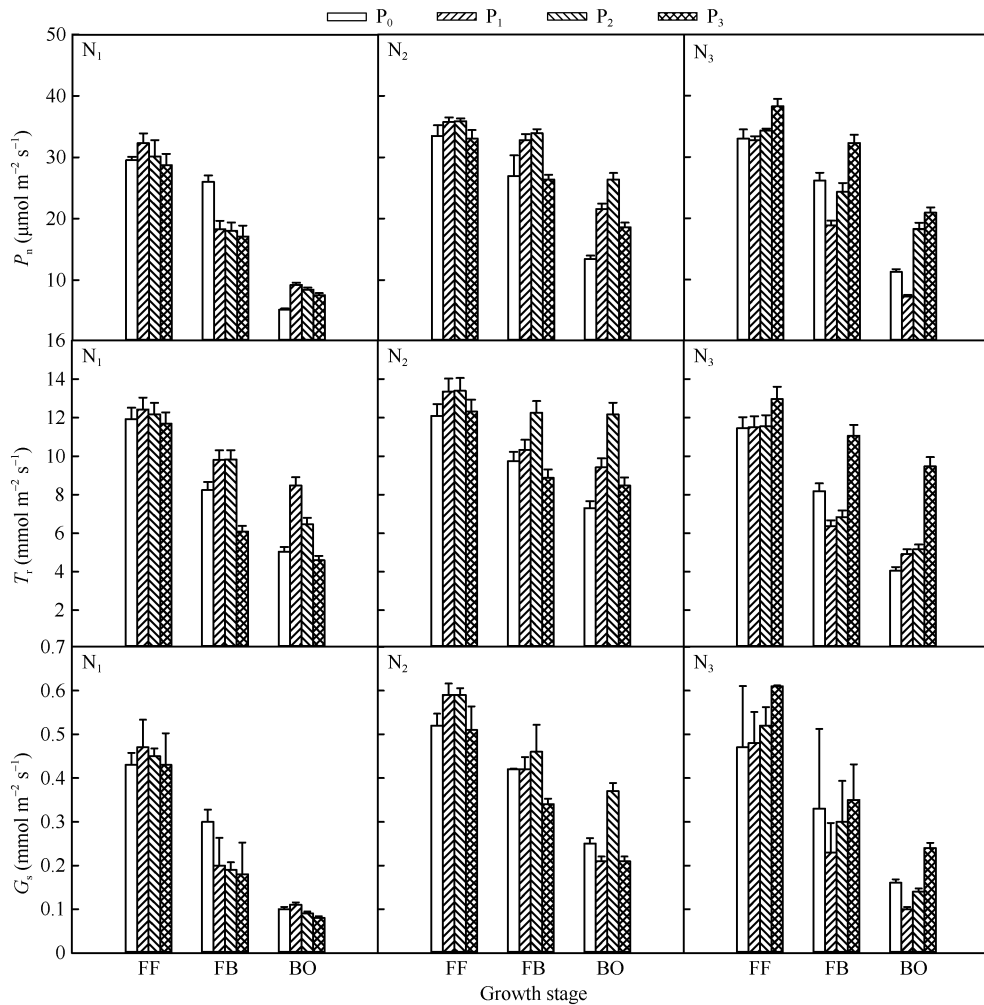


图 2 DPC⁺剂量对不同施氮量下棉花气体交换参数的影响(2014)

Fig. 2 Effects of chemical capping on cotton gas exchange parameters under different nitrogen rates (2014)

缩写同图 1。Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

随施氮量增加, 蒸腾速率(T_r)呈先增大后减小的趋势, 且在盛铃期和吐絮期达到显著水平, N_2 处理的 T_r 显著高于 N_1 和 N_3 处理; 而 DPC⁺ 剂量对 T_r 的影响在吐絮期达到了显著水平, P_0 处理的 T_r 显著低于其他处理, P_2 处理的 T_r 较 P_0 、 P_1 和 P_3 处理分别平均增加 15.02%、4.00% 和 5.23%。在 N_1 水平下, 以 P_1 处理的 T_r 值最高且在吐絮期达到显著水平, 比 P_0 、 P_2 和 P_3 处理分别平均提高 20.24%、8.58% 和 29.94%; N_2 水平下, 吐絮期 P_2 处理的 T_r 较 P_0 、 P_1 和 P_3 处理分别平均提高 23.39%、12.87% 和 22.02%; N_3 水平下, 盛铃期 P_3 处理的 T_r 显著高于 P_1 和 P_2 , 吐絮期 P_3 处理的 T_r 较 P_0 、 P_1 和 P_2 处理分别平均提高 31.68%、33.96% 和 31.57%。DPC⁺ 剂量和施氮量对盛铃期和吐絮期 T_r 交互效应显著, 以 N_2P_2 处理较高。

气孔导度(G_s)对 DPC⁺ 剂量、施氮量的响应与 P_n 和 T_r 的变化趋势相似, 吐絮期差异显著。 N_2 处理的

G_s 较 N_1 和 N_3 处理分别平均增加 43.91% 和 23.58%, 而 DPC⁺ 剂量对 G_s 的影响以 P_2 处理最优, 较 P_0 、 P_1 和 P_3 处理平均增加 5.08%、14.81% 和 6.46%。在 N_1 水平下, P_1 处理的 G_s 比 P_2 和 P_3 处理平均提高 7.84% 和 13.80%, 但比 P_0 处理降低 12.96%; 在 N_2 水平下, P_2 处理的 G_s 较 P_0 、 P_1 和 P_3 分别平均提高 18.52%、17.66% 和 27.43%; N_3 水平下, P_3 处理的 G_s 较 P_0 、 P_1 和 P_2 处理分别平均提高 19.74%、38.33% 和 23.43%。DPC⁺ 剂量和施氮量对吐絮期 G_s 交互效应显著, 以 N_2P_2 处理较高。

2.4 DPC⁺ 剂量对不同施氮量下棉花功能叶叶绿素荧光参数的影响

由图 3 可知, 不同处理 F_v/F_m 在盛花期保持在 0.83 左右, 盛铃期和吐絮期分别保持在 0.85 和 0.84 之间, 说明 DPC⁺ 剂量和施氮量及其互作对 F_v/F_m 无显著影响。

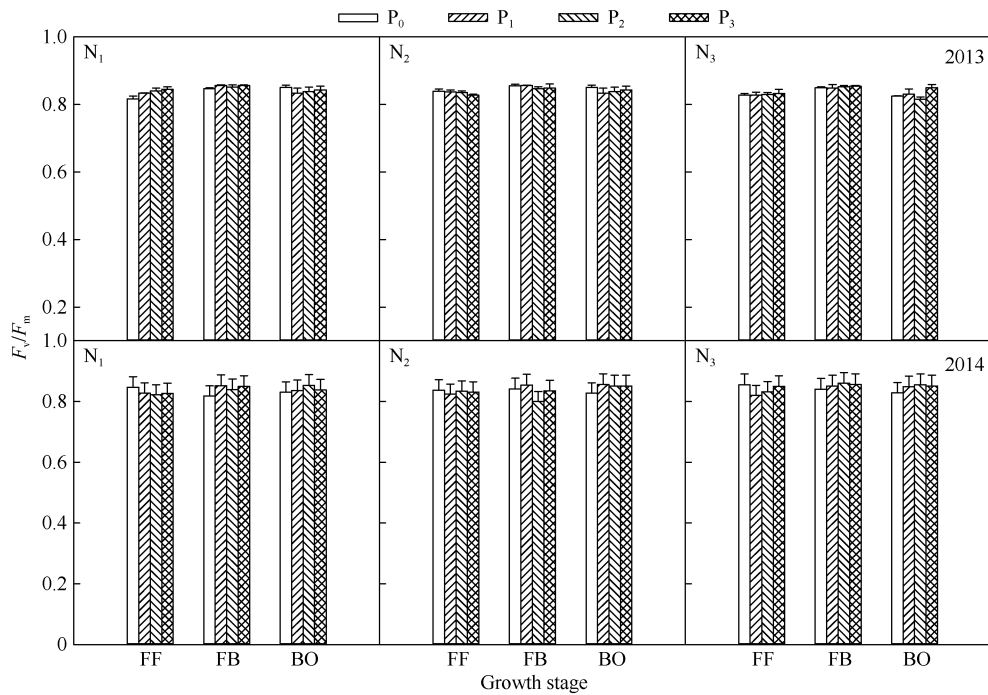


图 3 DPC⁺ 剂量对不同施氮量下棉花叶片 F_v/F_m 的影响

Fig. 3 Effects of chemical capping on cotton F_v/F_m under different nitrogen rates

缩写同图 1。Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

从盛花期至吐絮期, Φ_{PSII} 呈不断降低的趋势 (表 2)。随施氮量增加, Φ_{PSII} 呈现先增加后减小的趋势, 其中 N_2 处理的 Φ_{PSII} 分别比 N_1 和 N_3 处理平均提高 20.22% 和 10.76%。DPC⁺ 剂量对 Φ_{PSII} 的影响因施氮量的不同而不同。在 N_1 水平下, P_1 处理的 Φ_{PSII} 比 P_0 、 P_2 和 P_3 处理平均提高 19.64%、26.05%

和 37.19%; N_2 水平下, P_2 处理的 Φ_{PSII} 比 P_0 、 P_1 和 P_3 处理平均提高 10.11%、22.32% 和 18.82%; N_3 水平下, P_3 处理的 Φ_{PSII} 分别比 P_0 、 P_1 和 P_2 处理平均提高 16.77%、21.47% 和 14.25%。DPC⁺ 剂量和施氮量互作只对 2014 年 Φ_{PSII} 影响显著, 以 N_2P_2 处理最高、 N_1P_3 处理最低。

表 2 DPC⁺剂量对不同施氮量下棉花 Φ_{PSII} 的影响Table 2 Effects of chemical capping on cotton Φ_{PSII} under different nitrogen rates

处理 Treatment	2013			2014		
	盛花期 Full flowering	盛铃期 Full boll	吐絮期 Boll opening	盛花期 Full flowering	盛铃期 Full boll	吐絮期 Boll opening
N ₁	0.49 a	0.38 a	0.32 b	0.36 c	0.29 c	0.16 c
N ₂	0.57 a	0.43 a	0.36 a	0.50 a	0.35 a	0.26 a
N ₃	0.49 a	0.38 a	0.34 ab	0.47 b	0.31 b	0.22 b
P ₁	0.50 a	0.40 a	0.35 a	0.45 b	0.31 b	0.22 b
P ₂	0.52 a	0.39 a	0.34 a	0.47 a	0.35 a	0.22 b
P ₃	0.52 a	0.39 a	0.33 a	0.43 bc	0.31 b	0.16 c
P ₀	0.53 a	0.40 a	0.35 a	0.41 c	0.29 b	0.25 a
N ₁ P ₀	0.51 abc	0.38 a	0.33 a	0.33 ef	0.26 f	0.20 ef
N ₁ P ₁	0.61 abc	0.42 a	0.37 a	0.43 cd	0.34 b	0.30 b
N ₁ P ₂	0.44 abc	0.34 a	0.32 ab	0.36 e	0.31 cd	0.09 h
N ₁ P ₃	0.39 c	0.33 a	0.28 b	0.30 f	0.25 f	0.05 i
N ₂ P ₀	0.63 ab	0.42 a	0.37 a	0.47 bc	0.33 bc	0.30 b
N ₂ P ₁	0.46 abc	0.40 a	0.34 a	0.51 b	0.31 bcd	0.19 fg
N ₂ P ₂	0.68 a	0.43 a	0.37 a	0.59 a	0.41 a	0.34 a
N ₂ P ₃	0.52 abc	0.41 a	0.37 a	0.42 d	0.34 bc	0.21 de
N ₃ P ₀	0.42 abc	0.38 a	0.35 a	0.43 cd	0.29 de	0.24 c
N ₃ P ₁	0.43 bc	0.34 a	0.33 a	0.41 d	0.27 ef	0.17 g
N ₃ P ₂	0.44 abc	0.37 a	0.34 a	0.47 bc	0.32 bcd	0.23 cd
N ₃ P ₃	0.64 ab	0.40 a	0.37 a	0.57 a	0.34 b	0.23 cd
N	ns	ns	*	*	*	*
P	ns	ns	ns	*	*	*
N×P	*	ns	*	*	*	*

ns: 表示处理间在 0.05 水平差异不显著。*: 表示处理间在 0.05 水平差异显著。同一列不同字母表示同一年在 0.05 水平差异显著。缩写同图 1。

ns: no significant difference at the 0.05 probability level. *: significant difference at the 0.05 probability level. Values followed by different letters are significant difference at the 0.05 probability level within a column in the same year. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

从盛花期至吐絮期, ETR 呈现不断下降的趋势(表 3)。施氮量只对 2014 年 ETR 的影响达到显著水平, 无论何种 DPC⁺剂量条件下, 均以 N₂ 处理 ETR 最高, 比 N₁ 和 N₃ 处理平均提高 15.17% 和 18.57%。DPC⁺剂量也只在 2014 年盛花期和盛铃期对 ETR 的影响达到显著水平, 但因施氮量的不同呈现不同变化趋势。在 N₁ 水平下, P₁ 处理的 ETR 比 P₀、P₂ 和 P₃ 处理平均提高 34.18%、24.78% 和 38.88%; N₂ 水平下, P₂ 处理的 ETR 分别比 P₀、P₁ 和 P₃ 处理平均提高 25.93%、11.76% 和 33.33%; N₃ 水平下, P₃ 处理的 ETR 分别比 P₀、P₁ 和 P₂ 处理平均提高 14.29%、80.00% 和 60.00%。DPC⁺剂量和施氮交互仅对 2014 年 ETR 影响显著, 以 N₂P₂ 处理最高、N₁P₃ 处理最低。

由表 4 可知, 施氮量对 NPQ 的影响达到显著水平, 以 N₂ 处理最低, 分别比 N₁ 和 N₃ 处理平均降低 26.26% 和 20.52%。DPC⁺剂量主要对 2014 年棉花叶片 NPQ 的影响达到显著水平, 且不同 DPC⁺剂量的 NPQ 因施氮量不同呈现不同的变化趋势, 其中在 N₁ 水平下, P₁ 处理的 NPQ 分别比 P₀、P₂ 和 P₃ 处理降低 13.93%、8.12% 和 23.66%, 并在盛花期之后达到显著水平; N₂ 水平下, P₂ 处理的 NPQ 分别比 P₀、P₁ 和 P₃ 处理降低 14.67%、9.79% 和 13.23%; N₃ 水平下, P₃ 处理的 NPQ 分别比 P₀、P₁ 和 P₂ 处理降低 14.7%、29.67% 和 19.82%。DPC⁺剂量和施氮量对 2014 年 NPQ 交互效应显著, 最高为 N₁P₃ 处理、最低为 N₂P₂ 处理。

表 3 DPC⁺剂量对不同施氮量下棉花 ETR 的影响

Table 3 Effects of chemical capping on cotton electron transfer rate under different nitrogen rates

处理 Treatment	2013			2014		
	盛花期	盛铃期	吐絮期	盛花期	盛铃期	吐絮期
	Full flowering	Full boll	Boll opening	Full flowering	Full boll	Boll opening
N ₁	112.09 b	106.81 a	97.03 a	101.04 b	65.97 b	43.58 b
N ₂	143.09 a	112.14 a	105.68 a	126.81 a	75.57 a	56.89 a
N ₃	127.59 ab	105.97 a	99.25 a	90.38 c	66.87 b	29.16 c
P ₁	128.25 a	104.69 a	100.76 a	106.24 b	72.16 b	42.74 a
P ₂	131.40 a	115.22 a	105.99 a	117.34 a	80.09 a	43.85 a
P ₃	135.10 a	113.61 a	103.08 a	116.19 a	70.02 b	42.95 a
P ₀	115.60 a	99.71 a	92.79 a	84.54 c	55.61 c	43.30 a
N ₁ P ₀	104.98a	94.04 a	91.18 a	80.02 e	56.36 hi	37.98 fg
N ₁ P ₁	126.54 a	112.10 a	104.41 a	115.28 bc	73.01 de	57.70 b
N ₁ P ₂	112.45 a	111.15 a	102.10 a	105.79 cd	67.89 def	43.40 de
N ₁ P ₃	104.41 a	106.76 a	90.44 a	103.08 d	66.61 ef	35.26 g
N ₂ P ₀	120.29 a	103.01 a	96.47 a	100.36 d	58.92 gh	51.24 c
N ₂ P ₁	143.82 a	112.36 a	106.52 a	123.42 b	79.42 bc	61.03 b
N ₂ P ₂	159.12 a	120.85 a	113.79 a	143.76 a	89.66 a	69.17 a
N ₂ P ₃	149.12 a	113.68 a	105.92 a	139.70 a	74.29 cd	46.11 d
N ₃ P ₀	116.68 a	102.09 a	90.73 a	73.24 e	51.54 i	40.69 ef
N ₃ P ₁	114.39 a	96.98 a	92.75 a	80.02 e	64.05 fg	9.49 i
N ₃ P ₂	122.65 a	104.42 a	102.06 a	102.47 d	67.89 b	18.99 h
N ₃ P ₃	151.76 a	120.39 a	112.87 a	105.79 cd	69.17 def	47.47 cd
N	ns	ns	ns	*	*	*
P	ns	ns	ns	*	*	ns
N×P	ns	ns	ns	*	*	*

ns: 表示处理间在 0.05 水平差异不显著。*: 表示处理间在 0.05 水平差异显著。同一列不同字母表示同一年在 0.05 水平差异显著。缩写同图 1。

ns: no significant difference at the 0.05 probability level. *: significant difference at the 0.05 probability level. Values followed by different letters are significant difference at the 0.05 probability level within a column in the same year. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

表 4 DPC⁺剂量对不同施氮量下棉花 NPQ 的影响

Table 4 Effects of chemical capping on cotton non-photochemical quenching under different nitrogen rates

处理 Treatment	2013			2014		
	盛花期	盛铃期	吐絮期	盛花期	盛铃期	吐絮期
	Full flowering	Full boll	Boll opening	Full flowering	Full boll	Boll opening
N ₁	112.09 b	106.81 a	97.03 a	101.04 b	65.97 b	43.58 b
N ₂	143.09 a	112.14 a	105.68 a	126.81 a	75.57 a	56.89 a
N ₃	127.59 ab	105.97 a	99.25 a	90.38 c	66.87 b	29.16 c
P ₁	128.25 a	104.69 a	100.76 a	106.24 b	72.16 b	42.74 a
P ₂	131.40 a	115.22 a	105.99 a	117.34 a	80.09 a	43.85 a
P ₃	135.10 a	113.61 a	103.08 a	116.19 a	70.02 b	42.95 a
P ₀	115.60 a	99.71 a	92.79 a	84.54 c	55.61 c	43.30 a
N ₁ P ₀	104.98a	94.04 a	91.18 a	80.02 e	56.36 hi	37.98 fg
N ₁ P ₁	126.54 a	112.10 a	104.41 a	115.28 bc	73.01 de	57.70 b
N ₁ P ₂	112.45 a	111.15 a	102.10 a	105.79 cd	67.89 def	43.40 de
N ₁ P ₃	104.41 a	106.76 a	90.44 a	103.08 d	66.61 ef	35.26 g

(续表 4)

处理 Treatment	2013			2014		
	盛花期	盛铃期	吐絮期	盛花期	盛铃期	吐絮期
	Full flowering	Full boll	Boll opening	Full flowering	Full boll	Boll opening
N ₂ P ₀	120.29 a	103.01 a	96.47 a	100.36 d	58.92 gh	51.24 c
N ₂ P ₁	143.82 a	112.36 a	106.52 a	123.42 b	79.42 bc	61.03 b
N ₂ P ₂	159.12 a	120.85 a	113.79 a	143.76 a	89.66 a	69.17 a
N ₂ P ₃	149.12 a	113.68 a	105.92 a	139.70 a	74.29 cd	46.11 d
N ₃ P ₀	116.68 a	102.09 a	90.73 a	73.24 e	51.54 i	40.69 ef
N ₃ P ₁	114.39 a	96.98 a	92.75 a	80.02 e	64.05 fg	9.49 i
N ₃ P ₂	122.65 a	104.42 a	102.06 a	102.47 d	67.89 b	18.99 h
N ₃ P ₃	151.76 a	120.39 a	112.87 a	105.79 cd	69.17 def	47.47 cd
N	ns	ns	ns	*	*	*
P	ns	ns	ns	*	*	ns
N×P	ns	ns	ns	*	*	*

ns: 表示处理间在 0.05 水平差异不显著。*: 表示处理间在 0.05 水平差异显著。同一列不同字母表示同一年在 0.05 水平差异显著。缩写同图 1。

ns: no significant difference at the 0.05 probability level. *: significant difference at the 0.05 probability level. Values followed by different letters are significant difference at the 0.05 probability level within a column in the same year. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

2.5 DPC⁺剂量对不同施氮量下干物质累积与分配的影响

由表 5 可以看出, DPC⁺剂量对地上部干物质累积(SDM)影响不显著; 随施氮量增加, SDM 显著增大, 其中 N₃ 处理比 N₁ 和 N₂ 处理平均提高 22.90% 和 5.82%。施氮量对生殖器官干物质累积(RODM)的影响达到显著水平, 随施氮量增加, RODM 呈现先增加后减小的趋势, 以 N₂ 处理最高, 分别比 N₁ 和 N₃ 处理平均提高 21.85% 和 7.23%; DPC⁺剂量只对盛铃至吐絮期 RODM 影响显著, 其中 N₁ 水平下, 以 P₁ 处理 RODM 最高, 在 2014 年盛铃期 P₁ 处理显著高于 P₂ 和 P₃ 处理, 盛花期和吐絮期处理间差异不显著; N₂ 水平下, P₂ 处理的 RODM 比 P₀、P₁ 和 P₃ 处理分别提高 6.54%、12.90% 和 14.55%; N₃ 水平下, P₃ 处理 RODM 比 P₀、P₁ 和 P₂ 处理分别提高 9.47%、18.86% 和 15.42%。DPC⁺剂量和施氮量对棉花 SDM 和 RODM 互作效应显著, SDM 以 N₃P₃ 处理最高, RODM 以 N₂P₂ 处理最高。

由图 4 可知, 随施氮量的增加, 干物质向生殖器官分配的比例呈先上升后下降的趋势, 以 N₂ 处理最高。而在不同施氮量条件下, 干物质向生殖器官分配比例随 DPC⁺剂量呈现不同的变化, 其中在 N₁ 水平下, P₀、P₁ 比 P₂、P₃ 处理在盛花期和盛铃期分别平均提高

8.01% 和 4.45%; N₂ 水平下, P₀、P₂ 比 P₁、P₃ 处理平均提高 8.52%; N₃ 水平下, P₀、P₃ 比 P₁、P₂ 处理平均提高 6.98%。DPC⁺剂量和施氮量互作表明不同处理生殖器官干物质分配比例均以 N₂P₂ 处理最高, 盛花期以 N₁P₃ 处理最低、盛铃至吐絮期以 N₃P₁ 处理最低。

2.6 不同生育时期各参数的相关分析

由不同时期各参数之间的相关分析(表 6)可知, LA 与盛花期的 Chl、P_n 呈极显著正相关, 与 G_s 呈显著正相关。在盛花期至吐絮期, Chl 与气体交换参数、Φ_{PSII}、ETR 互为显著正相关, 但 NPQ 与各个光合参数之间呈极显著负相关。

SDM 与盛花期至吐絮期 LA、盛花期的 Chl、P_n、G_s 呈极显著正相关; 与盛花期和吐絮期的 Φ_{PSII} 和盛铃至吐絮的 P_n 以及吐絮期的 Chl、G_s 呈显著正相关; 与盛花期的 NPQ 呈显著负相关。RODM 与盛花期至吐絮期的 P_n、G_s、Φ_{PSII}、盛花期和吐絮期的 Chl, 盛花期的 LA 以及盛铃至吐絮期的 T_r 呈极显著正相关; 与盛花期和吐絮期的 ETR、盛铃期的 Chl 呈显著正相关; 与盛花期至吐絮期的 NPQ 呈极显著负相关。说明干物质累积与 Chl、LA、P_n、G_s、Φ_{PSII} 的提高直接相关。此外, Chl、P_n 和 G_s、Φ_{PSII} 的提高能显著促进干物质向生殖器官分配, 而叶面积的增加能够极显著提高地上部干物质累积。

表 5 DPC⁺剂量对不同施氮量下棉花地上部干物质质量、生殖器官干物质质量的影响
Table 5 Effects of chemical capping on cotton shoot dry matter, reproductive organs dry matter under different nitrogen rates

处理 Treatment	2013						2014					
	地上部干物质重 Shoot dry matter (g plant ⁻¹)			生殖器官干物质重 Reproductive organs dry matter (g plant ⁻¹)			地上部干物质重 Shoot dry matter (g plant ⁻¹)			生殖器官干物质重 Reproductive organs dry matter (g plant ⁻¹)		
	盛花期 Full flowering	盛铃期 Full boll	吐絮期 Boll opening	盛花期 Full flowering	盛铃期 Full boll	吐絮期 Boll opening	盛花期 Full flowering	盛铃期 Full boll	吐絮期 Boll opening	盛花期 Full flowering	盛铃期 Full boll	吐絮期 Boll opening
N ₁	54.43 c	118.89 c	185.02 c	15.77 c	40.25 c	93.27 c	53.66 c	117.65 c	182.13 b	15.53 c	51.40 c	93.27 c
N ₂	68.06 b	141.08 b	222.08 b	22.56 a	50.13 a	115.99 a	67.29 b	144.30 b	221.00 a	22.32 a	59.09 a	114.18 a
N ₃	71.67 a	155.14 a	234.27 a	20.89 b	46.43 b	107.49 b	70.90 a	158.53 a	224.51 a	20.65 b	55.60 b	105.24 b
P ₁	65.76 a	140.25 a	214.15 a	19.88 a	43.99 b	101.88 b	64.99 a	138.71 a	211.56 a	19.64 a	54.64 b	100.48 b
P ₂	65.68 a	139.56 a	215.67 a	20.09 a	46.04 ab	106.59 ab	63.91 a	139.63 a	210.48 a	19.85 a	56.06 a	105.13 ab
P ₃	65.35 a	135.38 a	210.34 a	19.10 a	45.63 ab	105.64 ab	64.58 a	138.98 a	206.73 a	18.86 a	53.39 b	106.13 a
P ₀	63.09 a	138.29 a	215.01 a	19.89 a	46.76 a	108.23 a	62.32 a	143.31 a	208.09 a	19.65 a	57.35 a	105.19 ab
N ₁ P ₀	51.99 d	115.37 c	181.42 e	15.21 e	40.70 cd	94.30 cd	51.22 d	124.97 e	176.33 de	14.97 e	55.37 cde	94.10 f
N ₁ P ₁	59.37 c	125.34 de	194.69 de	18.41 d	42.15 cd	97.64 cd	58.60 c	122.21 e	193.81 cd	18.17 d	55.54 cde	96.83 ef
N ₁ P ₂	54.10 cd	119.58 e	185.66 e	15.04 e	40.11 cd	92.95 cd	53.33 cd	115.24 ef	184.02 de	14.80 e	48.65 gh	92.62 f
N ₁ P ₃	52.26 d	115.27 e	178.30 e	14.44 e	38.05 d	88.21 d	51.49 d	108.17 f	174.36 e	14.20 e	46.03 h	89.54 f
N ₂ P ₀	66.74 b	141.72 bc	224.99 abc	23.11 b	52.03 a	120.36 a	65.97 b	144.42 cd	223.36 ab	22.87 b	59.94 bc	116.46 ab
N ₂ P ₁	70.13 b	141.86 bc	220.03 bc	22.02 b	47.52 b	109.99 b	69.36 b	143.57 cd	220.90 ab	21.78 b	58.26 bcd	107.81 bcd
N ₂ P ₂	70.22 b	146.86 ab	233.74 ab	25.20 a	54.47 a	125.98 a	69.45 b	147.50 cd	229.89 ab	24.96 a	65.18 a	123.36 a
N ₂ P ₃	65.16 b	133.88 cd	209.57 cd	19.92 cd	46.50 b	107.64 b	64.39 b	141.69 d	209.85 bc	19.68 cd	52.96 efg	109.10 bc
N ₃ P ₀	70.53 b	157.78 a	238.61 ab	21.36 bc	47.54 b	110.04 b	69.76 b	160.54 ab	224.54 ab	21.12 bc	56.73 cde	105.00 cde
N ₃ P ₁	67.77 b	153.54 ab	227.73 abc	19.21 d	42.31 cd	98.01 cd	67.00 b	150.35 bcd	219.98 ab	18.97 d	50.13 fgh	96.79 ef
N ₃ P ₂	69.73 b	152.23 ab	227.60 abc	20.04 cd	43.54 bc	100.84 bc	68.96 b	156.15 abc	217.54 ab	19.80 cd	54.34 def	99.42 def
N ₃ P ₃	78.65 a	156.99 a	243.13 a	22.94 b	52.34 a	121.08 a	77.88 a	167.07 a	235.97 a	22.70 b	61.18 ab	119.75 a
N	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	*	*
N×P	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

ns: 表示处理间在 0.05 水平差异不显著。*: 表示处理间在 0.05 水平差异显著。同一列不同字母表示同一年在 0.05 水平差异显著。缩写同图 1。

ns: no significant difference at the 0.05 probability level. *: significant difference at the 0.05 probability level. Values followed by different letters are significant difference at the 0.05 probability level within a column in the same year. Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

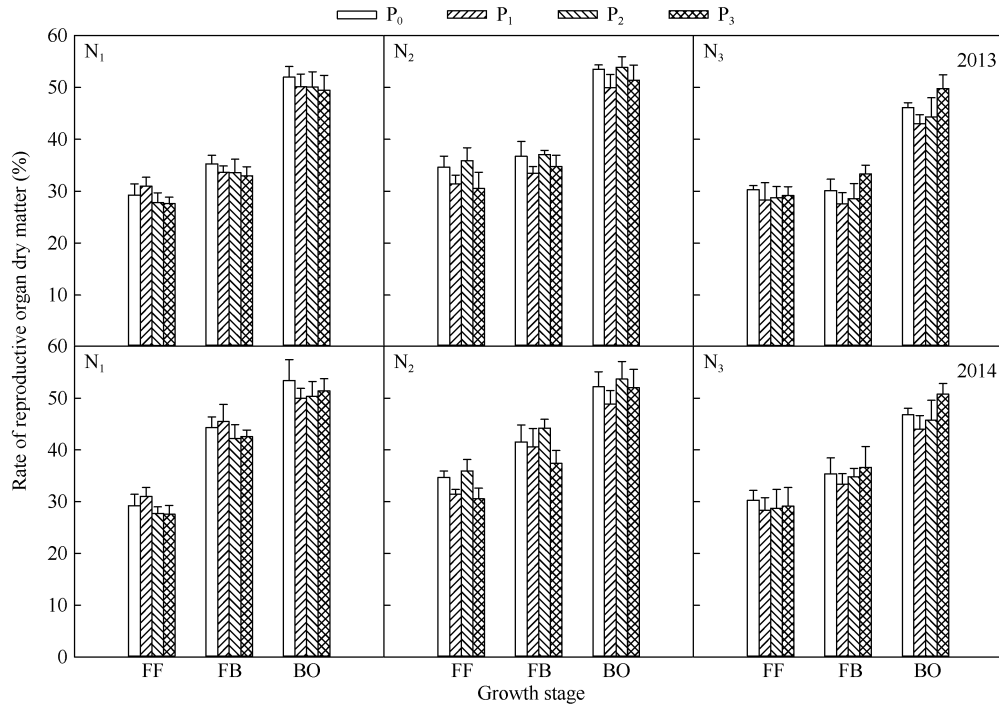


图 4 DPC⁺剂量对不同施氮量下生殖器官干重所占比例的影响

Fig. 4 Effects of chemical capping on rate of reproductive organ dry matter under different nitrogen rates

缩写同图 1。Abbreviations are the same as those given in Fig. 1.

表 6 不同时期测定参数与单株地上部和生殖器官干物质重的相关参数

Table 6 Correlation coefficients between the measured parameters and shoot and reproductive parts dry mass in different periods

生育时期 Growth stage	参数 Parameter	SDM	RODM	LA	Chl	P_n	T_r	G_s	F_v/F_m	Φ_{PSII}	ETR	NPQ
盛花期 Full flowering	SDM	1										
	RODM	0.882**	1									
	LA	0.901**	0.838**	1								
	Chl	0.788**	0.894**	0.713**	1							
	P_n	0.941**	0.887**	0.764**	0.877**	1						
	T_r	0.353	0.536	0.113	0.602*	0.617*	1					
	G_s	0.837**	0.857**	0.638*	0.851**	0.955**	0.769**	1				
	F_v/F_m	0.300	0.346	0.101	0.248	0.273	0.122	0.236	1			
	Φ_{PSII}	0.649*	0.827**	0.499	0.870**	0.806**	0.718**	0.808**	0.333	1		
	ETR	0.427	0.584*	0.262	0.614*	0.620*	0.824**	0.742**	-0.004	0.685*	1	
NPQ	-0.687*	-0.884**	-0.581*	-0.879**	-0.821**	-0.811**	-0.872**	-0.316	-0.869**	-0.782**	1	
盛铃期 Full boll	SDM	1										
	RODM	0.643*	1									
	LA	0.903**	0.552	1								
	Chl	0.506	0.693*	0.316	1							
	P_n	0.583*	0.834**	0.453	0.734**	1						
	T_r	0.173	0.711**	0.122	0.647*	0.665*	1					
	G_s	0.568	0.885**	0.521	0.719**	0.933**	0.607*	1				
	F_v/F_m	0.138	-0.181	0.210	-0.359	-0.308	-0.326	-0.350	1			
	Φ_{PSII}	0.344	0.786**	0.267	0.857**	0.640*	0.826**	0.683*	-0.313	1		
	ETR	0.060	0.303	0.014	0.666*	0.419	0.681*	0.330	-0.137	0.667*	1	

(续表 6)

生育时期 Growth stage	参数 Parameter	SDM	RODM	LA	Chl	P _n	T _r	G _s	F _v /F _m	Φ _{PSII}	ETR	NPQ
盛铃期 Full boll	NPQ	-0.471	-0.828**	-0.372	-0.912**	-0.788**	-0.847**	-0.797**	0.246	-0.933**	-0.683*	1
吐絮期 Boll opening	SDM	1										
	RODM	0.809**	1									
	LA	0.864**	0.464	1								
	Chl	0.707*	0.888**	0.393	1							
	P _n	0.682*	0.806**	0.354	0.930**	1						
	T _r	0.373	0.714**	0.011	0.878**	0.782**	1					
	G _s	0.684*	0.954**	0.325	0.926**	0.863**	0.799**	1				
	F _v /F _m	-0.083	0.163	-0.379	0.324	0.292	0.476	0.219	1			
	Φ _{PSII}	0.605*	0.735**	0.445	0.690*	0.514	0.571	0.692*	-0.224	1		
	ETR	0.224	0.641*	-0.113	0.772**	0.682*	0.916**	0.719**	0.376	0.520	1	
	NPQ	-0.546	-0.866**	-0.231	-0.888**	-0.777**	-0.825**	-0.872**	-0.233	-0.716**	-0.888**	1

*和**分别表示 0.05 和 0.01 的显著性水平。

* and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

3 讨论

人工打顶是目前实现新疆棉花全程机械化的主要限制因素。化学打顶技术在节约人工成本的同时,有利于塑造棉花高产株型^[20],更有利于光合作用的提高^[21]。本研究表明, N₂P₂ 处理较其他处理提高了棉花叶片的叶绿素含量(Chl)和光合能力,促进了生殖器官干物质的累积。因此,氮肥调控与化学封顶技术协同更有利于调节棉花向高产高效方向转变。

光合作用为作物产量的形成提供了物质基础,施肥、化学封顶对作物光合作用产生重要影响^[10-11]。本研究表明,棉花叶面积(LA)随施氮量的增加而增加,随 DPC⁺剂量的增加而逐渐下降,以 N₃P₁ 处理的 LA 最高,但生殖器官干物质累积与分配均以 N₂P₂ 处理最高。说明棉花叶面积过大会造成冠层遮阴严重,营养生长过旺,促使光合产物就近运输,降低冠层对光能的截获能力,最终使产量降低,这与罗宏海等^[22]的研究结论一致。赵强等^[20]研究认为,适量的 DPC⁺剂量会通过塑造紧凑株型,改善植株中下部通风透光,进而促进植株绿色器官光合色素累积、光能吸收和利用。本试验中, Chl、P_n、T_r 和 G_s 的变化趋势一致,均以 N₂P₂ 处理最高,与前人^[23-24]研究结果一致。说明适量的氮肥和化学封顶结合,能够增加棉花的光合面积、促进光合色素的累积,提高棉花叶片光合性能。

与“表现性”的气体交换参数相比,叶绿素荧光参数更能反映光合作用的“内在性”特征,因此被称

为测定叶片光合功能快速、无损的探针^[25]。PSII 量子产量(Φ_{PSII})代表 PSII 非环式电子传递效率或光能捕获的效率,它能反映 PSII 反应中心实际的光化学活性;电子传递速率(ETR)代表的是表观光合量子传递速率^[26],而 NPQ 常用来评价植物热耗散的程度。适量增加氮肥能够提高植株叶片 PSII 的活性和 PSII 反应中心开放的比例,提高 Φ_{PSII} 和 ETR,降低热耗散^[27-28]。本研究表明,Φ_{PSII} 和 ETR 随 DPC⁺剂量的增加而下降,适量增施氮肥会提高 Φ_{PSII} 和 ETR,而 NPQ 呈相反的变化趋势。说明喷施过量的 DPC⁺降低了 PSII 的活性和 PSII 光化学的最大效率;在少量 DPC⁺剂量条件下增施氮肥能够改善棉花叶片光合性能,提高 PSII 反应中心开放部分的比例,使表观光合作用电子传递速率和 PSII 总的光化学量子产量提高,降低非辐射能量耗散,从而增强棉花叶片的光合能力。

合理的生物量累积是棉花高产优质的前提^[29]。薛晓萍等^[30]研究认为,329.53 kg hm⁻²的施氮水平下,棉株总生物量动态累积特征参数最为协调,能够获得较高产量;在 360 kg hm⁻²和 480 kg hm⁻²的施氮水平下,虽然能累积较高的生物量,但由于营养生长过旺,抑制棉花的生殖生长,从而降低光合产物向生殖器官运输。在本研究中,棉花地上部干物质累积以 N₃P₃ 处理最高,生殖器官干物质累积则以 N₂P₂ 处理最高,表明适量增加 DPC⁺,合理增施氮肥在一定程度上协调了棉花群体生长,促进光合产物向生殖器官运输;在施肥量较低条件下,过量使用

DPC⁺会抑制植株的营养生长, 导致棉花籽棉产量下降^[31]。相关分析表明, 棉花 Chl、LA、 P_n 和 G_s 与干物质累积呈显著正相关, 而 NPQ 与干物质累积呈显著负相关, 表明在喷施 DPC⁺下, 配施适量的氮肥能增加植株叶面积和叶绿素含量, 提高棉花对光能的截获和吸收能力, 进一步提高棉花干物质累积。

4 结论

DPC⁺剂量和施氮量对棉花光合特性、干物质累积与分配的影响存在互作效应, 其中主导因素是化学封顶, 施氮可减少因化学封顶而造成植株叶面积和叶绿素含量降低的幅度。同一施氮量下, 随 DPC⁺剂量增加, 棉花叶片的光合性能下降, 光合产物的积累及其向生殖器官的运输受到抑制。喷施 DPC⁺ (750 mL hm⁻²) 条件下, 适量追施氮肥 (300 kg hm⁻²) 有利于提高棉花叶片叶绿素含量和叶面积, 改善叶片净光合速率, 增强 PSII 反应中心的光化学活性和表观光合量子传递速率, 促进棉花干物质累积和光合产物向生殖器官分配的比例。

References

- [1] Chen Z K, Ma H, Xia J, Hou F, Shi X J, Hao X Z, Hafeez A, Han H Y, Luo H H. Optimal pre-plant irrigation and fertilization can improve biomass accumulation by maintaining the root and leaf productive capacity of cotton crop. *Sci Rep*, 2017, 7: 17168.
- [2] 马春玥, 买买提·沙吾提, 依尔夏提·阿不来提, 姚杰. 新疆棉花种植业地理集聚特征及影响因素研究. *作物学报*, 2019, 45: 1859–1867.
Ma C Y, Mamat S, Ablet E, Yao J. Characteristics and influencing factors of geographical agglomeration of cotton plantation in Xinjiang. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 1859–1867 (in Chinese with English abstract).
- [3] 戴翠荣, 赵晓雁, 余力, 王献礼, 练文明, 贺美球, 王文涛. 氟节胺化学打顶对新疆棉花农艺性状及产量的影响. *新疆农业科学*, 2015, 52: 1394–1398.
Dai C R, Zhao X Y, Yu L, Wang X L, Lian W M, He M Q, Wang W T. Effect of chemical topping with flumetralin on the canopy and yield of cotton in Southern Xinjiang. *Xinjiang Agric Sci*, 2015, 52: 1394–1398 (in Chinese with English abstract).
- [4] Chen Z, Niu Y, Zhao R, Han C, Han H, Luo H. The combination of limited irrigation and high plant density optimizes canopy structure and improves the water use efficiency of cotton. *Agric Water Manage*, 2019, 218: 139–148.
- [5] 董春玲, 罗宏海, 张亚黎, 张旺锋. 喷施氟节胺对棉花农艺性状的影响及化学打顶效应研究. *新疆农业科学*, 2013, 50: 1985–1990.
Dong C L, Luo H H, Zhang Y L, Zhang W F. Research on cotton agronomic traits and chemical topping effect after spraying flumetralin. *Xinjiang Agric Sci*, 2013, 50: 1985–1990 (in Chinese with English abstract).
- [6] Renou A, Téréta I, Togola M. Manual topping decreases boll-worm infestations in cotton cultivation in Mali. *Crop Prot*, 2011, 30: 1370–1375.
- [7] Dai J L, Dong H Z. Intensive cotton farming technologies in China: Achievements, challenges and countermeasures. *Field Crops Res*, 2014, 155: 99–110.
- [8] 安静, 黎芳, 周春江, 田晓莉, 李召虎. 增效缩节安化学封顶对棉花主茎生长的影响及其相关机制. *作物学报*, 2018, 44: 1837–1843.
An J, Li F, Zhou C J, Tian X L, Li Z H. Morpho-physiological responses of cotton shoot apex to the chemical top-ping with fortified mepiquat chloride. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 1837–1843 (in Chinese with English abstract).
- [9] 何磊, 周亚立, 刘向新, 赵岩. 浅谈新疆兵团棉花打顶技术. *中国棉花*, 2013, 40(4): 5–6.
He L, Zhou Y L, Liu X X, Zhao Y. Discussion of cotton-topping technology in Xinjiang Production and Construction Corps. *Chin Cotton*, 2013, 40(4): 5–6 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨成勋, 张旺锋, 徐守振, 随龙龙, 梁福斌, 董恒义. 喷施化学打顶剂对棉花冠层结构及群体光合生产的影响. *中国农业科学*, 2016, 49: 1672–1684.
Yang C X, Zhang W F, Xu S Z, Sui L L, Liang F B, Dong H Y. Effects of spraying chemical topping agents on canopy structure and canopy photosynthetic production in cotton. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 1672–1684 (in Chinese with English abstract).
- [11] 韩焕勇, 王方永, 陈兵, 张旺锋, 李保成, 田晓莉, 李召虎. 灌水量对新疆棉花增效缩节胺化学封顶效应的影响. *棉花学报*, 2017, 29: 70–78.
Han H Y, Wang F Y, Chen B, Zhang W F, Li B C, Tian X L, Li Z H. Effects of drip irrigation water amount on the regulation of cotton growth and yield by fortified 1,1-dimethyl-piperidinium chloride in Northern Xinjiang. *Cotton Sci*, 2017, 29: 70–78 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王潭刚, 马丽, 李克富, 王冀川, 李慧琴, 吉光鹏, 郝全有, 崔建强, 胡宝. 不同密度下封顶方式对新疆棉花生长及产量性状的影响. *中国农业科技导报*, 2019, 21(6): 110–116.
Wang T G, Ma L, Li K F, Wang J C, Li H Q, Ji G P, Hao Q Y, Cui J Q, Hu B. Influences of different topping methods on cotton growth and yield traits under different plant densities in Southern Xinjiang. *J Agric Sci Technol Chin*, 2019, 21(6): 110–116 (in Chinese with English abstract).
- [13] 赵强, 张巨松, 周春江, 恽友兰, 李松林, 田晓莉. 化学打顶对棉花群体容量的拓展效应. *棉花学报*, 2011, 23: 401–407.
Zhao Q, Zhang J S, Zhou C J, Yun Y L, Li S L, Tian X L. Chemical detopping increases the optimum plant density in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Cotton Sci*, 2011, 23: 401–407 (in Chinese with English abstract).
- [14] 徐守振, 左文庆, 陈民志, 随龙龙, 董恒义, 酒兴丽, 张旺锋. 北疆植棉区滴灌量对化学打顶棉花植株农艺性状及产量的影响. *棉花学报*, 2017, 29: 345–355.
Xu S Z, Zuo W Q, Chen M Z, Sui L L, Dong H Y, Jiu X L, Zhang W F. Effect of drip irrigation amount on the agronomic traits and yield of cotton grown with a chemical topping in Northern Xinjiang, China. *Cotton Sci*, 2017, 29: 345–355 (in Chinese with English abstract).
- [15] Zahoor R, Dong H, Abid M, Zhao W Q, Wang Y H, Zhou Z G.

- Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in cotton by enhancing photosynthesis and carbohydrate metabolism. *Environ Exp Bot*, 2017, 137: 73–83.
- [16] Yang X Y, Geng J B, Li C L, Zhang M, Chen B C, Tian X F, Zheng W K, Liu Z G, Wang C. Combined application of polymer coated potassium chloride and urea improved fertilizer use efficiencies, yield and leaf photosynthesis of cotton on saline soil. *Field Crops Res*, 2016, 197: 63–73.
- [17] Chen Z K, Niu Y P, Ma H, Hafeez A, Luo H H, Zhang W F. Photosynthesis and biomass allocation of cotton as affected by deep-layer water and fertilizer application depth. *Photosynthetica*, 2016, 55: 638–647.
- [18] Yang G Z, Tang H Y, Nie Y C, Zhang X L. Responses of cotton growth, yield, and biomass to nitrogen split application ratio. *Eur J Agron*, 2011, 35: 164–170.
- [19] Lichtenthaler H K, Wellburn A R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. *Biochem Soc Trans*, 1983, 11: 591–592.
- [20] 赵强, 周春江, 张巨松, 李松林, 恽友兰, 田晓莉. 化学打顶对新疆棉花(*Gossypium hirsutum*)农艺和经济性状的影响. *棉花学报*, 2011, 23: 329–333.
Zhao Q, Zhou C J, Zhang J S, Li S L, Yun Y L, Tian X L. Effect of chemical detopping on the canopy and yield of cotton (*Gossypium hirsutum*) in South Xinjiang. *Cotton Sci*, 2011, 23: 329–333 (in Chinese with English abstract).
- [21] Stewart D W, Costa C, Dwyer L, Smith D L. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agron J*, 2003, 95: 1465–1474.
- [22] 罗宏海, 赵瑞海, 杨新军, 张旺锋. 高产棉花叶面积载荷量与光合生产的关系及对冠层结构的影响. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2011, 29(1): 6–10.
Luo H H, Zhao R H, Yang X J, Zhang W F. The relationship of sink capacity of unit leaf area to photosynthetic production and its regulation effect on canopy structure in high-yield cotton. *J Shihezi Univ (Nat Sci)*, 2011, 29(1): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张巨松, 陈冰, 周抑强, 张勇, 孙国华, 侯玲. DPC对棉花群体发育调控效应的研究. *新疆农业大学学报*, 1999, 22(1): 21–25.
Zhang J S, Chen B, Zhou Y Q, Zhang Y, Sun G H, Hou L. Regulating effect of DPC on cotton population development. *J Xinjiang Agric Univ*, 1999, 22(1): 21–25 (in Chinese with English abstract).
- [24] 冯国艺, 姚炎帝, 杜明伟, 田景山, 罗宏海, 张亚黎, 张旺锋. 缩节胺(DPC)对干旱区杂交棉冠层结构及群体光合生产的调节. *棉花学报*, 2012, 24: 44–51.
Feng G Y, Yao Y D, Du M W, Tian J S, Luo H H, Zhang Y L, Zhang W F. Dimethyl piperidinium chloride (DPC) regulation of canopy architecture and photosynthesis in a cotton hybrid in an arid region. *Cotton Sci*, 2012, 24: 44–51 (in Chinese with English abstract).
- [25] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. *植物学通报*, 1999, 16: 444–448.
Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Chin Bull Bot*, 1999, 16: 444–448 (in Chinese with English abstract).
- [26] 武文明, 陈洪俭, 李金才, 魏凤珍, 王世济, 周向红. 氮肥运筹对孕穗期受渍冬小麦旗叶叶绿素荧光与籽粒灌浆特性的影响. *作物学报*, 2012, 38: 1088–1096.
Wu W M, Chen H J, Li J C, Wei F Z, Wang S J, Zhou X H. Effects of nitrogen fertilization on chlorophyll fluorescence parameters of flag leaf and grain filling in winter wheat suffered waterlogging at booting stage. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 1088–1096 (in Chinese with English abstract).
- [27] Vijayalakshmi P, Vishnukiran T, Kumari B R, Srikanth B I, Rao S, Swamy K N, Surekha K, Sailaja N, Subbarao L V, Rao P R, Subrahmanyam D, Neeraja C N, Voleti S R. Biochemical and physiological characterization for nitrogen use efficiency in aromatic rice genotypes. *Field Crops Res*, 2015, 179: 132–143.
- [28] Ciompi S, Gentili E, Guidi L, Soldatini G F. The effect of nitrogen deficiency on leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in sunflower. *Plant Sci (Shannon)*, 1996, 118: 177–184.
- [29] 杨国正, 王德鹏, 聂以春, 张献龙. 钾肥用量对棉花生物量和产量的影响. *作物学报*, 2013, 39: 905–911.
Yang G Z, Wang D P, Nie Y C, Zhang X L. Effect of potassium application rate on Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) biomass and yield. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 905–911 (in Chinese with English abstract).
- [30] 薛晓萍, 王建国, 郭文琦, 陈兵林, 尤军, 周治国. 氮素水平对初花后棉株生物量、氮素累积特征及氮素利用率动态变化的影响. *生态学报*, 2006, 26: 3631–3640.
Xue X P, Wang J G, Guo W Q, Chen B L, You J, Zhou Z G. Effect of nitrogen applied levels on the dynamics of biomass, nitrogen accumulation and nitrogen fertilization recovery rate of cotton after initial flowering. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26: 3631–3640 (in Chinese with English abstract).
- [31] 韩焕勇, 王方永, 陈兵, 李保成, 张旺锋, 田晓莉, 李召虎. 氮肥对棉花应用增效缩节胺封顶效果的影响. *中国农业大学学报*, 2017, 22(2): 12–20.
Han H Y, Wang F Y, Chen B, Li B C, Zhang W F, Tian X L, Li Z H. Effect of nitrogen fertilizer on plant growth and yield formation of cotton applied with fortified DPC. *J Chin Agric Univ*, 2017, 22(2): 12–20 (in Chinese with English abstract).