

轮作倒茬对棉花光合性能的影响

张占琴^{1,2}, 王建江¹, 颀健辉^{1,2}, 田海燕¹, 牛媛³, 杨相昆^{1,2}

(1. 新疆农垦科学院,新疆 石河子 832000; 2. 谷物品质与遗传改良兵团重点实验室,新疆 石河子 832000;
3. 石河子大学农学院,新疆 石河子 832000)

摘 要:于 2017—2018 年在天山北坡棉花主产区连续 2 a 开展大田定点试验,选择连作 4 a 的棉田来轮作春小麦+复播饲料油菜,饲料油菜秋天翻压作绿肥后来年种植棉花,以连作 5 a 以上的棉田作为对照,研究轮作倒茬后对下茬棉花气体交换参数、荧光参数、光响应、产量及品质的影响。研究表明:(1)轮作倒茬后,显著提高了棉花的净光合速率,尤其是在生育后期这种趋势更明显,净光合速率提高了 44.88%~50.37%。轮作倒茬能提高棉花开花后期的光能利用率 18.82%~59.17%和水分利用效率 28.01%~68.35%。(2)轮作倒茬条件下,棉花开花中后期叶片光反应中心 II(PSII)的光化学反应活性提高了 8.31%~25.59%,整个生育期 PSII 的实际光化学量子产量提高了 3.42%~23.39%,开花前期和后期电子传递速率分别提高了 47.78%和 73.28%。(3)轮作倒茬模式下棉花产量提高了 6.70%~16.11%,处理间品质差异不显著。综上,棉花长期连作后,利用小麦+复播饲料油菜这种高强度利用土地的方式进行轮作倒茬,仍能提高棉花的光合效率,从而达到增产的效果,但对棉花品质的影响不显著。

关键词:棉花;轮作倒茬;光合性能;产量;品质

中图分类号:S562;S344 **文献标志码:**A

Photosynthetic characteristics of cotton under crop rotation conditions

ZHANG Zhanqin^{1,2}, WANG Jianjiang¹, XIE Jianhui^{1,2},
TIAN Haiyan¹, NIU Yuan³, YANG Xiangkun^{1,2}

(1. Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi, Xinjiang 832000, China;
2. Key Lab of Xinjiang Production and Construction Corps for Cereal Quality Research and Genetic Improvement, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 3. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: To study the growth and development rules of cotton under crop rotation, field experiments were carried out in the main cotton production areas of the northern slope of Tianshan Mountains for two consecutive years in 2017 and 2018. The cotton fields for four consecutive years were selected to rotate spring wheat + reseeded feed rape, and the feed rape was turned over in autumn as green manure to plant cotton in the following years. The cotton fields for more than five consecutive years were used as control to study the effects of rotation on gas exchange parameters, fluorescence parameters, rapid light curves, yield and quality of cotton in the following years. The results showed that: (1) After rotation, net photosynthetic rate of cotton was significantly increased, especially at late growth stage, this trend was more obvious, and the net photosynthetic rate increased by 44.88%~50.37%. The light energy use efficiency (*LUE*) and water use efficiency (*WUE*) were increased by 18.82%~59.17% and 28.01%~68.35% in cotton at late flowering period by rotational cropping. (2) Under the condition of inversion rotation, the photochemical activity of photosystem II (PSII) increased by 8.31%~25.59% at middle and late flowering period. The actual photochemical quantum yield of PSII increased by 3.42%~23.39% in the whole growth period. The electron transfer rate increased by 47.78% and 73.28% at early and late flowering period respectively. (3) The yield of cotton increased by 6.70%~16.11% and the quality of cotton had no significant difference under

the rotation mode. These experimental results indicate that after continuous cropping of cotton for a long time, using wheat + replanting fodder rapeseed as a high-intensity land use method for crop rotation and reverse cropping could still improve the photosynthetic efficiency of cotton, so as to achieve the effect of increasing yield, but it had no significant effect on cotton quality.

Keywords: cotton; crop rotation; photosynthetic performance; production; fiber quality

新疆棉花生产在中国棉业发展中具有举足轻重的地位^[1],2020年新疆棉花产量516.1万t,占全国棉花产量的比重为87.3%(国家统计局数据)。新疆棉花生产在对全国棉花生产做出巨大贡献的同时,长期连作引发的残膜污染等农田生态问题也是触目惊心的^[2-3],带来了巨大的经济损失^[4]。通过轮作倒茬可以调节农田生态环境、缓解棉花连作障碍,对保障新疆棉花可持续生产意义重大^[5]。前人研究了绿肥作物,如小麦^[5]、苜蓿^[6]、草木樨、毛苕子、沙打旺等^[7],以及加工番茄、玉米^[8]等与棉花轮作对棉田土壤环境及棉花产量的影响,认为加工番茄、玉米、小麦可作为连作棉田的良好前茬^[8],为当地缓解棉花连作障碍的较佳种植方式^[5],但上述研究涉及棉花光合性能的很少。虽然新疆可与棉花轮作倒茬的作物种类较多,但其前茬作物均为单作,经济效益有限。加之棉花生产效益较高,导致新疆棉区农业种植结构相对单一,棉花以长期连作为主。本课题组近几年利用北疆地区麦收后的光热资源,利用饲料油菜耐低温、生长迅速的特点,复播饲料油菜,一可以翻压做绿肥,增加有机质;二可以青贮做饲料,发展畜牧业。本研究在2017—2018年,利用小麦+复播饲料油菜与棉花轮作倒茬,研究在前一茬一年种植两种作物高强度利用土地条件下对后茬棉花生长的影响,以期为解决新疆长期连作棉花轮作倒茬问题提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2017—2018年在新疆石河子市新疆农垦科学院试验地(85.986°E、44.311°N,海拔460 m)进行,该地属典型的干旱气候区,年平均气温7.5℃~8.2℃,日照2 318~2 732 h,无霜期147~191 d,年降雨量180~270 mm,年蒸发量1 000~1 500 mm,≥10℃的活动积温3 570℃~3 729℃。试验地土壤类型为钙积正常干旱土,质地为粘壤土,耕层(0~30 cm)土壤基本理化性状为:有机质含量17.1 g·kg⁻¹、全盐含量1.17 g·kg⁻¹、全氮含量1.12 g·kg⁻¹、全磷含量0.96 g·kg⁻¹、全钾含量18.4 g·kg⁻¹、水解性氮含量86.73 mg·kg⁻¹、有效磷含量13.83 mg·

kg⁻¹、速效钾含量319.33 mg·kg⁻¹^[9]。

1.2 试验方法

小麦-棉花轮作(wheat-cotton, W-C)处理:选择连作4 a的棉田轮作春小麦,同年7月份春小麦收获后复播油菜,9月份翻压做绿肥,次年种植棉花。以5 a以上棉花连作田作为对照(CK)。田间试验工作于2017年和2018年进行,同一年度两个处理重复3次,每个处理面积200 m²。两个处理在年际间重复2次。

W-C处理,2017年种植棉花,2016年同一地块种植小麦+复播饲料油菜,然后翻压做绿肥。2016年以前均是棉花连作。2018年在另一地块重复W-C处理,本地块2018年种植棉花,2017年同一地块种植小麦+复播饲料油菜,然后翻压做绿肥。2017年以前均是棉花连作。

CK处理一直在同一地块连续种植棉花。

1.3 试验材料及其田间管理

春小麦品种为新春22号,2016、2017年分别于4月4日和4月13日播种、4月10日和4月22日出苗。行距15 cm,播量为375 kg·hm⁻²。采用滴灌的方式,在播种的同时铺设滴灌带,滴灌带铺设在土壤1~2 cm深处,滴灌带间距60 cm,每根滴灌带负责4行小麦的灌溉。分别于2016年7月20日和2017年7月17日收获,公顷收获穗数分别为450万、480万穗,产量分别为7 500、8 205 kg·hm⁻²。2016年春麦生育期灌水6 000 m³·hm⁻²,随水滴施尿素454 kg·hm⁻²,滴灌肥(N:P₂O₅:K₂O=6%:30%:30%)268 kg·hm⁻²。2017年春麦生育期灌水6 300 m³·hm⁻²,随水滴施尿素376 kg·hm⁻²,滴灌肥(N:P₂O₅:K₂O=6%:30%:30%)239 kg·hm⁻²。

油菜品种为华油杂62号,由华中农业大学提供,每公顷播量10.5 kg,播种时将油菜种与重过磷酸钙按照1:10比例混合均匀,采用小麦24行条播机沿着原小麦茬口错行免耕播种,行距为15 cm。2016年7月21日播种,7月26日出苗。全生育期追肥5次,每公顷用尿素150 kg。全生育期浇水5次,灌水量为6 750 m³·hm⁻²。10月20日测产,鲜物质产量57 669 kg·hm⁻²。随后机械粉碎翻压作

绿肥。

利用同样的方法于 2017 年 7 月 17 日免耕播种油菜,7 月 24 日出苗,全生育期追肥 5 次,随水追施 322.5 kg · hm⁻² 尿素,滴灌肥 (N : P₂O₅ : K₂O = 6% : 30% : 30%) 268 kg · hm⁻²。全生育期浇水 5 次,灌水量为 6 750 m³ · hm⁻²。9 月 28 日测产,鲜物质产量 66 827 kg · hm⁻²。随后机械粉碎翻压作绿肥。

棉花品种为陆地棉新陆早 45 号,2017 年于 4 月 21 日播种,4 月 22 日滴灌出苗水 225 m³ · hm⁻²,4 月 28 日出苗,9 月 6 日收获,生育期 131 d。全生育期灌溉量 6 345 m³ · hm⁻²,随水滴施尿素 600 kg · hm⁻²,滴灌肥 (N : P₂O₅ : K₂O = 6% : 30% : 30%) 345 kg · hm⁻²。

2018 年于 4 月 25 日播种,4 月 27 日滴灌出苗水 225 m³ · hm⁻²,5 月 3 日出苗,10 月 1 日收获,生育期 151 d。全生育期灌溉量 6 750 m³ · hm⁻²,随水滴施尿素 898.5 kg · hm⁻²,滴灌肥 (N : P₂O₅ : K₂O = 6% : 30% : 30%) 571.5 kg · hm⁻²。

棉花采用 1 膜 6 行 45 cm+20 cm 宽窄行种植模式,地膜宽 205 cm,每个播幅 1 条膜,宽 2.1 m,膜间行距 60 cm,株距 10 cm,种植密度 26×10⁴ 株 · hm⁻²,一膜铺设 3 条滴灌带,滴灌带铺设在窄行中间,即一根滴灌带负责两行棉花的灌溉^[10]。

1.4 测定项目与方法

在棉花开花后第 5、15、25、35、45 天,于 8 : 00—12 : 00 利用 PAM-2500 便携式调制叶绿素荧光仪 (WALZ, Germany),采用 2030-B 叶夹测定光系统 II (PSII) 叶绿素荧光参数。同时用 Li-6400 便携式光合测定系统 (Li-Cor, USA) 测定气体交换参数。测定部位为棉花主茎的倒数第二片叶,3 次重复。气体交换参数每个重复测定 10 片叶片,荧光参数每个重复测定 3 片叶片。气体交换参数及荧光参数的种类和测定、快速光响应曲线测定及拟合方法参考杨相昆^[9]的方法。棉花收获前,参考 YANG 等^[10]的方法,对小区产量及品质进行测定。

1.5 数据处理方法

数据录入和整理采用 Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation) 进行,并计算平均值和标准差。作图采用 SigmaPlot 12.5 (Systat Software Inc.) 软件,并用 Adobe Illustrator CS5 (Adobe Systems Incorporated) 软件对图片进行处理。采用 SPSS 23.0 (International Business Machines Corp) 对研究数据进行统计分析,多重比较采用 LSD 法,所有检验以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。在多因素方差分析时,采

用单因素一般线性模型分析不同处理对观测变量的影响。

2 结果与分析

2.1 轮作倒茬对长期连作棉花气体交换参数的影响

从图 1 可以看出,轮作倒茬后显著提高了棉花净光合速率 (P_n) 和气孔导度 ($Cond$),尤其是在生育后期这种趋势更明显。对胞间 CO₂ 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (Tr) 影响不大。在 2018 年花后 45 d,连作棉花 (CK) C_i 值较轮作倒茬处理 (W-C) 低,而 L_s 值较轮作倒茬处理 (W-C) 高,根据 FARQUHAR 等^[11] 的理论,2018 年连作棉花在花后 45 d 净光合速率降低主要是由气孔因素引起的。而在 2017 年,连作棉花在生育后期光合作用的主要限制因素则是非气孔因素。

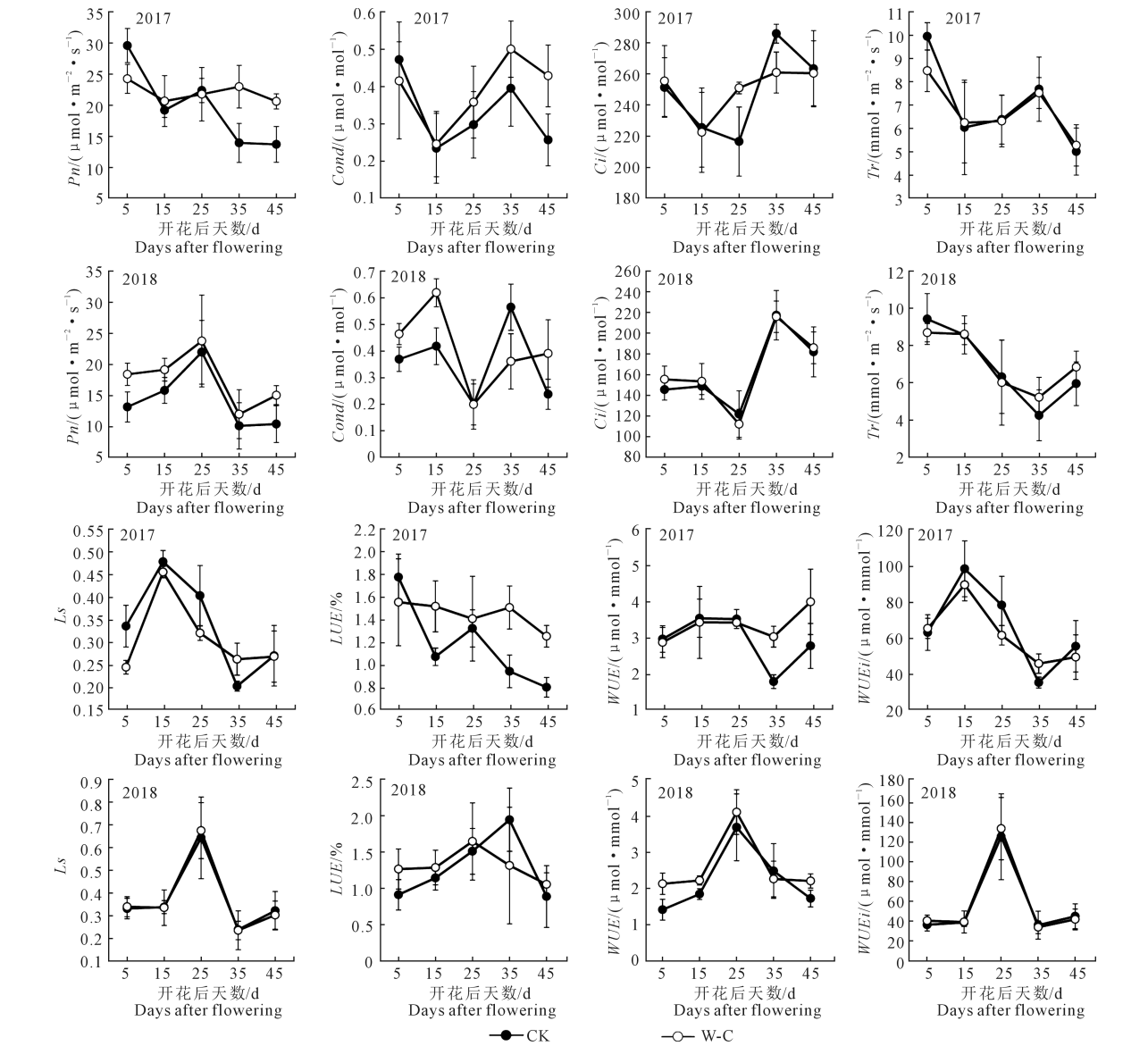
轮作倒茬能提高棉花开花后期的光能利用率 (LUE) 和水分利用效率 (WUE),而在生育后期,轮作倒茬模式下潜在水分利用效率 (WUE_i) 有所降低。这可能是秸秆还田后棉花长势较旺盛,没有经过水分胁迫锻炼,所以 WUE_i 有所降低。

多因素方差分析结果表明 (表 1),不同处理对 P_n 和 WUE 影响达到了极显著水平,对其他几个气体交换参数的影响则不显著。不同年份对 $Cond$ 、 Tr 、 WUE_i 和 LUE 的影响不显著。除了 $Cond$ 和 LUE 外,开花后天数对其余气体交换参数的影响均达到了极显著的水平。

2.2 轮作倒茬对长期连作棉花叶绿素荧光特性的影响

从图 2 可以看出,轮作倒茬与否对棉花生育前期 F_v/F_m 值 (光系统 II (PSII) 最大光化学量子产量, Maximum photochemical quantum yield of Photo System II) 影响无规律可循,年际间差别很大。但在生育后期,轮作倒茬都降低了棉花的 F_v/F_m 值。而在两年间,轮作倒茬都显著提高了 $Y(II)$ 值 (棉花 PSII 的实际光化学量子产量)。尤其是在 2018 年的生育后期,这种趋势更加明显。

从图 2 可以看出,轮作倒茬后,棉花光化学猝灭系数 (qL) 较高,即 PS II 反应中心的开放程度较高,光化学反应活性高。这与轮作倒茬后棉花 P_n 较高结果是一致的。而长期连作棉田棉花则是在整个生育期内非光化学猝灭系数 (NPQ) 较高。表明长期连作条件下棉花光化学反应降低,吸收的光能热耗散占的比例较高。



注:误差棒表示标准偏差($n=3$)。W-C;小麦-棉花轮作;CK;棉花长期连作; P_n :净光合速率; $Cond$:气孔导度; C_i :胞间 CO_2 浓度; Tr :蒸腾速率; WUE :水分利用效率; WUE_i :潜在水分利用效率; L_s :气孔限制值; LUE :光能利用率。下同。

Note: Bars are means $\pm$ standard deviation ($n=3$). W-C: Wheat-cotton rotation; CK: Long-term continuous cropping of cotton; P_n : Photosynthetic rate; $Cond$: Conductance to H_2O ; C_i : Intercellular CO_2 concentration; Tr : Transpiration rate; WUE : Water use efficiency; WUE_i : Intrinsic water use efficiency; L_s : The stoma limit value; LUE : Light use efficiency. The same below.

图 1 2017 — 2018 年花后不同时期各处理的棉花气体交换参数

Fig.1 Gas exchange parameters of cotton at different days after flowering in 2017–2018

表 1 2017 — 2018 年不同气体交换参数多因素方差分析 F 值

Table 1 F value of MANOVA of the gas exchange parameters in 2017–2018

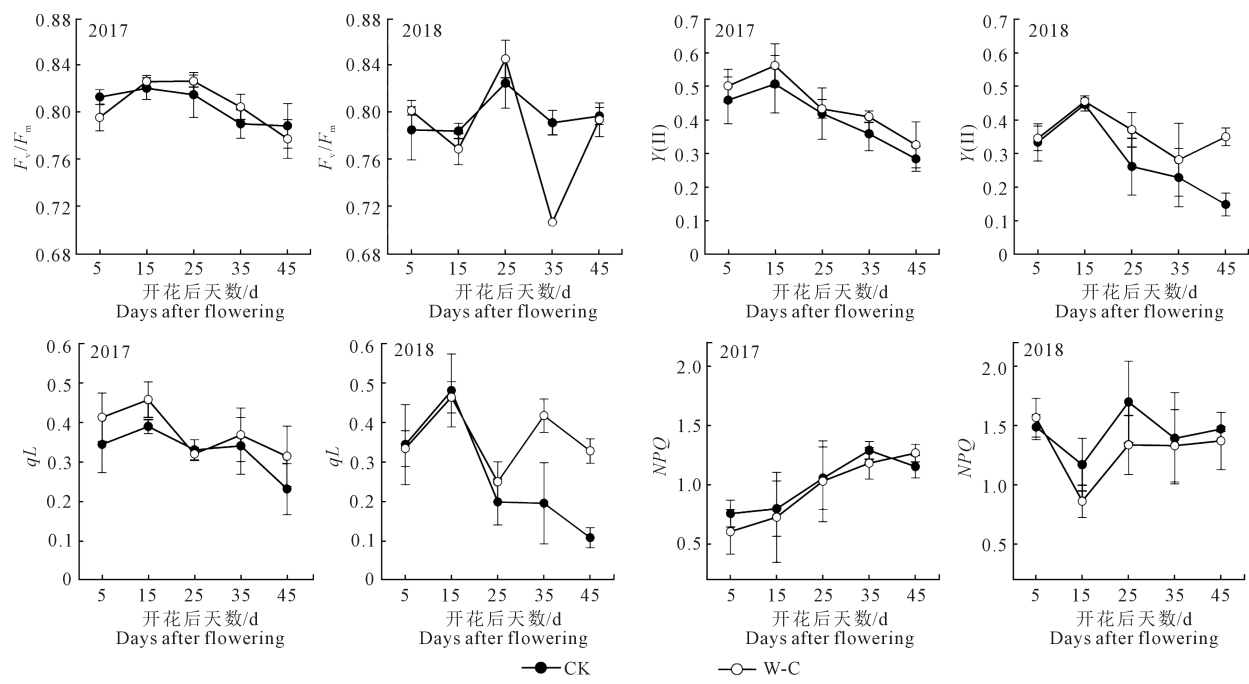
源 Sources	P_n	$Cond$	C_i	Tr	WUE	WUE_i	L_s	LUE
修正模型 Modified model	13.825 **	1.544	16.968 **	9.941 **	14.919 **	18.256 **	15.957 **	2.023 *
截距 Intercept	2656.886 **	179.525 **	4005.124 **	2790.848 **	2437.608 **	791.988 **	1372.231 **	511.346 **
年份 Year (A)	48.774 **	0.138	172.836 **	0.113	43.854 **	3.636	5.728 *	0.049
开花后天数 Days after flowering (B)	19.453 **	1.532	14.779 **	21.887 **	17.425 **	23.465 **	23.075 **	2.026
处理 Treatments (C)	15.777 **	0.940	0.052	0.020	12.086 **	0.069	0.060	1.646
A×B	8.178 **	1.560	2.720 *	12.227 **	11.443 **	17.985 **	11.525 **	3.038 *
A×C	0.579	0.007	0.000	0.640	0.108	0.374	0.165	0.976
B×C	2.824 *	0.441	0.444	1.310	1.310	0.219	0.232	0.211
A×B×C	4.456 **	0.696	0.741	0.267	3.928 **	0.493	0.524	1.340

注: * 表示差异显著($P<0.05$); ** 表示差异极显著性($P<0.01$)。下同。

Note: * indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$). The same below.

多因素方差分析结果表明(表 2),不同处理对 Y (II)、 qL 的影响达到了极显著水平,年份对 qL 的影响

不大,对其余荧光参数的影响达到了极显著的水平。不同生育时期对荧光参数的影响均达到了极显著水平。



注: F_v/F_m :光系统 II (PSII)最大光化学量子产量; $Y(II)$:PSII 实际量子产量; qL :光化学猝灭系数; NPQ :非光化学猝灭系数。
下同。
Note: F_v/F_m : Maximum photochemical quantum yield of PSII; $Y(II)$: Actual photochemical quantum yield of PSII; qL : Coefficient of photochemical fluorescence quenching assuming an interconnected PSII antennae; NPQ : Stern-volmer type non-photochemical fluorescence quenching. The same below.

图 2 2017—2018 年花后不同时期各处理的棉花荧光参数变化
Fig.2 Chlorophyll fluorescence parameter of cotton at different days after flowering in 2017–2018

表 2 2017—2018 年叶绿素荧光参数多因素方差分析 F 值
Table 3 F value of MANOVA of the chlorophyll fluorescence parameters in 2017–2018

源 Sources	F_v/F_m	$Y(II)$	qL	NPQ
修正模型 Modified model	14.072 **	8.185 **	3.790 **	3.839 **
截距 Intercept	209700.772 **	2290.061 **	962.420 **	1147.572 **
年份 Year (A)	20.731 **	44.284 **	3.283	30.139 **
开花后天数 Days after flowering (B)	26.736 **	22.389 **	10.767 **	5.550 **
处理 Treatments (C)	3.251	14.432 **	10.775 **	2.101
A×B	15.426 **	0.941	1.324	3.529 *
A×C	3.979	1.328	1.119	0.543
B×C	5.800 **	1.101	1.678	0.338
A×B×C	11.132 **	1.550	1.741	0.582

2.3 不同处理下棉花快速光响应曲线特征

由图 3 及表 3 可以看出,在绝大多数时间,轮作倒茬模式下棉花实际电子传递速率(ETR)及最大电子传递速率(ETR_{max})均高于连作模式。在花后 25 d 之前,轮作倒茬模式下棉花最大光合效率(α)较连作模式高,在此之后,则是连作模式光能利用效率较高。2018 年轮作倒茬模式下棉花对强光的耐受程度均高于连作模式,而在 2017 年,则是在生育后期(开花 35 d 之后)轮作倒茬模式下棉花对强光的耐受程度均高于连作模式。

多因素方差分析结果表明(表 4),不同处理对 α 影响不显著,而对 ETR_{max} 和半饱和光强(I_k)影响则达到了极显著水平。不同年份对 ETR_{max} 影响不显著。开花后天数(DAF)对 3 个拟合参数均有显著或极显著影响。

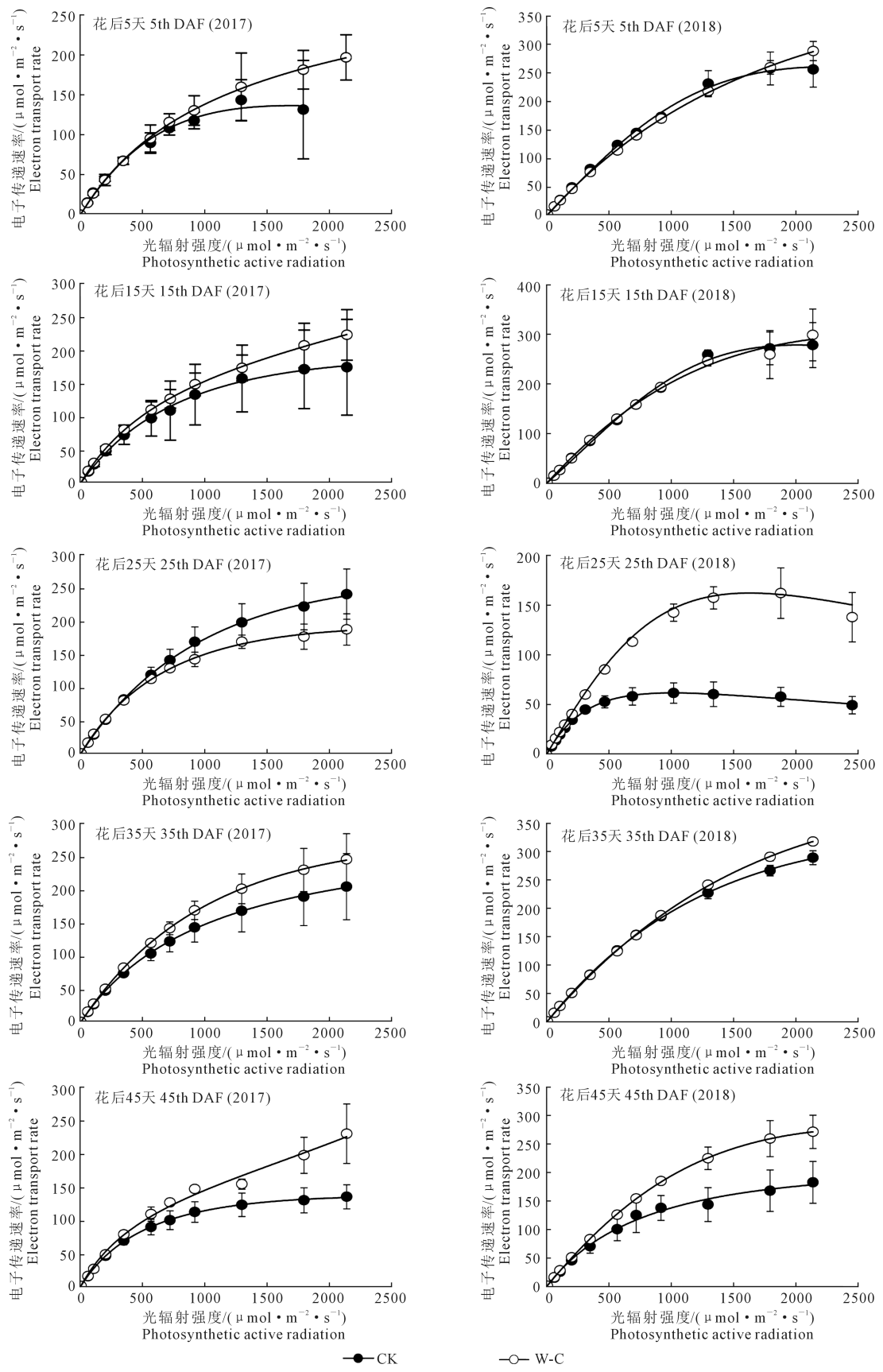


图 3 2017—2018 年花后不同时期棉花的快速光响应曲线

Fig.3 Rapid light curves of cotton at different days after flowering in 2017–2018

2.4 轮作倒茬对长期连作棉花产量及品质的影响

通过表 5 可以看出,轮作倒茬后,籽棉产量有所提高,轮作倒茬模式下,2017 年增产 6.70%,2018 年增产幅度达 16.11%,且处理间差异显著 ($P<0.05$)。

通过表 6 可以看出,轮作倒茬与长期连作模式相比,品质差别不大,处理间差异不显著。轮作倒茬模式下,纤维整齐度略有提高,短纤维指数略有降低,同时,马克隆值也略有降低。

表 3 各处理花后不同时期棉花最大电子传递速率 ($ETR_{\max}$)、最大光合效率 (α) 和半饱和光强 (I_k)

Table 3 Maximum electron transfer rate ($ETR_{\max}$), the initial slope of the fast light curve (α) and the minimum saturating irradiance (I_k) of cotton at different days after flowering in 2017–2018

年份 Year	开花后天数/d Days after flowering	处理 Treatment	$ETR_{\max}$ /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	α /(electrons $\cdot$ photon $^{-1}$)	I_k /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
2017	5	W-C	229.07±59.81	0.24±0.04	943.57±161.46
		CK	220.27±93.04	0.21±0.03	1019.90±319.56
	15	W-C	348.97±89.83	0.29±0.01	1192.40±285.25
		CK	202.70±66.08	0.25±0.04	800.50±197.89
	25	W-C	215.77±41.67	0.31±0.02	695.57±101.88
		CK	260.20±32.46	0.29±0.01	885.73±131.50
	35	W-C	270.20±59.31	0.29±0.01	942.53±227.13
		CK	244.67±72.55	0.29±0.03	860.73±293.51
	45	W-C	351.70±152.71	0.25±0.02	1428.00±684.64
		CK	140.07±15.14	0.31±0.03	458.63±85.00
2018	5	W-C	477.57±241.81	0.24±0.01	1976.37±1003.68
		CK	352.37±168.01	0.22±0.05	1575.90±453.55
	15	W-C	385.33±176.59	0.26±0.05	1488.27±359.08
		CK	294.67±43.88	0.22±0.03	1337.63±60.63
	25	W-C	157.33±19.04	0.25±0.00	636.73±90.17
		CK	61.88±10.91	0.23±0.01	270.20±57.27
	35	W-C	408.60±88.81	0.26±0.01	1587.15±304.41
		CK	319.45±13.36	0.27±0.00	1174.30±32.67
	45	W-C	278.80±39.60	0.26±0.01	1063.45±185.62
		CK	223.60±74.87	0.28±0.06	790.57±93.76

表 4 2017—2018 年棉花叶片光响应曲线拟合参数多因素方差分析 F 值

Table 4 F value of MANOVA of the rapid light curves fitting parameters of cotton leaf in 2017–2018

指标 Item	修正模型 Modified model	截距 Intercept	年份 Year (A)	开花后天数 Days after flowering (B)	处理 Treatment (C)	A×B	A×C	B×C	A×B×C
α	2.805 **	4066.915 **	9.248 **	5.140 **	0.780	2.046	0.047	2.632	0.339
$ETR_{\max}$	2.448 *	381.861 **	2.920	3.921 *	8.320 **	3.722 *	0.150	0.512	1.010
I_k	3.729 **	472.608 **	7.564 **	7.269 **	8.182 **	4.260 **	0.193	0.879	1.527

表 5 2017—2018 年棉花产量性状

Table 5 Yield traits of cotton in 2017–2018

年份 Year	处理 Treatment	单株铃数 Boll number per plant	收获株数/(10^4 株· hm^{-2}) Number of plants harvested /(10^4 plants· hm^{-2})	单铃重 Single boll weight/g	籽棉产量/(kg· km^{-2}) Estimated yield of seed cotton
2017	CK	6.83a	14.7833a	5.03a	5058a
	W-C	7.62a	13.7387a	5.16a	5397b
2018	CK	5.21a	19.1893a	5.52a	5368a
	W-C	5.07a	21.9721a	5.61a	6233b

注:不同小写字母表示同年份处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments in the same year ($P<0.05$). The same below.

表 6 2017—2018 年棉花品质性状
Table 6 Cotton quality traits in 2017–2018

年份 Year	处理 Treatment	UHML/mm	UI/%	Mic	Str/(g·tex ⁻¹)	Elg/%	SFI/%
2017	CK	28.42a	85.30a	4.38a	30.40a	6.90a	7.23a
	W-C	28.02a	86.73a	4.15a	30.27a	6.87a	6.73a
2018	CK	29.17a	85.10a	4.61a	31.20a	6.95a	7.10a
	W-C	29.65a	85.55a	4.47a	32.25a	6.95a	6.90a

注: UHML:上半部纤维长度;Mic:马克隆值;Str:断裂比强度;Elg:伸长率;SFI:短绒指数;UI:整齐度。
Note: UHML: Upper-half mean length;Mic: Micronaire reading;Str: Specific breaking strength;Elg: Elongation percentage;SFI: Short fiber index; UI: Uniformity index.

3 讨 论

长期连作可导致植株叶片叶绿素相对含量下降^[12]、主茎功能叶生理活性及膜结构稳定性降低^[13],不利于光合作用的进行,净光合速率、蒸腾速率^[14]及气孔导度、水分利用效率^[15]下降,降低了干物质的积累,影响了产量的形成^[13]。随着连作年限的增加,光合速率下降越明显,特别是连作 20 a 后光合速率下降更加明显^[12]。而轮作倒茬可以克服连作对棉花光合产生的不利影响,改善光合效率。卢成达等^[16]研究发现,轮作会改善谷子叶片的光合指标参数及根系发育指标参数,减轻连作障碍、提高产量;杨坚群等^[17]研究表明,轮作倒茬显著提高了花生叶面积指数、叶片净光合速率、叶绿素含量,促进光合作用,提高了籽仁产量;杜莹等^[18]研究指出,轮作和有机肥处理不同程度地增加了连作小白菜的光合速率和干物质量。

前人研究轮作倒茬对棉花的影响主要集中在棉田土壤环境及棉花产量方面^[5-8],结合光合性能的较少。魏飞等^[5]研究指出,在新疆长期连作棉田轮作小麦和苜蓿,可发挥轮作增加植物多样性、改良土壤生态环境的效果,促进棉花根系发育,提高棉花叶片光合生产能力和生物量。本研究结果与上述研究类似,轮作倒茬后,显著提高了棉花净光合速率和气孔导度,尤其是在生育后期,这种趋势更明显(图 1),提高了棉花的光能利用率和水分利用效率(图 1)、提高了 PS II 反应中心的光化学反应活性、实际电子传递速率及 PSII 的实际光化学量子产量提高(图 2),上述光合效率的改善促进了产量的提高(表 5)。魏飞等^[5]研究指出,轮作小麦对棉花生长的促进效果优于轮作苜蓿,本文仅研究了小麦收获后复播饲料油菜作绿肥对棉花光合性能的影响,若在以后研究方案中再添加小麦、绿肥单作倒茬的处理,研究结果将更具有理论指导意义,这也是我们下一步研究的方向。

唐志敏等^[12]研究表明,棉花连作主要是通过降

低叶片 PSII 原初光能转换效率和光化学荧光猝灭系数,引起单叶光合速率下降,最终影响棉花植株生理生长。本研究也发现,轮作倒茬显著提高了棉花 PSII 的实际光化学量子产量和光化学猝灭系数(图 2),净光合速率较高(图 1)。而长期连作条件下棉花光化学反应降低,吸收的光能热耗散占的比例较高,导致整个生育期内非光化学猝灭系数较高(图 3)。唐志敏等^[12]研究指出,棉花连作 5~10 a 的 PSII 原初光能转换效率和 PSII 潜在活性均表现出先下降后上升的趋势,光合活性受到暂时抑制,光合器官并未受到损伤。在本研究中,轮作倒茬在棉花生育中期提高了 PS II 最大光化学量子产量,而在生育后期却降低了棉花的 PS II 最大光化学量子产量(图 2)。这也表明,棉花连作年限不长不会对棉花的光反应中心造成损伤。

韩光明等^[19]研究指出,当连作年限较长时,光合速率下降的主要原因是非气孔因素,而许楠等^[20]则认为,连作 5 a 引起烤烟叶片光合作用减弱不仅是由气孔因素引起的,连作还限制了叶肉细胞对 CO₂ 的利用能力。本研究也表明,2018 年连作棉花在花后 45 d 净光合速率降低主要是由气孔因素引起的。而在 2017 年,连作棉花在生育后期光合作用的主要限制因素则是非气孔因素(图 1)。

4 结 论

长期连作棉田轮作倒茬后,棉花开花中后期叶片 PS II 反应中心的光化学反应活性提高了 8.31%~25.59%,开花前期和后期的实际电子传递速率分别提高 47.78%和 71.28%,棉花 PSII 的实际光化学量子 Y(II)提高了 3.42%~23.39%、净光合速率提高了 44.88%~50.37%,尤其是在生育后期这种趋势更明显;轮作倒茬提高了棉花 18.82%~59.17% 的光能利用率和 28.01%~68.35% 的水分利用效率。上述光合效率的改善促进了棉花产量的提高。轮作倒茬模式对棉花品质的影响不明显,轮作模式下棉花纤维整齐度略有提高,短纤维指数略有降低。

参 考 文 献:

- [1] 毛树春,李亚兵,冯璐,等.新疆棉花生产发展问题研究[J].农业展望,2014,10(11):43-51.
MAO S C, LI Y B, FENG L, et al. Study on the development of Xinjiang cotton production [J]. *Agricultural Outlook*, 2014, 10(11): 43-51.
- [2] 严昌荣,王序俭,何文清,等.新疆石河子地区棉田土壤中地膜残留研究[J].生态学报,2008,28(7):3470-3474.
YAN C R, WANG X J, HE W Q, et al. The residue of plastic film in cotton fields in Shihezi, Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3470-3474.
- [3] 董合干,刘彤,李勇冠,等.新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J].农业工程学报,2013,29(8):91-99.
DONG H G, LIU T, LI Y G, et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(8): 91-99.
- [4] 刘建国,李彦斌,张伟,等.绿洲棉田长期连作下残膜分布及对棉花生长的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(2):246-250.
LIU J G, LI Y B, ZHANG W, et al. The distributing of the residue film and influence on cotton growth under continuous cropping in oasis of Xinjiang[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2): 246-250.
- [5] 魏飞,孙新展,刘建国,等.连作棉田轮作苜蓿、小麦后对棉花光合能力和根系生长的影响[J].江苏农业科学,2019,47(12):126-128.
WEI F, SUN X Z, LIU J G, et al. Influences of rotation of alfalfa and wheat in continuous cropping cotton fields on photosynthesis and root growth of cotton [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(12): 126-128.
- [6] 王林娜,景春梅,张玲,等.不同种植年限紫花苜蓿和棉花轮作对土壤理化性质的影响[J].新疆农业科学,2017,54(8):1523-1530.
WANG L N, JING C M, ZHANG L, et al. Effects of different cultivation years alfalfa and rotation cotton on soil physical & chemical properties[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54(8): 1523-1530.
- [7] 李银平.绿肥压青对连作棉田土壤肥力及棉花产量的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2009.
LI Y P. Effect of green manure application on soil fertility continuous cropping of cotton field and cotton yield[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2009.
- [8] 徐文修,罗明,李银平,等.作物茬口对连作棉田土壤环境及棉花产量的影响[J].农业工程学报,2011,27(3):271-275.
XU W X, LUO M, LI Y P, et al. Effects of crop stubbles on cotton yield and soil environment in continuously cropped cotton field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(3): 271-275.
- [9] 杨相昆.生育前期揭除地膜对棉花生长发育及棉田生态的影响机制[D].石河子:石河子大学,2018.
YANG X K. Cotton growth and development and field ecology at different film removal times during the early stage[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.
- [10] YANG X K, ZHANG Z Q, NIU Y, et al. Cotton root morphology and dry matter accumulation at different film removal times[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(6): 2586-2597.
- [11] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982,33: 317-345.
- [12] 唐志敏,刘军,刘建国.秸秆还田对长期连作棉花光合速率及叶绿素荧光的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2012,30(3):302-307.
TANG Z M, LIU J, LIU J G. The effect of returning stalk to field on photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence of long-term continuous cropping of cotton[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2012, 30(3): 302-307.
- [13] 王翌,刘连涛,孙红春,等.连作对棉株干物质积累、分配及功能叶片生理特征的影响[J].河北农业大学学报,2013,36(5):6-11.
WANG Z, LIU L T, SUN H C, et al. Effects of cotton continuous cropping on accumulation and distribution of dry matter and physiological characteristics of functional leaf[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2013, 36(5): 6-11.
- [14] 马达灵,焦瑞枣,曹兴明.连作马铃薯光合特性与土壤速效氮含量的关系研究[J].中国农学通报,2018,34(35):17-21.
MA D L, JIAO R Z, CAO X M. The relationship between potato photosynthetic characteristics and soil available nitrogen content in continuous cropping system [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(35): 17-21.
- [15] 刘彦荣,康亚龙,冉辉,等.长期连作对加工番茄光合特性和产量的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2015,33(1):54-59.
LIU Y R, KANG Y L, RAN H, et al. Effect of long-term continuous cropping system on Leaf photosynthetic characteristics and yield of processing tomato [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2015, 33(1): 54-59.
- [16] 卢成达,郭志利,李阳,等.长期定点连作及单序轮作处理对旱地谷子的光合特性、根系构型和产量的影响[J].农学学报,2019,9(5):10-14.
LU C D, GUO Z L, LI Y, et al. Long-term continuous and rotation cropping: effect on photosynthetic characteristics, roots configuration and yield of dry-land millet [J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(5): 10-14.
- [17] 杨坚群,甄晓宇,栗鑫鑫,等.不同耕作方式对花生生理特性、产量及品质的影响[J].花生学报,2019,48(1):9-14.
YANG J Q, ZHEN X Y, LI X X, et al. Effects of different cropping modes on the physiological characteristics, yield and quality of peanut [J]. *Journal of Peanut Science*, 2019, 48(1): 9-14.
- [18] 杜莹,黄兴学,周国林,等.轮作和有机肥对连作小白菜生长及土壤微生物特性的影响[J].湖北农业科学,2016,55(24):6498-6503.
DU Y, HUANG X X, ZHOU G L, et al. Effects of rotation and organic fertilizer on the growth of *Brassica campestris* ssp. *chinensis* var. *communis* and soil microbial characteristics of continuous cropping soil [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(24): 6498-6503.
- [19] 韩光明,刘东,孙世清,等.生物炭对不同连作年限棉田棉花光合特性的影响[J].湖北农业科学,2015,54(24):6202-6206.
HAN G M, LIU D, SUN S Q, et al. Effect of biochar on photosynthetic characteristics of cotton in different continuous cropping cotton field [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(24): 6202-6206.
- [20] 许楠,张会慧,李鑫,等.连作对烤烟生长特性和光合能力的影响[J].草业科学,2012,29(9):1435-1440.
XU N, ZHANG H H, LI X, et al. Effects of continuous cropping on plant growth and photosynthetic capacity in leaves of flue-cured tobacco [J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(9): 1435-1440.