

网络出版时间:2013-08-26 17:53

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130826.1753.026.html>

连作对糜子抽穗后光合特性和干物质积累的影响

崔雯雯,高小丽,马瑞瑞,杨秋歌,马淑蓉,高金锋,王鹏科,冯佰利

(西北农林科技大学 农学院/旱区作物逆境生物学国家重点实验室,陕西 杨凌 712100)

[摘要] 【目的】探究连作对糜子生长发育及籽粒产量形成的影响,明确导致糜子连作障碍的生理机制,为糜子高产高效栽培提供理论依据。【方法】以“内糜 5 号”为试验材料,设置糜子连作和芸豆与糜子轮作(对照)2 个处理,分别于抽穗期、开花期、灌浆前期、灌浆后期、成熟期,测定连作、轮作下糜子旗叶光合特性、叶绿素含量、植株主茎绿叶面积和地上部干物质量,并于成熟期测定产量及其构成因素等指标。【结果】(1)连作显著降低了糜子旗叶净光合速率、叶绿素总含量、叶绿素 b 含量及植株主茎绿叶面积,在抽穗期和开花期影响尤为显著;(2)连作导致糜子抽穗后植株衰老进程加快,籽粒灌浆被迫提前终止,使植株干物质积累量减少、籽粒产量下降。【结论】连作糜子植株早衰和功能叶片光合性能下降是导致籽粒产量下降的主要原因,因此在栽培中应注重合理的轮作倒茬。

[关键词] 连作;糜子;光合特性;干物质积累

[中图分类号] S516.01

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2013)09-0055-06

Effects of continuous cropping on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of broomcorn millet after heading stage

CUI Wen-wen, GAO Xiao-li, MA Rui-rui, YANG Qiu-ge, MA Shu-rong,
GAO Jin-feng, WANG Peng-ke, FENG Bai-li

(College of Agronomy/State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to explore the specific impact of continuous cropping on broomcorn millet growth, development and yield of grain formation, and investigate the physiological mechanisms of continuous cropping broomcorn millet. 【Method】 “Neimi 5” was selected as test material with two rotations: kidney bean crop rotation (CK) and continuous cropping. The photosynthetic characteristics and chlorophyll content of the flag leaf, green leaf area of the main stem, and dry matter accumulation above ground were measured and maturity yield monitor test was conducted in the mature period. 【Result】 (1) Continuous cropping decreased flag leaf net photosynthesis (P_n), the flag leaf chlorophyll content, the chlorophyll b content and green leaf area of plants main stem of broomcorn millet, especially at heading stage and flowering stage. (2) Continuous cropping increased aging process and the grain filling termination was forced ahead, decreased plant dry matter accumulation quantity and grain yield. 【Conclusion】 The grain yield of broomcorn millet decreased by continuous cropping was mainly due to the acceleration of aging process and the decline in photosynthetic capacity.

Key words: continuous cropping; broomcorn millet; photosynthetic characteristics; dry matter accumulation

[收稿日期] 2013-02-22

[基金项目] 国家谷子糜子技术产业体系项目(CARS-07-12.5-A9);农业部公益性行业(农业)科研专项(200903007)

[作者简介] 崔雯雯(1987—),女,陕西榆林人,在读硕士,主要从事杂粮作物高效栽培研究。E-mail: lovefly2811@163.com

[通信作者] 高小丽(1968—),女,陕西宁强人,副教授,硕士生导师,主要从事小杂粮豆作物高产栽培生理研究。
E-mail: gao2123@yahoo.com.cn

糜子(*Panicum miliaceum* L.)属禾本科黍属(*Panicum*),具有生育期短、耐旱、耐贫瘠、耐盐碱等特性,营养价值和药用价值较高,是北方冷凉干旱地区的主要抗逆渡荒作物^[1-2],尤其是在中国灌溉条件欠缺的黄土高原以及华北等旱薄地区具有明显的区位优势和生产优势,是当地主要栽培的作物之一,但是糜子产区经济条件相对较差,栽培技术落后,使这一古老的作物未能充分发挥其效益。因此,探索糜子植株生育特性和轮作倒茬栽培技术,提高糜子产量和品质,对增加产区农民收入,维护国家粮食区域平衡具有重要的战略意义。

连作会导致作物生长不良,病虫害严重发生,产量和品质下降,经济效益降低。在大宗作物上关于连作障碍的研究报道较多。有研究表明,大豆连作造成根系、根瘤吸收能力减弱,致使体内速效养分含量降低,从而导致各项生理指标严重降低而减产^[3];小麦连作后全蚀病增加,产量下降^[4];水稻虽是一种较耐连作的作物,但是 Dobermann 等^[5]研究指出,长期连作也会导致其年产量降低 1.4%~2%;花生连作会降低单叶净光合速率、叶面积系数,从而导致产量下降^[6-7]。由此可见,连作给许多作物都造成了极大的危害,连作障碍已成为农业上一个亟待解决的重要问题^[8-9]。因此,加强对作物连作障碍机理的研究,采取有效措施减轻和避免连作造成的损失,对农业发展具有重要的现实意义。在实际生产中,人们也发现糜子是一种不耐连作物;同时由于耕地面积有限,加之产区特定的环境条件和种植传统,生产中糜子连作现象极为普遍,但由于糜子研究起步较晚,已有的研究主要集中在糜子种质资源、营养价值、种植区划、养分吸收规律与施肥的增产作用、对逆境胁迫的响应等生理生态方面^[10-12],而关于糜子连作障碍的系统研究尚未见报道。光合作用和干物质积累是植物生长发育及产量形成的基础,为了探究连作对糜子生长发育及产量形成的影响机制,本研究比较了连作、轮作糜子抽穗后功能叶片的光合特性、地上部干物质积累动态和产量,旨在探明导致糜子连作障碍的生理机制,从而为中国北方旱区糜子优质高产高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设计

以目前生产上普遍种植的“内糜 5 号”品种为供试材料,于 2010—2011 年在陕西杨凌西北农林科技大学农作一站进行。该站地处渭河三级阶地,海拔

520 m 左右,多年平均气温 12.9℃,降水量 550.8 mm,其中 7—9 月份降水量占年降水量的 60%以上,年均蒸发量为 1 400 mm,属于半湿润易旱地区。

糜子材料于 6 月中上旬种植,全生育期不灌溉,种植采用传统翻耕不施肥。设糜子的轮作和连作 2 个试验处理,小区面积 20 m²(4 m×5 m),4 次重复,2010 年分别种植糜子和芸豆,2011 年全部种植糜子,形成轮作(CK)和连作(Continuous cropping, CC)2 个处理。生育期间进行常规的田间管理。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 光合特征参数 糜子抽穗后选择有代表性的植株挂牌标记,分别于抽穗期、开花期、灌浆前期、灌浆后期、成熟期,采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合测定仪(开放系统)测定糜子旗叶净光合速率(net photosynthesis rate, Pn)、蒸腾速率(transpiration rate, Tr)、气孔导度(stomatal conductance, Gs)和胞间 CO₂ 浓度(internal CO₂ concentration, Ci)。每次均在晴天上午 09:00—11:00 进行,使用红蓝光源,设定叶室 CO₂ 浓度为 400 μmol/mol,光量子通量密度(PFD)为 1 200 μmol/(m²·s)。按田间小区种植顺序往返采样测定,每处理每重复测 6 片旗叶。水分利用效率 WUE=Pn/Tr。

1.2.2 叶绿素含量 糜子抽穗后分别于抽穗期、开花期、灌浆前期、灌浆后期、成熟期选取有代表性的植株取样,各处理每个小区分别取 5 片旗叶,所取样品放于冰壶中带回实验室,用滤纸擦拭干净,去除叶脉并剪碎、混匀用于叶绿素含量的测定。叶绿素含量测定采用丙酮浸提法^[13],即准确称取 0.08 g 剪碎混匀的叶片,置于 20 mL 具塞刻度试管中(各管分别加入约 0.5 mL 纯丙酮),然后分别加入 80%丙酮浸提叶绿素,待样品完全变白后,以 80%丙酮作为空白调零,在 645 和 663 nm 波长下测定光密度。用 Inskeep 法^[14]计算叶绿素含量。

1.2.3 主茎绿叶面积 糜子抽穗后分别于抽穗期、开花期、灌浆前期、灌浆后期、成熟期选取有代表性的植株取样,各处理每个小区分别取 5 株用于测定绿叶面积。叶片绿色部分占其全叶 2/3 及以上的作为一片绿叶,参考文献^[15]的方法即系数法测定各植株主茎各单叶绿叶面积,单叶绿叶面积=长×宽×0.76,每植株主茎各单叶绿叶面积之和即为主茎绿叶面积。

1.2.4 地上部干物质积累量 在抽穗期、开花期、灌浆前期、灌浆后期和成熟期,从各处理中选取有代

表性的糜子植株,每个小区取 5 株,将植株自然拔起,剪去根部,带回实验室,分别测定植株地上部鲜质量,然后放入烘箱中 105 ℃ 杀青 0.5 h 后,在 80 ℃ 下烘至恒质量后称其干质量。

1.2.5 成熟期考种测产 成熟期按梅花取样法每小区取 5 株调查籽粒产量构成因素,收获期按照常规方法进行考种、测产。

1.3 数据统计与分析

试验数据以“平均值±标准差”表示,用 DPS 7.05 进行方差分析,Excel 进行数据统计,origin75 制图。

2 结果与分析

2.1 连作对糜子旗叶光合特性的影响

2.1.1 光合特征参数 连作对糜子抽穗后旗叶光合特性的影响如表 1 所示。由表 1 可以看出,轮作

与连作糜子抽穗后旗叶净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和水分利用效率变化趋势基本一致,即随着生育进程的推进,4 个指标均呈现先上升后降低的趋势,于开花期达到最大值;而蒸腾速率始终呈下降趋势;且轮作糜子在成熟以前上述 4 个指标均较连作高,尤其是抽穗到灌浆前期叶片净光合速率差异达显著水平。轮作糜子旗叶的蒸腾速率在开花期、抽穗期均较连作低,而在灌浆前期、灌浆后期及成熟期 3 个处理间差异不显著;不同处理糜子旗叶蒸腾速率和水分利用效率在抽穗期和开花期差异均达显著水平($P<0.05$)。相对而言,连作对糜子旗叶净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率的影响较大,对气孔导度及胞间 CO₂ 浓度的影响较小,说明连作不利于糜子光能转化和电子传递,削弱了糜子对光能的利用能力,同时连作会导致糜子叶片蒸腾速率加大,水分利用效率降低。

表 1 连作和轮作条件下糜子抽穗后旗叶光合特征参数的变化

Table 1 Changes of the photosynthetic characteristics of flag leaf in broomcorn millet with continuous cropping and rotation cropping after heading stage

生育时期 Growth stage	处理 Treatments	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Pn	气孔导度/ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Gs	胞间 CO ₂ 浓度/ ($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$) Ci	蒸腾速率/ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Tr	水分利用效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$) WUE
抽穗期 Heading	轮作 CK	19.15±0.37 a	0.326±0.03 a	352±5.18 a	6.85±0.09 b	2.80±0.00 a
	连作 CC	16.50±0.23 b	0.316±0.03 a	338±1.39 a	8.28±0.15 a	1.99±0.00 b
开花期 Flowering	轮作 CK	24.45±0.56 a	0.671±0.01 a	425±3.53 a	5.32±0.08 b	4.59±0.01 a
	连作 CC	17.77±0.33 b	0.523±0.00 b	416±12.78 a	6.67±0.07 a	2.67±0.00 b
灌浆前期 Early filling	轮作 CK	20.08±0.30 a	0.353±0.03 a	317±7.46 a	4.94±0.05 a	4.06±0.00 a
	连作 CC	15.98±0.17 b	0.312±0.03 a	305±5.61 a	4.28±0.10 a	3.74±0.05 a
灌浆后期 Late filling	轮作 CK	12.23±0.11 a	0.134±0.03 a	210±10.17 a	3.88±0.07 a	3.15±0.01 a
	连作 CC	10.17±0.09 b	0.093±0.03 a	186±14.01 b	3.77±0.11 a	2.70±0.00 a
成熟期 Maturing	轮作 CK	5.69±0.05 a	0.033±0.03 a	163±3.54 a	2.74±0.04 a	2.08±0.00 a
	连作 CC	6.02±0.03 a	0.031±0.03 a	159±4.17 a	2.73±0.09 a	2.21±0.00 a

注:同列数字后标不同小写字母表示同期轮作和连作处理间在 $P=0.05$ 水平上存在显著差异。下表同。

Note: Values followed by different lowercase letters within same column indicate significantly difference between continuous cropping and rotation cropping at the same stage at the $P=0.05$ levels. The same below.

2.1.2 叶绿素含量 表 2 表明,自抽穗期开始,随着糜子植株的生长,轮作和连作糜子旗叶叶绿素总含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量及叶绿素 a/b 均呈现先上升后下降的变化趋势,并于开花期前后达到最大;从灌浆至成熟期,由于籽粒的形成,生殖生长占优势,叶片等营养器官逐渐停止生长并趋近衰老,叶绿素含量迅速减少。在同一生育时期,连作糜子旗叶叶绿素各指标值均低于轮作糜子,尤其是叶绿素总量及叶绿素 b 含量在大部分生育期存在显著差异,而叶绿素 a 及叶绿素 a/b 仅在抽穗期至灌浆前期存在显著差异($P<0.05$)。由此可知,连作在生育后期对糜子叶片叶绿素 b 含量的影响更大。从灌浆至成熟期叶绿素含量的下降速率反映了叶片后

期衰老速度的快慢。轮作糜子灌浆期至成熟期旗叶叶绿素含量平均下降速率为 37%,连作糜子平均下降速率为 49%,说明连作导致糜子衰老进程加快。

2.1.3 主茎绿叶面积 由图 1 可知,从抽穗至成熟期,糜子单株主茎绿叶面积的变化呈抛物线型曲线,在开花期达到最大值,之后随着生育进程的推进,植株下部叶片逐渐枯黄,绿叶面积逐渐减少;连作糜子单株主茎叶片绿叶面积在抽穗后各生育时期均显著低于轮作糜子($P<0.05$),而在灌浆后期差异尤为显著,此时连作较轮作糜子主茎绿叶面积降低了 68.3%。在成熟期,连作糜子主茎叶片基本黄枯,而轮作糜子还保持有一定的绿叶。

表 2 连作和轮作条件下糜子抽穗后旗叶叶绿素含量的变化

Table 2 Change of chlorophyll content of the flag leaf in broomcorn millet with continuous cropping and rotation cropping after heading stage					
生育时期 Growth stage	处理 Treatments	叶绿素 a+b/ (mg · g ⁻¹) Chlorophyll	叶绿素 a/ (mg · g ⁻¹) Chlorophyll a	叶绿素 b/ (mg · g ⁻¹) Chlorophyll b	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
抽穗期 Heading	轮作 CK	3.14±0.19 a	2.37±0.05 a	0.776±0.01 a	3.05±0.01 a
	连作 CC	2.72±0.11 b	2.00±0.03 b	0.714±0.03 b	2.80±0.07 b
开花期 Flowering	轮作 CK	4.92±0.23 a	3.83±0.07 a	1.084±0.05 a	3.53±0.13 a
	连作 CC	3.08±0.14 b	2.35±0.02 b	0.727±0.04 b	3.24±0.08 b
灌浆前期 Early filling	轮作 CK	3.25±0.07 a	2.55±0.08 a	0.772±0.03 a	3.66±0.12 a
	连作 CC	3.11±0.12 a	2.33±0.03 b	0.696±0.01 b	3.02±0.08 b
灌浆后期 Late filling	轮作 CK	2.20±0.16 a	1.56±0.01 a	0.630±0.01 a	2.57±0.05 a
	连作 CC	1.91±0.10 b	1.38±0.01 a	0.540±0.01 b	2.47±0.03 a
成熟期 Maturing	轮作 CK	1.28±0.01 a	0.89±0.00 a	0.390±0.00 a	2.32±0.02 a
	连作 CC	0.79±0.00 b	0.55±0.00 a	0.239±0.01 b	2.31±0.01 a

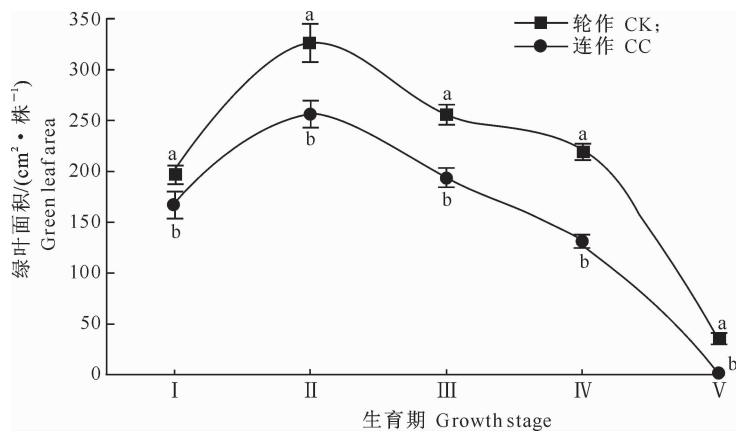


图 1 连作和轮作条件下糜子抽穗后植株主茎绿叶面积的变化

I . 抽穗期; II . 开花期; III . 灌浆前期; IV . 灌浆后期; V . 成熟期; 同一生育期下不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下图同

Fig. 1 Changes of the green leaf area of broomcorn millet plants main stem with continuous cropping and rotation cropping after heading stage

I . Heading; II . Flowering; III . Early filling; IV . Late filling; V . Maturing; Values followed by different small letters within a stage are significantly different at the $P=0.05$ levels respectively. The same as below

2.2 连作对糜子植株地上部干物质积累量的影响

本研究在抽穗期、开花期、灌浆前期、灌浆后期和成熟期测得的各处理糜子干物质积累量结果见图 2。

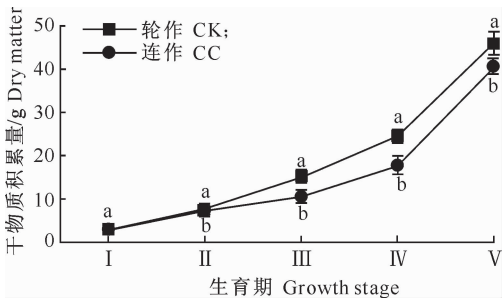


图 2 连作和轮作条件下糜子抽穗后植株地上部干物质积累量的变化

Fig. 2 Changes of the dry matter accumulation of broomcorn millet plants above ground with continuous cropping and rotation cropping after heading stage

由图 2 可以看出,抽穗至成熟期植株地上部干物质积累量均呈“J”型增长曲线,连作糜子各生育期干物质积累量均低于轮作糜子,并在开花期、灌浆期、成熟期达显著差异水平 ($P<0.05$),在灌浆前期的差异尤为显著,轮作糜子此时期地上部干物质积累量为 15.44 g,而连作糜子仅为 10.56 g,轮作糜子相对连作糜子高出 46.2%。可见,由于连作削弱了糜子叶片的光合性能,进而显著降低了糜子的地上部干物质积累量。

2.3 连作对糜子产量及其构成因素的影响

表 3 表明,连作对糜子籽粒产量、株高、主穗长、千粒质量影响较明显,对主茎节数和成穗茎数影响较小。与轮作相比,连作糜子的株高、主穗长、千粒质量、籽粒产量均显著下降,其中籽粒产量降低了 20.0%。

表 3 连作和轮作条件下糜子产量及其构成因素的变化

Table 3 Changes of broomcorn millet production and its components with continuous cropping and rotation cropping

处理 Treatments	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²) Yield	株高/cm Height	主茎节数 Nodes of main stem	成穗茎数 Panicle number of stems	主穗长/cm Main panicle length	千粒质量/g 1 000-grain weight
轮作 CK	2 874.3±33.5 a	132.7±2.1 a	3.8±0.4 a	7.0±0.4 a	39.9±1.9 a	7.951 3±0.005 9 a
连作 CC	2 299.2±28.6 b	118.9±1.9 b	4.0±0.2 a	6.7±0.5 a	34.3±2.3 b	7.170 0±0.015 2 b

3 讨 论

糜子抽穗后,随生育进程的推进,旗叶净光合速率、叶绿素总含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量及植株主茎绿叶面积均呈现先上升后下降的趋势,在开花期达到最大值;糜子干物质积累量则呈“J”型增长曲线;但是在同一生育期内连作糜子各生理指标明显低于轮作糜子。收获后,连作糜子株高、主穗长、千粒质量及籽粒产量显著低于轮作。

光合作用是作物产量形成的重要基础^[16]。作物光合产物的多少主要取决于叶片光合能力的高低,光合强度主要决定于单叶光合强度和叶面积。本研究结果表明,连作糜子旗叶净光合速率和绿叶面积较轮作均有不同程度的下降,在抽穗期及开花期下降尤为显著,这是导致连作糜子干物质积累量减少、产量下降的主要原因。本研究还发现,连作对糜子旗叶气孔导度及胞间 CO₂ 浓度影响不明显,但会导致叶片蒸腾速率显著升高,水分利用效率明显降低,这可能与连作引起的植株根系活力和土壤环境变化有关^[17],具体原因还有待进一步研究论证。

叶绿素是植物光合作用吸收光能的主要物质,其含量的高低与植物叶片光合效率有一定的正相关性^[18],且叶绿素含量的降低预示着叶片的衰老。Austin 等^[19]研究表明,旗叶衰老延迟 1 d,可增产 1.3%。本研究结果表明,连作糜子在抽穗后各生育期旗叶叶绿素含量均明显低于轮作糜子,且连作糜子旗叶叶绿素含量下降幅度较大,表明连作加快了植株衰老进程,籽粒灌浆提前终止,最终导致减产。

综上所述,连作显著降低了糜子旗叶净光合速率、植株主茎绿叶面积、叶绿素总含量及叶绿素 b 含量,致使光合器官过快衰老,功能叶片光合性能下降,最终导致了连作糜子干物质积累、主要经济性状及籽粒产量下降。

4 结 论

糜子抽穗后,随生育进程的推进,旗叶净光合速率、叶绿素含量、叶绿素 b 含量及植株主茎绿叶面积均呈现先上升后下降趋势,在开花期达到最大值;糜

子干物质积累量则呈“J”型增长曲线;但在同一生育期内,以上各生理指标表现为连作糜子总体低于轮作糜子。收获后,连作糜子株高、主穗长、千粒质量及籽粒产量显著低于轮作。因此,在糜子生产中应避免重茬、迎茬,实行合理轮作倒茬是糜子增产的关键。

[参考文献]

[1] 陈炳文. 中国糜子产业发展现状及对策 [M]//柴 岩,万富世. 中国小杂粮产业发展报告. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007:52-59.
Chen B W. Chinese millet industry development present situation and countermeasure [M]//Chai Y, Wan F S. Chinese minor grain crops industry development report. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2007:52-59. (in Chinese)

[2] 张永清,苗果园. 生土施肥对黍子根系生长及生理生态效应的影响 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 158-169.
Zhang Y Q, Miao G Y. Effects of fertilizing in immature soil to broomcorn millet root growing and its physiological ecology [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 158-169. (in Chinese)

[3] 杜长玉,赵华强,李明琴. 大豆连作对植株形态和生理指标的影响 [J]. 内蒙古农业科技, 2003(4): 14-15.
Du C Y, Zhao H Q, Li M Q. Effects of continuous cropping on soybean plant morphological and physiological indicators [J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2003(4): 14-15. (in Chinese)

[4] Finnsa C, Yuen J. Temporal progression of bean common bacterial blight (*Xanthomonas campestral* pv. *phaseoli*) in sole and intercropping systems [J]. European Journal of Plant Pathology, 2002, 108(6): 485-495.

[5] Dobermann A, Dawe D, Roetter R P, et al. Reversal of rice yield decline in a long-term continuous cropping experiment [J]. Journal of Agronomy: Soil Fertility, 2000, 92: 633-643.

[6] 王才斌,吴正锋,成 波,等. 连作对花生光合特性和活性氧代谢的影响 [J]. 作物学报, 2007, 33(8): 1304-1309.
Wang C B, Wu Z F, Cheng B, et al. Effect of continuous cropping on photo-synthesis and metabolism of reactive oxygen in peanut [J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(8): 1304-1309. (in Chinese)

[7] 樊堂群,王树兵,姜淑庆,等. 连作对花生光合作用和干物质积累的影响 [J]. 花生学报, 2007, 36(2): 35-37.
Fan T Q, Wang S B, Jiang S Q, et al. Effect of continuous crop-

ping on photosynthesis and accumulation of dry matter in peanut [J]. Journal of Peanut Science, 2007, 36(2): 35-37. (in Chinese)

[8] 阮维斌, 刘默涵, 潘洁, 等. 不同饼肥对连作黄瓜生长的影响及其机制初探 [J]. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1519-1524. Ruan W B, Liu M H, Pan J, et al. Effect of oil cakes on the growth of cucumber (*Cucumis sativus* L.) under continuous cropping system and its mechanism [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(12): 1519-1524. (in Chinese)

[9] 阮维斌, 赵紫娟, 薛健, 等. 高效液相色谱法检测与化感现象相关的 5 种酚酸 [J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(6): 609-612. Ruan W B, Zhao Z J, Xue J, et al. Measurement of five allelopathic related phenolic acids by high performance liquid chromatograph [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2001, 7(6): 609-612. (in Chinese)

[10] 王纶, 王星玉, 温琪汾, 等. 中国黍稷种质资源研究与利用 [J]. 植物遗传资源学报, 2005, 6(4): 474-477. Wang L, Wang X Y, Wen Q F, et al. Research and utilization of proso millet germplasm resource in China [J]. Plant Genet Resour, 2005, 6(4): 474-477. (in Chinese)

[11] 张权中, 荆家海, 王韶唐. 不同肥力水平下水分胁迫对高粱、糜子幼苗光合作用及水分利用效率的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(2): 46-49. Zhang Q Z, Jing J H, Wang S T. Effect of water stress on photosynthesis and water use efficiency in sorghum and proso millet seedlings under different fertility conditions [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1993, 11(2): 46-49. (in Chinese)

[12] 冯晓敏, 张永清. 水分胁迫对糜子植株苗期生长和光合特性的影响 [J]. 作物学报, 2012, 38(8): 1513-1521. Feng X M, Zhang Y Q. Effect of water stress on seedling growth and photosynthetic characteristics in broomcorn millet [J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(8): 1513-1521. (in Chinese)

[13] 陈毓荃. 生物化学实验方法和技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 95-97. Chen Y Q. Biochemistry experimental methods and techniques [M]. Beijing: Science Press, 2002: 95-97. (in Chinese)

[14] 苏正淑, 张宪政. 几种测定植物叶绿素含量的方法比较 [J]. 植物生理学通讯, 1989(5): 77-78. Su Z S, Zhang X Z. Comparison of the several test methods of the chlorophyll content [J]. Plant Physiology Communications, 1989(5): 77-78. (in Chinese)

[15] 刘自华. 冬小麦叶面积校正系数及叶面积指数的研究 [J]. 河北农业科学, 1996(1): 12-14. Liu Z H. Study of winter wheat leaf area correction coefficient and leaf area index [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 1996(1): 12-14. (in Chinese)

[16] 马新明, 熊淑萍, 李琳, 等. 土壤水分对不同专用小麦后期光合特性及产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 83-87. Ma X M, Xiong S P, Li L, et al. Effects of soil moisture on photosynthetic characteristics of different specialized end-uses winter wheat at their later growth stages and on their yields [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(1): 83-87. (in Chinese)

[17] 张庆霞, 宋乃平, 王磊, 等. 马铃薯连作栽培的土壤水分效应研究 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1212-1217. Zhang Q X, Song N P, Wang L, et al. Ecological effects of continuous potato cropping on soil water [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(6): 1212-1217. (in Chinese)

[18] 刘贞琦, 刘振业, 马达鹏, 等. 水稻叶绿素含量及其与光合速率关系的研究 [J]. 作物学报, 1984, 10(1): 57-62. Liu Z Q, Liu Z Y, Ma D P, et al. A study on the relation between chlorophyll content and photosynthetic rate of rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 1984, 10(1): 57-62. (in Chinese)

[19] Austin R B, Morgan C L, Ford M A. Flag leaf photosynthesis of triticum and related diploid and tetraploid species [J]. Annales Botanici Fennici, 1982, 49(2): 177-189.

(上接第 54 页)

[22] 徐达文, 张立平, 赵昌平, 等. 小麦光温敏雄性不育系 BS366 育性的遗传分析 [J]. 华中农业大学学报, 2009, 28(6): 655-659. Xu D W, Zhang L P, Zhao C P, et al. Genetic analysis of male sterility in photo-thermoperiod sensitive genic male sterile line BS366 in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2009, 28(6): 655-659. (in Chinese)