

## 超高产大豆根系活力和根瘤特性的比较研究

张晓霞<sup>1</sup>, 张惠君<sup>1</sup>, 宋书宏<sup>2</sup>, 王文斌<sup>2</sup>, 敖雪<sup>1</sup>, 谢甫绋<sup>1</sup>

(1. 沈阳农业大学 农学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 辽宁省农业科学院 作物研究所, 辽宁 沈阳 110866)

**摘要:**以超高产大豆辽豆14、中黄35与普通品种辽豆11为试材,在盆栽条件下于不同生育时期比较超高产品种和普通品种根系活力和根瘤特性的差异。结果表明:R2期伤流量超高产品种与普通品种差异显著,根系活力则是普通品种辽豆11最大,但在R4和R6期超高产品种根系伤流量和根系活力均显著大于普通品种;R4和R6期,超高产品种根瘤重、固氮活性、固氮量均显著高于普通品种辽豆11。R2和R4期,施磷酸二铵100 mg·kg<sup>-1</sup>处理的根系伤流量和根系活力显著高于其它施肥处理。因此,超高产大豆品种在R4和R6期具有更强的根系生理功能。

**关键词:**大豆;超高产;根系活力;根瘤特性

**中图分类号:**S565.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-9841(2013)04-0496-05

## Comparison on Root Activity and Nodulation Characteristics of Super-high-yielding Soybeans

ZHANG Xiao-xia<sup>1</sup>, ZHANG Hui-jun<sup>1</sup>, SONG Shu-hong<sup>2</sup>, WANG Wen-bin<sup>2</sup>, AO Xue<sup>1</sup>, XIE Fu-ti<sup>1</sup>

(1. Agronomy College of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Crop Institute of Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** In order to clarify the root physiological characteristics of super-high-yielding soybean, root activity and nodulation characteristics were determined through potted experiments with super-high-yielding soybean *cv.* Liaodou 14 and Zhonghuang 35, and common soybean *cv.* Liaodou 11 as materials. Root bleeding sap weight and root activity of super-high-yielding soybeans were much greater than those of common soybean at R4 and R6 stage, and root bleeding sap weight showed statistically significant differences at R2 stage between super-high-yielding and common soybean, while root activity of Liaodou 11 was maximum at R2 stage. Root bleeding sap weight and root activity were much higher than other fertilizer treatments under 100 mg·kg<sup>-1</sup> (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> treatment at R2 and R4 stage. Nodule weight, nitrogenase activity and amount of nitrogen fixation of super-high-yielding soybeans were also much greater than those of common soybean at R4 and R6 stage. Results suggest super-high-yielding soybeans had stronger root physiological activity at middle to late seed-filling stage.

**Key words:** Soybean; Super-high-yielding; Root activity; Nodulation characteristics

根系与茎、叶共同构成植物三大营养器官。根系能为作物的生长发育吸收水分、养分、无机盐等,合成转化氨基酸、激素等微量活性物质等,在植物体整个生长发育过程起到至关重要的作用<sup>[1-3]</sup>。作物根系与其地上部形成统一的整体共同影响着产量的高低<sup>[4]</sup>。因此,深入研究根系生理生化特性以及根系与地上部的关系,对制定合理的栽培措施和选育高产品种具有重要意义。

超高产大豆品种形成高额的籽粒产量,需要生产和积累比普通大豆品种更多的生物产量。为了满足地上部物质生产对水分和养分的需求,超高产大豆根系的形态和功能也可能存在特异性,以保证根冠的协调性。前人对超高产大豆地上部研究较多。相关研究表明,大豆叶面积指数和光合生产率在生长后期保持较高水平,是大豆高产的保证<sup>[5-7]</sup>。

张伟等<sup>[8]</sup>、肖万新等<sup>[9]</sup>对超高产大豆辽豆14的研究也表明超高产大豆光合速率在盛荚期体现不明显,到盛荚期之后则高于辽豆11。本试验在盆栽条件下,采用不同施肥处理探讨超高产品种根系生理功能的特异性,试图为超高产品种选育和超高产栽培措施的制定提供理论依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验设计

试验于2011年在辽宁省农业科学院作物研究所盆栽试验场进行,供试品种为在生产中曾创造超高产记录的超高产品种辽豆14<sup>[10]</sup>和中黄35<sup>[11]</sup>,以及普通品种辽豆11。设0(N1),50(N2),100(N3),150(N4)和200 mg·kg<sup>-1</sup>(N5)共5个磷酸二铵施肥水平,于出苗后一次性施入。盆栽完全随机排布,

收稿日期:2013-03-04

基金项目:国家自然科学基金(31071355);国家“十一五”科技支撑计划(2011BAD35B06-2);辽宁省科技厅攻关项目(2011201020)。

第一作者简介:张晓霞(1986-),女,在读硕士,主要从事大豆栽培生理研究。E-mail: xiaoxiazhang1986@yahoo.cn。

通讯作者:谢甫绋(1966-),男,教授,博士生导师,从事大豆株型育种和栽培研究。E-mail: snssoybean@yahoo.com.cn。

共 15 个处理,3 次重复。每盆装土 12.5 kg,每盆保苗 2 株,生育期正常管理。分别于 R2(7 月 4 日)、R4(8 月 17 日)和 R6 期(9 月 1 日)取样,测定大豆根系生理指标。

## 1.2 测定项目与方法

1.2.1 根系伤流液 于 R2、R4 和 R6 期,在子叶节部位剪去地上部分,用蒸馏水将子叶节周围清洗干净后,用塞有脱脂棉\管口用保鲜膜密封的塑料试管将子叶节处包裹,收集伤流液 12 h,测定伤流液的重量<sup>[12]</sup>。

1.2.2 根系活力 采用 TTC 法测定根系活力,参照李合生<sup>[13]</sup>的方法。

1.2.3 根瘤特性 取大豆根,用清水洗净泥土,参照刘丽君等<sup>[14]</sup>的方法测定根瘤数量、根瘤鲜重;参

照 Zablotowicz 等<sup>[15]</sup>的方法,测定根瘤固氮活性,测定仪器为安捷伦 7890A 气相色谱仪。

## 1.3 数据分析

采用 Excel 2003 和 DPS v7.05 进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 根系伤流量

由图 1 可知,R2 期根系伤流量最大,随着生育进程大豆伤流量呈下降趋势;辽豆 14 和中黄 35 伤流量在各时期均高于辽豆 11,R4 期和 R6 期辽豆 14 和中黄 35 伤流量均极显著高于辽豆 11。

R2 和 R4 时期,高施肥量处理(N3、N4、N5)植株伤流量均显著高于少量施肥处理。R6 期各施肥处理间差异不显著。

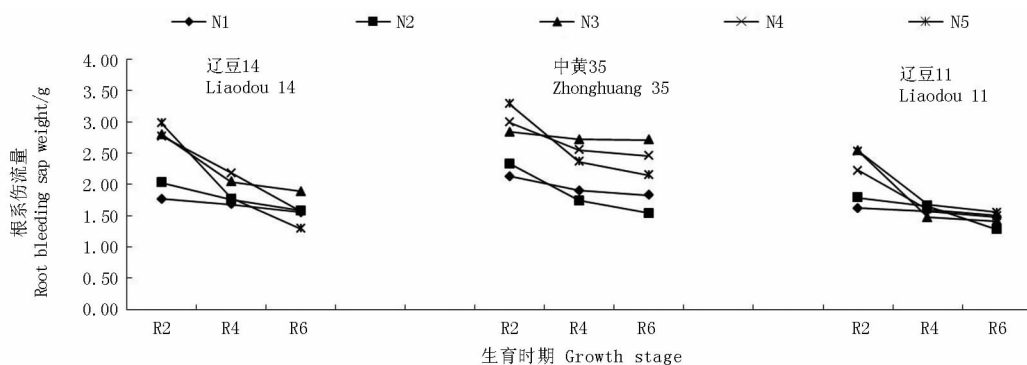


图 1 不同施肥处理下大豆植株伤流量的动态变化

Fig. 1 Change of root bleeding sap weight of soybean cultivars under different fertilizer treatments

### 2.2 根系活力

由图 2 可知,R2 期辽豆 11 根系活力显著大于中黄 35,辽豆 11 根系活力高于辽豆 14,但差异不显著;R4 期辽豆 14 和中黄 35 根系活力均极显著高于辽豆 11;R6 期中黄 35 根系活力显著高于辽豆 11,

辽豆 14 和辽豆 11 则差异不显著。

R2 期 N3 施肥处理下根系活力显著高于其他施肥处理,R4 期高施肥量处理(N3、N4、N5)根系活力显著高于少量施肥处理(N1、N2),R6 期各施肥处理根系活力未达到显著差异水平。

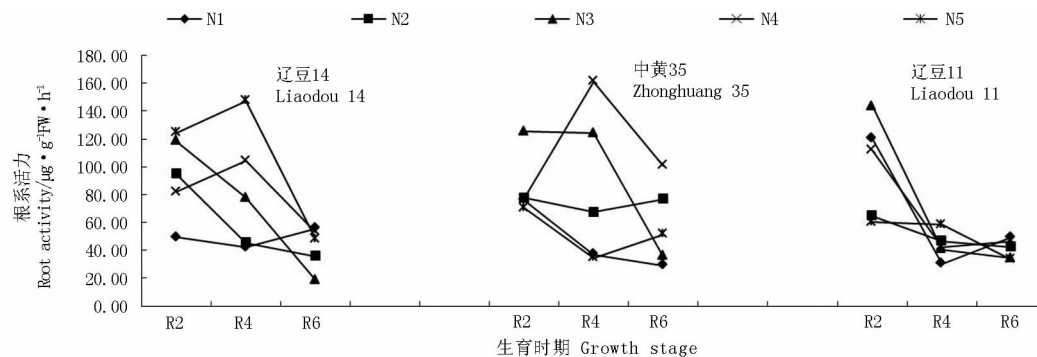


图 2 不同施肥处理下大豆根系活力的动态变化

Fig. 2 Change of root activity of soybean cultivars under different fertilizer treatments

### 2.3 根瘤特性和固氮活性

2.3.1 根瘤特性 由表 1 可知,各生育时期辽豆 14 和辽豆 11 的根瘤数均极显著高于中黄 35,R4 期辽豆 14 根瘤数显著高于辽豆 11。各生育时期根瘤

重辽豆 14 > 中黄 35 > 辽豆 11,R4 和 R6 期辽豆 14 和中黄 35 根瘤重极显著高于辽豆 11;R2 期辽豆 14 根瘤重显著高于辽豆 11,中黄 35 根瘤重与辽豆 11 差异不显著。

表 1 不同生育时期大豆品种根瘤特性的比较

Table 1 Comparison on nodulation characteristics of soybean cultivars at different growth stages

品种 Cultivar	根瘤数 Nodule number			根瘤重 Nodule weight/g		
	R2	R4	R6	R2	R4	R6
辽豆 14 Liaodou 14	62 aA	312 aA	187 aA	0.95 aA	6.05 aA	4.54 aA
中黄 35 Zhonghuang35	38 bB	207 cB	81 bB	0.87 abA	5.82 aA	3.30 bB
辽豆 11 Liaodou 11	53 aA	267 bA	166 aA	0.81 bA	3.93 bB	2.86 cC

数据后不同大、小写字母分别表示同一指标不同品种间比较差异达 0.01、0.05 显著水平。下同。

Values within a column followed by different capital and lowercase letters are significantly different at the 0.01 and 0.05 probability levels, respectively. The same below.

由表 2 可知,R2 期 N2 处理根瘤数显著高于 N4 和 N5 处理;R2 期 N3 处理根瘤重显著高于其它 N1、N3 和 N4 处理,说明施少量氮肥可以促进根瘤的生长,R4 期 N1、N2、N3 处理根瘤数极显著大于施肥处理,R6 期 N2 处理根瘤重显著高于其他施肥处理,R4 期施肥处理间差异不显著。

表 2 不同施肥处理下大豆根瘤特性的比较

Table 2 Comparison on nodulation characteristics of soybean cultivars at different fertilizer treatments

施肥处理 Fertilizer treatment	根瘤数 Nodule number			根瘤重 Nodule weight/g		
	R2	R4	R6	R2	R4	R6
N1	51 bAB	274 aAB	181 aA	0.76 bcB	5.61 aA	3.71 bA
N2	65 aA	315 aA	133 bA	0.73 cB	5.60 aA	4.15 aA
N3	43 bB	301 aA	137 bA	1.00 aA	4.94 aA	3.77 bA
N4	44 bB	207 bB	131 bA	0.85 bAB	5.23 aA	2.50 cB
N5	53 abAB	212 bB	143 abA	0.54 dC	4.94 aA	3.71 bA

2.3.2 固氮活性 由表 3 可知,R2 期辽豆 14 与辽豆 11 的固氮活性差异显著,中黄 35 与辽豆 11 差异不显著;R4 期辽豆 14 与辽豆 11 固氮活性差异极显著,中黄 35 固氮活性大于辽豆 11,但差异不显著;R6 期辽豆 14 和中黄 35 的固氮活性均极显著大于辽豆 11。R2 期辽豆 14 和中黄 35 与辽豆 11 固氮量差异不显著;R4 期和 R6 期,辽豆 14 和中黄 35 固氮量均显著大于辽豆 11,并在 R4 期达到极显著差异水平,固氮量辽豆 14 > 中黄 35 > 辽豆 11。

表 3 不同生育时期大豆品种固氮活性的比较

Table 3 Comparison on nitrogenase activity of soybean cultivars at different growth stages

品种 Cultivar	固氮活性 Nitrogenase activity/ $\text{mmolC}_2\text{H}_4 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$			固氮量 Amount of nitrogen fixation/ $\text{mmolC}_2\text{H}_4 \cdot \text{h}^{-1}$		
	R2	R4	R6	R2	R4	R6
辽豆 14 Liaodou 14	0.6996 aA	0.7001 aA	0.6996 aA	0.6549 aA	4.2402 aA	3.0907 aA
中黄 35 Zhonghuang 35	0.6994 abA	0.6993 bB	0.6993 aA	0.6126 aA	4.0767 aA	2.3836 bB
辽豆 11 Liaodou 11	0.6992 bA	0.6991 bB	0.6986 bB	0.5745 aA	2.8051 bB	2.0476 cB

表 4 不同施肥处理下大豆固氮活性的比较

Table 4 Comparison on nitrogenase activity of soybean cultivars at different fertilizer treatments

施肥处理 Fertilizer treatment	固氮活性 Nitrogenase activity/ $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$			固氮量 Amount of nitrogen fixation/ $\text{mmol} \cdot \text{h}^{-1}$		
	R2	R4	R6	R2	R4	R6
N1	0.6990 cB	0.6998 aA	0.6994 aA	0.5686 bAB	3.9145 aA	2.5525 aA
N2	0.6993 bcAB	0.6997 aA	0.6988 bA	0.5070 bBC	3.9149 aA	2.8654 aA
N3	0.6990 cB	0.6994 aA	0.6992 abA	0.6897 aA	3.7451 aA	2.6760 aA
N4	0.6999 aA	0.6994 aA	0.6988 bA	0.5532 bAB	3.6314 aA	1.7650 bB
N5	0.6997 abA	0.6993 aA	0.6995 aA	0.3884 cC	3.3307 aA	2.6776 aA

由表 4 可知,R2 期 N4 处理固氮活性显著高于 N1、N2 和 N3 处理,与 N5 差异不显著,R4 期各处理固氮活性差异不显著;R2 期 N3 处理固氮量显著高于其他施肥处理,R4 期不同施肥处理固氮量差异不显著。

### 3 结论与讨论

伤流量和根系氧化还原能力是表征作物根系活力的指标。在一定程度上植株伤流量大小能反映根系生理活动的强弱<sup>[16]</sup>,同时也能反映地上部生长的盛衰<sup>[17]</sup>。根系活力是反映植株吸收功能、发育状况的综合指标,它的大小直接影响根从土壤中吸收水分和养分的能力<sup>[18-19]</sup>。

本试验研究结果表明,超高产品种辽豆 14 和中黄 35 在各生育时期伤流量均高于普通品种辽豆 11,在 R4 和 R6 期,超高产品种与普通品种达到极显著差异水平。而孙彪等<sup>[20]</sup>研究表明地下部伤流量在 R2、R4 和 R6 时期与地上部生物量呈显著正相关。由此可知,超高产品种强的根系伤流量使地上部获得更多水分和养分,从而促进地上部生物产量的积累,最终使大豆获得高产。

对根系活力的研究表明,超高产品种根系活力在生育前期优势不明显甚至要低于普通品种,R4 和 R6 期超高产品种根系活力则表现出明显优势,而结荚鼓粒期是大豆产量形成的关键时期<sup>[21]</sup>,超高产品种生育后期强大的根系活力同样会促进地上部生物产量的积累,使大豆获得高产。

大豆的生长发育过程不同于其它非豆科植物,其显著特点是根与根瘤菌形成根瘤固氮体。根瘤的共生固氮作用为大豆生长提供了重要的氮素来源,对大豆产量和品质的提高具有重要作用<sup>[22]</sup>。本试验中超高产品种的根瘤重、固氮活性和固氮量在 R2 时期与普通品种差异不显著,但在 R4 和 R6 期均显著高于普通品种。Bliss 等<sup>[23]</sup>研究表明大豆不同品种的结瘤和固氮性能有显著差异,这种差异与根瘤数量、根瘤鲜重和根瘤体积有密切关系。超高产大豆生育后期强的根瘤特性可使大豆积累更多的氮素向籽粒转运,最终有利于形成高额的产量。

根、冠作为植株生长过程的两大功能器官,是相互依存,相互竞争的统一体<sup>[24]</sup>,在不同施氮情况下,根系的响应必然使冠的生长受到影响,进而影响作物产量。本试验发现,根系伤流量和根系活力随施肥量的增加均表现出先升高后降低的趋势,并且施磷酸二铵 100 mg·kg<sup>-1</sup>为最佳施肥水平。

### 参考文献

[1] 盖钧镒. 育种应用基础和技术研究进展[M]. 南京:江苏科学

技术出版社,1990. (Gai J Y. Advances in breeding base and technology research [M]. Nanjing: Jiangsu Sci & Tech Press,1990.)

- [2] 金剑,刘晓冰,王光华,等. 大豆生殖生长期根系形态性状与产量关系研究[J]. 大豆科学,2004,23(4):253-257. (Jing J, Liu X B, Wang G H, et al. Study on the relationship between root morphology and yield in soybean reproductive growth stage[J]. Soybean Science,2004,23(4):253-257.)
- [3] 向小亮,宁书菊,魏道智. 根系的研究进展[J]. 中国农学通报,2009,25(17):105-112. (Xiang X L, Nin S J, Wei D Z. Advance in root research[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2009,25(17):105-112.)
- [4] 董钻,孙卓韬,王克晶,等. 盆栽条件下大豆冠根比研究初报[J]. 吉林农业科学,1982(4):22-26. (Dong Z, Sun Z T, Wang K J, et al. Preliminary study on soybean root/shoot ratio under potting condition[J]. Jilin Agricultural Sciences,1982(4):22-26.)
- [5] 张荣贵,宋宇. 大豆叶面积、光合速率及产量的相关性研究[J]. 中国农业科学,1979,12(2):40-46. (Zhang R G, Song Y. The relevance of the soybean leaf area, the net photosynthetic rate and yield[J]. Scientia Agricultura Sinica,1979,12(2):40-46.)
- [6] 刘胜利,孔新,战勇. 新大豆 2 号的高效栽培技术及品种选择[J]. 新疆农业科学,2005(6):125-127. (Liu S L, Kong X, Zhan Y. Cultivation technology of high produce efficiency and breed selection of high oil soybean variety Xindadou 2[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2005(6):125-127.)
- [7] 林贤齐,陈慧琴,李凤兰,等. 菏泽地区夏大豆亩产 200 kg 的栽培措施研究[J]. 大豆科学,1992,10(2):159-165. (Lin X Q, Chen H Q, Li F L, et al. Study on the cultural techniques for 200 kg/mu yield of summer soybean in Heze area[J]. Soybean Science,1992,10(2):159-165.)
- [8] 张伟,谢甫绵,张惠君,等. 超高产大豆品种辽豆 14 号的冠层特性与产量性状研究[J]. 中国农业科学,2007,40(11):2460-2467. (Zhang W, Xie F T, Zhang H J, et al. Canopy and yield characteristics of super-high-yielding soybean cv. Liaodou No. 14[J]. Scientia Agricultura Sinica,2007,40(11):2460-2467.)
- [9] 肖万新,谢甫绵,张惠君,等. 不同肥力和密度处理对超高产大豆品种的光合特性和产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2009,31(2):190-195. (Xiao W X, Xie F T, Zhang H J, et al. Effect of fertilizer and planting density on photosynthetic characteristics and yield of super-high-yielding soybean cultivar[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2009,31(2):190-195.)
- [10] 宋书宏,王文斌,孙恩玉,等. 大豆单产 327.2 公斤研究初报[J]. 大豆通报,2001(2):7,23. (Song S H, Wang W B, Sun E Y, et al. Preliminary study on soybean yield of 327.2 kg/mu[J]. Soybean Bulletin,2001(2):7,23.)
- [11] 王晓光,赵念力,魏建军,等. 中黄 35 大豆超高产实例分析[J]. 大豆科学,2011,30(6):1051-1053. (Wang X G, Zhao N L, Wei J J, et al. The case analysis of super-high yielding soybean Zhonghuang 35[J]. Soybean Science,2011,30(6):1051-1053.)
- [12] 熊庆娥. 植物生理实验教程[M]. 成都:四川科技出版社,2003:26-50. (Xiong Q E. Experimental course of plant physiology [M]. Chengdu: Sichuan Sci & Tech Press,2003:26-50.)
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:119-120. (Li H S. Experimental principle and technology of plant biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press,

- 2000;119-120.)
- [14] 刘丽君,孙聪姝,刘艳,等. 氮肥对大豆结瘤及叶片氮素积累的影响[J]. 东北农业大学学报,2002,36(2):133-137. (Liu L J, Sun C S, Liu Y, et al. Effects of nitrogen on nodule-forming and nitrogen concentration in soybean leaves[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2002,36(2):133-137.)
- [15] Zablotowicz R M, Reddy K N. Impact of glyphosate on the *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis with glyphosate-resistant transgenic soybean: A minireview[J]. Journal of Environmental Quality, 2004,33:825-831.
- [16] 常江,张自立,郜红建,等. 外源稀土对水稻伤流组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(5):522-525. (Chang J, Zhang Z L, Gao H J, et al. Effect of rare earth on composition of bleeding sap of rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2004,10(5):522-525.)
- [17] 王熹,陶龙兴,黄效林,等. 灌溉稻田水稻旱作物法研究—水稻的生育与生理特性[J]. 中国农业科学,2004,37(9):1274-1281. (Wang X, Tao L X, Huang X L, et al. Study on non-flooding farming technique in irrigated paddy field—physiological and developmental characteristics of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004,37(9):1274-1281.)
- [18] 周广生. 小麦根系活力与产量性状关系的研究[J]. 华中农业大学学报,2001,20(6):531-534. (Zhou G S. Study of relation between root activity and yield characteristics in wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2001,20(6):531-534.)
- [19] 陈翠玲,茹振钢,朱翠萍. 不同品种小麦中、后期耕层根系活力变化规律[J]. 河南农业科学,2002(5):8-9. (Chen C L, Ru Z G, Zhu C P. The change regularity of root vitality in plow layer for different wheat varieties during middle and growth period[J]. Hunan Agricultural Sciences,2002(5):8-9.)
- [20] 孙彪,孙苗苗,徐克章,等. 不同年代大豆品种根系伤流液重量的变化及其与地上生物量的关系[J]. 大豆科学,2012,31(4):579-583. (Sun B, Sun M M, Xu K Z, et al. Changes of root bleeding sap weight and its correlation with biomass of above-ground organs in soybean cultivars released in different years[J]. Soybean Science,2012,31(4):579-583.)
- [21] 张丽华,赵洪祥,谭国波,等. 水肥耦合对大豆光合特性及产量的影响[J]. 大豆科学,2010,29(2):268-271. (Zhang L H, Zhao H X, Tan G B, et al. Influence of water and fertilizer coupling on photosynthetic characters and yield of soybean[J]. Soybean Science,2010,29(2):268-271.)
- [22] 丁伟,杨隆华,程苗,等. 氟磺胺草醚对大豆根瘤固氮活性及光合速率的影响[J]. 作物杂志,2010(4):82-84. (Ding W, Yang L H, Cheng Z, et al. Effect of fomesafen on nitrogenase activity and net photosynthesis rate in soybean[J]. Crops,2010(4):82-84.)
- [23] 杨贵羽,罗元培,李保国,等. 冬小麦根系对水分胁迫期间和胁迫后效的响应[J]. 中国农业科学,2005,38(12):2408-2414. (Yang G Y, Luo Y P, Li B G, et al. Response of winter wheat root to the effect and the after effect of soil water stress[J]. Scientia Agricultura Sinica,2005,38(12):2408-2414.)

#### (上接第 495 页)

- [19] Gamon J A, Peñuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J]. Remote Sensing of Environment,1992,41(1):35-44.
- [20] Merzlyak M N, Gitelson A A, Chivkunova O B, et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening[J]. Physiologia Plantarum, 1999, 106(1):135-141.
- [21] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance[J]. Remote Sensing of Environment,2000,74(2):229-239.
- [22] Sim D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. Remote Sensing of Environment,2002,81(2):331-354.
- [23] Filella I, Porcar-Castell A, Munné-Bosch S, et al. PRI assessment of long-term changes in carotenoids/chlorophyll ratio and short-term changes in de-epoxidation state of the xanthophyll cycle[J]. International Journal of Remote Sensing,2009,30:4443-4455.
- [24] 赵丽英,邓西平,山仑. 渗透胁迫对小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报,2005,16(7):1261-1264. (Zhao L Y, Deng X P, Shan L. Effects of osmotic stress on chlorophyll fluorescence parameters of wheat seedling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2005,16(7):1261-1264.)
- [25] Blackburn G A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments[J]. Journal of Experimental Botany,2007,25(4):855-867.
- [26] Yang F, Li J L, Gan X Y, et al. Assessing nutritional status of *Festuca arundinacea* by monitoring photosynthetic pigments from hyperspectral data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010,70:52-59.
- [27] 杨峰,钱育蓉,李建龙,等. 利用高光谱技术无损探测高羊茅草坪草营养状况研究[J]. 中国草地学报,2009,31(1):86-91. (Yang F, Qian Y R, Li J L, et al. Estimating nutrition status in *Festuca arundinacea* using hyperspectral remote sensing technique[J]. Chinese Journal of Grassland,2009,31(1):86-91.)
- [28] 徐元进,胡光道,张振飞. 包络线消除法及其在野外光谱分类中的应用[J]. 地理与地理信息科学,2005,21(6):11-14. (Xu Y J, Hu G D, Zhang Z F. Continuum removal and its application to the spectrum classification of field object[J]. Geography and Geo-information Science,2005,21(6):11-14.)
- [29] Garbulsky M F, Peñuelas J, Gamon J, et al. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies[J]. Remote Sensing of Environment,2011,115:281-297.