

氮素营养水平对大豆氮素积累及产量的影响

董守坤, 龚振平*, 祖伟

(东北农业大学农学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要: 以“东农 47”为试材, 采用¹⁵N 标记的 (NH₄)₂SO₄ 作为氮源, 利用砂培方式研究了氮素营养水平对大豆氮素积累及产量的影响。结果表明, 随外源氮水平增加, 大豆植株氮素积累量和产量呈先增加后降低的变化趋势, 当营养液氮浓度为 50 mg/L 时, 植株氮素积累量和子粒产量最大。在 R₄ 和 R₅ 期补充氮肥的供给明显增加植株对氮的积累, 并能显著提高大豆产量。大豆生长需要一定量的“启动氮”, “启动氮”的作用维持到 V₃ 期对大豆氮的积累和产量形成效果最好。随外源氮水平增加, 大豆吸收外源氮的比例增加, 根瘤固氮所占比例降低, 外源氮和根瘤固氮积累量随外源氮水平增加呈先增加后降低的变化趋势。当氮浓度为 100 mg/L 时, 有利于植株对外源氮的吸收, 当氮浓度为 50 mg/L 时, 有利于根瘤固氮的积累; “启动氮”的作用维持到 V₃ 期根瘤固氮的积累明显增加; 在 R₄ 和 R₅ 期补充外源氮的供给可以显著增加对外源氮利用, 以 R₅ 期效果最好。

关键词: 大豆; 氮素; 外源氮; 根瘤固氮; 产量

中图分类号: S565.1.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)01-0065-06

Effects of nitrogen nutrition levels on N-accumulation and yields of soybean

DONG Shou-kun, GONG Zhen-ping*, ZU Wei

(College of Agronomy, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: Labeled ¹⁵N ammonium sulfate was used as nitrogen source to study the effects of nitrogen nutrition levels on soybean (cultivar Dongnong 47) N-accumulation and yields using the sand culture. The results show that the crop N-accumulation and yields are increased earlier and decreased later as the exogenous-N levels are gradually increased, and the crop N-accumulation and yield are the highest when the nitrogen concentration is 50 mg/L. Applying N fertilizer during the R₄ and R₅ periods could increase the crop N-accumulation and yield significantly. Soybean growth and development needs “startup-N”, and the best effect of the “startup-N” on the soybean N-accumulation is until the V₃ period. Proportion of soybean absorption of exogenous-N is increased when enhancing the application level of the exogenous-N, while proportion of nodulation-N is decreased. The accumulation of the exogenous-N and accumulation of nodulation-N are increased earlier, and decreased later. The accumulation of exogenous-N is the main source when the nitrogen concentration is 100 mg/L, while the accumulation of nodulation-N is the main source when the nitrogen concentration is 50 mg/L. The accumulation of exogenous-N and accumulation of nodulation-N are increased apparently when continuously using “startup-N” until the V₃ period. The exogenous-N absorption is increased apparently when high level of exogenous-N is applied during the R₄ and R₅ periods.

Key words: soybean; nitrogen; exogenous-N; nodulation-N; yield

氮素是植物体内蛋白质、核酸、叶绿素和一些激素等的重要组成部分, 是限制作物生长和产量形成的首要因素^[1-3]。大豆自身积累高浓度的蛋白质, 根瘤固氮对结实器官营养作用非常明显^[4]。但是要

维持其正常生长靠根瘤固氮仅能满足大豆需氮的 50% 左右^[5-7], 所以必须给以足够的氮肥^[8-10]。近几年的研究表明, 施用氮肥可以促进植株生长, 提高大豆产量^[11-12]。大豆的氮素来源于两个方面, 一

收稿日期: 2009-01-15 接受日期: 2009-05-19

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAD21B01); 黑龙江省科技攻关课题(GA06B101); 大豆生物学省部共建教育部重点实验室开放基金资助项目(SB08B06); 东北农业大学博士启动基金资助。

作者简介: 董守坤(1978—)男, 博士, 助理研究员, 主要从事作物生理及保护性耕作研究。E-mail: dongshoukun@yahoo.com.cn

* 通讯作者 E-mail: gzpyx2004@163.com

是来自土壤和肥料中的氮素；二是来自根瘤菌的共生固氮，二者互相联系，又相互制约。所以，施氮肥必须考虑根瘤的固氮特点，使其既能够促进根瘤的固氮作用，又能给大豆补充养分，这是大豆合理施用氮肥技术中的关键问题。土壤中氮素来源和形态比较复杂，且受环境影响很大。因此，为了能够更准确地揭示氮素水平对大豆氮素积累、来源特性及产量的影响，本试验利用 ^{15}N 示踪技术，采用砂培方法，在营养条件可控的环境下进行研究，以期能为生产上合理施用氮肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

砂培试验于2007年在东北农业大学校内进行。桶直径0.30 m、高0.28 m，桶底钻1 cm直径孔，装江砂20 kg，装桶前将江砂洗净，置于玻璃防雨棚内，防止雨水淋入。在大豆2片复叶时接种根瘤菌，方法是取上年冷冻保存的大豆根瘤，研碎后加入到营养液中，每升营养液中约含5 g根瘤，连续淋浇5 d。

供试大豆(*Glycine max*)品种为东农47(亚有限结荚习性，脂肪含量23.12%)。

1.2 试验处理

试验设全生育期营养液氮浓度为N20、50、100、150 mg/L(分别用N20、N50、N100、N150表示)4个处理；为了模拟种肥作用，设 V_3 期以前营养液中N浓度150 mg/L， V_3 期以后变为20 mg/L(N150- V_3 -20)， R_1 期以前营养液中N浓度150 mg/L， R_1 期以后变为20 mg/L(N150- R_1 -20)， R_2 期以前营养液中N浓度150 mg/L， R_2 期以后变为20 mg/L(N150- R_2 -20)3个处理；另根据报道，种子形成初期追施氮肥能显著提高对氮素的吸收^[13]，为此还设 R_4 期以前营养液中N浓度20 mg/L， R_4 期以后变为150 mg/L(N20- R_4 -150)和 R_5 期以前营养液中N浓度20 mg/L， R_5 期以后变为150 mg/L(N20- R_5 -150 mg/L)2个处理，共计9个处理，每处理种30盆。以 ^{15}N 标记 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (购于上海化工研究院， ^{15}N 丰度为10.2%)作为氮源。营养液中除氮素外其他成分采用Hoagland营养液配制(mg/L)： KH_2PO_4 136.0， MgSO_4 240.0， CaCl_2 220.0， $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.03， $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.08， $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.22， $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 4.90， H_3BO_3 2.86，Fe-EDTA将5.57 g $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和7.45 g Na_2EDTA 分别溶解并定容到1 L蒸馏水中，使用时每升营养液加1 mL^[14]。

5月14日播种，播种至出苗(VE期)前每日淋浇1次自来水，每次500 mL。从出苗开始每日淋浇1次配制的营养液，每次500 mL；初花期(R_1)以后每日淋浇2次，每次500 mL；为防止砂培中盐分积累，每隔3 d用清水淋洗1次。

文中相关的生育时期： V_E (出苗)， V_3 (第3片复叶完全展开时)， R_1 (初花期)， R_2 (盛花期)， R_4 (盛荚期)， R_5 (鼓粒始期)， R_6 (鼓粒满期)， R_8 (成熟期)。

1.3 取样和分析

每次取样均选择在晴天上午9:00~10:00。地上部分自子叶痕处取下，根系及根瘤用水冲净，每个处理 R_1 ~ R_6 各时期取4盆， R_8 期取6盆，样品于70℃烘干至恒重，测量地上与地下各部位的干重，粉碎后待分析用。在大豆叶片出现枯黄时，用1.5 m高的透明纱网将盆围起来，收集残叶和叶柄。以每盆为单位计算全株氮素积累量和产量。

植株氮素含量测定：采用凯氏定氮法。有机物中的氮在强热和 CuSO_4 、 K_2SO_4 、浓 H_2SO_4 作用下，消化生成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ，在凯氏定氮器中与碱作用，经蒸馏释放出的 NH_3 收集于 H_3BO_3 溶液中，再用已知浓度的HCl标准溶液滴定，根据HCl消耗的量计算出氮的含量。

^{15}N 丰度测定：采用MAT2251型质谱仪测定。样品首先经凯氏法消化，测定液在微酸性条件下浓缩至N1 mg/mL左右，再在高真空条件下与次溴酸酞反应产生 N_2 ，用质谱仪进行测定。

氮素积累量 = 干物质量 × 氮素含量；

外源氮积累量 = 氮素积累量 × (样品 ^{15}N 丰度/硫酸铵 ^{15}N 丰度)；

根瘤固氮积累量 = 氮素积累量 - 外源氮积累量。

2 结果与分析

2.1 氮素水平对大豆植株氮素积累的影响

氮素供应水平直接影响大豆的氮素营养状况(表1)。在初花期(R_1)以前，随氮素水平增加，植株氮素积累量显著增加，N100 > N50 > N20处理，差异达到显著水平；当氮浓度大于100 mg/L时对氮素积累没有明显促进作用。在 R_1 ~ R_8 期，随氮素水平增加，氮素积累量呈先增加后降低的趋势，N50处理积累量最大，显著大于N20、N100、N150；N100在 R_6 期以前显著高于N20，到 R_8 期N20和N100处理没有显著差异。说明初花期以前提高外源氮水平有利于植株氮素的积累，初花期以后，外源氮水平过高、

表 1 不同生育时期全株氮素积累量($\bar{X} \pm SD$, g/pot)

Table 1 N accumulation in whole plant during the different stages of soybean

处理 Treatment	初花期 (R ₁) Beginning bloom	盛荚期 (R ₄) Full pod	鼓粒始期 (R ₅) Beginning seed	鼓粒满期 (R ₆) Full seed	成熟期 (R ₈) Full maturity
N20	0.455 ± 0.027 cC	1.337 ± 0.033 deCD	1.918 ± 0.091 cCD	2.549 ± 0.104 dD	3.553 ± 0.226 deE
N50	0.555 ± 0.025 bB	1.903 ± 0.057 aA	2.663 ± 0.107 aA	3.537 ± 0.147 aA	4.568 ± 0.205 abAB
N100	0.794 ± 0.055 aA	1.774 ± 0.089 bA	2.158 ± 0.086 bB	3.120 ± 0.133 bB	3.456 ± 0.201 eE
N150	0.756 ± 0.081 aA	1.409 ± 0.080 dC	1.751 ± 0.071 dDE	1.845 ± 0.074 fF	2.097 ± 0.126 fF
N150-V ₃ -20	0.538 ± 0.095 bB	1.290 ± 0.065 eCD	1.752 ± 0.078 dDE	2.881 ± 0.118 cC	4.323 ± 0.235 bcBC
N150-R ₁ -20	—	1.235 ± 0.062 eD	1.483 ± 0.059 eF	2.587 ± 0.106 dD	3.817 ± 0.199 dDE
N150-R ₂ -20	—	1.569 ± 0.063 cB	1.568 ± 0.063 eEF	2.009 ± 0.082 eE	3.462 ± 0.183 deE
N20-R ₄ -150	—	—	2.043 ± 0.086 bcBC	2.883 ± 0.118 cC	4.154 ± 0.172 cCD
N20-R ₅ -150	—	—	—	2.897 ± 0.120 cC	4.778 ± 0.292 aA

注 (Note): V₃-第 3 片复叶完全展开时 Spreading of the 3rd leaf; R₁-盛花期 Full bloom; 不同大、小写字母表示处理间差异达 1% 和 5% 显著水平 Different capital and small letters mean significant among treatments at the 1% and 5% levels, respectively.

过低均不利于植株对氮素的利用。

表 1 还看出,大豆是对氮素非常敏感的作物,不同时期改变营养液中的氮浓度,对大豆植株氮素积累影响很大。从 R₈ 期氮素积累量可以看出,在 VE~V₃、VE~R₁、VE~R₂ 期给予 150 mg/L 的高氮处理,而 V₃~R₈ 期、R₁~R₈ 期、R₂~R₈ 期给予 20 mg/L 的低氮处理时,N150-V₃-20 氮素积累量极显著高于 N20、N150-R₁-20、N150-R₂-20;N150-R₁-20、N150-R₂-20、N20 之间积累量无显著差异。说明在第 3 片复叶完全展开(V₃)期以前给予高氮处理能够增加大豆对氮素的吸收利用,高氮处理的时间继续延长对大豆氮素的积累没有明显的促进作用,甚至降低植株氮的积累。由此可以认为,大豆种肥的施氮量不宜过高,适量施氮使种肥氮的作用能维持到 V₃ 期即可;种肥氮量过大不仅不能达到促进氮素的利用,反而有抑制大豆对氮的积累的可能。

从成熟期(R₈)氮素积累量可以看出,VE~R₄ 期、VE~R₅ 期给予 20 mg/L 的低氮处理,R₄~R₈ 期、R₅~R₈ 期给予 150 mg/L 的高氮处理时,与 N20 相比其氮素积累量极显著增加,其中 N20-R₅-150 显著大于 N20-R₄-150。说明适量的追施氮肥,可以增加大豆植株氮的积累,尤以在鼓粒始期(R₅)追施氮肥,大豆对氮的吸收利用效果最好,这与甘银波等^[13]研究结果相似。可见,进入结荚期以后大豆对氮的需求旺盛,追施氮肥是必要的,能够促进对氮的吸收。

2.2 氮素水平对大豆植株氮素来源的影响

在砂培条件下,大豆氮素来源只有两种,即来自于营养液中的外源氮和根瘤固定的氮。表 2 看出,

随氮素水平增加,植株中外源氮的比例随之增大,根瘤固氮所占比例减小。营养液中氮素浓度从 20 mg/L 逐渐增加至 150 mg/L 时,外源氮所占比例从 15.0%~20.1% 增加到 73.5%~75.2%;根瘤固氮所占比例从 79.9%~85.0% 减小至 24.8%~26.5%。说明当外源氮水平较高时,植株积累的氮主要来自于外源氮,而外源氮水平较低时,植株以根瘤固定的氮作为其主要的氮素来源。随氮浓度增加,植株中外源氮积累量极显著增加,当氮浓度为 100 mg/L 时,外源氮的积累量最大,继续提高氮水平不能增加对外源氮的利用。根瘤固氮积累量在初花期以前随外源氮水平增加呈降低趋势;在初花期以后则表现为 N50 > N20 > N100 > N150 处理,差异达显著水平。说明根瘤生长需要氮,但外源氮的水平直接影响根瘤的固氮能力,过高、过低均不利于根瘤的生长。

不同时期改变营养液中氮浓度对大豆氮素构成影响也很大(表 2 表 3)。从成熟期(R₈)氮素积累量可以看出,在 VE~V₃ 期、VE~R₁、VE~R₂ 期给予 150 mg/L 的高氮处理,而 V₃~R₈ 期、R₁~R₈ 期、R₂~R₈ 期给予 20 mg/L 的低氮处理时,与 N20 处理相比,随高氮处理时间的延长,植株中外源氮所占比例增加,根瘤固氮所占比例降低。在鼓粒始期(R₅)以前随高氮处理时间的延长,外源氮积累量为 N150-R₂-20 > N150-R₁-20 > N150-V₃-20,差异达极显著水平,至成熟期,3 个处理间没有明显差异;而在成熟期,根瘤固氮积累量为 N150-V₃-20 > N20 > N150-R₁-20 > N150-R₂-20,差异达到显著水平;N150-V₃-20 根瘤固氮积累量与 N50 基本相同。说明“启动氮”的作用维持到第 3 片复叶完全展开时(V₃),对

大豆根瘤固氮的积累效果最好；作用时间继续延长不仅对外源氮的吸收起不到促进作用，而且明显抑制大豆根瘤固氮的积累。

当 VE~R₄ 期、VE~R₅ 期给予 20 mg/L 的低氮处理，R₄~R₈ 期、R₅~R₈ 期给予 150 mg/L 的高氮处理时，植株中外源氮比例明显比 N20 处理增加，根瘤固氮所占比例明显减少；在鼓粒满期(R₆)，植株外源氮积累量为 N20-R₄-150 > N20-R₅-150 > N20，差异达极显著水平；至成熟期，N20-R₅-150 极显著大于 N20-R₄-150 处理。说明在 R₄~R₅ 期追施氮肥能够明显增加植株对氮的利用，尤其在鼓粒始期追施氮肥对外源氮的利用效果更佳。在鼓粒满期，根瘤固氮积累量为 N20 > N20-R₅-150 > N20-R₄-150，差异达极显著水平，到成熟期两个处理间根瘤固氮积累量没有明显差异。说明在 R₄~R₅ 期追施氮肥，对根瘤的影响效果相同，即均能够抑制根瘤的固氮作用，但抑制效果没有明显差异。

2.3 氮素水平对大豆产量的影响

表 4 看出，外源氮水平增加，对植株高度有一定的促进作用。N20 处理的株高最小；N20-R₄-150、

N20-R₅-150 处理的株高大于 N20 处理，但低于 N50、N100、N150、N150-V₃-20、N150-R₁-20 和 N150-R₂-20 处理。说明当营养液中氮素浓度为 20 mg/L 时，氮素不足而影响植株的生长，在结荚期以后提高外源氮水平对植株高度影响不大。不同氮素水平对大豆节数没有明显影响，对荚数、粒数、产量影响较大。N50、N20-R₄-150、N20-R₅-150 产量最高，N20、N150-V₃-20 产量次之，N100、N150-R₁-20 和 N150-R₂-20 较低，N150 处理产量最低。在生育前期保持较高氮素水平，分别在第 3 片复叶完全展开时(V₃)、初花期(R₁)、盛花期(R₂)以后降到较低的氮素水平时，随高氮处理的时间延长，产量降低。本试验研究表明，在盛荚期(R₄)或鼓粒始期(R₅)提高外源氮水平，大豆产量显著提高，这与李永孝^[15]认为在结荚末期追施氮肥能显著提高大豆产量的结果相似。很多学者研究认为，高氮条件下抑制了根瘤的生长，降低了生物固氮能力^[16-17]，本试验表明，过低的氮素水平不能满足大豆植株对氮的需求，而在过高的氮水平条件下根瘤固氮量较低，对大豆产量形成不利。

表 4 大豆产量构成因素分析

Table 4 Analysis of yield components at the different N levels

处理 Treatment	株高(cm) Plant height	节数(No./plant) Node number	有效荚数(No./pot) Pod numbers	粒数(No./pot) Kernel number	子粒重(g/pot) Seed weight
N20	44.8 ± 2.2 cC	9.5 ± 0.5 aA	69.5 ± 5.9 bAB	195.4 ± 18.4 bABC	47.9 ± 2.5 bBC
N50	51.1 ± 2.0 abAB	10.2 ± 0.6 aA	78.3 ± 6.8 aA	227.2 ± 20.0 aA	54.1 ± 3.08 aAB
N100	55.2 ± 1.5 aA	10.0 ± 0.4 aA	53.0 ± 4.2 dD	152.5 ± 13.2 cD	38.9 ± 2.4 cD
N150	53.6 ± 2.2 aAB	9.7 ± 0.4 aA	38.8 ± 2.8 eE	113.0 ± 15.4 dE	22.7 ± 2.7 eE
N150-V ₃ -20	51.7 ± 3.1 abAB	9.8 ± 0.4 aA	64.0 ± 3.3 bcBC	192.8 ± 14.9 bABC	47.6 ± 3.3 bBC
N150-R ₁ -20	54.2 ± 2.5 aAB	10.0 ± 0.6 aA	57.8 ± 5.9 cdCD	175.1 ± 17.0 cBCD	41.4 ± 3.5 cCD
N150-R ₂ -20	52.1 ± 3.0 abAB	10.1 ± 0.6 aA	54.0 ± 4.7 dD	158.2 ± 18.0 cCD	37.7 ± 2.4 dD
N20-R ₄ -150	49.1 ± 3.1 bBC	9.5 ± 0.3 aA	68.0 ± 2.2 bB	200.5 ± 9.9 bAB	53.2 ± 0.9 aAB
N20-R ₅ -150	49.0 ± 2.5 bBC	9.5 ± 0.4 aA	68.5 ± 5.2 bB	199.0 ± 16.2 bAB	56.6 ± 3.6 aA

注(Note): 不同大、小写字母表示处理间差异达 1% 和 5% 显著水平 Different capital and small letters mean significant among treatments at the 1% and 5% levels, respectively.

3 讨论

1) 本试验看出，随着外源氮水平的增加，大豆植株氮素积累呈先增加后降低变化趋势，当外源氮水平较低时，因氮供应不足，氮素积累量较少，而过高的氮水平又不利于氮素的积累；在砂培条件下，营养液氮浓度为 50 mg/L 时，植株氮素积累量最大，有利于大豆对氮的吸收利用。甘银波等^[13]研究表明，大豆生长需要一定量的“启动氮”；董钊^[8]认为，以

氮肥做基肥或种肥可以促进对土壤氮和肥料氮的吸收，起到“启动效应”。本试验结果也表明，“启动氮”的这种作用维持到第 3 片复叶完全展开时，对大豆氮的积累效果最好，作用时间继续延长会抑制大豆植株对氮的利用；在种子形成初期补充氮肥的供给能明显增加植株对氮的积累，促进大豆对氮素的吸收利用。

2) 大豆生长发育所需要的氮由根瘤菌供给和从介质中吸收。本试验结果显示，外源氮积累量和根

瘤固氮积累量随外源氮水平增加呈先增加后降低的变化趋势。当氮浓度为 100 mg/L 时,有利于植株对外源氮的吸收;当氮浓度为 50 mg/L 时,有利于根瘤固氮的积累。但是,仅靠根瘤固氮难以满足大豆对氮的需求,高氮水平严重抑制了根瘤固氮的积累,致使大豆氮素积累总量减少。为使根瘤能更多地固定氮,也必须施一定量的“启动氮”。“启动氮”的作用维持到第 3 片复叶完全展开,植株根瘤固氮的积累量最大。在生育后期,随着根瘤逐渐衰老死亡,根瘤固氮能力降低,因此在结荚期和鼓粒期补充氮的供给,可以明显增加植株氮的积累量。

3)从试验看出,随氮素水平的增加,大豆产量呈先增加后降低的变化趋势,氮素营养水平可能与产量呈抛物线的关系。过低的氮素水平因氮素不足,不能满足大豆生长发育的需要,产量较低;而过高的氮素水平又严重抑制了根瘤的固氮作用,也不能获得较高的产量。生育前期氮水平过高,会抑制根瘤的固氮作用,不利于大豆产量的形成;而在前期保持适量的氮素供应,可使根瘤得到充分的生长发育,在结荚期或鼓粒初期再补充氮的供给,可以明显增加大豆的产量。汤树德^[18]认为,必须同时满足大豆一生中根瘤固氮和土壤(肥料)氮的需求才能获得较高的子实产量,本试验通过砂培方法也得出类似结论。因此,与其说氮素的供应是高产大豆的限制因素,不如说协调大豆对共生固氮和外源供氮的最大需求,是提高大豆子粒产量的关键所在。

参 考 文 献:

- [1] 黄建国. 植物营养学[M]. 北京:中国林业出版社,2004. 106-107.
Huang J G. Plant nutrition [M]. Beijing: China Forestry Press, 2004. 106-107.
- [2] Kumar S, Narula A, Abdin M Z *et al.* Enhancement in biomass and berberine concentration by neem cake and nitrogen (urea) and sulphur nutrients in *Tinospora cordifolia* Miers [J]. *Physiol. Mol. Biol. Plants*, 2004, 10: 243-251.
- [3] Zhou X J, Liang Y, Chen H *et al.* Effects of rhizobia inoculation and nitrogen fertilization on photosynthetic physiology of soybean [J]. *Photosynthetica*, 2006, 44(4): 530-535.
- [4] 郭海龙, 马春梅, 董守坤, 等. 春大豆生长中对不同氮源的吸收利用 [J]. *核农学报*, 2008, 22(3): 338-342.
Guo H L, Ma C M, Dong S K *et al.* Absorption and utilization of different nitrogen sources during the growth of soybean plant [J]. *J. Nucl. Agric. Sci.*, 2008, 22(3): 338-342.
- [5] Harper J E. Nitrogen fixation-limitations and potential [C]. Chicago, I L: World Soybean Research Conference VI, August, 1999.
- [6] Unkovich M J, Pate J S. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N₂ fixation by annual legumes [J]. *Field Crops Res.*, 2000, 65: 211-228.
- [7] 王金陵, 杨庆凯, 吴宗璞. 中国东北大豆 [M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社, 1999. 90-91.
Wang J L, Yang Q K, Wu Z P. Soybean in northeast of China [M]. Harbin: Heilongjiang Sciences and Technology Press, 1999. 90-91.
- [8] 董钻. 大豆产量生理 [M]. 北京:中国农业出版社, 2000. 75-102.
Dong Z. The physiology of soybean yield [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 75-102.
- [9] 丁洪, 郭庆元. 氮肥对不同品种大豆氮积累和产量品质的影响 [J]. *土壤通报*, 1995, 26(1): 18-21.
Ding H, Guo Q Y. Effect of nitrogenous fertilizer on yield and N accumulation of different varieties of soybeans [J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 1995, 26(1): 18-21.
- [10] Pantalone V J, Rebeck G J, Buort J W. Phenotypic content of root trait in soybean and applicability to plant breeding [J]. *Crop Sci.*, 1996, 36(2): 456-459.
- [11] Boroomandan P, Khoramivafa M, Haghi Y, Ebrahimi A. The effects of nitrogen starter fertilizer and plant density on yield, yield components and oil and protein content of soybean (*Glycine max* L. Merr) [J]. *Pakistan J. Biol. Sci.*, 2009, 12(4): 378, 382.
- [12] Osborne S L, Riedell W E. Starter nitrogen fertilizer impact on soybean yield and quality in the Northern Great Plains [J]. *Agron. J.*, 2006, 98: 1569-1574.
- [13] 甘银波, 陈静, 邱正明, 等. 不同阶段施用氮肥对大豆氮吸收及固氮的影响 [J]. *中国油料作物学报*, 1996, 18(4): 45-48.
Gan Y B, Chen J, Qiu Z M *et al.* Effects of N fertilizer application at different growth stages on N uptake and N-fixation of soybeans [J]. *Chin. J. oil Crop Sci.*, 1996, 18(4): 45-48.
- [14] Smakman G, Hofstra J J. Energy metabolism of *Plantago lanceolata* as affected by changes in root temperature [J]. *Physiol. Plant*, 1982, 56: 33-37.
- [15] 李永孝, 李佩. 底肥量追肥期对夏大豆产量性状的影响 [J]. *大豆科学*, 1995, 14(2): 119-125.
Li Y X, Li P T. Effects of amount of base fertilizer and stage of top dressing on yield characters in summer soybean [J]. *Soyb. Sci.*, 1995, 14(2): 119-125.
- [16] 谢南缙, 王海英, 张惠君. 高油大豆生产技术 [M]. 北京:中国农业出版社, 2004. 37-54.
Xie F T, Wang H Y, Zhang H J. High-oil soybean production technology [M]. Beijing: China Agricultural Press. 2004. 37-54.
- [17] 甘银波, 陈静, Stulen I. 大豆不同生长阶段施用氮肥对生长、结瘤及产量的影响 [J]. *大豆科学*, 1997, 16(2): 125-130.
Gan Y B, Chen J, Stulen I. Effects of N application at different growth stages on growth nodulation and yield of soybeans [J]. *Soyb. Sci.*, 1997, 16(2): 125-130.
- [18] 汤树德. 秸秆还田原理及其应用 [M]. 北京:北京农业大学出版社, 1993. 108-119.
Tang S D. Principle and returnvng application of straw [M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1993. 108-119.