

不同耕作处理下大豆生物固 N 能力及 对系统 N 素的贡献

谢田玲^{1,2}, 沈禹颖^{1,2,*}, 高崇岳¹, 南志标¹, Murray Unkovich³

(1. 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730000; 2. 干旱与草地生态教育部重点实验室, 兰州 730000;

3. 澳大利亚阿德莱德大学地球环境学院, 澳大利亚南澳州 5371)

摘要: 2002 年至 2003 年在黄土高原研究了 4 个耕作处理, 传统耕作(t)、传统耕作 + 秸秆覆盖(ts)、免耕(nt)和免耕 + 秸秆覆盖(nts)下大豆的生物固 N 百分率(%Ndfa)、固 N 数量及其对春玉米-冬小麦-夏大豆轮作系统中 N 素的贡献。结果表明, 在 t、ts、nt 和 nts 处理下 2002 年的生物固 N 百分率为 17.6%、34.3%、22.4% 和 19.3%, 2003 年则为 58.5%、62.4%、54.9% 和 43.8%, 其中 2003 年的生物固 N 百分率比 2002 年分别高出 69.9%、45.0%、59.3% 和 56.1%, 固 N 数量高出 56.2%、33.8%、49.5% 和 43.1%。大豆生物固 N 百分率、生物固 N 数量与生物量呈正相关关系, 在 ts 处理下显著相关。土壤 NO₃-N 含量和大豆固 N 数量呈负相关, 大豆植株吸 N 量占土壤 NO₃-N 的百分比在 2002 年为: t(88.1) > ts(84.6) > nts(78.7) > nt(63.6), 2003 年为: t(115.5) > ts(104.2) > nts(99.8) > nt(95.8)。2002 年大豆对该轮作系统的 N 素贡献分别为 6.6(t)、11.6(ts)、6.5(nt)和 6.1(nts)kg/hm², 生物固 N 量占总 N 输入量的百分比为 14.6(t)、21.5(ts)、14.9(nt)和 12.9(nts); 2003 年大豆对系统的 N 素贡献分别为 14.9(t)、17.6(ts)、12.9(nt)和 10.7(nts)kg/hm², 生物固 N 量占总 N 输入的百分比为 63.2%(t)、58.5%(nt)、47.7%(ts)和 39.9%(nts)。年际变异造成了大豆生物固 N 的年际差异, 秸秆覆盖 + 耕作因改善水分状况, 而促进了大豆的生物固 N 作用。

关键词: ¹⁵N 自然丰度技术; 生物固 N; N 素贡献; N 平衡; N 亏缺; 大豆

文章编号: 1000-0933(2006)06-1772-09 **中图分类号:** S142+.3, S158, S565.103 **文献标识码:** A

The biological N fixation ability of soybean and its contribution to a maize-winter wheat-soybean rotation system under different tillage treatments

XIE Tian-Ling^{1,2}, SHEN Yu-Ying^{1,2,*}, GAO Chong-Yue¹, NAN Zhi-Biao¹, Murray Unkovich³ (1. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology of MOE, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. Earth and Environmental Sciences, University of Adelaide, SA 5371, Australia). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1772-1780.

Abstract: One major reason legumes are utilized in farming systems is for their ability to maintain the soil nitrogen balance when incorporated into crop rotations. As such legumes can play an important role in both maintaining and improving crop yields. It is therefore important to quantify the total amount of nitrogen fixated through the biological nitrogen fixation (BNF) process used by legumes and to determine how much of this fixated N is available to the following crop. In doing so, this will enable greater precision in terms of appropriate fertilizer application rates and can increase fertilizer use efficiency. In 2002 and 2003, the ¹⁵N natural abundance technique was used to record the percentage of biological nitrogen fixation (%Ndfa) fixated by soybeans and the soybeans N contribution to a spring maize-winter wheat-summer soybean rotation system. The field experiment which was located in

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000018602); 2005 年中澳科技合作特别资金资助项目; 澳大利亚国际农业研究中心资助项目(LWR2 1999/094)

收稿日期: 2005-03-20; **修订日期:** 2006-02-07

作者简介: 谢田玲(1979~), 女, 山东省蓬莱市人, 硕士, 主要从事草地农业系统研究, 现工作单位为西北师范大学。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yy.shen@lzu.edu.cn

Foundation item: The project was supported by National Key Basic Research Special Funding Project of China (No. G2000018602), Special funding for China-Australia corporation project in 2005, (No. ACIAR-LWR 2/1999/094)

Received date: 2005-03-20; **Accepted date:** 2006-02-07

Biography: XIE Tian-Ling, Master, mainly engaged in grassland farming system.

the Gansu Loess Plateau used four tillage treatments. These were: conventional tillage (T), conventional tillage with stubble retention (TS), no-tillage (NT), and no-tillage with stubble retention (NTS). In general the % Ndfa by soybean was higher in 2003 than in 2002, related to 2003 receiving a significantly more rainfall. The % Ndfa by soybean in the TS treatment was significantly higher than in the other three treatments. The TS treatment benefited from a higher N fixing enzyme activity which improved the soybeans BNF ability and as a consequence resulted in a higher yield. A negative relationship between the amount of N fixed by soybean and the amount of $\text{NO}_3\text{-N}$ in the 0-30cm soil profiles was found. A soil $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration of 40 kgN/hm^2 was thought to be the critical value above which BNF activity was reduced. Soybean obtained its N requirements from both soil N and BNF. When there was no BNF activity recorded, N was supplied wholly by soil N, which led to soil N depletion and soil N scarcity. The aboveground biomass of soybeans increased with increases in % Ndfa, however this finding was most evident in the TS treatment. A positive relationship between the amount of N fixed by soybean and its above-ground biomass was also found. In 2002, the treatment effects on the proportion of soybean BNF to total N input ranged from 13 ~ 22%, with the highest proportion recorded under the TS treatment. In 2003, the % Ndfa ranged from 43.8 % ~ 62.4 %, with the amount of fixated N ranging from $10.7 \sim 17.6 \text{ kgN/hm}^2$ and the proportion total N contributed by N fixation ranging from 40 % ~ 63 %.

Key words: ^{15}N Natural Abundance; percentage of biological nitrogen fixation (% Ndfa); amount of N fixed; rotation system; N contribution; N balance; N scarcity; rhizobium; soybean

我国黄土高原每年因水土流失造成的 N 素流失,相当于 N 肥 40 万 t,加上农作物收获带走和多年淋溶,整个生态系统物质循环长期不平衡, N 素输出高于输入,成为土地生产力低下,产量长期低而不稳的原因之一^[1]。研究和实践表明,豆科植物对保证轮作系统的 N 素平衡,提高农作物产量有重要的意义,在紫花苜蓿/禾草混合人工草地中,紫花苜蓿的生物固 N 是供禾草生长所需的 N 源之一^[2,3]。在研究豆科植物生物固 N 技术方法中, ^{15}N 自然丰度法是目前使用最多、公认最好的研究方法之一^[4-12]。固定 N_2 植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值明显低于非固定 N_2 植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值,一般相差 $3 \sim 5\delta^{15}\text{N}$ 。与国外相比,在很长一段时间内,国内稳定性同位素 ^{15}N 的应用多用 ^{15}N 来标记^[13-18]。马昌燧等用 ^{15}N 自然丰度法估计大豆生物固 N 百分率(% Ndfa)的结果表明,不同大豆品种的 N 素自给能力不同^[7]。本文利用 ^{15}N 自然丰度技术测定了春玉米-冬小麦-夏大豆轮作系统中的大豆在不同耕作处理下的固 N 数量,并进一步探讨了系统 N 素循环和平衡的影响,对于确定豆类作物后茬的施 N 量,减少化肥投入,建立可持续农业系统有理论指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验地自然概况

试验地设在兰州大学草地农业科技学院庆阳黄土高原试验站($35^{\circ}39'\text{N}$, $107^{\circ}51'\text{E}$),海拔 1297 m。土壤为黑垆土,机械组成中粉粒含量 70 %^[19]。年均温 $8 \sim 10^{\circ}\text{C}$,平均无霜期为 161 d,年降雨量 480 ~ 660 mm。2002、2003 年 6 ~ 10 月平均月降雨量为 80.7 mm 和 129.9 mm,除 2002 年 6 月降雨量高出 2003 年同月 94.0 mm 以外,其余各月均表现为 2003 年高于 2002 年(表 1)。

1.2 试验材料

研究对象为春玉米-冬小麦-夏大豆轮作系统中播种的大豆(*Glycine max* L.),品种为丰收 12 号,为当地商用品种。轮作序列为 4 月上旬播种玉米,9 月中下旬玉米收获后播种冬小麦,来年 6 月底冬小麦收获后立即播种大豆,大豆于 10 月份收获。为避免年际变化对轮作系统的影响,使 3 种作物在一年内同时出现,试验设计采用重复轮作系统,2002 年与 2003 年的大豆,处在相同轮作序列,来自 2 个重复轮作区。

表 1 试验地点 2002-2003 年 6-10 月降水和多年平均月降水(mm)

Table 1 Monthly precipitation from June to October in year 2002 and 2003 and long term mean at experimental site(mm)

月份 Month	年份 Year		平均 Mean
	2002	2003	
6	129.2	35.2	65.1
7	96.3	146.1	108.7
8	33.9	238.6	101.9
9	98.2	141.6	90.1
10	46.0	88.1	41.6

1.3 耕作处理

共设有 4 个耕作处理,传统耕作(t):收获后和播种前分别耕作一次;传统耕作 + 秸秆覆盖(ts):秸秆覆盖处理用前茬作物小麦秸秆为覆盖物,覆盖量为 3.3 t/hm^2 ;免耕(No-tillage)(nt):收获后和播种前不耕作;免耕 + 秸秆覆盖(nts)。

小区面积为 $4 \text{ m} \times 14 \text{ m} = 56 \text{ m}^2$,随机区组排列,4 次重复。大豆播种施 $63 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$ 作为底肥。行间距 25 cm 。

1.4 取样和测定

1.4.1 生物量的测定 分别于 2002 年 8 月和 2003 年 8 月,样方法测定大豆盛花期生物量,每小区取 3 个 1 m^2 的样方,齐地面剪下,将茎和叶分开,鲜样置于干燥箱中, 85°C 下烘 48 h,测得干重。于 2002 年、2003 年 10 月大豆成熟期,在各小区四周去除边际效应后全区刈割测产,取籽粒和秸秆样品,于 85°C 下烘 48 h,得到干物质产量。

1.4.2 $\delta^{15}\text{N}$ 值的测定 于盛花期在各小区选取发育完全的大豆 5 株,以每株邻近的 1 年生非固 N 植物地锦 (*Euphorbia humifusa*) 为参照植物,配对取样,齐地面剪下。鲜样于 105°C 下杀青 10 min 后,在 85°C 下烘 48 h,全株粉碎,置 4°C 下保存。

用 Finnigan MAT-253 MS 质谱仪测定大豆及其参照植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值。

以下公式求得大豆的田间固 N 量^[20]:

$$\text{生物固 N 百分率}(\% \text{Ndfa}) = \frac{(\delta^{15}\text{N 参照植物} - \delta^{15}\text{N 固 N 植物})}{(\delta^{15}\text{N 参照植物} - \delta^{15}\text{N 砂培})} \times 100$$

1.4.3 植物含 N 量测定 用半微量凯氏定 N 法测定盛花期全株植物含 N 量、籽粒和秸秆含 N 量:

$$\text{植物吸 N 量}(\text{kg/hm}^2) = \text{植株全 N 含量}(\%) \times \text{花期生物量}(\text{kg/hm}^2)$$

1.4.4 土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 测定 于 6 月底大豆播种期和收获期分别用土钻按 $0 \sim 5 \text{ cm}$, $5 \sim 10 \text{ cm}$, $10 \sim 20 \text{ cm}$, $20 \sim 30 \text{ cm}$, $30 \sim 60 \text{ cm}$, $60 \sim 90 \text{ cm}$, $90 \sim 120 \text{ cm}$, $120 \sim 150 \text{ cm}$, $150 \sim 200 \text{ cm}$ 的层次取土样,每个小区重复 5 钻,同层混合成一个样。在 36°C 下烘干,过 2 mm 筛。紫外分光比色法测定土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量。

1.4.5 数据统计与分析方法 数据用 SPSS for Windows (version 12.0) 进行方差分析和相关显著性测验。

2 结果

2.1 不同耕作处理下大豆地上部分生物量

2002 年大豆盛花期的地上生物量 (kg/hm^2) 在 4 个耕作处理下由高到低依次为: $t(1299.0) > nts(1179.8) > ts(1172.3) > nt(1129.6)$; 2003 年则为: $ts(1024.1) > nts(936.8) > t(908.2) > nt(825.5)$, 秸秆覆盖处理下的大豆地上生物量较高。从年际来看,2002 年的大豆地上生物量都高于 2003 年,在 t、nt、nts 和 ts 4 个处理下分别高出: 30.1% 、 26.9% 、 20.6% 和 12.6% (图 1)。

2.2 不同耕作处理下大豆生物固 N 能力

2002 年大豆的生物固 N 百分率 ($\% \text{Ndfa}$) 在 4 个处理下依次表现为: $ts(34.3) > nt(22.4) > nts(19.3) > t(17.6)$, ts 下的生物固 N 百分率显著高于其它 3 个处理,其余 3 个处理间差异不显著; 2003 年各处理下大豆的生物固 N 百分率由高到低依次为: $ts(62.4) > t(58.5) > nt(55.0) > nts(43.8)$, 但处理间无显著差异 ($p >$

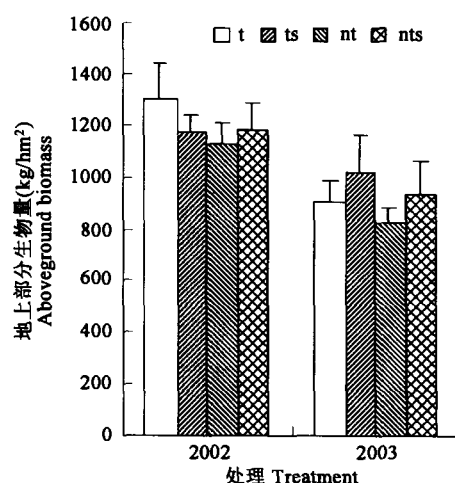


图 1 不同耕作处理下大豆盛花期地上部分生物量

Fig. 1 Aboveground biomass of soybean under different treatments at flowering

0.05), 无论 2002 年还是 2003 年, 均以 ts 处理下的生物固 N 百分率最高。从年际来看, 2003 年的生物固 N 百

分率在 t、nt、nts 和 ts 4 个处理下分别比 2002 年高出:69.9%、59.3%、56.1%和 45.0%(图 2)。

2.3 不同耕作处理下土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量、大豆吸 N 量和生物固 N 数量

2002 年 6 月底大豆播种期 0~30 cm 土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量为 40~50 kg/hm^2 ,大豆盛花期植物吸 N 量占播种期土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的百分比依次为 t(88.1) > ts(84.6) > nts(78.7) > nt(63.6),生物固 N 量则仅占播种期土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 量的 14.2%~29.2%,各处理下大豆生物固 N 量有显著差异($p < 0.05$)。2003 年大豆播种期 0~30 cm 土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量在 21.4~25.3 kg/hm^2 之间,低于 30 kg/hm^2 ,大豆吸 N 数量占播种期土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的百分比依次为 t(115.5) > ts(104.2) > nts(99.8) > nt(95.8),表现了较强的生物固 N 能力,生物固 N 量占播种期土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的 43.3%~70.0%,各处理间无显著差异($p < 0.05$)。从整体来看,大豆的生物固 N 能力和土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈负相关,2002 年的生物固 N 量低于 2003 年(图 3)。

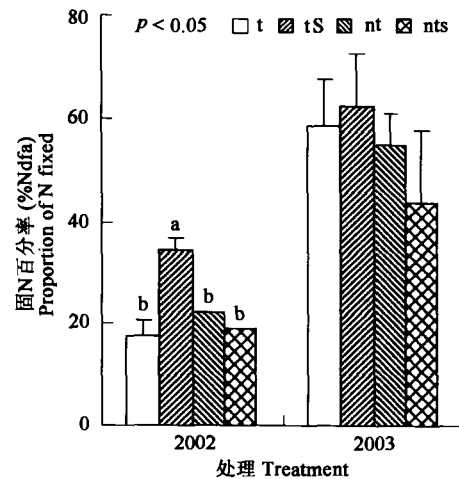


图 2 不同耕作处理下大豆盛花期生物固 N 百分率(% Ndfa)

Fig.2 The proportion of N fixed (% Ndfa) by soybean under different treatments at flowering

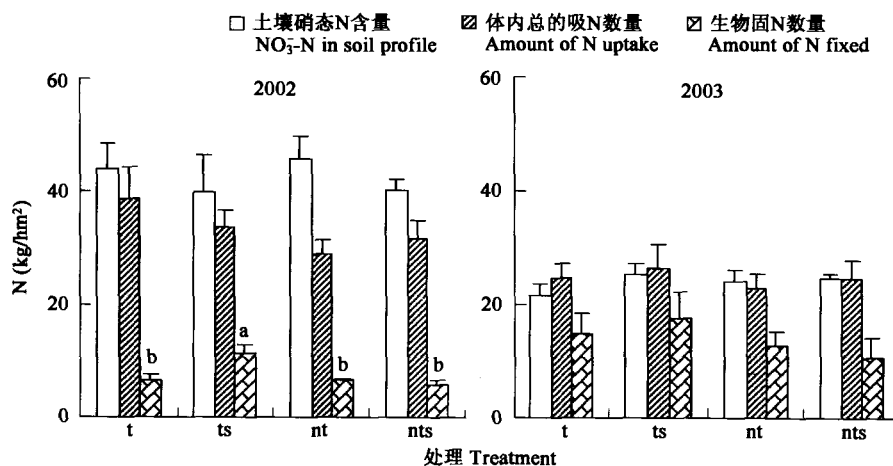


图 3 不同耕作处理下大豆盛花期总的吸 N 数量、生物固 N 数量与播种期土壤硝态 N(0~30cm)含量的关系

Fig.3 The relationship between N uptake and biological N fixation by soybean at flowering and $\text{NO}_3\text{-N}$ in 0~30cm soil profile at sowing under different treatments

2.4 生物固 N 百分率、生物固 N 数量与生物量的关系

4 个处理下大豆生物固 N 百分率随生物量的增加而增加,呈正相关关系,在 ts 处理下更为明显(图 4)。大豆生物固 N 数量同样与生物量呈正相关关系,其中 2003 年呈极显著正相关($p < 0.01$)(图 5)。

2.5 不同耕作处理下大豆生物固 N 对轮作系统 N 素的贡献

系统的 N 输入来自肥料、种子、前茬还田秸秆及大豆生物固 N,播种期和收获期土壤有效 N 含量的差值;N 输出主要分为两部分:被移走的秸秆和籽粒吸收的 N。用 N 输入减去 N 输出,可计算系统 N 平衡状况。发现 2002 年 ts、t、nt 和 nts 处理下,大豆对轮作系统的 N 素贡献分别为 11.6、6.6、6.5 kg/hm^2 和 6.1 kg/hm^2 。其中,ts 处理下大豆生物固 N 量(kg/hm^2)占总 N 输入量(kg/hm^2)的百分比最高,其它依次为 nt、t、nts(表 2)。从总 N 平衡来看,只有 t 处理下 N 略微不平衡,至收获时土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 与播种时土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量差异不大,除了 t 处理下有略微的 N 亏缺以外,其余处理下土壤剩余 N 数量都略高于播种期土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量,没有产生 N 亏缺。

2003 年大豆的生物固 N 数量是 2002 年的 1 倍, 占系统 N 素输入的 40% ~ 63%, 各处理下不等(表 3)。由于土壤起始 N 低于 2002 年水平, 系统中 N 素输入低于输出, 剩余 N 处于较低水平, 对轮作系统中后茬玉米而言, 需要施足够的 N 肥, 以满足生长需要。从耕作处理的差异来看, 2a 内, 土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 总是在两个秸秆覆盖处理下最高, 生物固 N 量也以 ts 处理下为高, 反映出秸秆还田对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 贡献的作用。

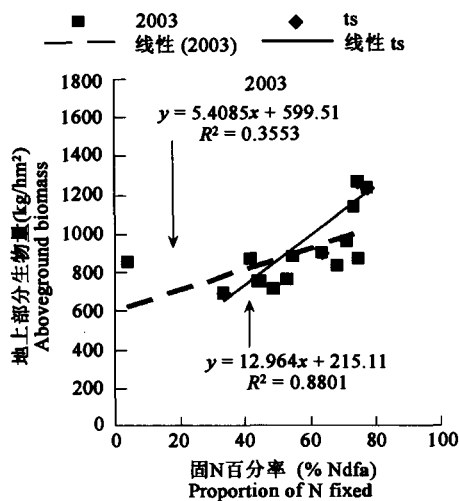


图 4 2003 年及 ts 处理下大豆盛花期生物固 N 率与地上生物量相关性

Fig. 4 The relationship between proportion of N fixed and aboveground biomass of soybean at flowering in 2003

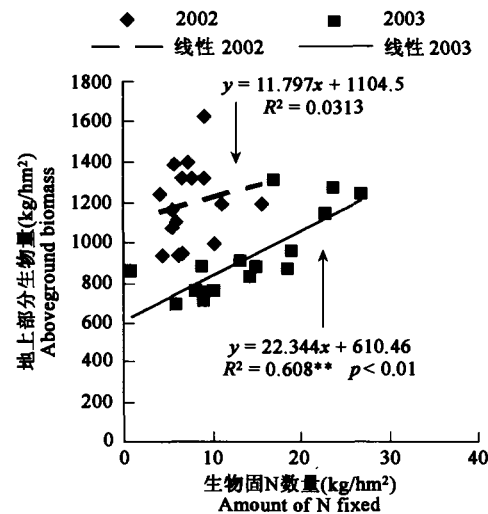


图 5 2002 和 2003 年大豆盛花期生物固 N 数量与地上生物量相关性

Fig. 5 The relationship between amount of N fixed and aboveground biomass of soybean at flowering in 2002 and 2003

表 2 2002 年 4 个耕作处理下大豆对春玉米-冬小麦-夏大豆轮作系统的 N 素贡献 (kg N/hm²)

Table 2 Contributions of N by soybean in rotation of maize-wheat-soybean under different treatments in 2002

N 收支项目 N balance	传统耕作 t	传统耕作 + 秸秆还田 ts	免耕 nt	免耕秸秆 + 还田 nts
播种期土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ Soil $\text{NO}_3\text{-N}$ at sowing	162.3	203.9	204.0	216.3
种子含 N N in sown seed	38.4	34.5	37.2	33.6
还田秸秆含 N N in return stubble	0.0	7.9	0.0	7.7
大豆生物固 N Soybean N fixed	6.6	11.6	6.5	6.1
总的 N 输入 Total N inputs	45.0	54.0	43.7	47.3
固 N 占总 N 输入 % Proportion of N fixed in total N inputs	14.6	21.5	14.9	12.9
大豆秸秆含 N Soybean stubble N	12.8	15.5	13.2	17.6
大豆籽粒含 N Soybean grain N	33.4	25.4	20.7	22.5
总的 N 输出 Total N exports	46.1	40.9	34.0	40.1
N 平衡 N Balance	-1.2	13.1	9.8	7.2
土壤剩余 N Soil residual N	161.1	217.0	213.8	223.5

表 3 2003 年 4 个耕作处理下大豆对春玉米-冬小麦-夏大豆轮作系统的 N 素贡献 (kg N/hm²)

Table 3 Contributions of N by soybean in rotation of maize-wheat-soybean under different treatments in 2003

N 收支项目 N balance	传统耕作 t	传统耕作 + 秸秆还田 ts	免耕 nt	免耕秸秆 + 还田 nts
播种期土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ Soil $\text{NO}_3\text{-N}$ at sowing	55.2	111.3	51.3	81.3
种子含 N N in sown seed	8.7	12.9	9.1	8.7
还田秸秆含 N N in return stubble	0.0	6.4	0.0	7.5
大豆生物固 N Soybean N fixed	14.9	17.6	12.9	10.7
总的 N 输入 Total N inputs	23.7	36.8	22.0	26.8
固 N 占总 N 输入 % Proportion of N fixed in total N inputs	63.2	47.7	58.5	39.9
大豆秸秆含 N Soybean stubble N	11.6	10.0	9.9	10.6
大豆籽粒含 N Soybean grain N	54.0	68.3	43.5	62.1
总的 N 输出 Total N exports	65.6	78.3	53.4	72.8
N 平衡 N Balance	-42.0	-41.5	-31.4	-45.9
土壤剩余 N Soil residual N	13.2	69.8	19.9	35.4

3 讨论

3.1 大豆的生物固 N 能力及其影响因子

已有的文献表明,共生固 N 对土壤敏感,尤其早期干旱胁迫可抑制生物固 N,导致豆科作物 N 积累和产量减少^[21]。王晓巍等也报道了大豆根瘤传导力在缺水后 3d 开始下降,根瘤表面积缩小,固 N 酶活性降低,根瘤菌形成受阻,降低固 N 量,干旱胁迫解除后,根瘤菌可重新恢复功能,但不能恢复到原有水平^[22]。McCallum 等发现季节性降雨分布影响 1 年生苜蓿的固 N^[23];从生物固 N 百分率来看,Peoples 等在澳大利亚 Coleambally 灌溉地区和新南威尔斯麦加利河流域测定 36 个灌溉大豆 (*Glycine max*) 的固 N 百分率,发现其变动在 21% ~ 94% 之间,而在 Coleambally 和麦加利河流域大豆的生物固 N 百分率分别为 52% ~ 73% 和 13% ~ 64%^[24],高于庆阳黄土高原大豆的固 N 百分率,说明土壤水分和大豆品种的差异影响大豆的生物固 N 能力。本研究中,2003 年降水情况较好,各处理下大豆生物固 N 百分率均高于 2002 年。2a 中,均以 ts 处理下生物固 N 百分率最高(图 2),这与 ts 处理下地上部分生物量较高的结果相一致,反映了在炎热的夏季,秸秆覆盖利于固 N 酶保持较高的活性,加强了生物固 N 能力,进而提高了产量。

3.2 大豆生物固 N 能力与土壤 NO₃-N 供应的关系

从大豆生物固 N 的年际变化来看,2003 年各处理下大豆固 N 数量均高于 2002 年,其与土壤 NO₃-N 含量呈负相关,这与土壤 NO₃-N 含量较高会抑制大豆的生物固 N 能力的文献报道相一致^[9,18,22,24~26]。Peoples 等报道谷类作物连作后种植大豆,虽然播种期土壤表层 NO₃-N 含量较低,因大豆具有较高的固 N 百分率,对土壤的固 N 贡献最高,而施 N 肥的地块连续种大豆 2 ~ 3a,大豆固 N 数量低,且土壤 N 平衡状况最差^[24]。从生育阶段来看,大豆幼苗生长早期,固 N 菌不供给可利用 N,施用少量化合态 N 利于单株根瘤数;在其它期间,施 N 肥对共生固 N 有明显的抑制作用,其抑制强度和时间与施肥呈正相关,且施 N 时间越早,生物固 N 被抑制越重,还发现土壤 NO₃-N 浓度高于 0.084%,根瘤菌固 N 即受到抑制^[22,25]。姚允寅等用¹⁵N 自然丰度法、¹⁵N 低丰度示踪法与全 N 差值法评估了苜蓿共生固 N,发现施 N 促进牧草对土壤 N 素的吸收,发生了“起爆 N”效应,但对苜蓿的固 N 活性有一定的抑制作用^[9];施氮 75 kg/hm² 显著降低了巴东红三叶的固 N 活性^[18],而 Gan Yinbo 等在泰国的研究表明在播种时施氮 25 kg N/hm²,营养生长早期或花期施追肥 50 kg N/hm²,大豆生物量增加 11% ~ 16%,豆荚产量提高 44%。其中以 N 肥为种肥时,大豆的固 N 比例最高,84% 生物量氮来自生物固 N,施用追肥使结瘤状况和固 N 数量下降^[26],可见 N 肥对大豆固 N 能力的影响比较复杂。

在 2002 年,ts 处理下土壤 NO₃-N 含量最低,为 39.9 kg/hm²,固 N 数量却显著高于其它处理,为 11.6 kg/hm²,其它几个处理的 NO₃-N 含量均高于 40 kg/hm²,固 N 数量显著低于 ts 处理,在立地条件下,40 kg N/hm² 的土壤 NO₃-N 有可能是抑制大豆生物固 N 的临界值,仍需进一步的研究来支持这一结论。

各处理下,2002、2003 年大豆吸 N 数量占土壤 NO₃-N 的百分比从高到低的顺序为:t > ts > nts > nt,2002 年在 88.1% 至 63.6% 之间,2003 年在 115.5% 至 95.8% 之间。2003 年 t(115.5%)、ts(104.2%) 植物吸 N 量高于土壤 NO₃-N 含量,说明大豆体内吸 N 来自土壤 N 和生物固 N 两部分,如果没有生物固 N 作用,则全部从土壤中吸 N,会造成 N 不平衡和 N 亏缺。

3.3 大豆生物固 N 能力与生物量的关系

大豆生物固 N 百分率(%Ndfa)、固 N 数量均和生物量呈正相关。2003 年大豆固 N 百分率和生物量呈正相关,在 ts 处理下更为明显,这与 ts 处理下的生物固 N 百分率和固 N 数量均最高相一致。大豆生物固 N 数量与生物量也呈正相关,其中 2003 年呈极显著正相关,图 4 和图 5 说明在同样的降水条件下,大豆的生物固 N 能力随产量的提高而提高,应该重视豆科作物的固 N 能力并加以利用。Carlsson 等认为尽管环境条件差异很大,例如土壤 N 肥沃程度和地理位置的不同,豆科植物固 N 数量总与干物质产量显著相关^[27],在加拿大曼尼托巴(Minitoba)也证明紫花苜蓿干物质生产力影响固 N 总数^[2]。

3.4 大豆对春玉米-冬小麦-夏大豆轮作系统的 N 素贡献

2002 年不同处理下大豆对轮作系统的 N 素贡献在 11.6 ~ 6.1 kg/hm² 之间,大豆生物固 N 量(kg/hm²)占总

N 输入量(kg/hm^2)的百分比为 21.5% ~ 12.9%; 而 2003 年大豆对轮作系统的 N 素贡献稍高, 在 17.6 至 10.7 kg/hm^2 之间, 大豆生物固 N 量(kg/hm^2) 占总 N 输入量(kg/hm^2) 的百分比为 63.2% ~ 39.9%, 生物固 N 贡献较大。这也与 2003 年的生物固 N 百分率都高于 2002 年的结果相一致。Peoples 等报道在澳大利亚的 Coleambally 和麦加利河流域, 36 个大豆品种 N 固定的数量为 103 ~ 313 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ 和 44 ~ 238 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ ^[24], 大豆生长期, 由于灌溉得到充足水分, 其 N 素贡献远高于本研究条件下的大豆。在西澳, 羽扇豆在最大生物量期 N 积累达 199 ~ 372 kg/hm^2 , 平均从大气中固定 86% 的 N 素^[4]。在古巴 2 个不同肥力的砂质土壤中, 菽麻地上部分生物固 N 能力相似, 为 40 ~ 80 $\text{kg N}/\text{hm}^2$, 在肥沃土壤上有更多的 N 累积^[5]。因此, 研究一定条件下, 豆科植物生物固 N 能力有实际意义。

在澳大利亚新南威尔士州的研究发现豆科作物对于维护系统的 N 平衡有重要作用, 窄叶羽扇豆-小麦、白花羽扇豆-小麦系统的 N 亏缺比大麦连作系统为低^[28]。本研究中, 2002 年系统 N 平衡状况, 在 -1.2 ~ +13.1 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ 之间, 发现只有 t 处理下 N 略微不平衡, 这与 t 处理吸 N 数量最高的结果相一致。除了 t 处理有略微的 N 亏缺以外, 其余处理下土壤剩余 N 数量都略高于播种期土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量(0 ~ 200 cm), 说明大豆生长基本维持了整个系统的 N 素平衡。

2003 年由于土壤起始 N 低于 2002 年水平, 系统中 N 素输入低于输出, 4 个处理下的土壤剩余 N 数量均低于播种期土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$, 各处理下 N 亏缺在 -45.9 ~ 31.4 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ 之间, 对轮作系统中后茬玉米而言, 需要施足够的 N 肥, 以满足玉米生长需要。从耕作处理的差异来看, 2a 内, 土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 总是在两个秸秆覆盖处理下较高, 生物固 N 量也以 ts 处理下最高(表 2、表 3), 反映出秸秆还田对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 贡献的作用。说明大豆的固 N 潜力在水分良好的情况下可能提高。

在此, 大豆秸秆的 N 不一定完全分解, 存在有效肥、N 素利用率等问题, 在此仅是作为一个完全的系统来看增加的 N 输入, 掌握表观的含 N 量的变化, 为下茬作物合理、有效施 N 提供依据。

3.5 大豆地下部分生物固 N 百分率及固 N 数量的价值

豆科植物地下部固 N 量也不容忽视^[10], 在华中红壤丘陵地区蚕豆、紫云英、苏箭 3 号、紫花苜蓿等几种冬季绿肥作物地下部固定的 N 量占总固 N 量的比例为 11.4% ~ 45.3%。窄叶羽扇豆的共生固 N, 在最大生物量期达到最大值 231 $\text{kg N}/\text{hm}^2$, 其中 13% 来自地下^[4]。田间豌豆地上部固定 N 的数量和整株植物(包括枝条和根)固定 N 的总数量分别为 121 ~ 175 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ 和 181 ~ 262 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ ^[23]。紫花苜蓿/禾草混播, 地上部分全年固 N 数为 40 ~ 118 $\text{kg N}/\text{hm}^2$, 如果包括根的固 N 量, 则为 52 ~ 153 $\text{kg N}/\text{hm}^2$ ^[2]。文献表明, 盆栽条件下, 砂质土壤生长的豆科植物地下部分 N 大致占植物总 N 吸收的 39% ~ 49%^[5]。因目前测定根部固 N 数量在实践中有一定的困难, 在此只测定了大豆地上部分的生物固 N 百分率和固 N 数量, 如果包括根部固氮, 大豆的固 N 能力可能略高。

4 结论

在甘肃庆阳, 2002 年和 2003 年大豆生物固 N 百分率在传统耕作 + 秸秆覆盖(ts)处理下显著高于其它 3 个处理, 2003 年的生物固 N 百分率高于 2002 年。

大豆的生物固 N 能力和土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈负相关, 2002 年大豆吸 N 量占土壤起始 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的百分比依次为 t(88.1) > ts(84.6) > nts(78.7) > nt(63.6), 处理间生物固 N 量有显著差异。2003 年生物固 N 量占土壤起始 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的 43.3% ~ 70.0%。土壤水分条件好的 2003 年生物固 N 量高于干旱的 2002 年。

4 个耕作处理下均表现为大豆生物固 N 百分率随生物量的增加而增加, 大豆生物固 N 数量与生物量呈正相关关系。t、ts、nt 和 nts 处理下, 2002 年大豆对轮作系统的 N 素贡献分别为 6.6、11.6、6.5 kg/hm^2 和 6.1 kg/hm^2 , 大豆生物固 N 量占总 N 输入量百分比以 ts 处理下最高, 2a 内, 土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 总是在两个秸秆覆盖处理下最高, 生物固 N 量也以 ts 处理下为高, 反映出秸秆还田对土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 贡献的作用。

References:

- [1] Ren J Z. Ecological productivity of grassland farming system on the Loess Plateau of China. Proceedings international conference on farming systems on the

- Loess Plateau of China, Gansu : Gansu Science and Technology Press, 1992, 3 ~ 6.
- [2] Chen W, McCaughey W P, Grant C A. Pasture type and fertilization effects on N_2 fixation, N budgets and external energy inputs in western Canada. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36 : 1205 ~ 1212.
- [3] Ledgard S F, Steele K W. Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. *Plant Soil*, 1992, 141 : 137 ~ 153.
- [4] Unkovich M J, Pate J S, Hamblin J. The nitrogen economy of Broadacre Lupin in southwest Australia. *Aust. J. Agric. Res.*, 1994, 45 : 149 ~ 164.
- [5] Margarita G Ramos, Maria Antonieta A. Villatoro, Segundo Urquiaga. *et al.* Quantification of the contribution of biological nitrogen fixation to tropical green manure crops and the residual benefit to a subsequent maize crop using ^{15}N -isotope techniques. *Journal of Biotechnology*, 2001, 91 (2-3) : 105 ~ 115.
- [6] Su B, Han X G, Huang J H. Application of ^{15}N natural abundance method to the research on nitrogen cycling in natural ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (3) : 408 ~ 416.
- [7] Ma C L, Yao Y Y, Chen M, *et al.* Estimation of symbiotic dinitrogen fixation by nodulating plants using variation in natural ^{15}N abundance. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 1989, 3 (2) : 65 ~ 74.
- [8] Chen M, Yao Y Y, Zhang X Z. Estimation of symbiotic N_2 fixation of Mid-Mountain Area using natural ^{15}N abundance. *J. Nucl. Agric. Sci*, 1994, 15 (2) : 77 ~ 80.
- [9] Yao Y Y, Chen M, Ma C L, *et al.* Estimation of symbiotic N_2 fixation of lucern. *J. Nucl. Agric. Sci*, 1993, 14 (2) : 79 ~ 84.
- [10] Sun G Q, Cao Y C, Shi S L, *et al.* Estimation of symbiotic N_2 fixation of winter legume. *Soil*, 1997, (2) : 99 ~ 102.
- [11] Yao Y Y, Chen M, Ma C L, *et al.* Evaluation of natural ^{15}N abundance method in estimating symbiotic dinitrogen fixation by leguminous grasses. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 1991, 5 (3) : 139 ~ 145.
- [12] Du L J, Shi S L, Zhou K Y, *et al.* Estimation of symbiotic N_2 fixation using natural ^{15}N abundance III. Choose reference plants. *Soil*, 1996, (4) : 210 ~ 212.
- [13] Wu K B, Dai J J, Zhao J M, *et al.* Study on the influence of ^{15}N -ureate on the yield and fertilizer utilization efficiency of soybean. *Journal of Northeast Agricultural University*, 1999, 30(4) : 339 ~ 341.
- [14] Yu B S. Application of ^{15}N isotope labelled technique to the research on soybean. *Heilongjiang Agricultural Science*, 1995, (6) : 35 ~ 37.
- [15] Li X M, Dou X T, Wang Y F, *et al.* Screening for high nitrogen fixation abilities of soybean germplasm using isotope labelled technique. *China Oil*, 1997, 19 (1) : 16 ~ 18.
- [16] Dai J J, Cheng Y. Study on the differences of nitrogen nutrition of 3 soybean cultivars by using ^{15}N isotope dilution method. *Journal of Northeast Agricultural University*, 1999, 30 (3) : 225 ~ 229.
- [17] Li Y Z, Redmann R E, Zhu Y C, *et al.* Nitrogen fixation in *Leymus chinensis* Grassland in northeast China. *Acta Agrestia Sinica*, 2002, 10 (3) : 164 ~ 166.
- [18] Yao Y Y, Chen M, Zhang X Z. Symbiotic dinitrogen and fate of urea applied in the pasture of Mid-Mountain Area, Subtropic Zone. *Acta Agrestia Sinica*, 1995, 3(2) : 158 ~ 163.
- [19] Shen Y Y, Nan Z B, Gao C Y, *et al.* Spatial and temporal characteristics of soil water dynamics and crop yield response from a 4-year of lucerne and winter wheat rotation system in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3) : 640 ~ 647.
- [20] Murray Unkovich, John S Pate. Assessing N_2 fixation in annual legumes using ^{15}N natural abundance. *Stable Isotope Techniques in the Study of Biological Processes and Functioning of Ecosystems*, 2001, 103 ~ 118.
- [21] Rachid Serraj, Thomas R. Sinclair, Larry C. Purcell. Symbiotic N_2 fixation response to drought. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50 (331): 143 ~ 155.
- [22] Wang X W, Guo S H, Zhou X J. Environmental factors concerning biological nitrogen fixation by soybean. *Journal of H L J. Hydr. Eng. Col*, 1998, (2) : 62 ~ 64.
- [23] McCallum M H, Peoples M B, Connor D J. Contributions of nitrogen by field pea (*Pisum sativum* L.) in a continuous cropping sequence compared with a lucerne (*Medicago sativa* L.)-based pasture ley in the Victorian Wimmera. *Aust. J. Agric. Res.*, 2000, 51 : 13 ~ 22.
- [24] Peoples M B, Gault R R, Lean B, *et al.* Nitrogen fixation by soybean in commercial irrigated crops of central and southern New South Wales. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(4 ~ 5) : 553 ~ 561.
- [25] Li X D, Wu A R. Nitrogen fixation by oil plants and biology environment. *China Oil*, 1992, (4) : 82 ~ 84.
- [26] Gan Yinbo, Mark B. Peoples, Benjavan Rerkasem. The effect of N fertilizer strategy on N_2 fixation, growth and yield of vegetable soybean. *Field Crops Research*, 1997, 51 (3) : 221 ~ 229.
- [27] Carlsson G, Huss-Danell K. Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field. *Plant and Soil*, 2003, 253 : 353 ~ 372.
- [28] Armstrong E L, Heenan D P, Pate J S, *et al.* Nitrogen benefits of lupins, field pea, and chickpea to wheat production in south-eastern Australia.

Australian Journal of Agricultural Research, 1997, 48 : 39 ~ 47.

参考文献:

- [1] 任继周. 黄土高原草地的生态生产力特征. 黄土高原农业系统国际学术会议论文集, 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1992. 3 ~ 6.
- [6] 苏波, 韩兴国, 黄建辉. ^{15}N 自然丰度法在生态系统氮素循环研究中的应用. 生态学报, 1999, 19(3): 408 ~ 416.
- [7] 马昌燧, 姚允寅, 陈明, 等. 用 ^{15}N 天然丰度法估测结瘤作物的共生固 N_2 量. 核农学报, 1989, 3(2): 65 ~ 74.
- [8] 陈明, 姚允寅, 张希忠. ^{15}N 天然丰度法对中山草地牧草固氮的初评. 核农学通报, 1994, 15(2): 77 ~ 80.
- [9] 姚允寅, 陈明, 马昌燧, 等. 苜蓿共生固氮量的测定: ^{15}N 天然丰度法与 ^{15}N 低丰度示踪法. 核农学通报, 1993, 14(2): 79 ~ 84.
- [10] 孙国庆, 曹亚澄, 施书莲, 等. 冬季豆科固氮植物固氮量的评估. 土壤, 1997, (2): 99 ~ 102.
- [11] 姚允寅, 陈明, 马昌燧, 等. ^{15}N 天然丰度法测量豆科牧草共生固氮的评估. 核农学报, 1991, 5(3): 139 ~ 145.
- [12] 杜丽娟, 施书莲, 周克瑜, 等. 应用 ^{15}N 自然丰度法测定固氮植物的固氮量 III. 参比植物的选择. 土壤, 1996, (4): 210 ~ 212.
- [13] 吴魁斌, 戴建军, 赵久明, 等. 不同施氮水平对大豆产量及氮肥利用率的影响. 东北农业大学学报, 1999, 30(4): 339 ~ 341.
- [14] 于佰双. ^{15}N 示踪技术在大豆研究领域的应用概况. 黑龙江农业科学, 1995, (6): 35 ~ 37.
- [15] 李新民, 宴新田, 王玉峰, 等. ^{15}N 同位素标记筛选高固氮大豆种质的研究. 中国油料, 1997, 19(1): 16 ~ 18.
- [16] 戴建军, 程岩. 应用 ^{15}N 示踪技术对不同品种大豆的三种氮源吸收利用的研究. 东北农业大学学报, 1999, 30(3): 225 ~ 229.
- [17] 李玉中, Redmann R. E., 祝廷成, 等. 羊草草原豆科牧草生物固氮量研究. 草地学报, 2002, 10(3): 164 ~ 166.
- [18] 姚允寅, 陈明, 张希忠. 中山人工草地共生固氮和尿素的去向. 草地学报, 1995, 3(2): 158 ~ 163.
- [19] 沈禹颖, 南志标, 高崇岳, 等. 黄土高原苜蓿-冬小麦轮作系统土壤水分时空动态及产量响应. 生态学报, 2004, 24(3): 640 ~ 647.
- [22] 王晓巍, 郭少华, 周喜君. 影响大豆生物固氮的环境因素. 黑龙江水专学报, 1998, (2): 62 ~ 64.
- [25] 李向东, 吴爱荣. 豆科油料作物根瘤固定氮与生物环境. 中国油料, 1992, (4): 82 ~ 84.