

# 胡麻/大豆间作体系下施氮 对胡麻干物质积累和产量的影响

杨萍<sup>1</sup>, 李杰<sup>2</sup>, 荆斌<sup>1</sup>, 牛俊义<sup>1\*</sup>

(1. 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州, 730070; 2. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃兰州, 730070)

**摘要:**为改进胡麻产量和发展胡麻/大豆间作技术,采用随机区组试验,设单作模式下不施氮(T1)、施氮75kg/hm<sup>2</sup>(T2)、施氮150kg/hm<sup>2</sup>(T3)和间作模式下不施氮(T4)、施氮75kg/hm<sup>2</sup>(T5)、施氮150kg/hm<sup>2</sup>(T6)6个处理,研究了施氮量和种植模式对胡麻干物质积累规律、产量及产量构成因子的影响。结果表明,拟合的胡麻全生育期干物质积累 Logistic 模型均达到极显著相关水平。单作胡麻最大干物质积累速率出现在盛花期,间作种植模式下过量施氮时峰值会转移至子实期。在单作模式下,胡麻总干物质积累量和籽粒干物质积累量均随施氮量的增加而增加,以施氮量为150kg/hm<sup>2</sup>处理(T3)最高;而在间作种植模式下,施氮量为75kg/hm<sup>2</sup>处理(T5)显著高于不施氮处理(T4)和施氮量150kg/hm<sup>2</sup>的处理(T6)。在同一施氮水平下,间作种植模式下各处理开花前贮藏同化物的转运量、花后干物质积累量和花后干物质同化量对籽粒的贡献率均显著高于单作各处理,以施氮量为75kg/hm<sup>2</sup>处理(T5)最高;各处理以T5的产量最高,为3204.80kg/hm<sup>2</sup>,且胡麻与大豆间作中得到的互利效应大于受到的竞争效应。因此,胡麻与大豆间作,即便减量施氮(75kg/hm<sup>2</sup>)仍可获得高产。

**关键词:**胡麻;大豆;间作;施氮量;干物质积累;产量

中图分类号:S565.906 文献标识码:A 文章编号:1007-9084(2015)04-0489-09

## Effects of applied nitrogen on dry matter accumulation and oil flax yield in flax/soybean intercropping system

YANG Ping<sup>1</sup>, LI Jie<sup>2</sup>, YAN Bin<sup>1</sup>, NIU Jun-yi<sup>1\*</sup>

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** To optimized nitrogen management on oil flax/soybean intercropping system, field experiment was carried out to investigate N effect on dry matter accumulation and yield of 2 crops. 3 different N rates (0, 75 and 150kg/hm<sup>2</sup>) were applied on monocropping and intercropping respectively. Results showed that fitted logistic equations of oil flax dry matter accumulation were significant at  $P < 0.01$ . The maximum rate of dry matter accumulation of monocropping oil flax occurred at flowering stage. It moved to fruiting stage under 150kg/hm<sup>2</sup> N on intercropping oil flax. Under monocropping, total dry matter accumulation and grain dry matter accumulation were increased with N application, and reached the highest under 150kg/hm<sup>2</sup> treatment (T3). Under intercropping in contrast, 75kg/hm<sup>2</sup> N application (T5) led to the top dry matter accumulation. Compared to monocropping, the maximum intercropping oil flax yield (as 3204.80kg/hm<sup>2</sup>) was obtained due to higher translocation of dry matter (before anthesis), higher dry matter accumulation (after anthesis), and higher contribution rate of dry matter assimilation to grains. Additionally, mutually beneficial effect was greater than competition effect in oil flax/soybean intercropping system. In conclusion, half N application (75kg/hm<sup>2</sup> N) under flax/soybean intercropping obtained high yield of 3204.80kg/hm<sup>2</sup> flax seeds.

**Key words:** Oil flax; Soybean; Intercropping; Nitrogen application; Dry matter accumulation; Yield

随着人口的不断增长,人均水土资源日趋减少,粮食问题日益突出。如何进一步提高作物单位耕地产出率备受关注<sup>[1]</sup>。间作套种既是我国农业生产中的传统栽培方法,又是一种较为普遍的高产种植方式,它能充分利用地力、光能和热能资源,是作物增产的重要措施之一<sup>[2,3]</sup>。西北地区光资源丰富,热量条件适于发展间作套种,但随着单位耕地生产力的提高,作物对养分的需求也随之增加。作物的高产是以较高的生物量为前提,而生物量累积又是以氮素吸收为基础<sup>[4]</sup>。Togun 等<sup>[5]</sup>研究表明,植物干物质的形成和细胞生长发育所需物质中,氮素营养的贡献率为 40%~50%,氮素营养是调控作物生长及光合生产的重要手段之一<sup>[6-8]</sup>。因此氮肥的合理施用成为农业高产高效和可持续发展的必然要求。豆科/非豆科间作是分布最广的间作模式之一,它通过豆科作物的固氮作用满足作物对氮素的部分需求,促进作物生长和增产,并可高效利用土壤氮素营养<sup>[9,10]</sup>。赵平等<sup>[11]</sup>对蚕豆与小麦间作的研究表明,间作不仅可以减少氮肥的施用而且能够提高作物产量与养分吸收积累;肖靖秀等<sup>[12]</sup>对蚕豆与小麦间作的研究表明,合理的施氮水平可以提高间作作物对病害的防治效果。

胡麻(*Linum usitatissimum* L.)因其具有抗旱、耐瘠、适应性强等特性<sup>[13,14]</sup>,已逐步成为西北地区农民调整种植结构的重要作物<sup>[15,16]</sup>,尤其与大豆等作物的间套种植面积愈来愈大。然而在胡麻/大豆间作模式中,能够满足胡麻生长并获得高产的合理施氮量是多少,尚需研究。因此本研究以当地单作胡麻的经验施氮量 150kg/hm<sup>2</sup> 为最大施氮量,在减量施氮 50% 的基础上,通过田间试验探讨了胡麻/大豆间作对胡麻干物质积累规律及产量的影响,旨在为该区域发展大豆/胡麻间作模式和合理施氮提供

科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在兰州市榆中县良种繁育场(92°13'N, 108°46'E)进行,试验区地处黄土高原丘陵沟壑区,属于温带大陆性半干旱气候区,平均海拔 1 876m,年均气温 6.7℃,年均降水量 382mm,年均蒸发量 1 450mm,无霜期 146d 左右,日照时数 2 563h。试验地前茬为药材作物黄芪,常年精耕细作,土质较好,肥力中等均一。土壤质地为黄绵土,0~20cm 土壤的理化性状如下:有机质 15.56g/kg,全氮 1.20g/kg,全磷 1.2g/kg,全钾 30.98g/kg,碱解氮 59.01mg/kg,速效磷 23.83mg/kg,速效钾 177.67mg/kg,土壤容重 1.13g/cm<sup>3</sup>,电导率 250μs/cm,pH8.03。

### 1.2 材料

胡麻品种为陇亚杂 1 号,大豆(*Glycine max* L.)品种为银豆 2 号。胡麻和大豆播种日期分别为 2014 年 3 月 28 日和 4 月 10 日,收获日期分别为当年 8 月 5 日和 10 月 12 日。供试肥料为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 20%)、硫酸钾(K<sub>2</sub>O 52%)。

### 1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,分别为胡麻单作及胡麻/大豆间作下不施氮、习惯施氮(N,150kg/hm<sup>2</sup>,根据当地胡麻总施氮量确定)和减量施氮(N,75kg/hm<sup>2</sup>),共计 6 个处理(表 1),每处理重复 3 次,合计 18 个小区。小区四周打 50cm 埂间隔。磷肥、钾肥和 2/3 氮肥均作为基肥一次性施入,1/3 氮肥在胡麻现蕾期前追施。磷肥、钾肥的施用量分别为 90.0 kg/hm<sup>2</sup>(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>),52.5kg/hm<sup>2</sup>(K<sub>2</sub>O)。间作与单作种植密度一致,灌溉制度和其他管理同当地常规管理。

表 1 不同种植模式的氮肥施用量

Table 1 N application amount under different planting patterns / (kg/hm<sup>2</sup>)

| 种植模式<br>Planting pattern                     | 施肥处理<br>N treatment | 代码<br>Code | 施氮总量<br>Total N application amount | 底肥<br>Base fertilizer | 追肥<br>Top fertilizer |
|--|---------------------|------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| 胡麻单作<br>Monocropping                         | 不施肥 Zero N          | T1         | 0                                  | 0                     | 0                    |
|  | 减氮 Reduced N        | T2         | 75                                 | 50                    | 25                   |
|  | 习惯施氮 Conventional N | T3         | 150                                | 100                   | 50                   |
| 胡麻/大豆间作<br>Oil flax/soybean<br>intercropping | 不施肥 Zero N          | T4         | 0                                  | 0                     | 0                    |
|  | 减氮 Reduced N        | T5         | 75                                 | 50                    | 25                   |
|  | 习惯施氮 Conventional N | T6         | 150                                | 100                   | 50                   |

### 1.4 不同种植模式的田间结构

单作胡麻:平作,播种密度为 750 万株/hm<sup>2</sup>,行

距 20cm,小区面积为 20m<sup>2</sup>(4.0m×5.0m);胡麻间作大豆:胡麻带宽 80cm,种 4 行,行距 20cm;大豆带

宽 60cm, 种 2 行, 行距 30cm、株距 15cm, 小区面积为  $21\text{m}^2$  ( $4.2\text{m} \times 5.0\text{m}$ ), 一个间作带宽 1.4m (图 1), 每小区间作中 3 个组合带, 其中一个组合带为作物生长期间的取样带, 另 2 个为作物成熟时的计产带。

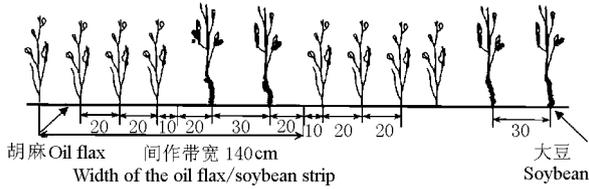


图 1 胡麻/大豆间作中作物分布示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of oil flax/soybean intercropping system

## 1.5 测定项目与方法

1.5.1 株高与茎粗测定 分别在胡麻苗期、现蕾期、盛花期、子实期和成熟期用游标卡尺测定子叶下 1cm 处茎粗, 用直尺量取子叶节到生长点的株高。

1.5.2 干物质测定 分别在胡麻苗期(5月7日)、现蕾期(6月5日)、盛花期(6月20日)、子实期(7月5日)和成熟期(8月5日), 按 5 点采样法在每个小区选取具有代表性且长势基本一致的植株 30 株, 将植株按茎、叶、非籽粒(包括花、花蕾和蒴果皮)、籽粒等器官分开, 于  $105^\circ\text{C}$  恒温箱中杀青 30min, 而后  $80^\circ\text{C}$  烘干至恒重, 测定其干物质重, 结合作物生长的库源关系理论, 计算作物生长率<sup>[17]</sup>、干物质分配比率、营养器官开花前贮藏同化物运转量、营养器官开花前贮藏同化物运转率、开花后同化物输入籽粒量和对籽粒产量的贡献率。计算公式如下<sup>[18]</sup>:

$$\text{作物生长率} = \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

式中:  $W_2 - W_1$  表示一定期间内每平方米土地面积上植株干重的净增长,  $T_2 - T_1$  为两次测定期间的间隔天数。

不同器官干物质分配比率 = 不同器官干物质质量/植株单株总干物质质量  $\times 100\%$

营养器官开花前贮藏同化物运转量 = 开花期干重 - 成熟期干重  $(2)$

营养器官开花前贮藏同化物运转率 = (开花期干重 - 成熟期干重)/开花期干重  $\times 100\%$   $(3)$

开花后同化物输入籽粒量 = 成熟期籽粒干重 - 营养器官开花前贮藏物质运转量  $(4)$

对籽粒产量的贡献率 = 开花前营养器官贮藏物质运转量(或开花后同化物量)/成熟期籽粒干重  $\times 100\%$   $(5)$

1.5.3 干物质增长模型和相关计算公式 采用生

态学研究中经典的 Logistic 模型来模拟胡麻整个生育期内的干物质积累过程, 以作物出苗后的天数  $t$  为自变量, 其实质是一个干物质累积增长曲线, 方程的表达式为

$$Y = \frac{k}{1 + ae^{-bt}} \quad (6)$$

其中:  $k$  为干物质最大积累量上限,  $a$  和  $b$  为常数。解出该方程的一阶导数, 可以得到 Logistic 增长方程的速度函数, 即

$$v(t) = \frac{dy}{dt} = \frac{kabe^{-bt}}{[1 + ae^{-bt}]^2} \quad (7)$$

用来描述胡麻干物质增长的速度, 其函数图像在坐标轴内为单峰曲线。分别对(6)式求 1 阶、2 阶和 3 阶导数, 可得到生物量累积的特征值, 即最快生长时段的起始时间( $t_1$ )、终止时间( $t_2$ )、最大相对生长速率( $V_{\max}$ )及其出现时间( $t_m$ )、快速增长持续时间  $\Delta t$  ( $\Delta t = t_2 - t_1$ )。其中,  $t_1 = \frac{1}{b} \ln \frac{2 + \sqrt{3}}{a}$ ;

$t_2 = \frac{1}{b} \ln \frac{2 - \sqrt{3}}{a}$ ;  $t_m = -\frac{\ln a}{b}$ ;  $V_{\max} = \frac{bk}{4}$ 。

1.5.4 计产 小区单收单打, 晒干后计算产量。

1.5.5 种间关系计算公式 竞争关系评估采用相对关系指数  $RII$  (relative interaction index)<sup>[19]</sup> 衡量间作条件下作物的竞争能力, 该指数对种间竞争试验有较好的统计性能, 计算公式为

$$RII = \frac{Y_{I0} - Y_{S0}}{Y_{I0} + Y_{S0}} \quad (8)$$

式中:  $Y_{I0}$  表示胡麻在间作条件下的产量;  $Y_{S0}$  表示胡麻在单作条件下的产量。当  $RII > 0$  时, 表示胡麻在间作中得到的互利效应大于受到的竞争效应, 当  $RII < 0$  时, 则竞争效应大于互利效应,  $RII = 0$  时, 作物在间作中没有受到影响。

为了比较胡麻和大豆的相对竞争能力, 采用相对竞争能力参数  $RC$  (relative competition ability)<sup>[20]</sup> 进行评估, 即

$$RC = \frac{Y_{I0} \times Y_{IS}}{Y_{S0} \times Y_{SS}} \quad (9)$$

式中:  $Y_{I0}$  和  $Y_{IS}$  分别表示间作胡麻和大豆的产量;  $Y_{S0}$  和  $Y_{SS}$  分别表示单作胡麻和大豆的产量。当  $RC > 1$  时, 表示胡麻的相对竞争能力比大豆强, 反之则大豆的相对竞争能力比胡麻强。

## 1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0 统计软件进行数据处理和差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 胡麻/大豆互作和施氮量对胡麻生长的影响

2.1.1 各处理胡麻株高和茎粗变化 由图2可知,在胡麻整个生育时期,各处理胡麻的株高和茎粗呈现出“快速升高-缓慢升高-趋于平稳”的增长趋势。总体来看,相同种植模式下,株高和茎粗均随施氮量的增加而增大。除苗期外,其他各生育时期的株高和茎粗,间作处理比单作高。现蕾期、盛花期、子实期和成熟期的株高与茎粗在单作模式下以 T3 最高,间作模式下以 T6 最高(图2)。

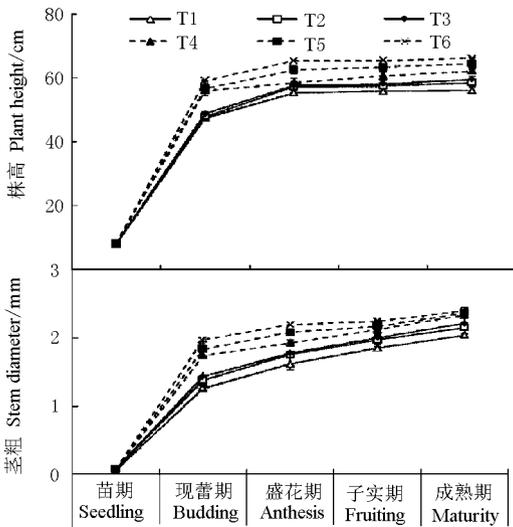


图2 不同处理下胡麻株高和茎粗的动态变化  
Fig.2 Dynamic changes of plant height and stem diameter of oil flax under different treatments

2.1.2 各处理作物生长率变化 由表2可知,苗期-现蕾期(S-B),同一施氮水平下,间作各处理胡麻作物生长率显著高于单作各处理;同一种植模式下,作物生长率随施氮量的增加而增加,单作模式下 T3、T2 比 T1 分别高 4.75 和 3.46  $g/(m^2 \cdot d)$ , T2 与 T3 差异不显著。间作模式下各处理均达到显著水

平,以 T6 最高。现蕾期-盛花期(B-A),同一施氮水平下,间作处理作物生长率显著高于单作处理;单作模式下各处理间差异不显著,间作模式下, T5 比 T4 和 T6 分别高出 10.48 和 9.22  $g/(m^2 \cdot d)$ 。盛花期-子实期(A-F)各处理间差异不显著。子实期-成熟期(F-M),单作模式下 T3 比 T1 和 T2 分别高出 3.84 和 4.85  $g/(m^2 \cdot d)$ , T1 与 T2 差异不显著;间作模式作物生长率各处理间无显著差异。从表2各处理的平均值和变异系数可知,各处理中胡麻作物生长率在 S-B 和 B-A 生长最快, A-F 次之, F-M 生长最慢。间作处理在 S-B、B-A 和 F-M 期间胡麻作物生长率高于单作处理,而 A-F 则单作处理高于间作处理。各处理在 F-M 期间间作作物生长率变化最大, T4 在各生育期作物生长率变化幅度最大。

### 2.2 胡麻/大豆互作和施氮量对胡麻干物质积累与分配的影响

2.2.1 各处理胡麻地上部干物质积累量 种植方式和施氮水平对胡麻地上部干物质积累量有显著影响(图3)。胡麻地上部干物质积累量在不同处理方式下总体均呈直线上升趋势。在同一施氮水平下,除苗期外,其他各生育时期地上部干物质积累量间作处理显著高于单作处理,间作比单作提高 34.72%。苗期和现蕾期,单作和间作模式下胡麻地上部干物质积累量均随施氮量的增加而增大,以 T3 和 T6 最高。从盛花期至成熟期,单作模式下,地上部干物质的积累量以 T3 最大,而间作模式下,以 T5 最大。由此可见,单作种植模式以习惯施氮处理下胡麻地上部干物质积累量最大,而间作种植模式下,习惯施氮处理在胡麻营养生长期干物质积累量高于各处理,当进入生殖生长,减量施氮处理跃居首位,表现出更好的同化物积累趋势。

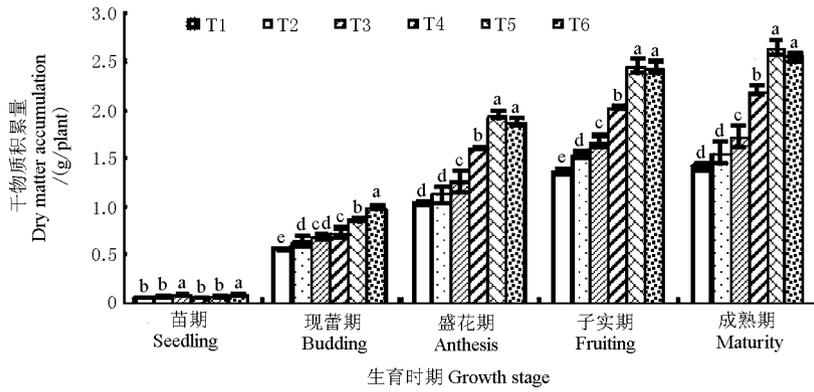
表2 种植模式和施氮水平对胡麻作物生长率的影响

Table 2 Effect of different N applications and planting patterns on crop growth rate of oil flax/[ $g/(m^2 \cdot d)$ ]

| 处理<br>Treatment   | S-B            | B-A            | A-F             | F-M            | 平均值<br>Average/CV |
|-------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------|
| T1                | 25.35 ± 0.16 e | 23.51 ± 1.22 c | 12.03 ± 1.67 a  | 3.59 ± 0.29 c  | 16.12 / 63.42%    |
| T2                | 28.81 ± 2.14 d | 24.30 ± 5.66 c | 16.29 ± 2.27 a  | 2.58 ± 0.75 c  | 18.00 / 63.95%    |
| T3                | 30.10 ± 1.08 d | 28.94 ± 5.28 c | 14.27 ± 10.68 a | 7.43 ± 0.51 b  | 20.19 / 55.21%    |
| T4                | 33.88 ± 2.56 c | 43.41 ± 2.80 b | 9.26 ± 0.15 a   | 10.43 ± 1.00 a | 24.25 / 70.46%    |
| T5                | 40.43 ± 1.41 b | 53.89 ± 3.38 a | 14.90 ± 1.92 a  | 9.93 ± 2.10 a  | 29.79 / 70.16%    |
| T6                | 45.14 ± 0.95 a | 44.67 ± 2.25 b | 12.08 ± 1.83 a  | 10.70 ± 0.72 a | 28.15 / 68.78%    |
| 平均值<br>Average/CV | 33.95 / 22.14% | 36.45 / 34.52% | 13.14 / 19.17%  | 7.44 / 48.14%  | -                 |

注: S-B 为苗期-现蕾期, B-A 为现蕾期-盛花期, A-F 为盛花期-子实期, F-M 为子实期-成熟期。CV 为变异系数。表中数据为 3 次重复的均值 ± SE。同列中不同小写字母表示间作与单作种植方式间在 0.05 水平上差异显著。下同

Note: S-B: from seedling to budding; B-A: from budding to anthesis; A-F: from anthesis to fruiting; F-M: from fruiting to maturity. Values followed by different letters within the column are significantly different at 0.05 level. CV: coefficient of variation. Values in the table are means ± SE (n = 3). Same as below



注/ Note:小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ) Lowercase letters indicate significantly differences at 0.05 level

图3 施氮量和种植模式对胡麻地上部干物质积累量的影响

Fig.3 Effect of different N application and planting patterns on aboveground dry matter accumulation of oil flax

2.2.2 不同处理胡麻干物质积累方程的拟合 胡麻全株总干物质积累量随着生育进程呈现出“快速升高-缓慢升高-平稳升高”的增长趋势(图4)。以出苗后天数为自变量( $t$ )、地上部干物质积累量/g为因变量( $Y$ ),对其进行 Logistic 方程拟合(表3)。结果表明,不同处理干物质积累量与出苗后天数的关系均符合 Logistic 方程,经检验均达到极显著相关水平( $P < 0.01$ ),拟合程度良好。

由表3可见,间作可提高胡麻总生物量,而施氮量对胡麻生物量累积的影响因种植模式的不同而不同。单作模式下,胡麻生物量随施氮量的增加而增大,T3的 $Y_{max}$ 和 $V_{max}$ 最大,分别为1.769 9g/plant和0.042 8g/(plant·d)。间作模式下T5的 $Y_{max}$ 最大,为2.645 5g/plant;T6的 $V_{max}$ 最大,为0.079 1g/(plant·d)。生物量快速累积期的起始时间、终止时间和最大累积速率出现时间各处理有所不同,总

体以单作处理快速生长期持续时间长,但增长速率较低,间作处理快速增长时期持续时间较短,但增长率较大,且最大生长速率出现的时间较晚。

对生物量累积模型进行1阶求导并代入时间变量可得到生物量累积速率。胡麻生物量累积速率的动态变化呈单峰曲线(图4)。峰值出现在盛花期至子实期。苗期,各处理干物质积累速率变化不明显。现蕾期,在同一施氮水平下,各处理积累速率表现为 $T5 > T2, T4 > T1$ ;在单作种植模式下,各处理生物量累积速率随施氮量的增加而增加,在间作种植模式下,T5高于T4和T6。在盛花后期至子实期T6干物质积累速率迅速增大,在子实期和成熟期T6干物质积累速率明显高于其他各处理,说明过量施氮会使干物质积累速率的波峰向子实期转移,表现出贪青晚熟。

表3 不同处理下胡麻生物量累积的 Logistic 模型及其特征值

Table 3 Logistic equations of dry matter accumulation under different treatments

| 处理<br>Treatment | 干物质累积模型方程<br>Dry matter accumulation equation | $Y_{max}$<br>/(g/plant) | $t_1$<br>/d | $t_2$<br>/d | $t_m$<br>/d | $V_{max}$<br>/[g/(plant·d)] | $\Delta t$ /d | 决定系数( $R^2$ )<br>Coefficient of determination | $P$     |
|-----------------|---|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------------|---------------|---|---------|
| T1              | $y = 1.446 1 / (1 + 516.6.8e^{-0.096 6x})$    | 1.446 1                 | 51.1        | 78.3        | 64.7        | 0.034 9                     | 27.3          | 0.998 6                                       | 0.001 4 |
| T2              | $y = 1.603 3 / (1 + 485.9e^{-0.095 9x})$      | 1.603 3                 | 50.8        | 78.3        | 64.5        | 0.038 4                     | 27.5          | 0.995 1                                       | 0.005 0 |
| T3              | $y = 1.769 9 / (1 + 528.3e^{-0.096 7x})$      | 1.769 9                 | 51.2        | 78.5        | 64.8        | 0.042 8                     | 27.2          | 0.998 8                                       | 0.0020  |
| T4              | $y = 2.205 3 / (1 + 1 250.8e^{-0.107 8x})$    | 2.205 3                 | 54.0        | 78.4        | 66.2        | 0.059 4                     | 24.4          | 0.999 4                                       | 0.000 4 |
| T5              | $y = 2.645 5 / (1 + 1 773.1e^{-0.113 2x})$    | 2.645 5                 | 54.4        | 77.7        | 66.1        | 0.074 9                     | 23.3          | 0.999 1                                       | 0.000 3 |
| T6              | $y = 2.527 3 / (1 + 21 440.1e^{-0.125 1x})$   | 2.527 0                 | 69.2        | 90.2        | 79.7        | 0.079 1                     | 21.0          | 0.988 3                                       | 0.011 6 |

注: $Y_{max}$ :最大累积生物量; $t_1$ :快速累积期起始时期; $t_2$ :快速累积期终止时期; $t_m$ :最大累积速率出现时期; $V_{max}$ :最大累积速率; $\Delta t$ :快速累积持续期

Note: $Y_{max}$ :Maximal accumulation biomass;  $t_1$ :Starting date of fleetly accumulation period;  $t_2$ :Terminating date of fleetly accumulation period;  $t_m$ :Time reached maximal rate of accumulation;  $V_{max}$ :Maximal speed of accumulation;  $\Delta t$ :Duration of fleet accumulation

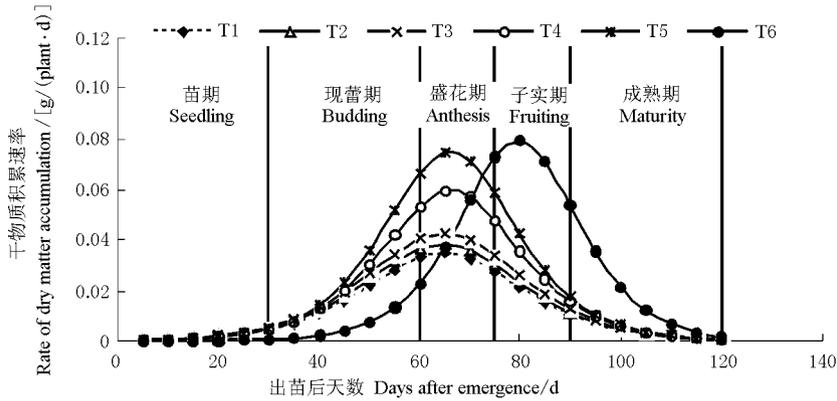


图4 胡麻干物质积累速率变化

Fig. 4 Change of dry matter accumulation rate of oil flax

2.2.3 不同处理下胡麻成熟期干物质在营养器官的分配 由表4可知,同一施氮水平下,与单作处理相比,间作处理成熟期胡麻干物质在籽粒中的分配显著增加了9.59%~23.29%。单作模式下,成熟期胡麻干物质在籽粒中的分配随施氮量的增加而增加,以T3最大,比T1和T2分别增加了7.05%和3.44%;间作模式下,随施氮量的增加呈先增加后降

低的趋势,以T5最大。主茎+分枝+果壳的分配比例的表现规律与干物质在籽粒中的分配顺序相反,以T1最高,T5最低,说明T5降低了干物质在主茎+分枝+果壳的分配比例,提高了籽粒的干物质分配量和比例,有利于产量形成。叶片在成熟期干物质的分配比例因处理有所差异,但分配量间差异不显著。

表4 施氮量和种植模式对胡麻成熟期干物质在不同器官中分配的影响

Table 4 Effect of N application and planting patterns on distribution rate of dry matter during maturing stage

| 处理<br>Treatment | 单株干重<br>Total dry matter<br>weight per plant/g | 籽粒<br>Grain        |               | 叶片<br>Leaf         |               | 主茎+分枝+果壳<br>Stem + Spike axis + Kernel husk |               |
|-----------------|--|--------------------|---------------|--------------------|---------------|---|---------------|
|                 |  | 干重<br>Dry weight/g | 比例<br>Ratio/% | 干重<br>Dry weight/g | 比例<br>Ratio/% | 干重<br>Dry weight/g                          | 比例<br>Ratio/% |
| T1              | 1.42 ± 0.03 d                                  | 0.44 ± 0.09 e      | 31.27         | 0.05 ± 0.01 a      | 5.21          | 0.93 ± 0.10 c                               | 65.34         |
| T2              | 1.56 ± 0.11 d                                  | 0.54 ± 0.07 e      | 34.88         | 0.05 ± 0.01 a      | 5.34          | 0.97 ± 0.19 c                               | 62.02         |
| T3              | 1.73 ± 0.12 c                                  | 0.66 ± 0.05 d      | 38.32         | 0.06 ± 0.02 a      | 5.76          | 1.02 ± 0.08 bc                              | 58.51         |
| T4              | 2.21 ± 0.04 b                                  | 0.90 ± 0.02 c      | 40.86         | 0.05 ± 0.01 a      | 5.15          | 1.26 ± 0.02 a                               | 56.92         |
| T5              | 2.65 ± 0.07 a                                  | 1.54 ± 0.03 a      | 58.17         | 0.05 ± 0.01 a      | 5.83          | 1.06 ± 0.07 bc                              | 40.04         |
| T6              | 2.55 ± 0.04 a                                  | 1.30 ± 0.11 b      | 50.77         | 0.06 ± 0.01 a      | 5.25          | 1.20 ± 0.09 ab                              | 46.89         |

注/Note:表中数据为3个重复的平均值±SE Values are means ± SE (n=3)

表5 施氮量和种植模式对胡麻干物质分配量和开花后积累量的影响

Table 5 Effect of N applications and planting patterns on dry matter distribution and accumulation after anthesis in oil flax

| 处理<br>Treatment | 花前贮藏物质 Dry matter translocation before anthesis |                  |                   | 花后贮藏物质 Dry matter translocation after anthesis |                        |  |
|-----------------|---|------------------|-------------------|--|------------------------|--|
|                 | 转运量<br>TA/(kg/hm <sup>2</sup> )                 | 转运率<br>TR/%      | 转运量对籽粒贡献率<br>CR/% | 积累量<br>AA/(kg/hm <sup>2</sup> )                | 干物质同化量对籽粒的贡献率<br>CRA/% |  |
| T1              | 1 362.90 ± 217.47 c                             | 17.51 ± 2.56 c   | 41.22 ± 3.30 a    | 1 962.10 ± 442.74 e                            | 58.78 ± 3.30 d         |  |
| T2              | 1 550.60 ± 205.28 c                             | 18.46 ± 3.54 bc  | 38.49 ± 3.52 ab   | 2 489.00 ± 417.52 de                           | 61.51 ± 3.52 cd        |  |
| T3              | 1 799.10 ± 193.07 c                             | 19.04 ± 1.93 bc  | 36.11 ± 2.66 bc   | 3 183.40 ± 264.80 d                            | 63.89 ± 2.66 bc        |  |
| T4              | 2 568.00 ± 376.00 b                             | 21.30 ± 3.03 abc | 35.31 ± 1.71 bc   | 4 701.40 ± 632.77 c                            | 64.69 ± 1.71 bc        |  |
| T5              | 3 673.70 ± 283.89 a                             | 25.07 ± 1.78 a   | 29.92 ± 1.94 d    | 8 601.30 ± 347.64 a                            | 70.08 ± 1.94 a         |  |
| T6              | 3 228.40 ± 194.38 a                             | 22.86 ± 1.33 ab  | 32.80 ± 1.55 cd   | 6 646.60 ± 883.42 b                            | 67.20 ± 1.55 ab        |  |

Note: Values are means ± SE (n=3). TA: translocation amount; TR: translocation ratio; CR: contribution (to grain) rate of dry matter translocation; AA: accumulation amount; CRA: contribution rate of dry matter assimilation to grain

### 2.3 不同处理对胡麻干物质运转特性的影响

由表5可以看出,与单作相比,胡麻间作在各施氮处理下的花前贮藏物质转运量和花后贮藏物质积累量显著增加,比单作处理分别高50.24%和61.73%。单作模式下花前贮藏物质转运量和花后贮

藏物质积累量随施氮量的增加而增加,而间作模式下则随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势。花后干物质同化量对籽粒的贡献率,间作比单作提高了5.9%。单作模式下,花后干物质同化量对籽粒的贡献率随施氮量的增加而增加,以T3最高,比T1和

T2 分别提高了 5.11% 和 2.38%; 间作模式下, T5 比 T4 和 T6 分别提高了 5.39% 和 2.88%。花前贮藏物质转运量对籽粒贡献率与花后干物质同化量对籽粒的贡献率相反, 说明间作处理能显著提高花后干物质积累能力, 增加花后干物质在籽粒的分配比例, 是其籽粒形成中同化物积累及高产的生理基础。

#### 2.4 胡麻/大豆互作和施氮量对胡麻籽粒产量及其构成因子的影响

由表 6 可知, 与单作相比, 胡麻间作处理的单株有效果数、果粒数、千粒重和单株产量显著增加。单

表 6 施氮量和种植模式对胡麻产量及其构成因子的影响

Table 6 Effect of nitrogen amount and planting patterns on yield and yield components of oil flax

| 处理<br>Treatment | 单株有效果数<br>Pod number per plant | 果粒数<br>Grain number per pod | 千粒重<br>1 000 - grain weight/g | 单株产量<br>Yield per plant/g | 产量 Yield/(kg/hm <sup>2</sup> ) |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| T1              | 6.32 ± 0.13 d                  | 5.58 ± 0.28 d               | 9.12 ± 0.12 c                 | 0.44 ± 0.09 e             | 2 278.3 ± 143.73 c             |
| T2              | 7.75 ± 0.32 bc                 | 6.04 ± 0.16 c               | 9.34 ± 0.08 b                 | 0.54 ± 0.07 e             | 2 481.7 ± 249.52 bc            |
| T3              | 8.01 ± 0.41 b                  | 6.55 ± 0.09 b               | 9.79 ± 0.22 ab                | 0.66 ± 0.05 d             | 2 721.7 ± 188.17 b             |
| T4              | 7.12 ± 0.28 c                  | 5.97 ± 0.11 cd              | 9.22 ± 0.36 c                 | 0.90 ± 0.02 c             | 2 802.4 ± 125.02 b             |
| T5              | 9.85 ± 0.84 a                  | 7.12 ± 0.47 a               | 10.02 ± 0.28 a                | 1.54 ± 0.03 a             | 3 204.8 ± 241.73 a             |
| T6              | 8.87 ± 0.36b                   | 6.66 ± 0.12 b               | 9.68 ± 0.34 b                 | 1.30 ± 0.11 b             | 3 145.2 ± 85.22 a              |

#### 2.5 胡麻/大豆互作和施氮量对产量以及种间关系的影响

由表 7 可知, 大豆产量以间作模式下 T6 最高, 显著高于 T4, 但与 T5 差异不显著。胡麻/大豆间作体系作物总产量以 T5 最高, 显著高于 T4, 但与 T6 差异不显著。胡麻/大豆间作体系各处理的相对关

作模式下, 单株有效果数、果粒数、千粒重和单株产量随施氮量的增加而增加; 间作模式下, 随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势。进一步分析胡麻产量可知, 间作处理的胡麻产量显著高于单作处理, 比单作处理高 18.25%; 单作模式和间作模式的胡麻产量随施氮量的增加分别呈增加和先增加后降低的趋势。单作模式下, T3 产量最高, 比 T1 和 T2 分别高 16.29% 和 8.82%; 间作模式下, T5 最高, 比 T4 和 T6 分别高 12.56% 和 1.86%。

系指数 RII > 0, 表明胡麻在间作中得到的互利效应大于受到的竞争效应, RII 的大小表现为 T5 > T4 > T6。胡麻/大豆间作体系各处理的相对竞争能力 RC > 1, 表明胡麻的相对竞争能力比大豆强, RC 的大小表现为 T5 > T4 > T6。

表 7 施氮量对间作模式下作物产量以及种间关系的影响

Table 7 Effect of nitrogen applications on yield of crops and interspecific interactions in oil flax/soybean intercropping

| 处理<br>Treatment | 大豆产量<br>Yield of soybean/(kg/hm <sup>2</sup> ) | 胡麻与大豆总产量<br>Total yield of two crops/(kg/hm <sup>2</sup> ) | 相对关系指数<br>RII | 相对竞争能力<br>RC |
|-----------------|--|--|---------------|--------------|
| T4              | 1 294.40 b                                     | 4 096.8 b  | 0.103         | 1.242        |
| T5              | 1 436.10 a                                     | 4 640.9 a  | 0.127         | 1.289        |
| T6              | 1 494.40 a                                     | 4 639.7 a  | 0.072         | 1.194        |

### 3 讨论与结论

作物生长的干物质积累与分配是一个“库源”协调的动态变化过程。干物质的积累与合理分配是提高作物产量的关键<sup>[11,21,22]</sup>。陈艳秋等<sup>[23]</sup>在大豆上的研究表明, 生育前期生长量不足, 干物质积累量过低, 会影响后期灌浆的物质来源, 对产量形成不利。本试验中, 间作模式下胡麻株高和茎粗均表现出优于单作模式, 且随着生育期的延长, 增长趋势逐渐平稳, 说明胡麻在子实期前的生长中心是茎和叶, 而子实期生长中心向籽粒转移。本研究拟合的不同处理下胡麻全生育期干物质积累 Logistic 模型达到极显著相关水平, 说明种植模式与施氮等因子并不改变其生长模型, 但可以影响其特征参数。结果表明, 生物量快速累积期以单作处理快速生长期持续

时间长, 但增长速率较低, 间作处理快速增长时期持续时间较短, 但增长率较大, 且最大生长速率出现的时间较晚, 说明间作模式下胡麻在全生育期均保持了较高的干物质累积速率。本试验中, 同一施氮水平下, 间作种植模式下各处理营养器官开花前贮藏同化物的转运量显著高于单作种植模式, 且间作处理始终保持较高的花后干物质积累量; 花后干物质同化量对籽粒的贡献率也最大, 说明间作处理促进了胡麻对土壤水分、养分的利用, 有利于胡麻开花前干物质的积累和开花后干物质向籽粒的分配。

植株干物质是植株光合产物积累的结果, 其累积量多少是衡量植株生长状况和内部代谢强弱的重要指标<sup>[24]</sup>。植株生长的过程, 实际上是干物质不断累积和在各器官中分配的过程, 分配的多少直接决定着植株的经济产量<sup>[25]</sup>。许多研究结果表明, 施氮

虽能促进作物生长,但过量施氮不利于植物的碳代谢<sup>[26~28]</sup>。本研究结果表明,无论是胡麻总的干物质累积量,还是籽粒干物质累积量,单作各处理在全生育期基本均表现为含氮量为 150kg/hm<sup>2</sup> 的 T3 处理显著高于含氮量为 75kg/hm<sup>2</sup> 的 T2 处理和不施氮肥的 T1 处理。在成熟期,T3 处理总干物质累积量、籽粒干物质累积量较 T1 和 T2 处理分别提高了 17.92%、33% 和 9.8%、18.18%。生育后期干物质累积多,一方面说明光合生产能力强,另一方面说明库的需求大,碳水化合物运输流畅<sup>[29]</sup>。本试验中,间作的胡麻干物质施氮量为 150kg/hm<sup>2</sup> (T6) 时,干物质积累量在盛花期至成熟期低于施氮量为 75kg/hm<sup>2</sup> 的 T5 处理。从干物质积累速率的单峰曲线及出苗率可以看出,过量施氮使幼苗前期生长缓慢,干物质积累速率降低,待幼苗进入盛花后期干物质才快速积累,而且胡麻生长发育后期氮素供应过量,破坏了植株的碳氮平衡<sup>[30]</sup>,影响光合产物的合成及干物质由营养器官向籽粒运输。

资源的有效利用是间套作优势的生物学基础,一是充分利用地上部光热资源,不同的植物具有不同的光适应特性<sup>[31]</sup>,例如高秆和矮秆、禾本科和豆科、窄叶作物和宽叶作物等的间套作,能得到更多的积温和光照,为作物高产创造条件;二是间套作物的根系深浅、疏密不一,根系的密集分布范围不同,能够更好地利用不同土层的养分和水分<sup>[32]</sup>。本实验结果表明,在胡麻的整个生育时期,各单作处理干物质积累量随施氮量的增加而增加;各间作处理在盛花期至成熟期,施氮量为 75kg/hm<sup>2</sup> 处理 (T5) 干物质积累量高于施氮量为 150kg/hm<sup>2</sup> 处理 (T6),且各单作处理的产量也是随施氮量的增加而增加,而 T5 处理的产量最大,达到 3 204.80kg/hm<sup>2</sup>,说明干物质作为产量形成的物质基础,受施氮水平的显著影响,适宜的氮素供应可以显著提高胡麻产量和各生育时期的干物质积累量,但过量施氮量并不增加产量。本研究中,胡麻的竞争优势比较明显,然而过量施氮抑制胡麻的竞争能力,使得胡麻对大豆的相对竞争能力降低,这可能是因为氮投入加速间作胡麻过早地消耗其他土壤资源,使其成为限制因子,抑或是降低了大豆产生的互利效应<sup>[33]</sup>。

综上所述,胡麻/大豆间作比单作胡麻可获得更多的干物质积累量,且花前贮藏同化物的运转量和花后干物质同化量对籽粒的贡献率均优于单作胡麻种植模式。施氮 75kg/hm<sup>2</sup> 处理下,与大豆间作的胡麻籽粒产量高于施氮 150kg/hm<sup>2</sup> 的单作胡麻。因此,大豆间作下施氮 75kg/hm<sup>2</sup> 为合理可行的胡麻/

大豆间作模式,可获得最高的胡麻产量。

#### 参考文献:

- [1] 柴强,杨彩红,黄高宝,等. 交替灌溉对西北绿洲区小麦间作玉米水分利用的影响[J]. 作物学报,2011,37(9):1 623 - 1 630.
- [2] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. Field Crops Res, 2001, 71: 123 - 137.
- [3] Willey R W. Intercropping - its importance and research needs: II. Agronomy and research approaches[J]. Field Crops Abstr, 1979, 32: 73 - 85.
- [4] 孟亚利,曹卫星,柳新伟,等. 水稻地上部干物质分配动态模拟的初步研究[J]. 作物学报,2004,30(4):376 - 381.
- [5] Togun A O, Akanbi W B, Dris R. Influence of compost and nitrogen fertilizer on growth, nutrient uptake and fruit yield of tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. J Crop Res, 2003, 98: 40 - 56.
- [6] Akanbi W B, Togun O A, Olaniran J O, et al. Physico-chemical properties of eggplant (*Solanum melongena* L.) fruit in response to nitrogen fertilizer and fruit size [J]. Agr J, 2007, 2: 140 - 148.
- [7] Aminifard M H, Aroiee H, Fatemi H, et al. Performance of eggplant (*Solanum melongena* L.) and sweet pepper (*Capsicum annum* L.) in intercropping system under different rates of nitrogen [J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2010, 51(5): 367 - 372.
- [8] Read S M, Northcote D H. Minimization of variation in the response to different protein of the Coomassie Blue G dye-binding assay for protein [J]. Analytical Biochemistry, 1981, 116: 53 - 64.
- [9] 肖焱波,段宗颜,金航,等. 小麦/蚕豆间作体系中的氮节约及产量优势[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(2):267 - 271.
- [10] 刘广才,李隆,黄高宝. 大麦/玉米间作优势及地上部和地下部因素的相对贡献研究[J]. 中国农业科学,2005,38(9):1 787 - 1 795.
- [11] 赵平,郑毅,汤利,等. 小麦蚕豆间作施氮对小麦氮素吸收、累积的影响[J]. 中国生态农业学报,2010,18(4):1 - 6.
- [12] 肖靖秀,周桂凤,汤利,等. 小麦/蚕豆间作条件下小麦的氮、钾营养对小麦白粉病的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(4):517 - 522.
- [13] 魏景云,高炳德,索全义,等. 旱地油用亚麻优化施肥的研究[J]. 中国油料作物学报,1998,20(4):79 - 83.
- [14] 闫志利,郭丽琢,方子森,等. 有机肥对胡麻干物质积

- 累、分配及产量的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 988 - 995.
- [15] 谢亚萍, 安惠惠, 牛俊义, 等. 氮磷对油用亚麻茎叶中生理指标及产量构成因子的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(4): 476 - 482.
- [16] 谢亚萍, 吴 兵, 牛俊义, 等. 施氮量对旱地胡麻养分积累、转运及氮素利用率的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(3): 357 - 362.
- [17] 徐 婷, 雍太文, 刘文钰, 等. 播期和密度对玉米 - 大豆套作模式下大豆植株、干物质积累及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(5): 593 - 601.
- [18] 姜 东, 谢祝捷, 曹卫星, 等. 花后干旱和渍水对冬小麦光合特性和物质运转的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(2): 175 - 182.
- [19] 王秋杰, 曹一平, 张福锁. 间套作研究中的统计分析方法[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 176 - 182.
- [20] Armas C, Ordiales R, Pugnaire F I. Measuring plant interactions: a new comparative index[J]. Ecology, 2004, 85: 2 682 - 2 686.
- [21] 杜明伟, 罗宏海, 张亚黎, 等. 新疆超高产杂交棉的光合生产特征研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 1 952 - 1 962.
- [22] 孔丽红, 赵玉路, 周富平. 简述小麦干物质积累运转与高产的关系[J]. 山西农业科学, 2007, 35(8): 6 - 8.
- [23] 陈艳秋, 宋书宏, 张立军, 等. 夏播菜用大豆生长动态及干物质积累分配的研究[J]. 大豆科学, 2009, 28(3): 468 - 471.
- [24] 陈波浪, 吴海华, 曹公利, 等. 不同肥力水平下立架栽培甜瓜干物质累积和氮、磷、钾养分吸收特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 142 - 149.
- [25] 路海东, 薛吉全, 马国胜, 等. 不同基因型玉米品种源库调节对籽粒产量形成的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(9): 9 - 13.
- [26] Hisatmi H, Yoshinori Y, Yoshihito S, et al. Variations in nitrogen uptake and nitrate - nitrogen concentration among sorghum groups[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2000, 46(1): 97 - 104.
- [27] Isabel S, Vieira E P, Vasconcelos A A. Nitrate accumulation, yield and leaf quality of turnip greens in response to nitrogen fertilization[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 51: 249 - 258.
- [28] 李春燕, 封超年, 张 容, 等. 密度、氮素对优质弱筋小麦宁麦 9 号旗叶早衰的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(5): 60 - 64.
- [29] 戴明宏, 赵久然, 杨国航, 等. 不同生态区和不同品种玉米的源库关系及碳氮代谢[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1 585 - 1 595.
- [30] 刘占军, 谢佳贵, 张 宽, 等. 不同氮肥管理对吉林春玉米生长发育和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 38 - 47.
- [31] 张力文, 钟国成, 张 力, 等. 3 种鼠尾草属植物光合作用 - 光响应特性研究[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 70 - 76.
- [32] 王文秀, 成马丽, 聂宗顺, 等. 毕节地区马铃薯不同间套作栽培技术模式[J]. 贵州农业科学, 2003, 31(3): 50 - 51.
- [33] Tilman D. The resource - ratio hypothesis of plant succession[J]. American Naturalist, 1985, 125: 827 - 852.

(责任编辑: 郭学兰)