

西北小麦与豆科绿肥间作体系箭筈豌豆和毛叶苕子 生物固氮效率及氮素转移特性

刘蕊¹, 常单娜^{2†}, 高嵩涓³, 周国朋², 韩梅¹, 张久东⁴, 曹卫东^{2*}, 孙小凤^{1*}

(1 青海大学农林科学院土壤肥料研究所, 青海西宁 810016; 2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081; 3 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095; 4 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃兰州 730030)

摘要:【目的】箭筈豌豆、毛叶苕子与春小麦间作是西北地区推广的新型种植制度。利用¹⁵N 自然丰度法, 研究小麦间作对该系统中豆科绿肥的生物固氮量及其向小麦的氮素转移量, 以期为该系统养分管理提供科学依据。

【方法】在青海西宁和甘肃武威两地分别进行盆栽试验, 供试绿肥包括箭筈豌豆和毛叶苕子, 设置小麦单作、绿肥单作、小麦||绿肥间作等共 5 个处理, 所有处理不施用氮肥, 利用¹⁵N 自然丰度技术, 分析箭筈豌豆、毛叶苕子的生物固氮量及其向小麦的氮素转移量, 调查了不同种植模式下小麦和绿肥作物的生物量, 分析了影响绿肥生物固氮的因素。【结果】与单作相比, 间作处理明显降低两地小麦和豆科绿肥的地上部干物质质量, 但间作系统中地上部干物质质量土地当量比均大于 1。间作后, 小麦和箭筈豌豆、毛叶苕子的氮素积累量显著下降(西宁小麦除外), 但绿肥单作、小麦||绿肥间作模式下总氮素积累量均明显高于小麦单作。与单作相比, 间作豆科绿肥的生物固氮效率无明显改变, 但固氮量显著降低(武威毛叶苕子除外), 其中, 西宁、武威两地间作箭筈豌豆的生物固氮量(0.24、0.48 g/pot)较单作(0.88、0.78 g/pot)分别显著降低了 82.1% 和 38.5%, 西宁间作毛叶苕子的生物固氮量(0.38 g/pot)较单作(0.81 g/pot)显著降低了 51.2%。西宁毛叶苕子的生物固氮效率和生物固氮量均显著高于武威; 两地箭筈豌豆的生物固氮效率差异不大, 间作下的生物固氮量在武威较高。间作条件下, 两种豆科绿肥生物固定的氮素均可向小麦转移, 西宁、武威两地箭筈豌豆氮素转移量分别为 0.13、0.19 g/pot, 分别占间作小麦吸氮量的 31.6% 和 24.7%; 毛叶苕子的氮素转移量分别为 0.09、0.06 g/pot, 分别占间作小麦吸氮量的 23.8% 和 11.4%。路径分析结果表明, 地上部干物质质量是影响生物固氮量和氮素转移量的最主要因素。

【结论】在不施氮肥条件下, 间作小麦对豆科绿肥生物固氮效率无明显影响, 但显著降低豆科绿肥的地上部生物量, 进而降低总的生物固氮量。间作春小麦吸氮量的 11.4%~31.6% 来自于豆科绿肥, 箭筈豌豆向小麦的氮素转移能力强于毛叶苕子。品种和生长环境都会影响豆科绿肥的总生物固氮量, 因此, 还需进一步研究与小麦间作的豆科绿肥的种类和品种, 以提高间作绿肥对小麦的氮素转移效率。

关键词: 绿肥; 春小麦; 间作; ¹⁵N; 生物固氮效率; 氮素转移

Nitrogen fixation and transfer efficiency of common vetch and hairy vetch in wheat-vetch intercropping system in northwest China

LIU Rui¹, CHANG Dan-na^{2†}, GAO Song-juan³, ZHOU Guo-peng², HAN Mei¹, ZHANG Jiu-dong⁴,
CAO Wei-dong^{2*}, SUN Xiao-feng^{1*}

(1 Institute of Soil and Fertilizer, Qinghai Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 3 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China; 4 Soil and Fertilizer and Water-saving Agriculture Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730030, China)

收稿日期: 2020-08-11 接受日期: 2020-11-29

基金项目: 国家绿肥产业技术体系(CARS-22); 中国农业科学院科技创新工程; 国家作物种质资源库绿肥分库(NCGRC-2020-19); 农业农村部绿肥种质资源的收集、鉴定、编目、繁种与入库保存项目(19200393); 青海省农业科学院基金项目(2019-NKY-06)。

联系方式: 刘蕊 E-mail: 1121937568@qq.com; †常单娜为共同第一作者 E-mail: 18638562818@126.com

* 通信作者 曹卫东 Tel: 010-82109622, E-mail: caoweidong@caas.cn; 孙小凤 Tel: 0971-5311177, E-mail: 610193056@qq.com

Abstract: [Objectives] Intercropping wheat with common vetch or hairy vetch is a new crop production system in northwest China. To provide theoretical base for the nutrient management of this intercropping system, we studied the effect of N fixation and N transfer efficiency of two legumes (common vetch and hairy vetch) on wheat. **[Methods]** Identical pot experiments were conducted in two sites: Xining and Wuwei in Qinghai and Gansu Provinces of China, respectively. The treatments in the experiments included wheat monoculture (WC); common vetch monoculture (MC); hairy vetch monoculture (MH); wheat and common vetch intercropping (IWC); and wheat and hairy vetch intercropping (IWH). We did not apply N fertilizer in all the treatments. ^{15}N natural abundance method was used to analyze the amount of N from biological fixation and the amount transferred to wheat. **[Results]** The aboveground dry biomass of wheat and the two legumes in intercropping treatments were significantly lower than their biomass in monoculture treatments. Similarly, the individual N accumulation of the two legumes and wheat in intercropping treatments were significantly lower than their N accumulation in monoculture treatments. The total N accumulation in legume monoculture (MH and MC) and wheat-legume intercropping treatments (IWC and IWH) were higher than that of WC. The amount of N fixed by common vetch in IWC treatment in the two sites (Xining: 0.24 g/pot and Wuwei: 0.48 g/pot) were lower than that fixed in MC treatment (Xining: 0.88 g/pot and Wuwei: 0.78 g/pot). The amount of N fixed by hairy vetch in IWH (0.38 g/pot) was lower than that fixed in MH treatment (0.81 g/pot) in Xining, while those of Wuwei were similar. Both the amount of N fixed by hairy vetch and N transferred to wheat in Xining were significantly higher than those in Wuwei, whereas both N fixed by common vetch and N transferred to wheat were higher in Wuwei than Xining. The amount of N transferred from N fixation to wheat under IWC (Xining: 0.13 g/pot and Wuwei: 0.19 g/pot) accounted for 31.6% and 24.7% of the total N uptake by wheat in IWC treatment in Xining and Wuwei, respectively. The N transferred to wheat under IWH (Xining: 0.09 g/pot and Wuwei: 0.06 g/pot) accounted for 23.8% and 11.4% of the total N uptake by wheat in IWH treatment in Xining and Wuwei, respectively. Path analysis showed that shoot dry biomass was the most important factor affecting N fixation and N transfer from legumes to wheat. **[Conclusions]** Overall, intercropping decreases the aboveground biomass of legumes and amount of fixed N. Our results also suggest that cultivar and growing environment affect N fixation of the two legumes. About 11.4%–31.6% of the N uptake by wheat is from leguminous N fixation, and the N transfer ability of common vetch is generally higher than that of hairy vetch. Therefore, further study is needed to identify the best techniques for efficient intercropping of wheat and vetch legumes.

Key words: green manure; spring wheat; intercropping; ^{15}N ; biological N fixation; N transfer

土壤含氮量是限制作物生长的主要因素之一^[1], 对维持作物高产十分重要^[2]。合理施用氮肥是作物生产中获得较高目标产量的关键措施, 但我国氮肥有效率为 50%~60%^[3], 利用率仅 30%~35%^[4], 且过量施用氮肥引起一系列环境问题^[5]。禾||豆间作系统中, 豆科作物能够与根瘤菌共生固氮, 减少化学氮肥的施用, 被认为是可持续发展农业的重要模式之一。禾||豆间作有利于作物对氮素的合理利用, 降低作物对土壤氮素的需求。一方面豆科作物可以向与其间作的禾本科作物转移一定量的氮素, 另一方面禾本科作物对土壤氮素竞争能提高豆科作物的生物固氮效率^[6]。然而, 不同禾||豆间作模式对豆科作物生物固氮的影响不同^[7-8], 豆科作物向禾本科氮素转

移量也存在很大差异^[9-10]。

^{15}N 自然丰度技术近年来被逐渐应用于生物固氮研究, 在探索间作系统中豆科作物的生物固氮特性及其氮素迁移方面发挥了重要作用^[5, 11]。相关研究主要集中在以收获籽粒为目标的豆类作物上^[12-13]。西北地区传统的禾||豆间作模式是玉米、小麦间作大豆, 这种传统的间作模式存在耗水量高、地力耗竭等问题^[14-15]。近年来, 西北地区开始探索玉米、小麦间作豆科绿肥等新型间作模式, 有关模式利用箭筈豌豆 (*Vicia sativa* L.)、毛叶苕子 (*Vicia villosa* Roth) 等凉爽型绿肥作物早生、速发的特点, 以供肥培肥、绿色生产为主要目的。箭筈豌豆、毛叶苕子在西北地区较为常见, 能够替代部分氮肥、增加禾本科作物产

量、提高土壤肥力^[16-17]，但其与小麦等间作时的生物固氮特性如何、间作条件下小麦对豆科绿肥生物固定氮素的利用情况等鲜有报道。为此，本研究利用¹⁵N自然丰度技术，通过在中国西北两省设置盆栽试验，探究间作下箭筈豌豆、毛叶苕子的生物固氮特性，调查小麦利用生物固定氮素的能力，以期阐明在不施用氮肥条件下，间作系统中豆科绿肥的固氮及氮素转移能力，为充分挖掘豆科作物固氮潜力，评价间作体系中豆科绿肥对小麦氮营养的贡献，以及为西北地区小麦豆科绿肥间作模式的建立提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于2019年在青海省西宁市和甘肃省武威市进行。西宁(36°62'N, 101°77'E)海拔2300 m, 年均气温5.9℃、降水量368 mm、蒸发量1730 mm, 土壤类型为栗钙土。武威(37°43'N、102°35'E)海拔1504 m, 年均气温7.8℃, 年均降水量222 mm、蒸发量2021 mm, 土壤类型为灌漠土。试验土壤来自农田耕作层(0—20 cm), 采集后经风干、去杂、过筛(5 mm)后备用。两地土壤基础性状见表1。

小麦与绿肥品种为两地主栽品种, 西宁地区供试小麦品种为‘青春38号’, 箭筈豌豆品种为‘青牧3333’; 武威地区供试小麦品种为‘宁春58号’, 箭筈豌豆品种为‘陇箭2号’, 两地毛叶苕子品种均为‘土库曼毛苕’。

1.2 试验设计

采用盆栽试验, 设小麦单作(MW)、箭筈豌豆单作(MC)、毛叶苕子单作(MH)、小麦||箭筈豌豆间作(IWC)和小麦||毛叶苕子(IWH)间作, 共5处理, 每处理5次重复, 完全随机排列。

盆大小为48 cm × 32 cm × 16 cm, 每盆装干土20 kg。各处理均不施氮肥, 西宁、武威两地春小麦田间常规施磷量分别为P₂O₅ 112.5和150 kg/hm², 施钾量均为K₂O 75 kg/hm²。盆栽施肥量在此基础上加

倍(耕层土重约2250 t/hm²), 西宁所有处理每盆施用含P₂O₅ 12%的过磷酸钙16.7 g, 武威所有处理每盆施用含P₂O₅ 43%的重过磷酸钙6.2 g, 两地各处理每盆均施用含K₂O 50%的氯化钾2.7 g。于2019年4月15日播种, 播种方式如图1所示。本试验中每穴种植10粒小麦种子和6粒绿肥种子, 出苗后小麦定植5株, 绿肥植物定植3株, 实际生产中春小麦田间种植密度约为450 × 10⁴株/hm²。

1.3 样品采集与指标测定

取样时间于绿肥盛花期(西宁, 2019年7月3日; 武威, 2019年6月29日), 小麦灌浆前期, 采集地上部植株, 105℃杀青30 min, 65℃烘干至恒重。使用球磨机研磨用于测定¹⁵N丰度及全氮含量。同时采集土样, 分取部分鲜土用于测定无机氮含量, 剩余土样自然风干、过筛后用于测定土壤其他指标。

用质谱仪(DELTAplus XP, Thermo Finnigan Electron Corporation, 德国)测定植株¹⁵N丰度, 用元素分析仪(Elementar Analysensysteme GmbH, 德国)测定植株全氮含量。采用电位法测定土壤pH(水土比2.5:1)。重铬酸钾-外加热法测定土壤有机质(soil organic matter, SOM)含量, 凯氏定氮法测定土壤全氮含量。将新鲜土样按土水比1:5加入2 mol/L KCl溶液, 浸提30 min后, 通过流动分析仪(SEAI AutoAnalyzer3, 德国)测定土壤无机氮(inorganic nitrogen, N_{min})含量。用0.5 mol/L NaHCO₃提取—钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量。用1 mol/L NH₄Ac浸提—火焰光度法测定土壤速效钾含量^[18]。

1.4 计算与分析

1.4.1 地上部干物质量 土地当量比(LER)计算公式:

$$LER = \frac{Y_{IWL-W}}{Y_{MW}} + \frac{Y_{IWL-L}}{Y_{ML}}$$

式中: Y_{IWL-W}和Y_{IWL-L}分别代表间作的小麦、豆科绿肥的地上部干物质量, Y_{MW}和Y_{ML}分别代表单作小麦、单作豆科绿肥的地上部干物质量。当LER > 1时表明间作相比于单作地上部干物质量具有优势,

表1 供试土壤基础化学性状

Table 1 Basic chemical properties of experimental soils

试验地点 Experimental site	pH	有机质(g/kg) SOM	全氮(g/kg) Total N	无机氮(mg/kg) N _{min}	有效磷(mg/kg) Available P	速效钾(mg/kg) Available K
西宁 Xining	8.13	21.95	0.81	9.40	23.70	140.00
武威 Wuwei	7.84	22.46	1.19	13.60	27.90	121.20

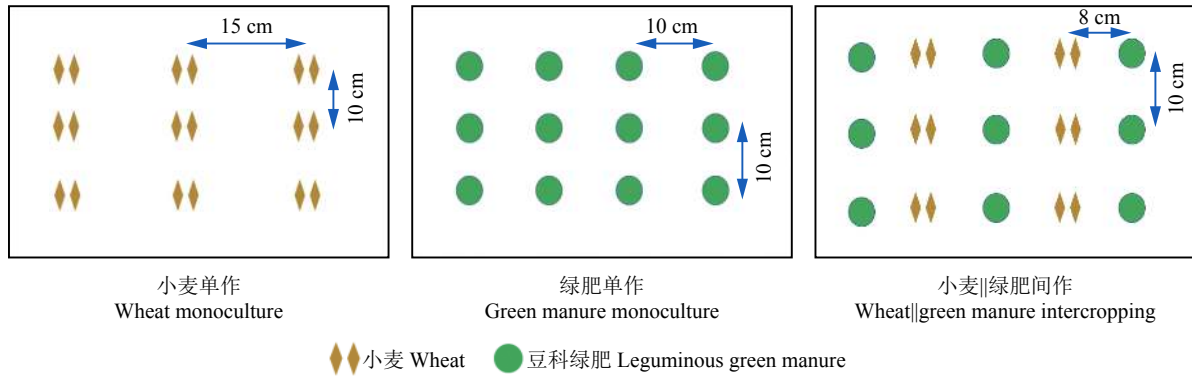


图 1 播种方式示意图

Fig. 1 Planting pattern diagram

反之, 则为劣势。

1.4.2 ^{15}N 相对丰度 ($\delta^{15}\text{N}$)^[19]

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = \frac{\text{atom}\% \text{ } ^{15}\text{N}(\text{sample}) - \text{atom}\% \text{ } ^{15}\text{N}(\text{standard})}{\text{atom}\% \text{ } ^{15}\text{N}(\text{standard})} \times 1000$$

式中: $\delta^{15}\text{N}$ 为样品 ^{15}N 相对丰度; $\text{atom}\% \text{ } ^{15}\text{N}$ (sample) 为样品 ^{15}N 原子丰度; $\text{atom}\% \text{ } ^{15}\text{N}$ (standard) 为大气中 ^{15}N 原子丰度 (0.3663%), 被用作 ^{15}N 标准同位素丰度^[20]。

1.4.3 生物固氮效率 ($\%N_{\text{dfa}}$) 及豆科绿肥氮转移占小麦吸氮量百分比 ($\%N_{\text{transfer}}$)^[12, 21]

$$\%N_{\text{dfa}} = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{ref. plant}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{fixing plant}}}{\delta^{15}\text{N}_{\text{ref. plant}} - \text{B}} \times 100$$

$$\%N_{\text{transfer}} = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{ref. plant}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{receiver}}}{\delta^{15}\text{N}_{\text{ref. plant}} - \text{B}} \times 100$$

式中: $\delta^{15}\text{N}_{\text{ref. plant}}$ 为参比作物 (非固氮作物小麦) 的 $\delta^{15}\text{N}$; $\delta^{15}\text{N}_{\text{fixing plant}}$ 为固氮作物豆科绿肥的 $\delta^{15}\text{N}$; $\delta^{15}\text{N}_{\text{receiver}}$ 为间作小麦的 $\delta^{15}\text{N}$ 。B 表示以氮气为唯一氮源的豆科绿肥的 $\delta^{15}\text{N}$, 箭筈豌豆 B 值为 1.56, 毛叶苕子 B 值为 0.93^[22]。

1.4.4 作物地上部氮素积累量 (N accumulation), 生物固氮量 (N_{dfa}) 及豆科绿肥向小麦氮素转移量 (N_{transfer})

$$\text{N accumulation (g/pot)} = \text{N}\% \times \text{Biomass}$$

$$N_{\text{dfa}} \text{ (g/pot)} = \%N_{\text{dfa}} \times \text{N accumulation}_{\text{fixing plant}}$$

$$N_{\text{transfer}} \text{ (g/pot)} = \%N_{\text{transfer}} \times \text{N accumulation}_{\text{receiver}}$$

式中: N% 为作物氮素含量; $\text{N accumulation}_{\text{fixing plant}}$ 为豆科绿肥氮素积累量; $\text{N accumulation}_{\text{receiver}}$ 为间作小麦氮素积累量; Biomass 为作物地上部干物质量。

1.5 数据统计

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理, SPSS 软件进行方差分析, LSD 法和 t 检验法进行平均值

间显著性检验 ($P < 0.05$), R 3.6.1 中的 “plsppm” 包^[23] 探究间作模式、试验地点、土壤理化性质和地上部干物质量对豆科绿肥生物固氮量及氮素转移量的影响。

2 结果与分析

2.1 间作对作物地上部干物质量及氮素积累量的影响

表 2 显示, 与单作相比, 两地间作系统中小麦、箭筈豌豆、毛叶苕子的地上部干物质量均明显降低。小麦地上部干物质量降低 25.1%~52.2%, 箭筈豌豆地上部干物质量降低 36.1%~52.0%, 毛叶苕子地上部干物质量降低 30.8%~52.0%。但两地间作系统中, 两种作物总地上部生物量显著高于豆科绿肥单作; LER 均大于 1。西宁和武威, 小麦||箭筈豌豆间作系统 LER 分别为 1.23 和 1.24, 小麦||毛叶苕子间作系统 LER 分别为 1.19 和 1.17。由此可见, 与单作相比, 间作系统中作物地上部干物质量具有总体优势。

与单作相比, 西宁间作对小麦氮素积累量无显著影响, 武威间作显著降低了小麦氮素积累量; 两地间作均显著降低了豆科绿肥的氮素积累量 (表 3)。西宁、武威两地, 箭筈豌豆氮素积累量分别显著降低了 68.2% 和 37.9%; 毛叶苕子氮素积累量分别显著降低了 51.2% 和 20.4%。但绿肥单作、绿肥||小麦间作总氮素积累量均高于小麦单作。

2.2 间作对土壤性状的影响

由表 4 可见, 两地均表现为小麦单作处理的土壤无机氮含量较低, 其中西宁显著低于箭筈豌豆和毛叶苕子单作。西宁小麦单作的土壤 pH 低于其他处理, 有效磷则高于其他处理。西宁试验点, 与豆科绿肥单作相比, 小麦||豆科绿肥间作显著降低了土壤无机氮含量; 小麦||毛叶苕子间作显著增加了土壤有效磷含量;

表 2 作物地上部干物质量及土地当量比

Table 2 Shoot dry biomass and land equivalent ratio (LER)

试验地点 Experimental site	处理 Treatment	小麦 (g/pot) Wheat	豆科绿肥 (g/pot) Leguminous green manure	总计 (g/pot) Total	LER
西宁 Xining	MW	85.65 ± 17.50 a		85.65 ± 17.50 b	
	MC		62.63 ± 4.60 a	62.63 ± 4.60 c	
	MH		55.91 ± 3.48 a	55.91 ± 3.48 c	
	IWC	64.12 ± 3.66 ab	30.07 ± 3.76 b	94.20 ± 4.21 a	1.23
	IWH	60.77 ± 7.71 b	26.84 ± 3.40 b	88.19 ± 4.64 ab	1.19
武威 Wuwei	MW	79.37 ± 7.93 a		79.37 ± 7.93 b	
	MC		71.58 ± 8.80 a	71.58 ± 8.80 c	
	MH		69.36 ± 7.34 a	69.36 ± 7.34 c	
	IWC	47.36 ± 13.98 b	45.77 ± 5.07 b	93.13 ± 12.16 a	1.24
	IWH	37.98 ± 3.81 b	48.03 ± 2.05 b	86.01 ± 3.07 ab	1.17

注 (Note): MW—小麦单作 Wheat monoculture; MC—箭筈豌豆单作 Common vetch monoculture; MH—毛叶苕子单作 Hairy vetch monoculture; IWC—小麦||箭筈豌豆间作 Wheat and common vetch intercropping; IWH—小麦||毛叶苕子间作 Wheat and hairy vetch intercropping; 表中数值均为平均值 ± 标准误 The values in the table are mean ± standard error ($n = 5$); 同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著 Values followed by different letters within a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 3 作物地上部氮素积累量 (g/pot)

Table 3 Shoot nitrogen accumulation

处理 Treatment	西宁 Xining			武威 Wuwei		
	小麦 Wheat	豆科绿肥 Leguminous green manure	总计 Total	小麦 Wheat	豆科绿肥 Leguminous green manure	总计 Total
MW	0.53 ± 0.10 a		0.53 ± 0.10 c	1.36 ± 0.12 a		1.36 ± 0.12 b
MC		1.95 ± 0.38 a	1.95 ± 0.38 a		1.82 ± 0.34 a	1.82 ± 0.34 a
MH		1.27 ± 0.09 b	1.27 ± 0.09 b		1.67 ± 0.11 a	1.67 ± 0.11 ab
IWC	0.43 ± 0.07 a	0.62 ± 0.04 c	1.05 ± 0.08 b	0.63 ± 0.16 b	1.13 ± 0.24 b	1.76 ± 0.21 ab
IWH	0.38 ± 0.09 a	0.62 ± 0.12 c	1.00 ± 0.18 b	0.53 ± 0.03 b	1.33 ± 0.08 b	1.86 ± 0.08 a

注 (Note): MW—小麦单作 Wheat monoculture; MC—箭筈豌豆单作 Common vetch monoculture; MH—毛叶苕子单作 Hairy vetch monoculture; IWC—小麦||箭筈豌豆间作 Wheat and common vetch intercropping; IWH—小麦||毛叶苕子间作 Wheat and hairy vetch intercropping; 表中数值均为平均值 ± 标准误 The values in the table are mean ± standard error ($n = 5$); 同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著 Values followed by different letters within a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

各处理间土壤有机质、全氮、速效钾含量均无显著差异。武威试验点, 各处理间的差异相对较小, 其中小麦||毛叶苕子间作处理的土壤 pH 显著高于绿肥单作处理, 其他指标在各处理间均无显著差异。

2.3 间作对豆科绿肥生物固氮效率及生物固氮量的影响

表 5 显示, 与豆科绿肥单作相比, 两地小麦||豆科绿肥间作对豆科绿肥的生物固氮效率均无显著影响。单作、间作系统中, 西宁毛叶苕子生物固氮效率分别为 64.1% 和 60.1%, 均显著高于箭筈豌豆的 44.8% 和 39.2%。武威单作和间作箭筈豌豆的生物固

氮效率 (分别为 44.6% 和 42.8%) 均显著高于毛叶苕子 (分别为 12.5% 和 11.4%)。两地箭筈豌豆的生物固氮效率无显著差异, 而西宁毛叶苕子的生物固氮效率显著高于武威。

与豆科绿肥单作相比, 间作显著降低豆科绿肥的生物固氮量 (武威毛叶苕子除外)。西宁、武威两地试验, 间作箭筈豌豆生物固氮量分别显著降低了 82.1% 和 38.5%; 西宁间作毛叶苕子生物固氮量显著降低了 51.2%, 武威无显著变化。两地单作箭筈豌豆生物固氮量无显著差异, 武威间作箭筈豌豆生物固氮量显著高于西宁。西宁单作、间作系统中毛叶苕子生

表 4 不同处理土壤化学性状
Table 4 The chemical properties of soils under different treatments

试验地点 Experimental site	处理 Treatment	pH	有机质 (g/kg) SOM	全氮(g/kg) Total N	无机氮 (mg/kg) N _{min}	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
西宁 Xining	MW	7.92 ± 0.02 c	18.94 ± 1.26 a	0.87 ± 0.03 a	7.66 ± 1.08 b	33.74 ± 2.90 a	127.40 ± 9.69 a
	MC	8.00 ± 0.05 b	20.75 ± 2.51 a	0.83 ± 0.01 a	16.75 ± 2.39 a	23.58 ± 1.52 c	134.80 ± 6.73 a
	MH	8.09 ± 0.03 a	20.09 ± 0.57 a	0.87 ± 0.03 a	15.92 ± 3.17 a	24.64 ± 2.16 c	126.20 ± 7.19 a
	IWC	8.06 ± 0.05 ab	19.98 ± 0.63 a	0.87 ± 0.03 a	8.31 ± 3.13 b	27.26 ± 1.52 bc	122.60 ± 16.49 a
	IWH	8.09 ± 0.02 a	19.43 ± 0.94 a	0.87 ± 0.04 a	10.03 ± 0.63 b	30.94 ± 7.07 b	121.60 ± 14.85 a
武威 Wuwei	MW	7.96 ± 0.02 b	19.72 ± 1.00 a	1.17 ± 0.11 a	9.35 ± 1.05 a	34.88 ± 1.45 a	106.40 ± 7.96 a
	MC	7.90 ± 0.04 b	20.86 ± 0.70 a	1.20 ± 0.01 a	11.31 ± 4.28 a	35.16 ± 1.13 a	112.20 ± 5.15 a
	MH	7.93 ± 0.03 b	20.03 ± 3.01 a	1.20 ± 0.04 a	12.51 ± 5.00 a	34.78 ± 1.53 a	105.30 ± 7.79 a
	IWC	7.93 ± 0.04 b	19.40 ± 3.01 a	1.23 ± 0.01 a	11.23 ± 3.83 a	34.86 ± 2.20 a	104.40 ± 12.67 a
	IWH	8.04 ± 0.03 a	18.68 ± 2.01 a	1.22 ± 0.03 a	9.39 ± 1.54 a	34.58 ± 2.56 a	108.40 ± 4.88 a

注 (Note): MW—小麦单作 Wheat monoculture; MC—箭筈豌豆单作 Common vetch monoculture; MH—毛叶苕子单作 Hairy vetch monoculture; IWC—小麦||箭筈豌豆间作 Wheat and common vetch intercropping; IWH—小麦||毛叶苕子间作 Wheat and hairy vetch intercropping; 表中数值均为平均值 ± 标准误 The values in the table are mean ± standard error ($n = 5$); 同列数据后不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$). Values followed by different letters within a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 5 豆科绿肥生物固氮效率及生物固氮量
Table 5 %N_{dfa} and N_{dfa} of leguminous green manures

处理 Treatment	生物固氮效率 %N _{dfa}		生物固氮量 N _{dfa} (g/pot)	
	西宁 Xining	武威 Wuwei	西宁 Xining	武威 Wuwei
MC	44.8 ± 7.3 bA	44.6 ± 10.1 aA	0.88 ± 0.24 aA	0.78 ± 0.13 aA
IWC-C	39.2 ± 2.1 bA	42.8 ± 3.4 aA	0.24 ± 0.01 bB	0.48 ± 0.11 bA
MH	64.1 ± 3.5 aA	12.5 ± 1.7 bB	0.81 ± 0.04 aA	0.21 ± 0.04 cB
IWH-H	60.1 ± 12.7 aA	11.4 ± 8.8 bB	0.38 ± 0.04 bA	0.16 ± 0.12 cB

注 (Note): MC—箭筈豌豆单作 Common vetch monoculture; MH—毛叶苕子单作 Hairy vetch monoculture; IWC-C—与小麦间作的箭筈豌豆 Common vetch in wheat and common vetch intercropping system; IWH-H—与间作小麦的毛叶苕子 Hairy vetch in wheat and hairy vetch intercropping system; 表中数值均为平均值 ± 标准误 The values in the table are mean ± standard error ($n = 5$); 同列数据后不同小写字母代表同一试验点处理间差异显著, 同行不同大写字母代表两个试验地点间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments in the same experimental site, and different capital letters in a row indicate significant difference among the Xining and Wuwei experimental sites ($P < 0.05$).

物固氮量均显著高于武威。

2.4 间作对豆科绿肥氮素转移比例及氮素转移量的影响

由图 2 结果可知, 两地间作系统中, 豆科绿肥氮素含量均显著高于小麦, 箭筈豌豆和毛叶苕子的植株氮素含量在 2.2%~3.1%, 小麦仅为 1.0%~1.8%。禾||豆间氮素转移的前提是两者的养分浓度差^[24], 可见, 本研究中小麦与豆科绿肥间氮素含量差异足以建立源库关系。

表 6 显示, 西宁、武威箭筈豌豆氮素转移量分别为 0.13 和 0.19 g/盆 (分别占小麦吸氮量的 31.6% 和

24.7%), 分别显著高于毛叶苕子的 0.09 和 0.06 g/盆 (分别占小麦吸氮量的 23.8% 和 11.4%)。西宁豆科绿肥转移的氮素占小麦吸氮量比例高于武威。武威箭筈豌豆氮素转移量显著高于西宁, 西宁毛叶苕子氮素转移量显著高于武威。

2.5 生物固氮量、氮素转移量的影响因素

通过对生物固氮量影响因素的路径分析 (图 3) 发现, 种植模式 (单作、间作) 和试验地点对豆科绿肥地上部干物质量有显著影响, 试验地点对土壤有机质、全氮、速效养分 (无机氮、有效磷、速效钾)、pH 有显著影响。土壤全氮、速效养分、pH 和地上部干物质量对

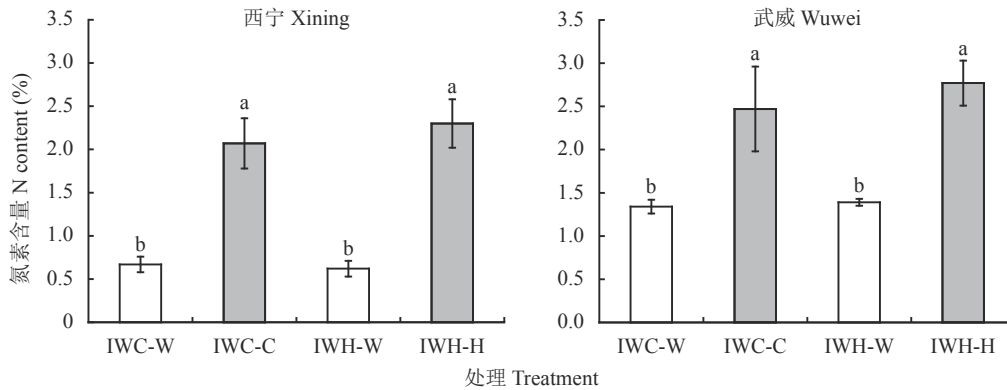


图 2 间作系统作物氮素含量

Fig. 2 Plant nitrogen content in intercropping systems

[注 (Note): IWC-W—与箭筈豌豆间作的小麦 Wheat in wheat and common vetch intercropping system; IWC-C—与小麦间作的箭筈豌豆 Common vetch in wheat and common vetch intercropping system; IWH-W—与毛叶苕子间作的小麦 Wheat in wheat and hairy vetch intercropping system; IWH-H—与小麦间作的毛叶苕子 Hairy vetch in wheat and hairy vetch intercropping system; 柱上不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among the treatments ($P < 0.05$).]

表 6 豆科绿肥氮素向小麦的转移量及其占小麦氮素吸收量的比例

Table 6 Amount of nitrogen transfer from leguminous green manure to wheat and its proportion in wheat nitrogen uptake

处理 Treatment	比例 Proportion (%)		转移量 Translocation (g/pot)	
	西宁 Xining	武威 Wuwei	西宁 Xining	武威 Wuwei
IWC-W	31.6 ± 2.6 aA	24.7 ± 4.2 aB	0.13 ± 0.01 aB	0.19 ± 0.04 aA
IWH-W	23.8 ± 2.0 bA	11.4 ± 1.3 bB	0.09 ± 0.02 bA	0.06 ± 0.01 bB

注 (Note): IWC-W—与箭筈豌豆间作的小麦 Wheat in wheat and common vetch intercropping system; IWH-W—与毛叶苕子间作的小麦 Wheat in wheat and hairy vetch intercropping system; 表中数值均为平均值 ± 标准误 The values in the table are mean ± standard error ($n = 5$); 不同小写字母代表同一列处理间差异显著, 不同大写字母代表同一行试验地点间差异显著 Values followed by different lowercase letters indicate significant difference among the treatments in the same experimental site, and different capital letters indicate significant difference among the Xining and Wuwei experimental sites ($P < 0.05$).

豆科绿肥生物固氮量有显著影响, 以地上部干物质量的影响最大。

图 4 表明, 不同间作系统和试验地点对土壤 pH 有显著影响; 试验地点对土壤有机质、全氮、速效养分 (无机氮、有效磷、速效钾) 和豆科绿肥地上部干物质量均有显著影响。土壤全氮、速效养分、pH 和地上部干物质量对氮素转移量有显著影响, 以地上部干物质量的影响最大。

3 讨论

3.1 间作对豆科绿肥生物固氮的影响

本研究结果表明, 与豆科绿肥单作相比, 小麦||豆科绿肥间作对豆科绿肥的生物固氮效率无显著影响, 但有降低趋势。邸伟^[25]发现遮荫会降低豆科作物光合作用, 减少光合产物向根部的运输继而降低根瘤固氮能力。推测本研究中小麦的遮荫作用导致豆

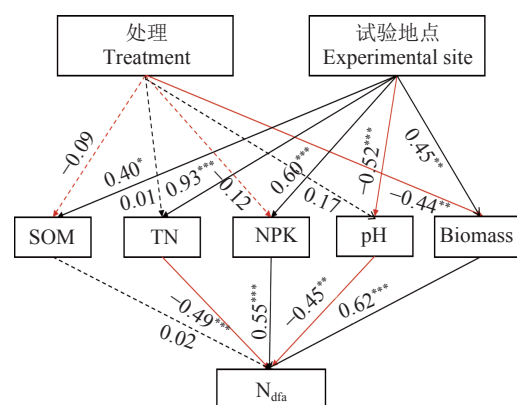


图 3 生物固氮量影响因素的路径分析

Fig. 3 Path analysis of factors influencing N_{dfa}

[注 (Note): SOM—土壤有机质 Soil organic matter; TN—全氮 Total nitrogen; NPK—速效氮磷钾养分 Available NPK (无机氮、有效磷、速效钾 Mineral nitrogen, available phosphorus, available potassium); Biomass—地上部干物质量 Shoot dry biomass; N_{dfa} —生物固氮量 Biological N fixation amount; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ***— $P < 0.001$.]

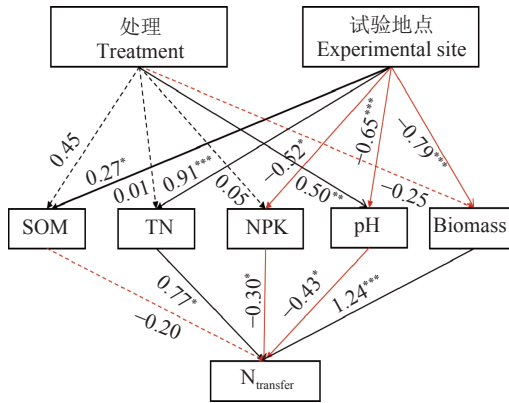


图 4 氮素转移量影响因素的路径分析

Fig. 4 Path analysis of factors influencing N translocation

[注 (Note): SOM—土壤有机质 Soil organic matter; TN—全氮 Total nitrogen; NPK—速效氮磷钾养分 Available NPK nutrients; Biomass—地上部干物质量 Shoot dry biomass; $N_{transfer}$ —氮素转移量 Transferred nitrogen amount; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ***— $P < 0.001$.]

科绿肥光合作用减弱, 豆科绿肥向地下部运输的光合产物减少可能是导致生物固氮效率降低的原因之一。另外本试验未施氮肥, 且小麦对氮素的竞争作用高于绿肥^[26], 可能会导致绿肥生长前期过于缺氮, 从而影响绿肥根系发育而导致固氮能力降低。但有研究发现, 与单作相比, 小麦||蚕豆间作系统中蚕豆的固氮效率提高了 21%~108%, 原因是在禾||豆间作系统中, 土壤中大部分氮都被禾本科作物消耗, 蚕豆被迫增加根瘤菌共生, 以满足其对氮的需求^[27]。Danso 等^[28]也发现禾||豆间作提升了豆科作物的固氮效率, 原因是间作系统中豆科植物从土壤中吸收氮素量降低, 其固氮效率提高; 且禾本科作物的密度越大, 这种效果越明显。本研究中小麦仅生长到灌浆前期, 处于籽粒水分增长阶段, 吸收氮素能力较弱^[29], 可能小麦对氮素的竞争没有迫使豆科绿肥增加生物固氮效率。

本研究中, 与单作相比, 两地间作系统中豆科绿肥的地上部干物质量均显著降低。两地单作与间作系

统中豆科绿肥生物固氮效率无显著差异。但与豆科绿肥单作相比, 两地间作模式下豆科绿肥生物固氮量均显著降低 (武威毛叶苕子除外)。由此可见, 与生物固氮效率相比, 地上部干物质量对生物固氮量影响更大。由于本试验供试土壤氮素含量较低, 且未施氮肥, 导致前期养分不足, 影响间作系统生物量积累, 从表 7 也可看出, 间作绿肥单株生物量显著降低。相关研究发现, 土壤未施氮肥时豆科作物生物固氮效率较低, 适量补充氮素会增加其生物固氮效率, 但高水平的外源氮反而会抑制生物固氮^[30]。冯晓敏等^[10]研究发现燕麦||花生间作系统中, 间作处理增加了花生的固氮效率, 但降低了花生的地上部干物质量, 最终导致间作处理降低了花生的生物固氮量。Fan 等^[31]的研究结果也表明, 间作虽然提高了蚕豆的固氮效率, 但降低了其地上部干物质量, 最终导致生物固氮量降低。因此, 豆科绿肥的地上部干物质量是决定其生物固氮能力的关键因素, 这和本研究中生物固氮量影响因素的路径分析结果相一致 (图 3)。

豆科作物生物固氮同时受到生物因素 (如豆科作物种类、根际菌群等)^[5, 32]和环境因素 (如土壤养分、水分等) 的影响^[33-34]。两试验点所用的箭筈豌豆品种不同, 毛叶苕子品种相同, 箭筈豌豆生物固氮效率在两地不同模式中无显著差异; 单作模式下两地生物固氮量无显著差异, 间作模式下两地生物固氮量差异显著。毛叶苕子生物固氮效率和生物固氮量均表现出明显的地域差异性, 西宁试验点均显著高于武威试验点。上述结果表明箭筈豌豆受品种及环境因素影响较小, 毛叶苕子易受环境因素影响。相关研究表明, pH 影响根瘤菌的生长、繁殖, 是豆科作物生物固氮的重要影响因素, 且根瘤菌在中性条件下活性较高, 较高的土壤 pH 会抑制根瘤菌结瘤固氮^[35]。这和本研究中生物固氮量影响因素的路径分析结果相一致 (图 3)。本研究结果表明, 豆科绿肥地上部干物质量、土壤速效养分和 pH 均会影响生物固氮量。相关研究表明, 气候也会对生物固氮造成影响^[36],

表 7 豆科绿肥作物地上部平均干物质量 (g/plant)

Table 7 Average shoot dry matter yield of leguminous green manure crops

试验地点 Experiment site	箭筈豌豆 Common vetch		毛叶苕子 Hairy vetch	
	单作 Monoculture	间作 Intercropping	单作 Monoculture	间作 Intercropping
西宁 Xining	1.66 a	1.11 b	1.55 a	0.62 b
武威 Wuwei	1.99 a	1.69 b	1.93 a	1.78 b

注 (Note): 同行数据后不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters within a row indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

这也可能是造成两地试验生物固氮差异的原因。生产实践中,可通过合理的禾豆组合、适宜的种群密度及相应的土壤管理措施(尤其是适宜的氮素供应和水分调控),在保证作物产量的同时,最大限度地挖掘间作系统中豆科绿肥的固氮潜能。

3.2 间作对豆科作物氮素转移的影响

本研究发现两试验点豆科绿肥作物氮素向小麦的转移量均为箭筈豌豆显著高于毛叶苕子,西宁、武威试验结果从箭筈豌豆转移氮素占小麦吸氮量比例为 31.6% 和 24.7%,从毛叶苕子转移氮素占小麦吸氮量比例为 23.8% 和 11.4%。关于禾本科与豆科间作时氮素的转移规律前人也有研究,从大豆转移氮素占玉米吸氮量的比例为 2%~17%^[37-38],从花生转移氮素占水稻吸氮量的比例为 2.1%~10.9%^[39],从豌豆转移氮素占大麦吸氮量的比例为 11%^[7]。经济豆类大部分氮素转移到籽粒^[40],导致根系分配的氮素较少,转移比例较低。豆科牧草氮素占非豆科吸氮量的比例(7%~42%)大多高于经济豆类^[41-42]。本研究结果表明,与上述经济豆类相比,从箭筈豌豆、毛叶苕子转移的氮素占小麦吸氮量的比例较高,即小麦能够获取较多的豆科绿肥生物固定的氮素。同时,豆科绿肥一般会在盛花期翻压入土,大量氮素进入土壤氮库,能够更好地供给禾本科利用、维持土壤肥力。

本研究结果表明,从箭筈豌豆转移到小麦的氮素量显著高于从毛叶苕子转移的氮素量。同一地区环境因素相似,造成这种差异的原因可能是绿肥品种不同。且通过路径分析发现,各个试验处理(绿肥品种不同)主要通过改变土壤 pH 影响氮素转移量(图 4)。武威试验箭筈豌豆氮素转移量显著高于西宁试验,西宁试验毛叶苕子氮素转移量显著高于武威试验。相关研究表明,在不同地区布置大麦||豌豆间作试验,氮素转移量也存在差异^[7,26]。本研究中路径分析表明,土壤全氮、速效养分、pH 及小麦地上部干物质量对氮素转移量有显著影响,且影响以上指标的主要因素是不同试验地点土壤理化性质、气候等的差异(图 4)。此外,研究发现禾||豆系统中的氮素转移主要是通过根系接触^[43],本研究盆栽试验中小麦与豆科绿肥的根系接触紧密,可能也是氮素转移比例较高的原因之一。

4 结论

不施氮肥,间作小麦对豆科绿肥生物固氮效率无显著影响,虽然可不同程度地降低豆科绿肥的地

上部干物质量、氮素积累量及生物固氮量,但间作提高了土地当量。绿肥的固氮效率受其品种和生长环境的影响显著,西宁试验箭筈豌豆的固氮效率低于毛叶苕子,而武威试验前者高于后者。箭筈豌豆向小麦的氮素转移率和转移量均显著高于毛叶苕子。地上部干物质量是影响生物固氮量和氮素转移量的主要因素。

参 考 文 献:

- [1] Mcgraw R L, Stamps W T, Houx J H, *et al.* Yield, maturation, and forage quality of alfalfa in a black walnut alley-cropping practice[J]. *Agroforestry Systems*, 2008, 74(2): 155-161.
- [2] Thilakarathna M S, McElroy M S, Chapagain T, *et al.* Belowground nitrogen transfer from legumes to non-legumes under managed herbaceous cropping systems: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36(4): 58.
- [3] 巨晓棠. 氮肥有效率的概念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 921-933.
Jü X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio—Discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 921-933.
- [4] 任科宇, 段英华, 徐明岗, 张旭博. 施用有机肥对我国作物氮肥利用率影响的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(17): 2983-2996.
Ren K Y, Duan Y H, Xu M G, Zhang X B. Effect of manure application on nitrogen use efficiency of crops in China: A Meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(17): 2983-2996.
- [5] Li Z, Ji Q, Zhao S X, *et al.* Changes in C and N fractions with composted manure plus chemical fertilizers applied in apple orchard soil: An in-situ field incubation study on the Loess Plateau, China[J]. *Soil Use and Management*, 2018, 34(2): 276-285.
- [6] Peoples M B, Chalk P M, Unkovich M J, *et al.* Can differences in ¹⁵N natural abundance be used to quantify the transfer of nitrogen from legumes to neighboring non-legume plant species?[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 87: 97-109.
- [7] Fan Z, Zhao Y, Chai Q, *et al.* Synchrony of nitrogen supply and crop demand are driven via high maize density in maize/pea strip intercropping[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 10954.
- [8] Chapagain T, Riseman A. Barley-pea intercropping: Effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations[J]. *Field Crops Research*, 2014, 166: 18-25.
- [9] Zang H, Yang X, Feng X, *et al.* Rhizodeposition of nitrogen and carbon by mungbean (*Vigna radiata* L.) and its contribution to intercropped oats (*Avena nuda* L.)[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(3): e0121132.
- [10] 冯晓敏, 杨永, 臧华栋, 等. 燕麦花生间作系统作物氮素累积与转移规律[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3): 617-624.
Feng X M, Yang Y, Zang H D, *et al.* Characteristics of crop nitrogen accumulation and nitrogen transfer in oat and peanut intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3): 617-624.

- [11] Gathumbi S M, Cadisch G, Giller K E. ^{15}N natural abundance as a tool for assessing N_2 -fixation of herbaceous, shrub and tree legumes in improved fallows[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(8): 1059–1071.
- [12] Li R, Tao R, Ling N, *et al.* Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physicochemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field: Implications for soil biological quality[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 30–38.
- [13] Johansen A, Jensen E S. Transfer of N and P from intact or decomposing roots of pea to barley interconnected by an arbuscular mycorrhizal fungus[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(1): 73–81.
- [14] 柴强, 胡发龙, 陈桂平. 禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(1): 19–26.
Chai Q, Hu F L, Chen G P. Research advance in the mechanism and agronomic regulation of high-efficient use of nitrogen in cereal-legume intercropping[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(1): 19–26.
- [15] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(4): 403–415.
Li L. Intercropping enhances agroecosystem services and functioning: Current knowledge and perspectives[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(4): 403–415.
- [16] 张久东, 包兴国, 曹卫东, 等. 间作绿肥作物对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013, (4): 43–47.
Zhang J D, Bao X G, Cao W D, *et al.* Effect of intercropping green manure crops on maize yield and soil fertility[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013, (4): 43–47.
- [17] 张小明, 来兴发, 杨宪龙, 等. 施氮和燕麦/箭筈豌豆间作比例对系统干物质质量和氮素利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 489–498.
Zhang X M, Lai X F, Yang X L, *et al.* Effects of nitrogen application and intercropping ratio on dry matter production and nitrogen use efficiency of the oat and common vetch intercropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 489–498.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [19] 魏琦, 武海雯, 刘正祥, 等. 盐胁迫下沙枣生物固氮能力及氮素分配研究[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(6): 985–992.
Wei Q, Wu H W, Liu Z X, *et al.* Biological nitrogen fixation ability and nitrogen distribution of *Elaeagnus angustifolia* under salt stress[J]. *Forestry Scientific Research*, 2017, 30(6): 985–992.
- [20] Mariotti A. Atmospheric nitrogen is a reliable standard for natural ^{15}N abundance measurements[J]. *Nature*, 1983, 303(5919): 685–687.
- [21] Shearer G B, Kohl D H. N_2 -Fixation in field settings: Estimations based on natural ^{15}N abundance[J]. *Functional Plant Biology*, 1986, 13(6): 699–756.
- [22] Yoneyama T, Fujita K, Yoshida T, *et al.* Variation in natural abundance of ^{15}N among plant parts and in $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ fractionation during N_2 fixation in the legume-rhizobia symbiotic system[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1986, 27(5): 791–799.
- [23] Sanchez G, Trinchera L. Plspm: Partial least squares data analysis methods (R package version 0.1. 17)[DB/OL]. 2009, <http://cran.r-project.org/package=plspm>
- [24] Bethlenfalvay G J, Reyes-Solis M G, Camel S B, *et al.* Nutrient transfer between the root zones of soybean and maize plants connected by a common mycorrhizal mycelium[J]. *Physiologia Plantarum*, 1991, 82(3): 423–432.
- [25] 邸伟. 大豆根瘤固氮酶活性与固氮量的研究[D]. 黑龙江哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2010.
Di W. Study on nitrogen fixation activity and nitrogen fixation in soybean root nodules[D]. Harbin, Heilongjiang: MS Thesis of Northeast Agricultural University, 2010.
- [26] Hauggaardnielsen H, Ambus P, Jensen E S. Temporal and spatial root distribution and competition for nitrogen in pea-barley intercropping – a field study employing ^{32}P methodology[J]. *Plant and Soil*, 2001, 236: 63–74.
- [27] Ingraffia R, Amato G, Frenda A S, *et al.* Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on nutrient uptake, N_2 fixation, N transfer, and growth in a wheat/faba bean intercropping system[J]. *PLoS ONE*, 2019, 14(3): e0213672.
- [28] Danso S K A, Zapata F, Hardarson G, *et al.* Nitrogen fixation in faba beans as affected by plant population density in sole or intercropped systems with barley[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(4): 411–415.
- [29] 米国华, 汤利, 张福锁. 两种熟相小麦籽粒建成期的氮素吸收与转运[J]. *中国农业大学学报*, 1999, 4(3): 53–57.
Mi G H, Tang L, Zhang F S. Nitrogen uptake and translocation during grain formation of two wheat cultivars with contrasting maturity appearance[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1999, 4(3): 53–57.
- [30] 杨子文, 沈禹颖, 谢田玲, 等. 外源供氮水平对大豆生物固氮效率的影响[J]. *西北植物学报*, 2009, 29(3): 574–579.
Yang Z W, Shen Y Y, Xie T L, *et al.* Biological nitrogen fixation efficiency in soybean under different levels of nitrogen supply[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(3): 574–579.
- [31] Fan F, Zhang F, Song Y, *et al.* Nitrogen fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems[J]. *Plant and Soil*, 2006, 283(1/2): 275–286.
- [32] Meng L, Zhang A, Wang F, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium facilitate nitrogen uptake and transfer in soybean/maize intercropping system[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 339.
- [33] Oberson A, Frossard E, Bühlmann C, *et al.* Nitrogen fixation and transfer in grass-clover leys under organic and conventional cropping systems[J]. *Plant and Soil*, 2013, 371(1–2): 237–255.
- [34] Saia S, Amato G, Frenda A S, *et al.* Influence of arbuscular mycorrhizae on biomass production and nitrogen fixation of berseem clover plants subjected to water stress[J]. *PLoS One*, 2014, 9(3): 1–7.
- [35] 杨琼博. pH值和化合态氮对紫花苜蓿结瘤和固氮效果的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2007.
Yang Q B. Effects of pH value and combined nitrogen on nodulation and nitrogen fixation of Alfalfa[D]. Harbin, Heilongjiang: MS Thesis of Northeast Agricultural University, 2007.
- [36] Liu L, Knight J D, Lemke R L, Farrell R E. A side-by-side comparison of biological nitrogen fixation and yield of four legume

- crops[J]. *Plant and Soil*, 2019, 442(1): 169–182.
- [37] Yong T, Liu X, Yang F, *et al.* Characteristics of nitrogen uptake, use and transfer in a wheat-maize-soybean relay intercropping system[J]. *Plant Production Science*, 2015, 18(3): 388–397.
- [38] 雍太文, 杨文钰, 任万军, 等. 两种三熟套作体系中的氮素转移及吸收利用[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(9): 3170–3178.
Yong T W, Yang W Y, Ren W J, *et al.* Analysis of the nitrogen transfer, nitrogen uptake and utilization in the two relay-planting systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(9): 3170–3178.
- [39] 李奇真, 徐承业. 夏大豆施肥生理基础及高产栽培技术研究[J]. *中国农业科学*, 1989, 22(4): 41–48.
Li Q Z, Xu C Y. Physiological basis of fertilization and high-yield cultivation techniques of summer soybean[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, 22(4): 41–48.
- [40] Shen Q, Chu G. Bi-directional nitrogen transfer in an intercropping system of peanut with rice cultivated in aerobic soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 40: 81–87.
- [41] Thilakarathna R M M S, Papadopoulos Y A, Rodd A V, *et al.* Characterizing nitrogen transfer from red clover populations to companion bluegrass under field conditions[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2012, 92(6): 1163–1173.
- [42] Schipanski M E, Drinkwater L E. Nitrogen fixation in annual and perennial legume-grass mixtures across a fertility gradient[J]. *Plant and Soil*, 2012, 357(1/2): 147–159.
- [43] Xiao Y B, Li L, Zhang F S, *et al.* Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and faba bean using direct and indirect ^{15}N techniques[J]. *Plant and Soil*, 2004, 262(1/2): 45–54.