

DOI:10.11686/cyxb2024452

http://cyxb.magtech.com.cn

鲍根生, 李媛, 冯晓云, 等. 施氮量和混播方式对燕麦/饲用豌豆间作系统氮素吸收和干物质产量的影响. 草业学报, 2025, 34(11): 161-173.

BAO Gen-sheng, LI Yuan, FENG Xiao-yun, et al. Effects of intercropping planting patterns and nitrogen addition level on nitrogen absorption and biomass within oat-pea intercropping systems. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(11): 161-173.

施氮量和混播方式对燕麦/饲用豌豆间作系统氮素吸收和干物质产量的影响

鲍根生^{1,2,3*}, 李媛^{1,2,3}, 冯晓云^{1,2,3}, 赵倩^{1,2,3}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810003; 2. 青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 3. 青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要: 燕麦与饲用豌豆间作种植是高寒区人工草地生产力提升的主要途径, 同时, 氮添加也是人工草地饲草产量增加的关键栽培措施。然而, 不同间作种植方式和氮添加对燕麦与豌豆间作体系产量增加及氮素吸收方面影响的研究较少。以青海高原人工草地建植主要饲草—燕麦和饲用豌豆为对象, 研究种植方式(单播、同行混播和隔行间作)和氮添加(未添加、低氮和高氮)对燕麦和豌豆饲草产量和氮素吸收的影响。结果表明: 1) 隔行间作种植燕麦和单播豌豆生物量(茎叶和根系)最高, 而同行混合间作燕麦和豌豆生物量最低。高氮添加能显著增加隔行和同行混合间作燕麦生物量, 而高氮添加后单播和间作种植豌豆生物量显著降低。2) 间作种植能显著增加燕麦茎叶、根系全氮和土壤速效氮含量, 而单播种植豌豆根系的全氮和土壤速效氮含量最高。高氮添加的单播燕麦和豌豆根系全氮含量显著高于隔行间作燕麦, 而氮添加处理的燕麦和豌豆同行混合间作土壤的硝态氮和铵态氮含量显著高于单播和隔行间作土壤。3) 结构模型方程结果表明间作种植和氮添加对燕麦生物量积累、茎叶和土壤氮素增加具有促进作用, 而对豌豆却呈抑制生物量生长、降低茎叶及土壤氮素含量的负效应。由此可见, 燕麦与豌豆隔行间作种植并添加尿素 50 kg·hm⁻²(低氮)能显著促进禾豆间作体系氮素吸收能力并实现人工草地产量增加目标, 成为高寒区人工草地产量提升的关键栽培技术。

关键词: 燕麦; 豌豆; 间作; 氮添加; 氮素吸收

Effects of intercropping planting patterns and nitrogen addition level on nitrogen absorption and biomass within oat-pea intercropping systems

BAO Gen-sheng^{1,2,3*}, LI Yuan^{1,2,3}, FENG Xiao-yun^{1,2,3}, ZHAO Qian^{1,2,3}

1. Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai University, Xining 810003, China; 2. Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Xining 810016, China; 3. Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau, Xining 810016, China

Abstract: Oats intercropped with peas has been regarded as an important method to improve the productivity of artificial grassland. Similarly, nitrogen fertilization is also recommended as an effective cultivation practice in increasing forage productivity for artificial grasslands. However, few studies have examined the interactive effects of different intercropping planting patterns and nitrogen addition levels on forage yields and the capacity for nitrogen absorption in oat-pea intercropping systems. A field experiment was carried out to examine the role of different

收稿日期: 2024-11-18; 改回日期: 2025-03-17

基金项目: 青海省科技厅重点研发与转化计划项目(2024-NK-135)和国家重点研发计划项目(2022YFD1602301)资助。

作者简介: 鲍根生(1980—), 男, 青海乐都人, 副研究员, 博士。E-mail: baogensheng2008@hotmail.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: baogensheng2008@hotmail.com

intercropping patterns (monocropping, mixed monocropping, alternate-row intercropping) and nitrogen addition (control, low and high level) in improving forage biomass and increasing nitrogen uptake within intercropping systems comprising oats and peas. Our results showed 1) Both above- and belowground biomass of oats was highest when oats were intercropped with peas in an alternate-row pattern. Conversely, oat above- and belowground biomass was minimum when peas and oats were combined in a mixed intercropping system. Furthermore, both oat leaves and stem and oat root total nitrogen content and soil available nitrogen content were significantly increased when oats were intercropped with peas, while root nitrogen and soil available nitrogen contents of peas were lowest when peas were cultivated as a monocrop. 2) Root total nitrogen contents of oats and peas when monocropped were significantly higher than in the counterpart plants in alternate-row intercropped plantings. By contrast, soil NH_4^+ -N and NO_3^- -N contents of oats and peas in mixed intercropped plantings were markedly higher than those in monocropped and alternate-row intercropped systems. 3) Structural equation model (SEM) results indicated that intercropping and nitrogen addition both had a positive effect on oat biomass accumulation and enhanced nitrogen absorption in leaves, stems and soil, while resulting in negative effects on pea biomass and nitrogen contents in aboveground tissues and soil. In conclusion, the forage productivity of artificial grasslands in alpine regions achieves maximum productivity when exploiting the interactive effects of oat alternate-row intercropping with peas, with the addition of a low amount of nitrogen fertilizer ($50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). Our findings suggest that grass intercropping with legumes together with modest exogenous nitrogen addition is an ideal cultivation practice to enhance the productivity of artificial grassland in alpine regions.

Key words: oats; pea; intercropping; nitrogen addition; nitrogen absorption

间作是两种或多种作物种植于同一地块内,实现间作体系生产力提高的重要农业种植模式^[1],其主要利用间作作物生长特性的差异和资源吸收利用生态位的分化而构建种间互惠关系,进而实现间作群体生产力增加和生态功能强化的目标^[2-4]。禾本科与豆科植物间作是全球范围内最广泛的间作种植模式,也是开展间作研究的经典组合^[5-6]。与单播相比,禾豆间作不仅能增加间作系统的产量和品质,同时,也能显著改善和提高土壤质量^[7]。Zhang等^[8]研究发现玉米(*Zea mays*)与蚕豆(*Vicia faba*)间作能显著提高玉米根际有效磷含量,从而提高玉米产量。Garland等^[9]研究发现间作种植能增加地表盖度,进而显著提高土壤微生物多样性水平和优化土壤质量。Yan等^[10]研究也证明禾豆间作为土壤和根际微生物互作营造有利环境,进而提高间作系统生产力。由此可见,禾本科与豆科植物间作通过整合地上(光)和地下(水分、土壤养分和微生物)等限制植物生长的关键资源,实现有限资源的高效利用和间作系统生产力的增加^[1,5-6]。

大量研究证明间作体系生产力的增加与禾豆间作方式紧密相关^[11-13]。鲍根生等^[12]研究发现燕麦(*Avena sativa*)与饲用豌豆(*Pisum sativum*)隔行间作的产量显著高于同行混合间作和单播种植。王旭等^[14]开展不同比例的燕麦/箭筈豌豆(*Vicia sativa*)同行混播和隔行间作研究发现,燕麦和豌豆按照1:3隔行间作种植的生物量最高和品质最佳。然而,Wang等^[13]证明燕麦与箭筈豌豆同行混播种植的生物量显著高于单播燕麦和箭筈豌豆。Liu等^[15]研究也证实玉米与大豆(*Glycine max*)同行混合间作系统生物量高于隔行间作和单播种植。由此可见,禾豆间作体系产量显著高于单播已形成共识,而不同间作方式对禾豆间作体系增产效应的贡献尚存在争议。虽然豆科植物生物固氮特性能为禾豆间作体系提供氮源,而适量外源氮素添加能最大限度地提升禾豆间作体系的生产力。Li等^[5]通过蚕豆和玉米间作长期定位试验发现,适量外源氮素添加能显著提升禾豆间作体系增产效应的稳定性。Yu等^[16]基于全球3000余项作物间作的整合研究发现,适度添加氮肥对间作体系产量存在明显增产效应。同时,基于全球552项禾豆间作种植的整合分析也证实适量添加氮肥能增加间作体系产量,而氮肥添加过量则会造成间作体系减产^[17]。虽然间作方式和氮添加对禾豆间作体系生产力提升存在明显增产效应,而综合不同间作方式和氮添加对间作体系增产的对比研究较少。

氮作为植物生长最关键的限制因素之一,外源氮肥添加成为提高土壤肥力和保证作物产量增加的关键途径^[18]。然而,过度氮肥投入会造成土壤酸化、水资源污染和生物多样性降低等环境问题^[19]。豆科植物的生物固氮作用成为降低工业氮肥投入和维持农业生态系统生产力稳定的有效途径,禾豆间作种植成为豆科植物提高间作作物增产效应的最经典案例^[5,7]。已有大量报道有关禾豆间作通过根际氮素耗竭效应和磷素活化作用强化豆科植物生物固氮能力,进而增加土壤氮素,并提高禾本科植物产量及间作系统氮素吸收利用^[11,14,17,20-21]。然而,有关不同间作方式和氮添加互作对禾豆间作体系氮素吸收的报道较少。因此,本研究以青海高原人工饲草基地建植主栽饲草—燕麦和饲用豌豆为对象,设置单播、间作(同行混合和隔行间作)种植模式与低氮和高氮添加处理组合种植试验,重点解决以下问题:1)不同氮添加水平对燕麦和豌豆间作体系氮素吸收和土壤氮含量影响是否存在差异?2)间作种植方式对燕麦和豌豆间作体系氮素吸收和土壤氮含量是否存在调控作用?3)最佳氮添加量和间作种植方式对燕麦和豌豆间作体系氮素吸收利用是否存在增益效应?通过解答上述问题可明晰不同间作种植模式对燕麦和豌豆氮素吸收利用的调控作用及氮添加对间作体系的增产能力,从营养生态位与空间生态位的互补角度深度解析禾豆间作体系生产力提升的潜在作用过程。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及试验材料

2022年选择青海省东部的典型半浅山地区湟中区土门关乡加汝尔村(36°26′51″N,101°41′30″E,海拔2668 m)农田作为试验地,该区域属典型高原大陆性气候,年均温5.3℃且冷季漫长,月均降水量1.56 mm且集中于7—9月(图1),无绝对无霜期。土壤为栗钙土,有机质含量、全氮含量、全磷含量、铵态氮含量、速效磷含量、速效钾含量分别为34.39 g·kg⁻¹、2.20 g·kg⁻¹、2.44 g·kg⁻¹、121.00 mg·kg⁻¹、27.60 mg·kg⁻¹、290.00 mg·kg⁻¹,pH为8.18。试验地前茬种植作物为燕麦。供试燕麦品种为‘青燕3号’、饲用豌豆品种为‘青建1号’,种子千粒重分别为43.20和159.15 g,发芽率分别为98%和97%。两个品种为青海地区大面积种植的主推饲草品种,具有抗逆性强、饲草产量高和品质优等特点。

1.2 试验设计

本试验采用裂区设计,以氮添加水平为主区,间作种植模式为副区。主区设置3个氮添加水平:对照(0 kg·hm⁻²)、低氮(50 kg·hm⁻²)和高氮(200 kg·hm⁻²),氮源为尿素(N≥46%,云南云天化股份有限公司)。副区包括两种种植模式:1)单播:‘青燕3号’燕麦单播和‘青建1号’饲用豌豆单播;2)间作:‘青燕3号’燕麦与‘青建1号’饲用豌豆的同行混播和隔行间作。同行混播采用两种作物单播播种量的50%,种子混合后均匀撒播;隔行间作则按单播播种量交替种植4行燕麦和4行饲用豌豆。

试验共设置4个重复区组,每个区组面积为15 m×20 m,内含12个小区(2 m×5 m),分别对应氮添加水平和种植模式的组合。区组间设置2 m保护行,小区间设置1 m行间距。试验于2022年5月初开展,采用人工开沟器进行播种,每小区开沟8行,沟间距25 cm,沟深5 cm。根据当地种植习惯及相关文献^[22],确定‘青燕3号’燕麦和‘青建1号’饲用豌豆的播种量分别为225和112.5 kg·hm⁻²。氮添加处理区分别在播种期和拔节期分两次施入尿素。播种期施入总氮添加量的50%,拔节期施入剩余50%。播种期施肥采用尿素与田间表层土按1:10(质量比)混合后均匀撒施。为避免尿素直接接触茎叶造成茎叶灼伤,拔节期用自来水溶解尿素进行叶面喷施(尿素与自来水质量比为1:5),未添加氮处理区喷洒等质量的自来水。播种期施入过磷酸钙(P₂O₅≥12%,南京多力农资有限

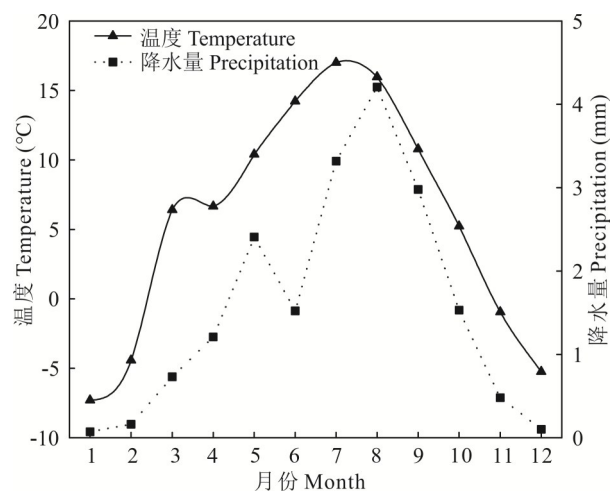


图1 2022年试验点月平均气温和降水分布

Fig. 1 Average temperature and precipitation in different months of the pilot area in 2022

公司)作为基肥,用量为 $375\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,以满足试验地土壤低有效磷条件下作物生长需求。

1.3 测定指标及方法

由于乳熟期燕麦地上生物量最高、营养价值最优,故燕麦乳熟期各小区随机选取面积 0.25 m^2 ($50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$)的样方齐地面刈割样方内燕麦和豌豆地上茎叶。由于燕麦和豌豆主根均属浅根系植物^[23],将样方内深度 30 cm 含土壤和根系的土方块挖出并置于直径 60 cm 、高度 1 m 的水桶内浸泡 24 h ,用流水轻轻清洗根系附着土壤并收集根系样品。茎叶和根系带回实验室, $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min , $65\text{ }^\circ\text{C}$ 烘至恒重并称量。采用5点采样法采集各小区 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层的土壤,过 0.83 mm 筛,挑除碎石和根系。各处理土样充分混匀,分两部分带回实验室,其中,一部分土壤室内自然风干并过 0.075 mm 筛;另一部分新鲜土壤置于 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱内保存用于土壤硝态氮和铵态氮测定。

植物和土壤全氮含量测定:烘干燕麦和饲用豌豆样品按茎叶和根分开,粉碎后过 0.075 mm 筛。称取 0.2 g 样品放入 100 mL 消煮管内,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 法消解,并利用PROXIMA连续流动分析仪(法国Alliance)测定燕麦和饲用豌豆茎叶、根系和土壤的全氮含量^[24]。

土壤铵态氮和硝态氮含量测定: $4\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱保存新鲜土样过 0.83 mm 筛,精确称取 10 g ,放入含有 100 mL 氯化钾溶液(浓度: $74.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)的 250 mL 三角瓶内,塞紧瓶塞, $25\text{ }^\circ\text{C}$ 振荡器(JC-2102C,中国上海)上振荡 1 h 后过滤振荡液,滤液于 24 h 内使用PROXIMA连续流动分析仪测定土壤铵态氮和硝态氮含量^[24]。

1.4 数据分析

采用一般线性模型中双因素方差分析进行统计分析,种植模式和氮水平设定为固定变量,区组设定为随机变量,分析种植模式和氮水平及种植模式与氮水平交互作用对‘青燕3号’燕麦或‘青建1号’饲用豌豆生物量(地上和地下)、全氮(包括茎叶、根系和土壤)、土壤硝态氮和铵态氮含量的影响。同时,采用单因素方差分析不同氮水平或间作模式下燕麦或豌豆生物量、全氮、土壤硝态氮和铵态氮含量的变化。另外,为评估不同间作方式和氮添加水平对燕麦、豌豆生物量和氮素(全氮、铵态氮和硝态氮)吸收利用的贡献,利用结构模型方程(structural equation modeling, SEM)分析种植模式和氮添加水平对豌豆、燕麦生长及氮素吸收利用的影响。其中,不同间作种植模式和氮添加作为起始变量,植株(茎叶和根系)全氮和土壤全氮、铵态氮、硝态氮作为关键因子,燕麦和豌豆生物量设为目标变量。使用拟合优度卡方检测及相关 P 值评估模型的拟合效果,当 P 值介于 $0.05\sim 1.00$,判定模型拟合度较好^[24]。另外,选取R语言中偏最小二乘法路径(partial least squares path modeling, PLS-PM)模块构建分段结构模型方程。利用SPSS 21.0进行数据统计,采用Origin 22.0和Canoco 5软件绘图,图中数据用“平均值±标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 氮添加和间作种植模式对燕麦、豌豆生物量的影响

不同间作模式和氮添加水平对燕麦生物量(地上和地下)存在极显著影响,而氮添加水平对豌豆地上生物量、不同间作模式对豌豆地上、地下生物量有显著影响(表1, $P<0.05$)。值得注意的是,燕麦生物量和豌豆地上生物量受氮添加和间作模式交互作用的影响(表1, $P<0.05$)。单播、间作种植燕麦和单播种植豌豆的地上生物量随氮添加量增加而增加(图2a和b, $P<0.05$),同行混播豌豆的地上生物量在低氮添加条件下最高(图2b, $P<0.05$),氮添加隔行间作豌豆的地上生物量显著低于未添加对照(图2b, $P<0.05$)。单播燕麦地下生物量在低氮添加条件下最高(图2c, $P<0.05$),而不添加氮间作种植燕麦地下生物量显著低于氮添加间作燕麦地下生物量(图2c, $P<0.05$)。不同间作模式豌豆的地下生物量随氮添加量的增加均呈先上升后下降趋势,且低氮添加豌豆地下生物量最高(图2d, $P<0.05$)。

2.2 氮添加和间作种植模式对燕麦和豌豆茎叶、根系全氮含量的影响

间作种植模式和氮添加水平及间作种植模式和氮添加水平交互作用对燕麦和豌豆茎叶及根系全氮含量均存在显著影响(表2, $P<0.05$)。随氮添加量增加,单播和同行混播燕麦茎叶全氮含量呈先降后增的变化,而隔行间作燕麦茎叶全氮含量呈先增加后降低变化(图3a);同时,相同氮添加水平下,隔行间作和同行混播燕麦茎叶全氮含量显著高于单播燕麦(图3a)。然而,高氮添加的单播、同行混合和隔行间作燕麦根系的全氮含量显著高于未

表 1 间作种植模式和氮添加对燕麦、豌豆生物量影响的双因素方差分析

Table 1 Results of two-way ANOVA of different intercropped planting patterns and nitrogen addition levels on aboveground and belowground biomass of oats and peas

处理 Treatment	自由度 Degree of freedom	地上生物量 Aboveground biomass				地下生物量 Belowground biomass			
		燕麦 Oat		豌豆 Pea		燕麦 Oat		豌豆 Pea	
		F	P	F	P	F	P	F	P
间作种植模式 Intercropping planting patterns (I)	2	7.84	<0.01	23.26	<0.01	8.40	<0.01	17.82	<0.01
氮添加水平 Nitrogen (N)	2	17.46	<0.01	21.21	0.01	106.94	<0.01	1.89	0.17
间作种植模式×施氮水平 (I×N)	4	3.63	<0.01	8.43	0.01	3.63	<0.01	1.23	0.32

注: $P < 0.05$ 表示差异显著; $P < 0.01$ 表示差异极显著, 下同。

Note: $P < 0.05$ indicate significant difference; $P < 0.01$ indicate extremely significant difference, the same below.

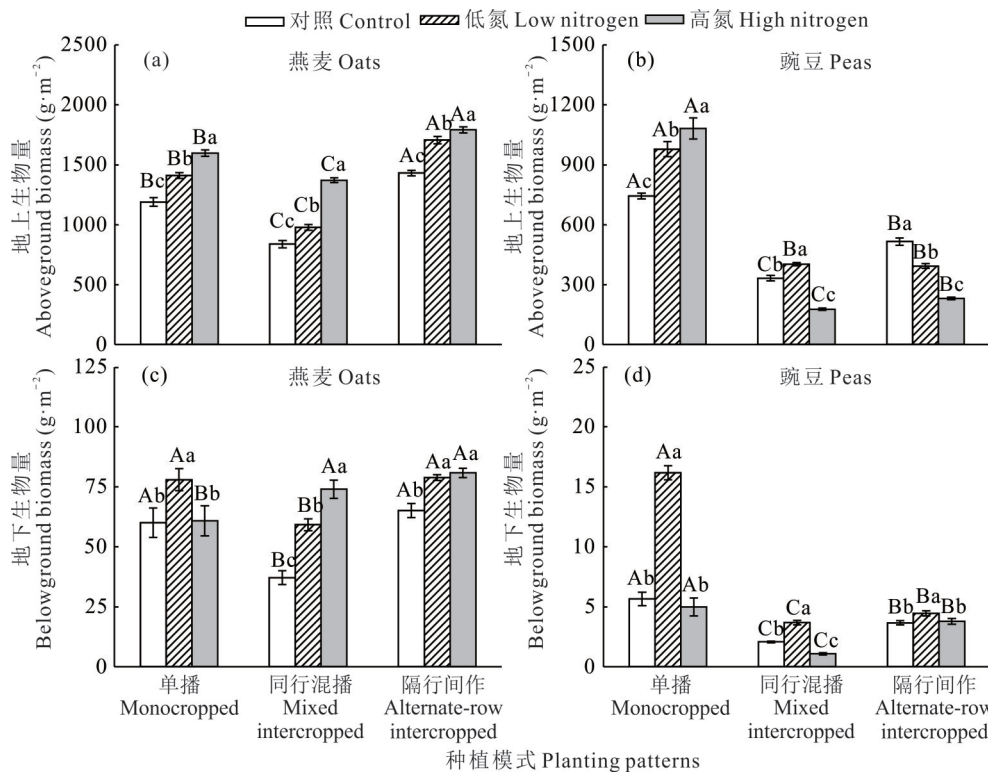


图 2 氮添加对不同间作种植模式燕麦和豌豆生物量的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen addition levels on aboveground and belowground biomass of oats and peas among different intercropped planting patterns

不同大写字母表示不同种植模式在相同氮添加水平下差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同种植模式在不同氮添加水平下差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different capital letters indicate significantly different among different intercropped planting patterns at 0.05 level under the same nitrogen addition level, and different lowercase letters for the same intercropped planting patterns indicate significant differences among different nitrogen addition levels, the same below.

添加氮处理燕麦根系全氮含量 (图 3c, $P < 0.05$); 低氮添加隔行间作燕麦根系全氮含量高于同行混合间作和未添加氮燕麦根系全氮含量 (图 3c, $P < 0.05$), 而高氮添加隔行间作燕麦根系全氮含量却显著低于单播和同行混合间作燕麦根系全氮含量 (图 3c, $P < 0.05$)。高氮添加条件下, 单播和同行混合间作豌豆茎叶全氮含量高于未添加氮的单播和同行混合间作豌豆茎叶全氮含量 (图 3b)。然而, 高氮添加 3 种植模式豌豆根系全氮含量显著高于未添加氮 3 种植模式豌豆根系全氮含量 (图 3d, $P < 0.05$)。未添加和高氮添加条件下, 单播豌豆根系全氮含量显著高于间作种植豌豆根系全氮含量 (图 3d, $P < 0.05$)。

表2 间作种植模式和氮添加水平对燕麦、豌豆茎叶和根系全氮含量影响的双因素方差分析

Table 2 Results of two-way ANOVA of total nitrogen content in stems and leaves, roots of oats and peas with combined effects of different intercropped planting patterns and nitrogen addition levels

物种 Species	处理 Treatment	自由度 Degree of freedom	茎叶全氮含量 Total nitrogen content of stems and leaves		根系全氮含量 Total nitrogen content of roots	
			F	P	F	P
豌豆 Peas	间作种植模式 Intercropping planting patterns (I)	2	9.87	<0.01	45.61	<0.01
	氮添加水平 Nitrogen (N)	2	4.75	<0.05	10.76	<0.01
	间作种植模式×施氮水平 (I×N)	4	28.44	<0.01	18.96	<0.01
燕麦 Oats	间作种植模式 Intercropping planting patterns (I)	2	37.23	<0.01	5.37	<0.01
	氮添加水平 Nitrogen (N)	2	4.00	<0.05	36.00	<0.01
	间作种植模式×施氮水平 (I×N)	4	11.17	<0.01	6.75	<0.01

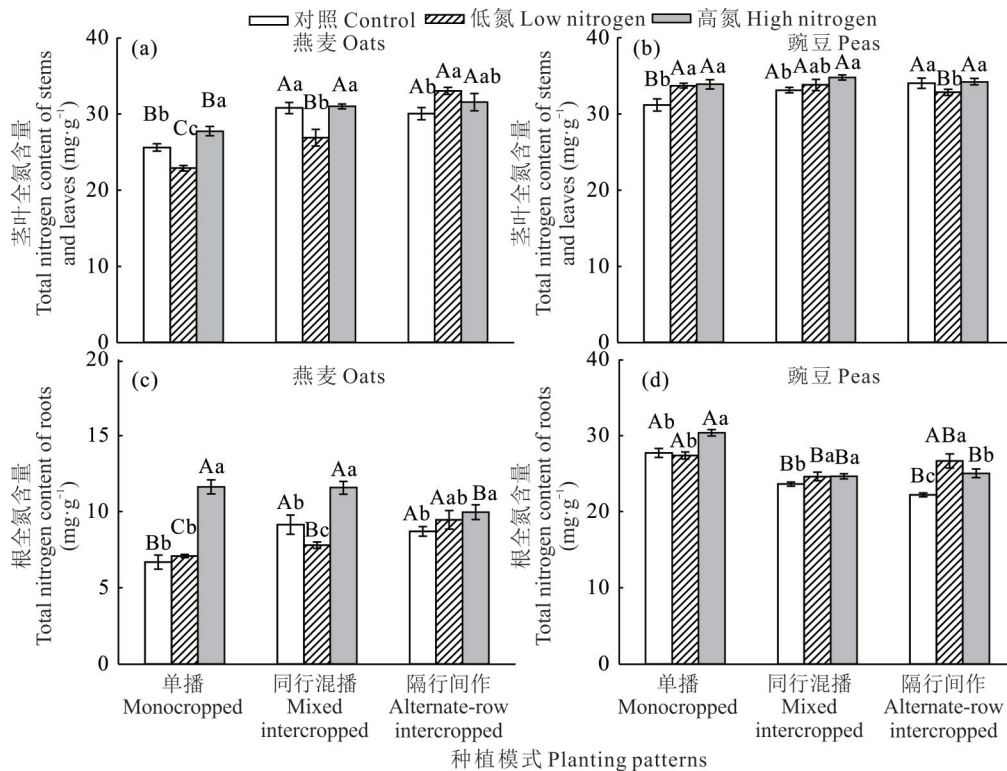


图3 氮添加对不同间作种植模式燕麦、豌豆茎叶和根系全氮含量的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen addition levels on total nitrogen contents in stems and leaves and roots of oats and peas among different intercropped planting patterns

2.3 氮添加和间作种植模式对燕麦、豌豆土壤全氮、硝态氮及铵态氮含量的影响

由表3可知,燕麦和豌豆间作种植模式对土壤全氮存在显著影响($P < 0.05$),而氮添加水平、氮添加水平与间作种植模式的交互作用对土壤全氮含量无显著影响(表3, $P > 0.05$)。同时,间作种植模式、氮添加水平及二者交互作用对土壤铵态氮和硝态氮含量存在显著或极显著影响(表3)。未添加氮条件下,燕麦单播、燕麦与豌豆同行混合间作种植区土壤全氮含量显著高于氮添加处理;高氮添加后,燕麦和豌豆隔行间作种植区土壤全氮含量高于燕麦单播种植区土壤全氮含量,但二者差异不显著(图4a)。豌豆单播、豌豆和燕麦隔行间作种植区土壤的全氮含量随氮添加量增加呈先增加后降低变化,而豌豆和燕麦同行混播种植区土壤的全氮含量却呈先降低后增加变化(图4b, $P < 0.05$)。低氮添加后,豌豆单播、豌豆和燕麦隔行间作种植区土壤全氮含量较高,而豌豆和燕麦同行

表 3 燕麦、豌豆不同间作模式和氮素水平对土壤氮素含量影响的双因素方差分析

Table 3 Results of two-way ANOVA of soil nitrogen content under different intercropped planting patterns of oats and peas combined with nitrogen addition levels

处理 Treatment	自由度 Degree of freedom	土壤全氮含量 Total nitrogen content in soil		土壤铵态氮含量 NH ₄ ⁺ -N content in soil		土壤硝态氮含量 NO ₃ ⁻ -N content in soil	
		F	P	F	P	F	P
		间作种植模式 Intercropping planting patterns (I)	2	2.96	<0.05	3.83	<0.05
氮添加水平 Nitrogen (N)	2	1.01	0.37	6.50	<0.01	53.82	<0.01
间作种植模式×施氮水平 (I×N)	4	1.32	0.26	5.22	<0.01	7.96	<0.01

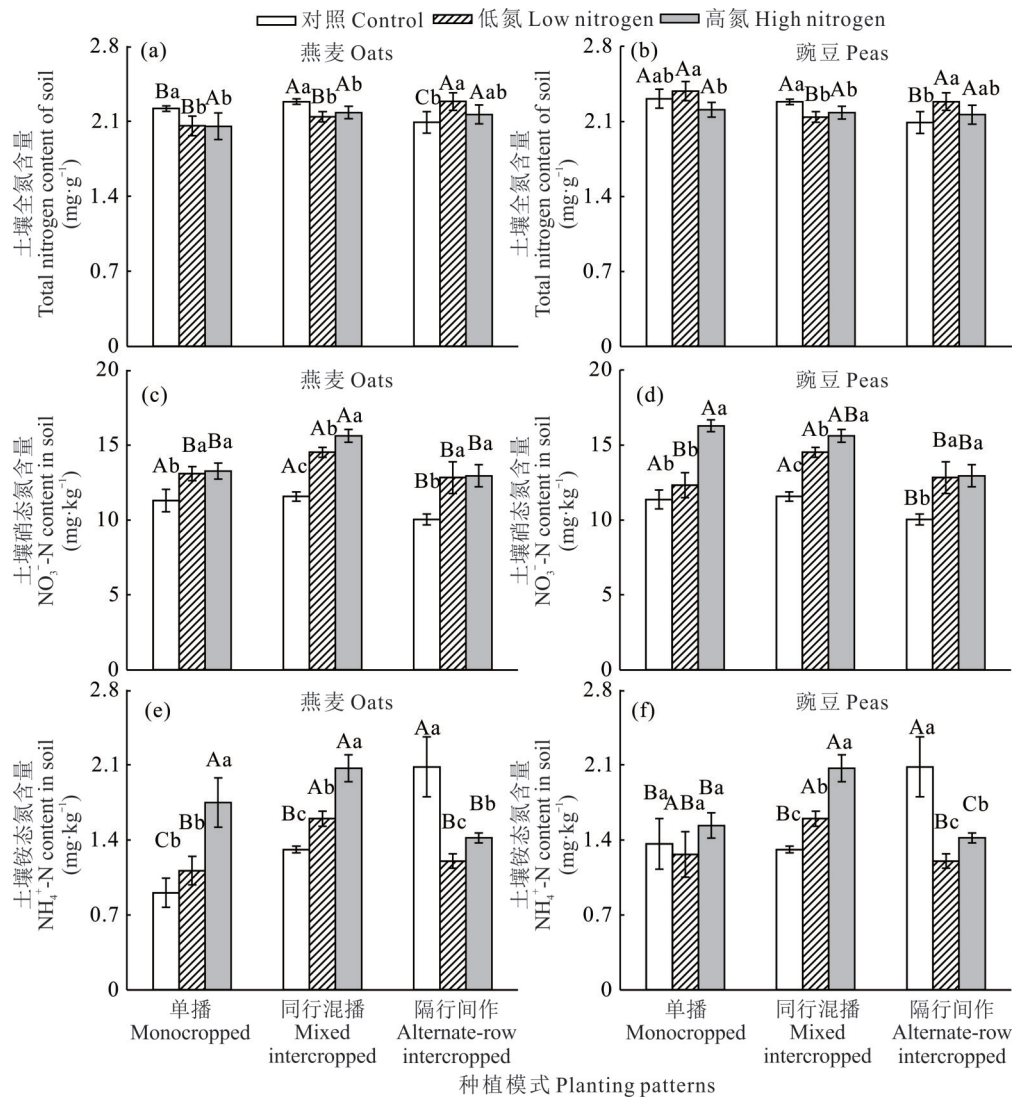


图 4 氮添加对燕麦和豌豆不同间作种植模式土壤全氮含量、铵态氮及硝态氮含量的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen addition on total nitrogen, NO₃⁻-N and NH₄⁺-N contents of soil in different intercropped patterns between oats and peas

混播种植区土壤全氮含量最低(图 4b, $P < 0.05$)。氮添加条件下,燕麦与豌豆同行混播和隔行间作种植区土壤硝态氮含量显著高于未添加处理,其中,氮添加处理的燕麦与豌豆同行混播种植区土壤的硝态氮含量显著高于燕麦单播及燕麦和豌豆隔行间作种植区土壤硝态氮含量(图 4c, $P < 0.05$)。与硝态氮变化不同,氮添加处理的燕麦单播、燕麦和豌豆同行混播土壤铵态氮含量显著高于未添加氮处理的燕麦单播及燕麦和豌豆同行混播土壤铵态氮

含量,而未添加氮处理的燕麦和豌豆隔行间作土壤铵态氮含量却显著高于氮添加燕麦和豌豆隔行间作燕麦和豌豆土壤铵态氮含量(图4e和f, $P < 0.05$)。

2.4 氮添加、间作种植模式与燕麦和豌豆生物量、茎叶全氮和土壤氮素含量关联性

冗余分析(redundancy analysis, RDA)结果表明,氮添加与燕麦地上和地下生物量、茎叶和根系全氮、土壤速效氮(硝态氮和铵态氮)含量间呈正相关(图5a)。种植模式与茎叶、根系和土壤全氮及土壤铵态氮和硝态氮含量呈正相关,而与地上和地下生物量间呈负相关(图5a)。氮添加与豌豆土壤铵态氮含量、茎叶和根系全氮、土壤硝态氮含量间呈正相关,而与地上和地下生物量及土壤全氮含量呈负相关(图5b)。种植模式与土壤铵态氮和硝态氮、茎叶全氮含量间呈正相关,而与地上和地下生物量、土壤和根系全氮含量呈负相关(图5b)。

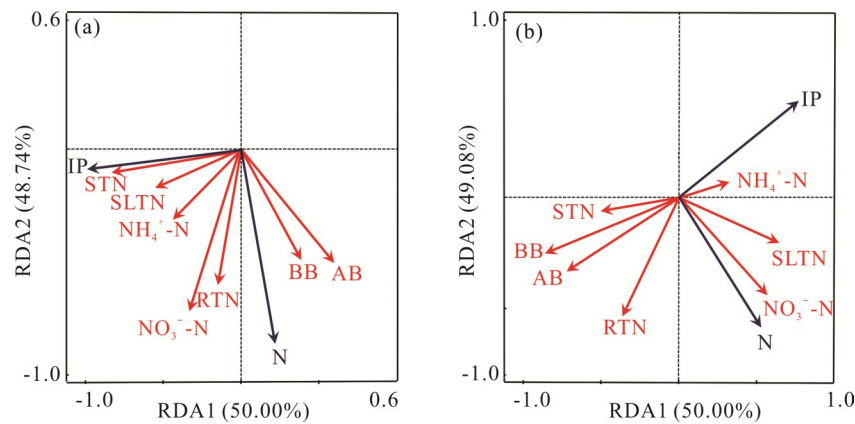


图5 不同间作种植模式和氮添加与燕麦(a)和豌豆(b)生物量及氮素含量间的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) of biomass and nitrogen contents in oats (a) and peas (b) with intercropping patterns and nitrogen addition

IP代表不同间作种植模式,N代表氮添加水平,STN代表土壤全氮含量,SLTN代表茎叶全氮含量,RTN代表根系全氮含量, NH_4^+ -N代表土壤铵态氮含量, NO_3^- -N代表土壤硝态氮含量,AB代表地上生物量,BB代表地下生物量。IP was the abbreviation of different intercropped patterns between oats and peas, N was the abbreviation of different nitrogen addition levels, STN was the abbreviation of soil total nitrogen content, SLTN was the abbreviation of stems and leaves total nitrogen content, RTN was the abbreviation of root total nitrogen content, NH_4^+ -N indicated the soil ammonium nitrogen content, NO_3^- -N indicated soil nitrate nitrogen content, AB was the abbreviation of aboveground biomass, BB was the abbreviation of belowground biomass. 下同 The same below.

SEM路径综合分析显示,氮添加水平、间作种植模式与燕麦和豌豆茎叶、根系、土壤氮素含量存在显著关联性并最终影响燕麦和豌豆地下和地上生物量(图6)。其中,间作方式与燕麦茎叶、根系和土壤全氮及铵态氮含量呈显著正相关,路径系数分别为0.557、0.205、0.198和0.221(图6a);同时,间作种植模式、土壤和茎叶全氮及土壤硝态氮含量与地下生物量呈显著负相关,路径系数分别为-0.778、-0.099、-0.107和-0.304(图6a);另外,燕麦地上生物量与间作种植模式和燕麦地下生物量间呈显著正相关,路径系数分别为1.476和1.402(图6a)。氮添加与根系全氮和土壤硝态氮含量呈显著正相关,路径系数分别为0.603和0.601;而与土壤全氮含量呈显著负相关,路径系数为-0.230(图6a)。同时,氮添加与燕麦地上和地下生物均呈显著正相关,路径系数分别为0.450和0.271(图6a)。间作方式与豌豆地上和地下生物量、根系和土壤全氮及土壤铵态氮和硝态氮含量呈显著负相关,路径系数分别为-0.542、-0.132、-0.556、-0.206、-0.166和-0.251(图6b)。氮添加与豌豆地上和地下生物量、土壤和茎叶全氮含量呈显著负相关,路径系数分别为-0.348、-0.151、-0.225和-0.075;而与根系全氮和土壤硝态氮呈显著正相关,路径系数分别为0.352和0.593(图6b)。同时,根系全氮含量与豌豆地下生物量呈显著正相关,路径系数为0.760;而土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量却与豌豆地下生物量呈显著负相关,路径系数分别为-0.220、-0.112和-0.415(图6b)。另外,燕麦、豌豆的地下和地上生物量间呈显著正相关,路径系数分别为1.402和0.318(图6)。

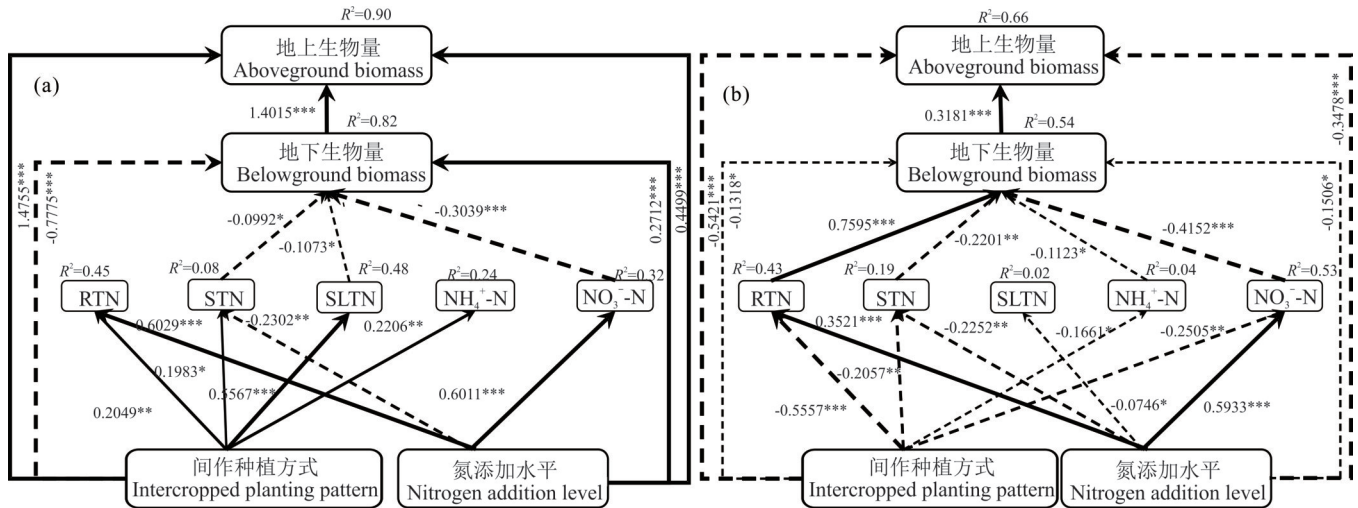


图 6 氮添加水平和间作种植模式对燕麦和豌豆茎叶、根系和土壤氮素含量及生物量影响的结构模型方程

Fig. 6 Structural equation model (SEM) based on effects of nitrogen addition levels and intercropped planting patterns on shoots (including stems and leaves), root and soil nitrogen contents and above- and belowground biomass of oats and peas

图 a 和 b 分别表示氮添加和不同间作种植模式对燕麦和豌豆茎叶、根系土壤氮素含量及生物量影响的结构模型方程。选择 R 语言中偏最小二乘结构方程包进行模型构建, 结构模型中的实线和虚线分别代表变量间的正、负相关性。虚线和实线上的数值为标准化路径系数, 数值上标记的星号及数量表示关系强度, * 表示 0.05 水平上显著相关, ** 和 *** 分别表示 0.01 和 0.001 水平上极显著相关。线条粗细与相关性强度呈正比, R^2 表示解释方差的比例。Figure a, b demonstrated the SEM based on effects of nitrogen addition levels and intercropped planting patterns on shoots and soil nitrogen contents and above- and belowground biomass of oats and peas, respectively. A piecewise SEM module package in R language was employed to evaluate and construct the piecewise structural equations. Solid and dotted lines in SEM indicated the positive or negative correlation between variables, respectively. The value above these solid or dotted lines indicated the normalized path coefficients of variables, * indicated significant correlation at 0.05 level, ** and *** indicated extremely significant correlation at 0.01 and 0.001 level, respectively. Width of the solid and dotted lines was proportional of the strength of positive or negative correlation. The value of R^2 indicated the proportion of the interpreted variance.

3 讨论

3.1 间作模式对燕麦和豌豆氮素吸收的调控作用

研究证明禾本科与豆科植株间作能显著提高间作系统生产力, 这主要与禾本科植物生长周期内对氮素需求高属耗氮类植物, 能直接刺激同域生长豆科植物的生物固氮能力, 即经典的“根系氮素耗竭作用”理论^[20]。间作系统建植初期, 禾本科植物凭借发芽时间短、根系发育快等特性对生长所需资源获取常处于主导地位; 相比之下, 豆科植物发芽耗时长且根系发育滞后, 导致豆科植物对资源竞争能力低于禾本科植物^[25]。禾本科营养生长阶段对氮素的需求持续增加, 造成豆科植物根际周围土壤中有效氮含量处于亏损状态, 豆科植物会强化根部根瘤菌固氮能力, 进而丰盈豆科植物根际土壤矿质氮含量^[26]。例如, Xiao 等^[26]研究发现蚕豆与小麦 (*Triticum aestivum*) 间作种植时, 蚕豆共生固氮效率提高 33%, 间作小麦 15% 氮素来源于间作蚕豆固定大气中游离态的氮。Hauggaard-Nielsen 等^[27]的研究结果表明, 大麦 (*Hordeum vulgare*) 与豌豆间作种植后, 间作豌豆共生固氮效率比单播豌豆提高 29%, 导致间作大麦茎叶氮含量比单播大麦增加 3 倍。Li 等^[28]开展蚕豆与玉米间作研究也证明开花期、灌浆期和完熟期间作蚕豆的生物固氮效率显著高于单播蚕豆。本研究结果发现燕麦与豌豆间作种植后, 间作燕麦茎叶全氮含量显著高于单播燕麦 (图 3), 从侧面支持间作燕麦能获得部分豌豆通过共生固氮作用固定的氮素; 同时, 燕麦/豌豆间作种植后土壤硝态氮含量的显著提高也进一步支持间作能强化间作豌豆的共生固氮能力, 进而丰盈土壤有效氮素含量的假设。

然而, 本研究也发现单播和间作种植对燕麦、豌豆土壤全氮含量影响不显著, 而对土壤速效氮含量影响明显。其中, 除高氮添加外, 同行混播种植燕麦土壤中硝态氮和铵态氮含量显著高于单播燕麦; 而单播和同行混播种植豌豆土壤中硝态氮含量显著高于隔行间作种植豌豆土壤中硝态氮含量, 同时, 同行混播种植豌豆土壤中铵态氮含量显著高于单播豌豆的土壤中铵态氮含量 (图 4)。由此可见, 燕麦与豌豆不同间作种植方式能有效改变土壤中

有效氮素的含量,这主要与豌豆生物固氮与燕麦耗氮特性、燕麦和豌豆根系构型差异及二者对氮素吸收利用偏好性差异有关。首先,豌豆可通过根际共生根瘤菌将大气中惰性氮气转化为植物生长所需的氮素,从而增加土壤铵态氮和硝态氮含量。相比之下,燕麦属高耗氮类植物,燕麦持续消耗土壤中有效氮素含量造成土壤有效氮素降低,而豆科固氮特性能及时补充部分土壤中因燕麦生长所消耗的有效氮素,将为燕麦和豌豆间作种植提高土壤有效氮素含量提供直接证据^[29]。同时,主根细长、侧根发达的燕麦根系对土壤养分具有较强的获取能力,而主根粗短、侧根稀疏豌豆对土壤养分获取能力较弱,燕麦和豌豆同行混播种植条件下,由于燕麦和豌豆根系紧密缠绕,两种植物对土壤资源利用生态位重叠,表现出对土壤氮素的高强度竞争状态^[23]。土壤有效氮高消耗过程将进一步提高豌豆固氮效率,致使土壤有效氮含量维持一种平衡状态;相比之下,隔行间作燕麦与豌豆对土壤养分竞争强度较低,燕麦优先吸收原位土壤中的有效氮素,而对豌豆生物固氮氮素利用次之,这将为同行混播间作种植土壤的有效氮含量高于隔行间作种植土壤进行合理解释^[30]。另外,众多研究表明禾豆间作系统内,燕麦和豆科植物分别对硝态氮和铵态氮表现出吸收偏好性。燕麦营养生长阶段主要以消耗土壤中硝态氮来维持自身生长,而生殖生长阶段主要消耗铵态氮来加速种子形成和成熟^[31]。相比之下,豌豆生长初期主要消耗种内贮存的氮及土壤中的铵态氮,这主要与豌豆吸收过多硝态氮能明显抑制豌豆根瘤和固氮能力进而抑制豌豆生长有关。然而,豌豆生长后期,由于根系快速生长和根瘤数量增加,导致其生物固氮能力加强,不断丰盈土壤铵态氮含量,这将为燕麦生殖生长阶段所需铵态氮提供保障^[32]。综上所述,燕麦和豌豆间作种植不仅能有效增加土壤有效氮含量,同时也能提高土壤中铵态氮和硝态氮的利用效率,最终实现间作系统对土壤氮素高效利用及系统生产力提升。

3.2 氮添加对燕麦和豌豆间作种植系统氮素吸收的影响

外源氮素添加是提高土壤可利用氮素最直接、最便捷的途径,也是禾豆间作种植体系生产力提升的关键途径之一。然而,不同间作种植系统对氮添加的响应存在差异^[33-34]。本研究发现,单播种植时,高氮添加燕麦、豌豆茎叶和根系全氮含量显著高于未添加氮处理(图3),说明高水平氮投入可直接提高燕麦和豌豆根系氮素获取和吸收能力,进而增加单播燕麦和豌豆茎叶全氮含量。同行混播种植条件下,低氮添加燕麦茎叶和根系全氮含量却显著低于未添加和高氮添加燕麦全氮含量(图3),说明燕麦与豌豆混合播种对氮素资源竞争强度最高、氮素利用率较高,这也为低氮条件下混播燕麦和豌豆积累较高生物量提供证据^[20,28]。值得注意的是,低氮添加隔行间作种植条件下,燕麦茎叶全氮含量最高而根系全氮含量与未添加和高氮添加处理全氮差异不显著。这一结论进一步支持低氮添加隔行间作燕麦获取氮素能力明显优于未添加和高氮添加燕麦,这与低氮添加间作豌豆茎叶全氮含量显著高于未添加和高氮添加豌豆茎叶全氮含量相悖,说明低氮添加能有效强化豌豆生物固氮能力,增加土壤有效氮素含量进而满足燕麦生长所需氮素,营造燕麦和豌豆间养分供需的稳定状态,实现间作系统生产力提升^[11,35]。随氮添加量增加,间作(同行混合和隔行)燕麦和豌豆土壤硝态氮含量显著高于单播燕麦和豌豆土壤硝态氮含量(图4)。证明外源尿素添加可直接增加土壤硝态氮含量,同时,由于燕麦单播种间竞争强度强于间作燕麦,造成单播燕麦对土壤中硝态氮消耗强度高于间作燕麦^[13,36]。与之相反,隔行间作种植区燕麦和豌豆土壤铵态氮含量却随氮添加量增加而降低(图4),造成这种现象的原因主要为:1)隔行间作种植燕麦和豌豆的种间生态位分离,导致燕麦和豌豆种间的竞争强度低于燕麦单播、燕麦与豌豆同行混合间作,造成隔行间作豌豆根部固氮细菌的固氮效率下降,最终导致隔行间作种植区土壤铵态氮含量较低^[37-38];2)外源氮素添加能显著抑制豆科植物根瘤形成和发育,进而降低豌豆固氮能力,这也从侧面为未添加氮燕麦和豌豆间作土壤硝态氮含量较高提供证据^[39]。由此可见,外源氮素添加可直接补充土壤无机氮含量,但氮添加量对单播和间作燕麦和豌豆的氮素吸收利用能力存在明显影响,表现出单播和同行混合间作种植模式的土壤硝态氮随施氮量增加持续增加,而隔行间作种植模式的铵态氮却随氮添加量增加而降低^[40]。

3.3 不同间作种植模式和氮添加互作对燕麦和豌豆氮素吸收利用的影响

间作种植模式、外源氮添加均对禾豆间作系统生产力具有明显增产效应,这主要与间作种植和氮添加增加土壤有效氮含量,满足间作系统生长所需氮素,进而整体提高间作系统生产力相关^[41-43]。本研究发现不同间作种植模式和氮添加对燕麦、豌豆氮素吸收和生物量积累影响总体存在明显差异。具体表现为:间作种植方式能明显增

加燕麦根系、茎叶和土壤全氮含量及土壤铵态氮含量,氮添加直接增加土壤硝态氮含量和根系全氮含量,而土壤、茎叶全氮和硝态氮含量增加却造成燕麦根系生物量降低(图 6a)。说明间作种植能增加土壤铵态氮含量,一方面燕麦耗氮特性强化豌豆生物固氮能力,进而增加土壤铵态氮含量;同时,外源氮素添加可直接增加土壤硝态氮含量。土壤中铵态氮和硝态氮含量增加便于燕麦根系直接吸收原位土壤中有效氮,满足地上植株生长所需氮素,土壤有效氮素充盈的环境下燕麦只需分配少量光合产物维持根系生长,无须通过改变燕麦根系构型获取更多氮素,造成燕麦根系生物量增加不明显。相比之下,燕麦根系直接吸收间作种植和氮添加互作土壤中丰富的有效氮素直接输送至茎叶,保障茎叶快速生长,最终导致燕麦生物量显著增加。

豌豆作为间作种植组合土壤氮素主要供给者,间作种植却显著降低豌豆根系、土壤全氮及土壤铵态氮和硝态氮含量,而氮添加却显著增加豌豆根系全氮和硝态氮含量(图 6b)。虽然豌豆通过生物固氮能有效增加土壤有效氮含量,然而其对氮素吸收利用能力较低。主要原因为:1)燕麦和豌豆间作体系中燕麦高大株型对阳光拦截能力较强,豌豆长期处于遮阴生长环境,造成地上植株通过光合作用合成碳水化合物向根系输入量降低,导致根系发育迟缓,获取土壤有效氮能力较弱。2)豌豆主根粗短、侧根不发达造成营养吸收能力较弱,而燕麦则利用发达的侧根可获取豌豆根际周围有效氮,激发豌豆生物固氮。然而,豌豆生物固氮属高耗能过程,由于燕麦遮阴对光合作用受限,豌豆需大量投入光合产物至根部,造成豌豆地上生物量降低。氮添加虽然能短期暂时缓解燕麦对豌豆根际有效氮的摄取,而高氮素投入造成土壤酸化,抑制豌豆根瘤形成,造成固氮能力降低,可见氮添加对豌豆生物量积累总体呈抑制作用^[44]。

4 结论

间作种植模式、氮添加能明显提高燕麦与豌豆间作体系生产力,其中,间作种植能显著增加燕麦植株(茎叶和根系)全氮含量却降低豌豆根系全氮含量。同时,间作能明显提高间作种植土壤速效氮含量,说明间作种植能显著提高间作优势种群燕麦氮素获取和吸收能力,进而促进燕麦快速生长和积累更多生物量。随外源氮添加量增加,间作燕麦植株全氮和土壤硝态氮明显增加,单播豌豆茎叶和土壤茎叶全氮含量最高;说明外源氮添加能增加燕麦茎叶的全氮含量和土壤速效氮含量,而抑制豌豆对氮素的吸收利用。另外,间作种植模式和氮添加互作对燕麦氮素吸收和生物量积累表现出正向调控作用,而对豌豆表现出负向调控。综上所述,高寒区人工草地建植不仅要选择最佳的燕麦与豌豆间作模式(隔行间作种植),同时要适时适量补充土壤氮素,营造燕麦和豌豆间作体系资源高效利用的生长环境,最终实现禾豆混播人工草地生产力最大限度提升的目标。

参考文献 References:

- [1] Mousavi S R, Eskandari H. A general overview on intercropping and its advantages in sustainable agriculture. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 2011, 1(11): 482–486.
- [2] Brooker R W, Bennett A E, Cong W F, *et al.* Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 2015, 206(1): 107–117.
- [3] Li L, Tilman D, Lambers H, *et al.* Plant diversity and overyielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture. *New Phytologist*, 2014, 203(1): 63–69.
- [4] Maitra S, Hossain A, Brestic M, *et al.* Intercropping—A low input agricultural strategy for food and environmental security. *Agronomy*, 2021, 11(2): 343.
- [5] Li X F, Wang Z G, Bao X G, *et al.* Long-term increased grain yield and soil fertility from intercropping. *Nature Sustainability*, 2021, 4(11): 943–950.
- [6] Ryan M R. Crops better when grown together. *Nature Sustainability*, 2021, 4(11): 926–927.
- [7] Ma H Y, Zhou J, Ge J Y, *et al.* Intercropping improves soil ecosystem multifunctionality through enhanced available nutrients but depends on regional factors. *Plant and Soil*, 2022, 480(1/2): 71–84.
- [8] Zhang D, Lyu Y, Li H, *et al.* Neighbouring plants modify maize root foraging for phosphorus: coupling nutrients and neighbours for improved nutrient-use efficiency. *New Phytologist*, 2020, 226(1): 244–253.
- [9] Garland G, Edlinger A, Banerjee S, *et al.* Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and

- cereal yields in European cropping systems. *Nature Food*, 2021, 2(1): 28–37.
- [10] Yan H L, Gu S S, Li S Z, *et al.* Grass legume mixtures enhance forage production via the bacterial community. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 338: 108087.
- [11] Neugschwandtner R W, Kaul H P, Moitzi G, *et al.* A low nitrogen fertiliser rate in oat-pea intercrops does not impair N₂ fixation. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2021, 71(3): 182–190.
- [12] Bao G S, Zhang P, Ma X, *et al.* Effect of nitrogen addition on forage and seed yields of intercropping system of *Avena sativa* and *Pisum sativum* in alpine regions. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(7): 2210–2219.
鲍根生, 张鹏, 马祥, 等. 高寒区氮添加对禾豆间作系统牧草和种子产量的影响. *草地学报*, 2023, 31(7): 2210–2219.
- [13] Wang Z K, Zhang X M, Ma Q H. Seed mixture of oats and common vetch on fertilizer and water-use reduction in a semi-arid alpine region. *Soil and Tillage Research*, 2022, 219: 105329.
- [14] Wang X, Zeng Z H, Zhu B, *et al.* Effect of different intercropping and mixture modes on forage yield and quality of oat and common vetch. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(11): 1892–1895.
王旭, 曾昭海, 朱波, 等. 箭筈豌豆与燕麦不同间作混播模式对产量和品质的影响. *作物学报*, 2007, 33(11): 1892–1895.
- [15] Liu M, Qiao N, Zhang Q, *et al.* Cropping regimes affect NO₃⁻ versus NH₄⁺ uptake by *Zea mays* and *Glycine max.* *Plant and Soil*, 2018, 426(1): 241–251.
- [16] Yu Y, Stomph T J, Makowski D, *et al.* Temporal niche differentiation increases the land equivalent ratio of annual intercrops: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 2015, 184: 133–144.
- [17] Xu Z, Li C J, Zhang C C, *et al.* Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use; A meta-analysis. *Field Crops Research*, 2020, 246: 107661.
- [18] Taylor B N, Menge D N. Light regulates tropical symbiotic nitrogen fixation more strongly than soil nitrogen. *Nature Plants*, 2018, 4(9): 655–661.
- [19] Cui Z L, Zhang H Y, Chen X P, *et al.* Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature*, 2018, 555(7696): 363–366.
- [20] Wang X Y, Gao Y Z. Advances in the mechanism of cereal/legume intercropping promotion of symbiotic nitrogen fixation. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(2/3): 142–149.
王新宇, 高英志. 禾本科/豆科间作促进豆科共生固氮机理研究进展. *科学通报*, 2020, 65(2/3): 142–149.
- [21] Feng X Y, Hou T L, Bao G S, *et al.* Effects of nitrogen addition on CNP stoichiometric traits of oat-pea intercropping system. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(2): 450–461.
冯晓云, 侯统璐, 鲍根生, 等. 氮添加对燕麦/豌豆间作体系碳氮磷化学计量特征的影响. *草地学报*, 2024, 32(2): 450–461.
- [22] Duan L X, Ma X, Ju Z L, *et al.* Effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of *Avena sativa* ‘Qinghai’. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(2): 471–478.
段连学, 马祥, 琚泽亮, 等. 减氮配施有机肥对‘青海甜燕麦’光合特性和产量的影响. *草地学报*, 2022, 30(2): 471–478.
- [23] Bao G S, Li Y, Feng X Y, *et al.* Interactive effects of intercropping patterns and nitrogen addition on root architectural characteristics of oat and pea in an alpine region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 73–84.
鲍根生, 李媛, 冯晓云, 等. 高寒区氮添加和间作种植互作对燕麦和豌豆根系构型影响的研究. *草业学报*, 2024, 33(3): 73–84.
- [24] Wu X R, Ye X S, Zhao Z Q. Comparison of determining the soil total nitrogen concentration with a continuous flow injection analyzer and Kjeldahl method. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2009, 28(5): 560–563.
吴晓荣, 叶祥盛, 赵竹青. 流动注射法与凯氏定氮法测定土壤全氮的比较. *华中农业大学学报*, 2009, 28(5): 560–563.
- [25] Lonati M, Moot D J, Aceto P, *et al.* Thermal time requirements for germination, emergence and seedling development of adventive legume and grass species. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2009, 52(1): 17–29.
- [26] Xiao Y B, Li L, Zhang F S. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and fababean using direct and indirect ¹⁵N techniques. *Plant and Soil*, 2004, 262: 45–54.
- [27] Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 65: 289–300.
- [28] Li Y Y, Yu C B, Cheng X, *et al.* Intercropping alleviates the inhibitory effect of N fertilization on nodulation and symbiotic N₂ fixation of faba bean. *Plant and Soil*, 2009, 323: 295–308.
- [29] Hichri I, Meilhoc E, Boscari A, *et al.* Nitric oxide: jack-of-all-trades of the nitrogen-fixing symbiosis? *Advances in Botanical*

- Research, 2016, 77: 193–218.
- [30] Zhu Y Q, Zheng W, Wang X, *et al.* Effects plant spacing pattern on root morphological and architectural characteristics of legume-grass mixtures. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(1): 73–85.
朱亚琼, 郑伟, 王祥, 等. 混播方式对豆禾混播草地植物根系构型特征的影响. *草业学报*, 2018, 27(1): 73–85.
- [31] Fan M S, Sun Y Q, Shao J W, *et al.* Influence of nitrogen forms on oat growth and phosphorus uptake. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(1): 114–118.
樊明寿, 孙亚卿, 邵金旺, 等. 不同形态氮素对燕麦营养生长和磷素利用的影响. *作物学报*, 2005, 31(1): 114–118.
- [32] Xia X, Gong Z P. Research advance on the relationship between nitrogen and leguminous nitrogen fixation. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2017, 48(1): 79–88.
夏玄, 龚振平. 氮素与豆科作物固氮关系研究进展. *东北农业大学学报*, 2017, 48(1): 79–88.
- [33] Xu R X, Zhao H M, Liu G B, *et al.* Effects of nitrogen and maize plant density on forage yield and nitrogen uptake in an alfalfa-silage maize relay intercropping system in the north China Plain. *Field Crops Research*, 2021, 263: 108068.
- [34] Yu Y, Stomph T J, Makowski D, *et al.* A meta-analysis of relative crop yields in cereal/legume mixtures suggests options for management. *Field Crops Research*, 2016, 198: 269–279.
- [35] Hu F L, Zhao C, Feng F X, *et al.* Improving N management through intercropping alleviates the inhibitory effect of mineral N on nodulation in pea. *Plant and Soil*, 2017, 412: 235–251.
- [36] Li C J, Dong Y, Li H G, *et al.* The dynamic process of interspecific interactions of competitive nitrogen capture between intercropped wheat (*Triticum aestivum* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.). *PLoS One*, 2014, 9(12): e115804.
- [37] Fan F L, Zhang F S, Song Y N, *et al.* Nitrogen fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems. *Plant and Soil*, 2006, 283: 275–286.
- [38] Xiao J X, Yin X H, Ren J B, *et al.* Complementation drives higher growth rate and yield of wheat and saves nitrogen fertilizer in wheat and faba bean intercropping. *Field Crops Research*, 2018, 221: 119–129.
- [39] Hauggaard-Nielsen H, Gooding M, Ambus P, *et al.* Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 64–71.
- [40] Feng X Y, Zhang P, Li Y, *et al.* Effects of nitrogen addition and intercropping patterns on agronomic traits of oats and peas in alpine regions. *Pratacultural Science*, 2024, 41(3): 718–730.
冯晓云, 张鹏, 李媛, 等. 高寒区燕麦、豌豆农艺性状对氮添加和间作模式的响应. *草业科学*, 2024, 41(3): 718–730.
- [41] Li C J, Stomph T J, Makowski D, *et al.* The productive performance of intercropping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2023, 120(2): e2201886120.
- [42] Li C J, Hoffland E, Kuypers T W, *et al.* Syndromes of production in intercropping impact yield gains. *Nature Plants*, 2020, 6(6): 653–660.
- [43] Li C J, Li Y Y, Yu C B, *et al.* Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in northwest China. *Plant and Soil*, 2011, 342: 221–231.
- [44] Markham J H, Zekveld C. Nitrogen fixation makes biomass allocation to roots independent of soil nitrogen supply. *Canadian Journal of Botany*, 2007, 85(9): 787–793.