

引文格式: 梅富鹏, 黄之远, 吴加香, 等. 减氮对玉米黄草乌间作优势的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(5): 890–896. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202111008

减氮对玉米黄草乌间作优势的影响*

梅富鹏¹, 黄之远^{1,2,3}, 吴加香^{1,2,3}, 寸梦垚^{1,2,3}, 赵桂茹¹,
李世华¹, 杨旺福¹, 字淑慧^{1,2,3}**

- (1. 云南农业大学 农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201;
2. 云南农业大学, 西南中药材种质创新与利用国家地方联合工程研究中心, 云南 昆明 650201;
3. 云南农业大学, 云南省药用植物生物学重点实验室, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】探索高寒山区减氮对玉米黄草乌间作优势的影响。【方法】采用田间试验, 种植模式为玉米间作黄草乌(2:4), 设常规施氮(IN, 144.0 kg/hm²)、减氮 20%(IN20, 115.2 kg/hm²)、减氮 40%(IN40, 86.4 kg/hm²)和减氮 60%(IN60, 57.6 kg/hm²) 4 种施氮水平, 并设置玉米单作和黄草乌单作 2 种植方式, 观测 2 种作物的产量、生长及品质指标。【结果】与单作相比, 玉米黄草乌间作可明显提高间作优势, 其土地当量比(LER)均大于 1, 且以 IN 和 IN20 的 LER 值最大; IN20 的复合产量显著增加($P<0.05$), 分别比 IN40 和 IN60 提高 21.6% 和 30.8%, 但与 IN 差异不显著($P>0.05$); IN20 的产量净效应最高(2 837.57 kg/hm²), 且与 IN60 差异显著($P<0.05$), 但与 IN 差异不显著($P>0.05$)。间作对玉米生长的影响大于黄草乌, 相较于 IN 处理, IN20 和 IN40 的玉米株高显著增加($P<0.05$), 但各间作处理间的玉米茎粗及黄草乌生长指标均无显著差异($P>0.05$)。不同处理对黄草乌品质均有影响, 其中, IN40 的黄草乌浸出物含量显著高于其他处理($P<0.05$), 比 IN、IN20 和 IN60 分别提高 13.4%、10.6% 和 5.6%; 各处理间的总生物碱含量差异不显著($P>0.05$)。【结论】减氮 20% 种植模式下, 玉米间作黄草乌的优势明显, 对黄草乌的品质影响较小, 达到了既提高作物产量又减少化肥施用量的目的。

关键词: 减氮; 玉米; 黄草乌; 间作优势

中图分类号: S344.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X(2022)05-0890-07

Effects of Nitrogen Reduction on Intercropping Advantage of Maize and *Aconitum vilmorinianum*

MEI Fupeng¹, HUANG Zhiyuan^{1,2,3}, WU Jiaxiang^{1,2,3}, CUN Mengzhuang^{1,2,3}, ZHAO Guiru¹,
LI Shihua¹, YANG Wangfu¹, ZI Shuhui^{1,2,3}

- (1. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. National & Local Joint Engineering Research Center on Germplasm Innovation & Utilization of Chinese Medicinal Materials in Southwestern China, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Key Laboratory of Medicinal Plant Biology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To explore the effects of nitrogen reduction on the intercropping advantage of

收稿日期: 2021-11-03

修回日期: 2022-05-20

网络首发日期: 2022-09-07

*基金项目: 云南省科技厅重大科技专项(2017AB002, 2018BB015, 2018ZF011)。

作者简介: 梅富鹏(1998—), 男, 云南昆明人, 在读硕士研究生, 主要从事栽培生理研究。

E-mail: 674893263@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 字淑慧(1971—), 女, 云南大理人, 博士, 副教授, 主要从事作物栽培与耕作研究。E-mail: 258437889@qq.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20220906.1645.015.html>



maize and *Aconitum vilmorinianum* in Alpine mountainous areas. [Methods] Using the field experiment method, taking the maize intercropping *A. vilmorinianum* (2 : 4) as the planting mode, four nitrogen application levels were set: conventional nitrogen application (IN, 144.0 kg/hm²), nitrogen reduction by 20% (IN20, 115.2 kg/hm²), nitrogen reduction by 40% (IN40, 86.4 kg/hm²), nitrogen reduction by 60% (IN60, 57.6 kg/hm²), and maize monoculture (MS) and *A. vilmorinianum* monoculture (AS) were also set. [Results] Compared with monoculture, the intercropping advantage of maize and *A. vilmorinianum* was obviously improved; the land equivalent ratio (LER) was greater than one, and the maximum value was counted in IN and IN20. Compound yield of IN20 was significantly increased ($P<0.05$), 21.6% and 30.8% higher than IN40 and IN60, respectively, but there was no significant difference with IN ($P>0.05$); the net yield effect of IN20 was 2 837.57 kg/hm², which was significantly higher than IN60 ($P<0.05$), but there was no significant difference with IN ($P>0.05$). The effect of intercropping on maize growth was greater than that of *A. vilmorinianum*. Compared with IN, the maize plant height of IN20 and IN40 were increased significantly ($P<0.05$). There was no significant difference in maize stem diameter and *A. vilmorinianum* growth indexes among intercropping treatments ($P>0.05$). Different treatments had effects on the quality of *A. vilmorinianum*. Among them, the extract content of *A. vilmorinianum* in IN40 was the highest, which was significantly different from other treatments ($P<0.05$), and it was 13.4%, 10.6% and 5.6% higher than IN, IN20 and IN60, respectively. There was no significant difference of total alkaloids content among treatments ($P>0.05$). [Conclusion] Under the planting mode of reducing nitrogen by 20%, the intercropping advantage of maize and *A. vilmorinianum* is more obvious, and it has little impact on the quality of *A. vilmorinianum*, which achieves the purpose of increasing crop yield and reducing the amount of chemical fertilizer.

Keywords: nitrogen reduction; maize; *Aconitum vilmorinianum*; intercropping advantage

玉米是重要的传统旱地作物^[1], 在农业生产中经常和其他作物间作^[2]。如玉米与豆科作物间作, 不仅能减少氮肥施用量, 还能促进作物对氮素的吸收利用以获得高产^[3-5]; 但在减少氮肥施用量的情况下, 玉米与非豆科作物间作能否发挥间作优势的报道相对较少, 特别是鲜有与高寒山区药用植物间作的研究。间作作为一种集约化、可持续的农业种植模式, 在国内外得到广泛的应用^[6-7]。相较于单作, 间作通过促进种间作用或时空生态位分离, 提高养分、水分和光能等资源的高效利用^[8-10], 实现多样性防治病虫害及提高产量的目的^[11-12]。目前, 农业生产中为了获得高产, 施用大量化肥并偏施氮肥, 过量氮肥导致肥料利用率低, 氮素流失, 进而对水体造成污染^[13-14]。如何减少氮肥投入, 是发展可持续农业目前面临的重要问题。

黄草乌 (*Aconitum vilmorinianum*) 是云南独具特色的中药材, 主要种植在海拔 2 100~2 600 m 的

高寒冷凉山区和半山区, 其药用部位为侧生块根, 具有祛风散寒、活血止痛和解毒消肿的药理作用^[15], 是云南白药、云南红药、百宝丹、无敌膏和虎力散等多种名药的重要原料。随着生物医药大健康产业的发展, 黄草乌需求量逐年攀升, 野生资源逐年锐减, 栽培面积逐年递增。由于受高寒山区有限耕地的限制, 药农多采用单作高肥水投入方式连年种植黄草乌以获取高产, 导致其病虫害逐年加重, 产量逐年减低, 既影响了药材品质, 也制约了黄草乌种植产业的可持续健康发展。课题组前期利用玉米与黄草乌间作开展黄草乌多样性种植试验, 发现 2 种作物间作能提高黄草乌根际土壤微生物群落的丰富度和多样性 (另文发表), 但鲜有关于减氮施肥的玉米与黄草乌间作能否发挥间作优势的报道。因此, 针对高寒山区中药材种植过程中出现的“粮药争地”现象, 本研究通过玉米与乌头属药用植物黄草乌间作, 探讨减少玉米氮肥施用量对 2 种作物间作优势的影

响, 以期为高寒山区发展玉米与黄草乌间作种植提供技术支持, 也为在云南及其他相似地方推广应用该间作模式提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试品种

试验在云南省昆明市禄劝县撒营盘镇书西村委会干海子村 (N25°91', E102°57') 进行, 试验地平均海拔 2 400 m, 年平均气温 11 ℃, 年降雨量 960 mm。土壤为沙壤土, 土质疏松, 有机质含量 46.420 g/kg, 全氮含量 2.870 g/kg, 碱解氮含量 178.300 mg/kg, 全磷含量 1.009 g/kg, 有效磷含量 63.990 mg/kg, 全钾含量 14.010 g/kg, pH 值 7.99。前茬作物为黄草乌。供试玉米品种为金玉 2 号, 购于云南会丰种业责任有限公司, 该品种适应性广 (海拔 1 180~2 500 m), 抗逆性强, 综合性状好, 株型半紧凑^[16], 近几年在西南山区种植面积较大; 黄草乌 (*A. vilmorinianum*) 选用云南农业大学 2016 年选育的新品种滇草乌 1 号。

1.2 试验设计

采用随机区组设计, 设 IN (玉米常规施氮肥间作黄草乌)、IN20 (玉米减氮 20% 间作黄草乌)、IN40 (玉米减氮 40% 间作黄草乌)、IN60 (玉米减氮 60% 间作黄草乌)、MS (玉米常规施氮单作) 和 AS (黄草乌常规施肥单作), 共 6 个处理, 每个处理设 3 个重复。试验地周围设 0.5 m 走道, 0.1 m 保护行, 小区长 10 m, 宽 3 m, 面积 30 m²。玉米采用等行距种植, 行距 0.8 m, 株距 0.2 m, 每穴种 2 株, 单作种植密度 62 505 株/hm², 间作种植密度 34 485 株/hm²; 黄草乌采用宽窄行种植, 宽行 0.7 m, 窄行 0.3 m, 株距 0.2 m, 单作种植密度 100 005 株/hm², 间作种植密度 68 970 株/hm²。

2020 年 1 月 6 日选取当地当年收获的黄草乌新鲜健康侧生块根, 大小均匀一致、无病虫害、具芽头, 每个质量为 10~15 g, 采用常规条播种植方式播种, 4 月 20 日采用点播种植方式播种玉米。黄草乌施肥参照当地常规施肥方法, 农家肥作为底肥施用, 施用量为 16 245 kg/hm², 不施追肥。玉米施用氮肥为尿素 (含氮量 46.4%), 磷肥为过磷酸钙 (含磷量 16%), 钾肥为硫酸钾 (含钾量 51%); 不施基肥, 于 2020 年 5 月 31 日进行第 1 次追肥, 常规施肥处理纯氮、磷、钾施用量

分别为 144、243 和 72 kg/hm²; 2020 年 8 月 9 日进行第 2 次追肥, 常规施肥处理纯氮、磷、钾施用量分别为 96、162 和 48 kg/hm²; 各减氮处理按照相应比例减少氮肥用量。

1.3 测定指标及计算方法

在玉米抽雄期、黄草乌初花期及两作物收获期进行生长和产量指标测定。测定生长指标时, 在各小区内随机选 5 株代表性植株, 测定自然株高和茎粗; 收获期, 取玉米茎叶和穗以及黄草乌地上部茎叶, 在 103 ℃ 下杀青 30 min, 75 ℃ 烘干至恒质量; 收获后取黄草乌块根于 50 ℃ 烘干至恒质量^[17], 称其干质量, 用于分析两作物产量优势。将烘干后的黄草乌块根磨成粉末, 参照 1977 年版《中华人民共和国药典: 一部》中雪上一枝蒿相应物质含量测定的方法, 检测黄草乌块根浸出物和总生物碱含量。通过计算得出收获指数、土地当量比和单位面积产量净效应。

(1) 收获指数 (HI)^[18]:

$$HI = \frac{\text{经济产量}}{\text{生物量}}。$$

式中: 经济产量为玉米籽粒产量和黄草乌块根产量。

(2) 土地当量比 (LER)^[19]:

$$LER = \frac{Y_{ip}}{Y_{sp}} + \frac{Y_{im}}{Y_{sm}}。$$

式中: Y_{ip} 为草乌的间作产量, Y_{sp} 为草乌的单作产量, Y_{im} 为玉米的间作产量, Y_{sm} 为玉米的单作产量。

(3) 单位面积产量的净效应 (NE)^[20]:

$$NE = (Y_1 + Y_2) - (EY_1 + EY_2);$$

$$EY_1 = M_1 \times LS_1;$$

$$EY_2 = M_2 \times LS_2;$$

式中: Y_1 和 Y_2 分别为间作中玉米和黄草乌的实际产量, EY_1 和 EY_2 分别为玉米和黄草乌的预期产量, 即单作产量和土地占有率的乘积; M_1 和 M_2 分别为单作玉米和黄草乌的产量, LS_1 和 LS_2 分别为玉米和黄草乌间作中的土地份额 (根据间作和单作中某一作物的密度计算)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据整理; 用 SPSS 26 对所有指标进行单因素方差分析和 LSD 检验, 显著水平为 $P < 0.05$; 采用 GraphPad Prism 8 软件作图。

2 结果与分析

2.1 玉米减氮对两作物间作优势的影响

由表 1 可知: 减氮对间作玉米和黄草乌产量均产生明显影响。与 MS 和 AS 处理相比, IN 处理可显著提高间作系统复合产量 ($P<0.05$), 分别提高 71.4% 和 129.7%, IN 处理的黄草乌产量有所增加, 但与 AS 处理相比差异不显著 ($P>0.05$)。间作减氮处理下, 随着玉米减氮比例增加, 2 种

作物的产量及复合产量均呈降低的趋势。与 IN 处理相比, IN20 处理的玉米、黄草乌产量及复合产量小幅增加 ($P>0.05$), IN40 和 IN60 处理的玉米产量分别降低 2.3% 和 13.1% ($P>0.05$)、黄草乌产量分别降低 35.9% 和 41.6% ($P<0.05$)、复合产量分别降低 16.8% 和 27.0% ($P<0.05$)。间作减氮处理对玉米和黄草乌的收获指数均无显著影响。可见, 玉米减氮 20% 与黄草乌间作有利于 2 种作物产量的增加。

表 1 不同处理产量及收获指数比较

Tab. 1 Comparison of yield and harvest index of different treatments

处理 treatment	产量/(kg·hm ⁻²) yield			收获指数 harvest index	
	玉米 maize	黄草乌 <i>Aconitum vilmorinianum</i>	复合产量 compound yield	玉米 maize	黄草乌 <i>A. vilmorinianum</i>
IN (CK)	8447.70±51.46 ab	8472.30±49.28 a	16920.00±10.30 a	0.34±0.02 a	0.62±0.05 a
IN20	9094.50±26.30 ab	8533.35±67.67 a	17627.85±43.53 a	0.34±0.03 a	0.65±0.10 a
IN40	8259.00±40.28 ab	6233.40±31.61 b	14492.40±65.77 b	0.35±0.03 a	0.59±0.09 a
IN60	7494.45±59.68 b	5982.30±1.29 b	13476.75±59.62 b	0.30±0.03 a	0.52±0.10 a
MS	9872.25±18.13 a	—	9872.25±18.34 c	0.34±0.02 a	—
AS	—	7366.65±15.17 ab	7366.65±15.17 d	—	0.64±0.06 a

注: IN为玉米常规施氮间作黄草乌, IN20、IN40和IN60分别为玉米减氮20%、40%和60%且间作黄草乌, MS为玉米常规施氮单作, AS为黄草乌常规施肥单作; 同列中不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P<0.05$); 下同。

Note: IN is maize intercropping *A. vilmorinianum* with conventional nitrogen application; IN20, IN40 and IN60 is maize intercropping *A. vilmorinianum* with nitrogen reduction by 20%, 40% and 60%, respectively; MS is maize monoculture; AS is *A. vilmorinianum* monoculture; different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$); the same as below.

由图 1 可知: 所有间作处理的土地当量比均大于 1, IN 和 IN20 处理的土地当量比最大 (1.54), 比最小的 IN60 处理提高了 21.6%, 但处理间差异均不显著 ($P>0.05$); 减氮可显著影响单位面积产量净效应 (NE), 所有间作处理的 NE 值均大于 0, 最大为 IN20 处理的 2 837.57 kg/hm², 其次是 IN 处理的 2 577.57 kg/hm² 和 IN40 处理的 2 523.12 kg/hm², 最小为 IN60 处理的 626.98 kg/hm², 其中 IN60 与其他处理差异显著 ($P<0.05$)。可见, 玉米减氮与黄草乌间作能提高土地利用效率, 且减氮 20% 的单位面积产量净效应最高。

2.2 不同处理对作物生长性状及生物量的影响

由表 2 可知: 间作对玉米生长的影响大于黄草乌。与单作相比, IN 处理可显著降低玉米茎粗 ($P<0.05$), 玉米和黄草乌的生物量有所增加但差异不显著 ($P>0.05$)。间作模式下, IN20 和 IN40 处理的玉米株高分别较 IN 处理显著增加 11.8% 和 12.6% ($P<0.05$), 其余指标处理间差异不显著 ($P>0.05$); 与 IN 处理相比, IN20 处理的黄草乌生物量增加 16.2%、IN40 和 IN60 处理则分别降低

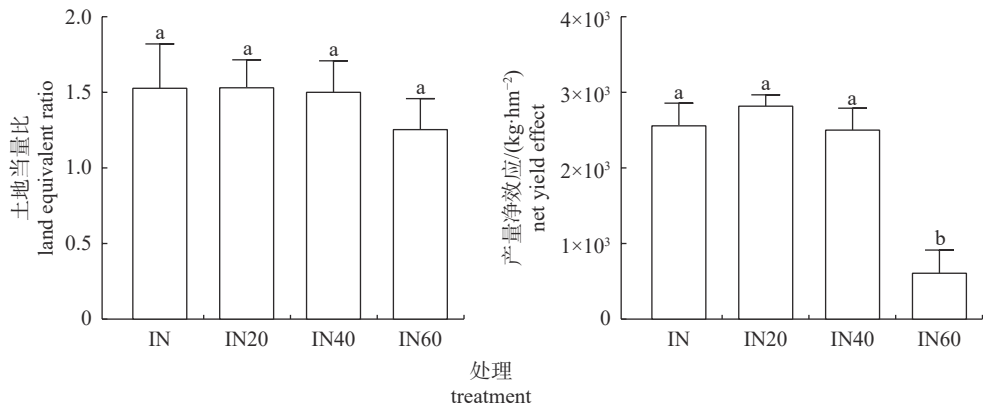
7.6% 和 72.8%, 且 IN20 与 IN60 处理间差异显著 ($P<0.05$)。可见, 玉米减氮 20% 与黄草乌间作不影响两作物正常生长。

2.3 不同间作模式对黄草乌品质的影响

由图 2 可知: 间作减氮模式对黄草乌浸出物有显著影响 ($P<0.05$), 但对总生物碱含量的影响不显著 ($P>0.05$)。与 AS 相比, IN40 和 IN60 处理可显著提高浸出物含量 ($P<0.05$); 间作模式下, 随着施氮量的减少, 黄草乌浸出物和总生物碱含量均呈先增后减的趋势, 且均在 IN40 处理达到峰值。可见, 玉米适量减氮与黄草乌间作既能提高黄草乌浸出物又不会影响总生物碱含量。

3 讨论

间作是基于生态学原理, 通过调节作物群体结构, 使其互补性利用地上和地下空间资源, 提高间作群体生产力, 发挥间作优势^[21]。黄草乌是云南高寒山区种植的块根类药用植物, 需种植在土层深厚、有机质含量较高的沙壤土中才能获得高产^[22]。本研究选择云南黄草乌种植面积最大、



注：IN 为玉米常规施氮间作黄草乌，IN20、IN40 和 IN60 分别为玉米减氮 20%、40% 和 60% 且间作黄草乌；不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著；下同。

Note: IN is maize intercropping *Aconitum vilmorinianum* with conventional nitrogen application; IN20, IN40 and IN60 is maize intercropping *A. vilmorinianum* with nitrogen reduction by 20%, 40% and 60%, respectively; different lowercase letters indicate significant differences among treatments at 0.05 level; the same as below.

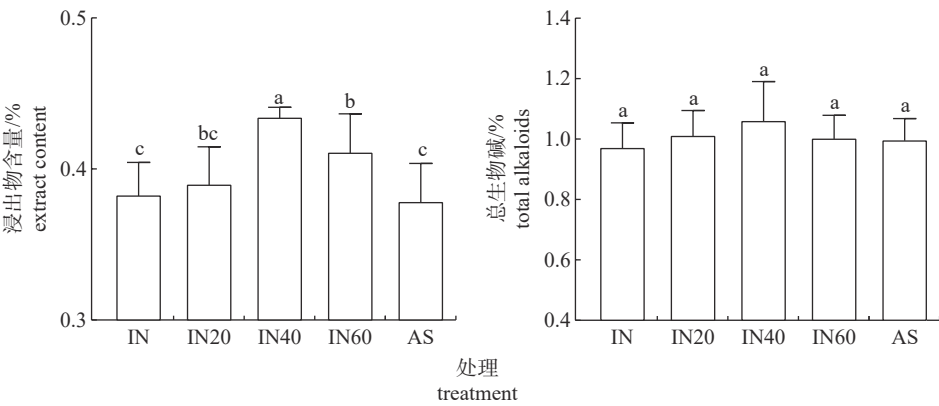
图 1 4 种间作处理的土地当量比和产量净效应

Fig. 1 Land equivalent ratio and net yield effect of four intercropping treatments

表 2 不同处理玉米抽雄期和黄草乌初花期的生长性状和生物量的比较

Tab. 2 Growth characters and biomass of different treatments of heading stage of maize and early flowering stage of *A. vilmorinianum*

处理 treatment	玉米 maize			黄草乌 <i>A. vilmorinianum</i>		
	株高/cm plant height	茎粗/cm stem diameter	生物量/g biomass	株高/cm plant height	茎粗/cm stem diameter	生物量/g biomass
IN (CK)	163.4±4.91 c	6.4±0.21 b	339.3±22.08 ab	173.3±8.94 a	1.5±0.05 a	95.9±12.14 ab
IN20	182.7±6.91 ab	6.8±0.23 ab	403.1±25.75 a	164.5±8.05 a	1.6±0.09 a	111.4±20.35 a
IN40	184.0±6.26 a	7.0±0.19 ab	367.0±22.61 ab	151.8±7.57 a	1.4±0.04 a	89.1±13.46 ab
IN60	165.9±7.31 bc	6.9±0.26 ab	344.2±21.36 ab	176.6±12.77 a	1.5±0.05 a	55.5±4.77 b
MS	171.3±6.28 abc	7.3±0.23 a	323.9±12.26 b	—	—	—
AS	—	—	—	165.0±10.19 a	1.6±0.09 a	83.0±12.55 ab



注：AS 为黄草乌常规施肥单作。

Note: AS is *A. vilmorinianum* monoculture.

图 2 不同处理的黄草乌浸出物和总生物碱含量

Fig. 2 Extract and total alkaloids content of *A. vilmorinianum* of different treatments

种植时间最长的禄劝县开展试验,结果发现:玉米常规施氮及减氮 20%、40% 和 60% 与黄草乌间作的土地当量比均大于 1.22,表明玉米减少氮肥施用量后,可通过 2 行玉米间作 4 行黄草乌的种植模式提高土地利用效率,获得间作优势。该结果与薄荷、紫苏和苜蓿与丹参间作可显著提高丹参及其间作作物的产量而发挥间作优势的结果^[23]一致;也与减少 20% 氮肥投入的花生和玉米间作可提高土地当量比的结果^[24]相似。由此可见,本研究通过减施玉米氮肥与黄草乌间作的模式,可有效提高土地利用率,发挥两作物间作的优势,为云南高寒山区发展黄草乌多样性种植提供借鉴和参考。

在农田微环境内,间作作物的生物量主要由作物对资源的获取能力决定,作物获取资源的能力更决定了作物的经济产量^[25]。与单作相比,玉米和黄草乌间作存在种间互作关系。玉米间作黄草乌的复合产量显著高于玉米单作和黄草乌单作,分析其原因可能是在玉米和黄草乌间作体系中,玉米为浅根系作物,而黄草乌为深根系作物,两作物充分利用了地下营养物质源,实现了资源的重新利用和分配。这与桔梗辣椒间作有利于桔梗根系生长^[26]、间作可提高半夏一级种产出从而提高半夏产量^[27]的研究结果相似。玉米黄草乌行比 2:4 减氮 20% 的种植模式提高了两作物的复合产量,说明此种种植模式的经济效益最好。

粮药间作不仅能发挥间作优势,还能提高药材品质。中药材品质主要受到遗传和生长环境的共同影响,间作模式改变了黄草乌的生长微环境,刺激了黄草乌次生代谢的加强,从而影响其浸出物的积累。张文静等^[26]利用辣椒与桔梗间作发现:间作能显著提高桔梗主根的水溶性浸出物和总皂苷含量等,改善桔梗的内在品质。刘伟等^[23]将丹参与薄荷、紫苏和苜蓿间作发现:间作丹参的脂溶性成分含量显著高于单作。本研究发现:与黄草乌单作相比,玉米减氮与黄草乌间作对黄草乌品质影响很小。说明玉米减氮间作黄草乌不仅能发挥间作优势,还能减少氮肥用量。

4 结论

在高寒冷凉和含氮相对较高的中等肥力土壤条件下,玉米减氮与黄草乌间作均能发挥间作优

势。其中,玉米减氮 20% 间作黄草乌的种植模式能显著提高系统复合产量,且对黄草乌的品质影响较小;玉米减氮 40% 间作黄草乌的种植模式能显著提高黄草乌浸出物含量,但对总生物碱含量的影响较小。这一结果可为高寒山区进一步推广玉米减氮与黄草乌间作的种植模式提供一定的理论依据。

[参考文献]

- [1] ZHANG D S, SUN Z X, FENG L S, et al. Maize plant density affects yield, growth and source-sink relationship of crops in maize/peanut intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2020, 257: 107926. DOI: [10.1016/j.fcr.2020.107926](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107926).
- [2] 李怡文,白水欣,字变仙,等. 玉米和辣椒单作调控根围土壤细菌降低病害的效果和机制初探[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2020, 35(5): 765. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202003052](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202003052).
- [3] 刘培,邵宇婷,王志国,等. 减氮对华南地区甜玉米//大豆间作系统产量稳定性的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(9): 1332. DOI: [10.13930/j.cnki.cjea.190129](https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190129).
- [4] 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. DOI: [10.13930/j.cnki.cjea.160603](https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160603).
- [5] 赵胜利,龙光强,杨超,等. 施氮对玉米//马铃薯间作物氮累积和分配的影响[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2016, 31(5): 886. DOI: [10.16211/j.issn.1004-390X\(n\).2016.05.018](https://doi.org/10.16211/j.issn.1004-390X(n).2016.05.018).
- [6] MARTIN-GUAY M O, PAQUETTE A, DUPRAS J, et al. The new green revolution: sustainable intensification of agriculture by intercropping[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 767. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2017.10.024](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.024).
- [7] FRANCO J G, KING S R, VOLDER A. Component crop physiology and water use efficiency in response to intercropping[J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 93: 27. DOI: [10.1016/j.eja.2017.11.005](https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.005).
- [8] HU F L, GAN Y T, CHAI Q, et al. Boosting system productivity through the improved coordination of interspecific competition in maize/pea strip intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 50. DOI: [10.1016/j.fcr.2016.08.022](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.022).
- [9] 肖靖秀,郑毅. 间套作系统中作物的养分吸收利用与病虫害控制[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(3): 150. DOI: [10.3969/j.issn.1000-6850.2005.03.041](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6850.2005.03.041).
- [10] 朱锦惠,董坤,杨智仙,等. 间套作控制作物病害的机理研究进展[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(4): 1117. DOI: [10.13292/j.1000-4890.201704.016](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201704.016).
- [11] 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. DOI: [10.13930/j.cnki.cjea.160061](https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160061).
- [12] 字淑慧,吴开贤,安瞳昕,等. 行距对间作玉米/马铃薯产

- 量优势和种间关系的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(2): 200. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).zk201811019](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).zk201811019).
- [13] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 西南黄壤性水稻土长期不同施肥模式下作物产量及氮肥利用率演变特征[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3): 20. DOI: [10.11838/sfsc.20170305](https://doi.org/10.11838/sfsc.20170305).
- [14] 刘昕萌, 陈庚, 王志国, 等. 不同氮肥基追比对玉米氮素吸收利用、土壤氮素供应及产量的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(5): 124. DOI: [10.7668/hbnxb.20190714](https://doi.org/10.7668/hbnxb.20190714).
- [15] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第 27 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [16] 沈建华, 田晓琴, 何昀昆, 等. 高产多抗玉米杂交种金玉 2 号的选育及其特征特性[J]. 种子, 2010(7): 3. DOI: [10.3969/j.issn.1001-4705.2010.07.036](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-4705.2010.07.036).
- [17] 陈明玮, 邱斌, 郑雷, 等. 黄草乌采收期及初加工工艺研究[J]. 湖南农业科学, 2017(8): 4. DOI: [10.16498/j.cnki.hnnykx.2017.008.020](https://doi.org/10.16498/j.cnki.hnnykx.2017.008.020).
- [18] HAY R K M. Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology[J]. Annals of Applied Biology, 2010, 126(1): 197. DOI: [10.1111/j.1744-7348.1995.tb05015.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1995.tb05015.x).
- [19] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008. DOI: [10.1126/science.1182570](https://doi.org/10.1126/science.1182570).
- [20] LI C J, ELLIS H F, KUYPER T W, et al. Yield gain, complementarity and competitive dominance in intercropping in China: a meta-analysis of drivers of yield gain using additive partitioning[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 113(1): 125987. DOI: [10.1016/j.eja.2019.125987](https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125987).
- [21] 柴强, 殷文. 间作系统的水分竞争互补机理[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 233. DOI: [10.13292/j.1000-4890.201701.013](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201701.013).
- [22] 赵仁, 赵毅. 云南中草药实用栽培技术[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2019.
- [23] 刘伟, 周冰谦, 王晓, 等. 高效生态间作模式对丹参生长及有效成分含量的影响[J]. 中药材, 2018, 41(5): 1027. DOI: [10.13863/j.issn1001-4454.2018.05.003](https://doi.org/10.13863/j.issn1001-4454.2018.05.003).
- [24] CHEN J, ARAFAT Y, WU L K, et al. Shifts in soil microbial community, soil enzymes and crop yield under peanut/maize intercropping with reduced nitrogen levels[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 124: 327. DOI: [10.1016/j.apsoil.2017.11.010](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.11.010).
- [25] PAN Q M, BAI Y F, WU J G, et al. Hierarchical plant responses and diversity loss after nitrogen addition: testing three functionally-based hypotheses in the Inner Mongolia grassland[J]. PLoS One, 2011, 6(5): e20078. DOI: [10.1371/journal.pone.0020078](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020078).
- [26] 张文静, 王鹏, 陈香香, 等. 桔梗辣椒间作对桔梗根系生长及产量品质的影响[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(6): 1111. DOI: [10.19540/j.cnki.cjcmm.2018.0038](https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcmm.2018.0038).
- [27] 杭烨, 罗夫来, 赵致, 等. 不同间作模式下半夏产量及品质的综合评价[J]. 北方园艺, 2018(13): 132. DOI: [10.11937/bfyy.20180264](https://doi.org/10.11937/bfyy.20180264).

责任编辑: 何承刚