

# 间作和施磷对 2 种牧草生物量及氮磷吸收的影响

张 德<sup>1,2</sup>, 龙会英<sup>1,2</sup>, 曾丽萍<sup>3</sup>, 刘屹湘<sup>4</sup>

(1. 云南省农业科学院热区生态农业研究所, 云南 元谋 651399; 2. 元谋干热河谷植物园, 云南 元谋 651399;

3. 红河学院理学院, 云南 蒙自 651199; 4. 云南农业大学植物保护学院, 云南 昆明 6502012)

**摘 要:**采用双因素随机区组田间试验设计, 设置不同种植模式(单作和间作)和 2 个磷水平(不施 P:P<sub>0</sub>; P:P<sub>75</sub>), 研究柱花草与扭黄茅间作和施磷对牧草生物量、养分吸收的影响。结果表明:在株行距均为 50 cm 条件下, 施磷提高了间作体系中扭黄茅生物量的 30.10% 和氮吸收量的 21.51%, 但减少了柱花草地上部生物量 5.53% 和氮、磷吸收量的 3.73% 和 3.18%。2015 年, 相对扭黄茅地上部生物量, P<sub>75</sub> 水平下, 与柱花草间作显著高于扭黄茅单作 31.00% ( $P < 0.05$ )。与未施磷对比, 施磷条件下, 柱花草和扭黄茅间作地上部的生物量分别增加 41.31% 和 52.68%。2 个磷水平下的土地当量比(LE<sub>R</sub>)、间作系统生产力(SP)及牧草种间竞争能力(A)无明显差异( $P > 0.05$ )。在间作系统中, 相对柱花草, 其与扭黄茅种间竞争能力小于 0, 说明柱花草在间作系统中为弱竞争作物。氮磷吸收方面, 2015 年, P<sub>0</sub> 和 P<sub>75</sub> 水平下, 间作体系中的柱花草氮、磷吸收量显著低于柱花草单作 67.74% (P<sub>0</sub>) 和 67.19% (P<sub>75</sub>) ( $P < 0.05$ ), 扭黄茅氮吸收量高于扭黄茅单作 5.79% (P<sub>0</sub>) 和 44.28% (P<sub>75</sub>), 而磷吸收量高于单作 13.80% (P<sub>0</sub>) 和 6.61% (P<sub>75</sub>)。

**关键词:**柱花草; 扭黄茅; 间作; 施磷; 生物量; 氮磷吸收

**中图分类号:**S344.2; S158.3 **文献标志码:**A

## Effects of intercropping and phosphorus application on biomass, nitrogen and phosphorus absorption of two forage species

ZHANG De<sup>1,2</sup>, LONG Hui-ying<sup>1,2</sup>, ZENG Li-ping<sup>3</sup>, LIU Yi-xiang<sup>4</sup>

(1. Institute of Tropical Eco-agricultural Sciences, Yunnan Academy of Agriculture Sciences, Yuanmou, Yunnan 651399, China;

2. Yuanmou Dry-Hot Valley Botanical Garden, Yuanmou, Yunnan 651399, China;

3. College of science, Honghe University, Mengzi, Yunnan 661199, China;

4. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 65020124, China)

**Abstract:** In order to understand the effect of phosphorus (P) application on grass biomass and nutrient absorption in the intercropping system of *S. guianensis* and *H. contortus*, two factors randomized block field experiments were designed with two planting patterns (intercropping and monoculture) and two P levels (P<sub>0</sub> and P<sub>75</sub>, in which P<sub>0</sub> indicated no P). The results showed that in the intercropping system, P application increased the biomass by 30.10% over the control and N uptake by 21.51% of *H. contortus*, but reduced biomass by 5.53%, N by 3.73%, and P by 3.18% of *S. guianensis*. In 2015, above-ground biomass of *H. contortus* in the intercropping system under P<sub>75</sub> level was significantly higher by 31.00% than that of monoculture ( $P < 0.05$ ). Compared with the crops without P application, the above-ground biomass of *S. guianensis* and *H. contortus* in the intercropping system was increased by 41.31% and 52.68%, respectively, with P application. Under the two P levels ( $P > 0.05$ ), there were no significant differences in land equivalent ratio (LE<sub>R</sub>), intercropping system productivity (SP) and inter-specific competitiveness. However, *S. guianensis* was the weaker competition in the intercropping system with *H.*

收稿日期:2019-01-16

修回日期:2019-08-29

**基金项目:**国家自然科学基金地区基金项目(41361099); 云南省科学技术厅云南省技术创新人才培养项目(2011CI066); 云南省农业科学院热区生态农业研究所科技计划项目(RQS 2006-1, RQS 2008-1)

**作者简介:**张德(1964-), 男, 云南保山, 研究员, 主要从事热区农业资源与环境研究。E-mail: ynzhangde2004@sina.com

**通信作者:**龙会英(1965-), 女, 研究员, 主要从事热区农业资源与环境研究。E-mail: ynhuiying12003@sina.com

*contortus*. Under P0 and P75 levels, N and P uptake of *S. guianensis* in the intercropping system were lower than in monoculture system by 67.74% (P0) and 67.19% (P75), respectively ( $P < 0.05$ ). With the same situation, N uptake of *H. contortus* in the intercropping system was higher than monoculture system by 5.79% (P0) and 44.28% (P75), respectively, and P uptake was higher by 13.80% (P0) and 6.61% (P75).

**Keywords:** *S. guianensis*; *H. contortus*; intercropping; P application; biomass; nitrogen and phosphorus absorption

磷是作物生长必需的营养元素,在植物的生理生化调节过程中起着重要作用<sup>[1]</sup>,能够加强碳水化合物运输,促进氮的吸收与生物固氮<sup>[2]</sup>。充足的磷营养有利于植物抵抗外界不利环境,增强抗倒伏能力;而缺磷环境下植物生长受到严重影响,果实产量与品质显著降低<sup>[3]</sup>。然而,由于化肥的过度施用,同时大量化肥施用也会影响肥料利用率,并抑制微量元素的吸收<sup>[3]</sup>,造成植物微量元素缺乏<sup>[1]</sup>、土壤氮淋溶加剧,导致水体富营养化及面源污染<sup>[4-5]</sup>等农田生态环境问题。目前,国内土壤退化问题十分严重<sup>[6]</sup>。因此,有必要根据作物的植物学特征和生物学特性,寻找磷高效利用种植模式和适宜施磷量,来实现磷素的合理使用,以提高作物对土壤难溶性磷素的利用<sup>[7]</sup>。研究表明,玉米||蚕豆间作具有显著的互惠作用<sup>[8]</sup>,蚕豆能改善玉米磷营养,这一促进作用体现在作物根系占据土壤空间的互补性及蚕豆的种间根际效应上,蚕豆的根际效应能够帮助玉米从土壤中获得更多的磷<sup>[9]</sup>。蚕豆根系释放有机酸,也能促进难溶性磷的活化,从而有利于两种作物的磷营养<sup>[8]</sup>。因此,禾本科||豆科间作是增加作物种植体系磷利用效率、增加磷回收率、减少环境负担、磷肥合理使用的有效方式<sup>[10]</sup>。

扭黄茅是云南省元谋干热河谷的优势多年生禾本科草本植物,作为云南本地的一种重要牧草,具备低热耐旱耐贫瘠等优点;但同时也表现出蛋白质含量低的缺点。柱花草为多年生优良豆科牧草,半直立草本植物,根系有根瘤,具有产量高、营养丰富、栽培容易的特征,集饲用、土壤改良、水土保持等多种功能,对修复退化土壤肥力起重要作用<sup>[6]</sup>。同时,柱花草根系深而发达,须根大多集中在0~25 cm,主根可深入土层50 cm以上,与扭黄茅根系的生长区域相互重叠;如果将柱花草引入扭黄茅分布区域,并且粗蛋白质含量达到16%~20%,能改善扭黄茅蛋白质含量低的缺点,两种牧草根系长时间互作,有可能提高养分吸收利用效率。但在柱花草与扭黄茅间作中是否需要施磷?有利提高牧草产量和氮磷吸收的施磷量是多少?需做深入的研究。目前,元谋地区关于豆科||禾本科牧草间作中合理施用磷肥以及磷元素吸收的研究鲜有报道。本研

究在前期研究工作基础上,针对不同磷环境下柱花草和扭黄茅间作的磷养分吸收进行研究,旨在了解牧草种间互作对生长和养分吸收的影响,为不同牧草优化配置中磷肥施用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地点位于云南省元谋县黄瓜园镇小雷宰流域,北纬25°50'42",东经101°49'19",海拔1 073 m,属典型金沙江干热河谷气候,年均气温22℃,日照时数2 670.4 h,最热月(6月)28.5℃,最冷月(12月)15.9℃,≥10℃年均积温8 552.7℃;降雨量645 mm,集中于5—10月,占全年94.6%,干燥度4。分别于2015年和2016年进行试验。样地土壤为燥红土,2015年种植牧草前耕层土壤全N含量0.054%,全P含量0.22%,有效磷(Olsen P)含量7.86 mg·kg<sup>-1</sup>,pH值6.79。2016年种植牧草前耕层土壤全N含量0.032%,全P含量0.26%,速效P含量15.60 mg·kg<sup>-1</sup>,pH值7.01。

### 1.2 试验材料与方法

1.2.1 供试牧草 试验分别选用柱花草和扭黄茅。柱花草为多年生豆科牧草,半直立草本植物,根系深50 cm以上,具有产量高、干物质粗蛋白质含量高、适口性好、容易栽培等特性,既可作为建植人工草地和改良天然草地的主要牧草品种,又可作为保持水土的优良植物。禾本科牧草扭黄茅为本区域优势种,多年生草本,高30~100 cm,喜热、耐旱、耐瘠,分布区覆盖度高、侵占性强,易形成单优势种群落,产量高,为良等牧草<sup>[6]</sup>。

1.2.2 试验方法 田间试验采用双因素随机区组设计。供试磷肥为含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%的过磷酸钙。设2个施磷水平:不施P(P0)和施P 75 kg·hm<sup>-2</sup>(P75),此磷施用量参照夏海勇等<sup>[7]</sup>和余常兵等<sup>[11]</sup>在单作和豆科||禾本科间作系统中施磷水平;设单作柱花草、单作扭黄茅和柱花草||扭黄茅间作3个种植模式,共计6个处理,每个处理3次重复,18个小区。单作小区净种10行柱花草或扭黄茅,间作小区中柱花草与扭黄茅按照1:1比例间作,2种牧草各种植5行。2种作物株、行距都为50 cm,小区面

积  $2\text{ m} \times 5\text{ m} = 10\text{ m}^2$ 。2种牧草实行育苗移栽方式,2015年育苗时间为4月24日,移栽时间6月8日;2016年育苗时间为5月10日,移栽时间7月1日。每塘穴栽2株幼苗,成活后留1株,2015年11月和2016年12月收获。试验地不施底肥,磷肥在整地时全部施入,小区不施农药和除草剂,按龙会英等<sup>[6]</sup>的方法进行管理。

**1.2.3 样品测定指标与评价方法** 在柱花草现荚期和扭黄茅果实始熟期采收植物,在整个小区选取中间有代表性的2行,取植物全株后清洗,用草纸擦干水气测鲜样重,样品经过  $70\sim 80^\circ\text{C}$  烘干后称植株干重(含地上部和地下部),折算成单位面积牧草生物量(折算公式为: $10\ 000 \times 4 \times$ 单株生物量,生物量单位为  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>[12]</sup>,分析样品为植株混合样(植株根、茎、叶、花和现荚期的种子),测定植株氮、磷含量,2015年的样品由中国科学院南京土壤研究所土壤与环境分析测试中心协助测试,2016年的样品由云南悦分环境检测有限公司协助测试。根据所测值计算不同种植模式及磷水平下的产量、当量比、种间相对竞争能力、牧草氮磷吸收量。计算公式如下:

植株对氮磷的吸收量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) = 植株氮磷含量(%) $\times$ 植株生物量<sup>[13]</sup>,换算为单位面积的量。

间作系统当量比(Land Equivalent Ratio, *LER*) = (间作系统柱花草地上部生物量/单作系统柱花草地上部生物量) + (间作系统扭黄茅地上部生物量/单作系统扭黄茅地上部生物量)<sup>[14-15]</sup>。*LER* 表征间作产量优势状况,*LER*>1,表明间作相比单作具有产量优势;*LER*<1,表明间作相比单作为产量劣势。

间作系统生产力(System Productivity, *SP*,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )为单位面积两种间作作物产量平均值,计算公式:*SP* = 两种作物在间作系统中所占的面积比例 $\times$ 单位面积两种间作牧草地上部生物量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>[16]</sup>。

种间相对竞争能力(Aggressivity, *A*)是恒量一种

作物相对另一种作物对资源竞争能力大小的指标,两种作物共处期间,通过各作物地上部分生物量计算获得种间相对竞争能力,计算公式: $A = (\text{间作系统柱花草地上部生物量}/\text{单作系统柱花草地上部生物量}) - (\text{间作系统扭黄茅地上部生物量}/\text{单作系统扭黄茅地上部生物量})$ <sup>[17]</sup>,当*A*>0,表明柱花草竞争能力强于扭黄茅,反之则弱。

### 1.3 试验数据处理与统计分析

试验数据采用 SPSS 数据处理软件进行计算和方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 间作与施磷对牧草生长的影响

方差分析表明,相同磷水平下,相对柱花草单作,间作显著降低了2015年柱花草生物量,但显著提高2015年(P0水平)扭黄茅地上部生物量和2016年(P75水平)柱花草地下部生物量,其他无显著差异( $P < 0.05$ )。分析表1和表2年平均值,柱花草具有生长前期生长缓慢的生物学性特征<sup>[6]</sup>,对照柱花草单作,与扭黄茅间作抑制柱花草生长,从而降低柱花草地上部生物量,分别减少31.58%(P0)和30.59%(P75),地下部生物量减少幅度分别为9.88%(P0)和21.26%(P75);相对扭黄茅,与柱花草间作中吸收更多的土壤养分,促进自身的生长,增加扭黄茅生物量,地上部生物量分别提高13.12%(P0)和29.04%(P75),地下部生物量提高为15.58%(P75)。相同种植模式下,与未施磷对比,施磷均降低柱花草地上部生物量,地上部生物量减少6.88%(单作)和5.52%(间作),地下部生物量减少8.05%(间作)。施磷促进了扭黄茅生长,增加地上部和地下部生物量,单作地上部和地下部生物量提高14.05%,间作系统扭黄茅地上部和地下部生物量分别提高30.10%和25.22%。

表1 柱花草 || 扭黄茅与施磷对牧草地上部生物量的影响

Table 1 Effect of intercropping *S. guianensis* and *H. contortus* and P on above-ground biomass

年份 Year	种植模式 Model	P0/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )		P75/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	
		柱花草 <i>S. guianensis</i>	扭黄茅 <i>H. contortus</i>	柱花草 <i>S. guianensis</i>	扭黄茅 <i>H. contortus</i>
2015	间作 Intercropping	4306.67 $\pm$ 898.67b	22380.55 $\pm$ 7799.75a	6085.65 $\pm$ 2833.63b	34171.24 $\pm$ 6121.61a
	单作 Sole cropping	13342.88 $\pm$ 3817.63a	20622.08 $\pm$ 6187.52b	13340.11 $\pm$ 1106.83a	26084.83 $\pm$ 5731.40a
2016	间作 Intercropping	15294.89 $\pm$ 1141.94a	13880.67 $\pm$ 778.05a	12432.00 $\pm$ 2751.68a	13003.33 $\pm$ 1188.00a
	单作 Sole cropping	15307.11 $\pm$ 1509.93a	11432.67 $\pm$ 1553.44a	13339.11 $\pm$ 656.33a	10472.00 $\pm$ 1940.16a
平均值	间作 Intercropping	9800.78 $\pm$ 7769.85	18130.61 $\pm$ 6010.32	9258.83 $\pm$ 4487.55	23587.29 $\pm$ 14967.97
The average	单作 Sole cropping	14325 $\pm$ 1388.92	16027.38 $\pm$ 6497.89	13339.61 $\pm$ 0.71	18278.42 $\pm$ 11039.94

注:P0:不施磷,P75:施磷  $75\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。同年同物种同列不同小写字母表示种植模式间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Note: P0: Without P; P75: Applying P  $75\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among planting pattern within a species in a year at  $P < 0.05$ . The same below.

方差分析表明,相同种植模式下,间作对牧草根冠比无显著影响( $P<0.05$ ),见表 3。分析表 3 平均值,与单作比较,间作增加柱花草根冠比增幅分别为 28.57%(P0)和 14.29%(P75);间作提高扭黄茅根冠比 6.67%(P0),P75 水平下根冠比减少 15.38%。相同种植模式下,施磷减少间作系统柱花草根冠比 11.11%,单作与间作系统扭黄茅的根冠比分别降低 13.33%和 31.25%。

## 2.2 间作与施磷对土地当量比和间作系统生产力及牧草种间竞争能力的影响

方差分析表明,施磷对间作系统的土地当量比、间作系统生产力及牧草种间竞争能力无显著影响( $P<0.05$ )。受种植日期的影响,2 a 试验中,2015 年两个施肥水平的间作体系当量比 LER 均小于 1,而 2016 年两个施肥水平的间作体系当量比 LER 均大于 1,平均值接近 1,说明柱花草 || 扭黄茅间作系统具有间作优势。分析表 4 平均值,与 P0 水平对

比,P75 水平间作体系当量比高于 P0 水平平均值,P75 水平间作系统生产力高于 P0 水平 17.60%,说明施磷均提高间作系统生产力,使施肥水平生产力高于未施肥水平,表明施磷(P75 水平)对柱花草 || 扭黄茅间作体系具有一定产量优势。种间相对竞争能力是恒量一种作物相对另一种作物对资源竞争能力大小的指标<sup>[11]</sup>。表 4 表明,相对柱花草,与柱花草间作的扭黄茅前期生长量远高于柱花草,从而抑制柱花草生长,在两种磷水平间作体系种间相对竞争能力均小于 0,表明柱花草在本文的种植密度下为弱竞争优势作物。

## 2.3 间作与施磷对作物氮磷吸收的影响

表 5 和表 6 表明,相同磷水平下,与单作对比,间作显著降低柱花草 2015 年和平均氮磷吸收量( $P<0.05$ )。2 a 平均值可见,两种磷水平下,与单作相比,间作降低了柱花草氮磷吸收量,氮吸收量分别减少了 34.47%(P0)和 34.02%(P75),磷吸收量减

表 2 柱花草 || 扭黄茅与施磷对牧草地下部生物量的影响

Table 2 Effect of intercropping *S. guianensis* and *H. contortus* and P on under-ground biomass

年份 Year	种植模式 Model	P0/(kg·hm <sup>-2</sup> )		P75/(kg·hm <sup>-2</sup> )	
		柱花草 <i>S. guianensis</i>	扭黄茅 <i>H. contortus</i>	柱花草 <i>S. guianensis</i>	扭黄茅 <i>H. contortus</i>
2015	间作 Intercropping	483.11±224.15a	2296.67±614.81a	409.78±122.80b	3802.67±1391.41a
	单作 Sole cropping	750.22±225.79a	3591.11±739.79a	766.22±37.37a	2975.11±345.97a
2016	间作 Intercropping	1117.78±64.86a	1762.22±297.61a	1062.22±220.31a	1280.00±243.41a
	单作 Sole cropping	1026.22±34.70a	1982.22±196.42a	1103.11±106.37a	1422.27±404.00a
两年平均值	间作 Intercropping	800.45±448.78	2029.45±377.91	736.00±461.35	2541.34±1783.80
The average	单作 Sole cropping	888.22±195.16	2786.67±1137.66	934.67±238.22	2198.69±1098.02

表 3 柱花草 || 扭黄茅与施磷牧草的根冠比

Table 3 The root shoot ratio of *S. guianensis* and *H. contortus* intercropping and P application

年份 Year	种植模式 Model	P0/(kg·hm <sup>-2</sup> )		P75/(kg·hm <sup>-2</sup> )	
		柱花草 <i>S. guianensis</i>	扭黄茅 <i>H. contortus</i>	柱花草 <i>S. guianensis</i>	扭黄茅 <i>H. contortus</i>
2015	间作 Intercropping	0.11±0.04a	0.18±0.02a	0.07±0.02a	0.11±0.02a
	单作 Sole cropping	0.06±0.01a	0.11±0.04a	0.06±0.00a	0.12±0.03a
2016	间作 Intercropping	0.07±0.01a	0.13±0.02a	0.09±0.01a	0.10±0.02a
	单作 Sole cropping	0.07±0.00a	0.18±0.02a	0.08±0.01a	0.14±0.04a
两年平均值	间作 Intercropping	0.09±0.03	0.16±0.04	0.08±0.01	0.11±0.01
The average	单作 Sole cropping	0.07±0.01	0.15±0.05	0.07±0.01	0.13±0.11

表 4 柱花草 || 扭黄茅与施磷对土地生产力和种间竞争能力的影响

Table 4 LER and SP and aggressivity of two intercropping modes in two P levels

磷水平 P level	间作系统当量比 LER			间作系统生产力 SP/(t·hm <sup>-2</sup> )			种间竞争能力(相对柱花草) Aggressivity( <i>S. guianensis</i> )		
	2015	2016	平均 Average	2015	2016	平均 Average	2015	2016	平均 Average
P0	0.75±0.26a	1.12±0.14a	0.94±0.26a	13.34±3.47a	14.59±0.18a	13.97±0.88a	-0.84±0.50a	-0.22±0.07a	-0.53±0.44a
P75	0.92±0.29a	1.11±0.18a	1.02±0.13a	20.13±3.22a	12.71±1.01b	16.42±5.24a	-0.92±0.50a	-0.34±0.38a	-0.63±0.41a

注:同列不同小写字母表示种植模式磷处理间差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different lowercase letters in the same column mean significant difference at  $P<0.05$  level among P treatments under same planting pattern.

表 5 间作与施磷对牧草氮素吸收的影响

Table 5 Effect of intercropping and P application on N absorption

年份 Year	种植模式 Model	P0/(kg·hm <sup>-2</sup> )		P75/(kg·hm <sup>-2</sup> )	
		柱花草 <i>S. guianensis</i>	扭黄茅 <i>H. contortus</i>	柱花草 <i>S. guianensis</i>	扭黄茅 <i>H. contortus</i>
2015	间作 Intercropping	128.64±37.41b	268.45±102.90a	178.37±87.51b	388.35±98.77a
	单作 Sole cropping	398.75±118.45a	253.76±77.52a	405.94±28.04a	269.16±20.34a
2016	间作 Intercropping	434.96±7.51a	170.61±34.95a	364.22±57.53a	145.14±19.60a
	单作 Sole cropping	461.29±45.63a	139.80±15.89a	416.39±34.99a	113.34±34.86a
两年平均值 The average	间作 Intercropping	281.8±216.60b	219.53±69.18a	271.30±131.42b	266.75±171.98a
	单作 Sole cropping	430.02±44.22a	196.78±80.58a	411.17±7.39a	191.25±110.18a

表 6 间作与施磷对牧草磷素吸收的影响

Table 6 Effect of intercropping and P application on P absorption

年份 Year	种植模式 Model	P0(kg·hm <sup>-2</sup> )		P75(kg·hm <sup>-2</sup> )	
		柱花草 <i>S. guianensis</i>	扭黄茅 <i>H. contortus</i>	柱花草 <i>S. guianensis</i>	扭黄茅 <i>H. contortus</i>
2015	间作 Intercropping	8.96±2.31b	22.52±10.24a	12.30±5.06b	21.77±8.12a
	单作 Sole cropping	27.31±10.70a	19.79±8.39a	30.49±1.03a	20.42±2.02a
2016	间作 Intercropping	30.62±2.91a	14.23±4.01a	26.02±5.60a	8.43±1.62a
	单作 Sole cropping	31.16±6.47a	10.70±2.27a	31.32±2.73a	11.86±1.48a
两年平均值 The average	间作 Intercropping	19.79±15.32a	18.38±5.86a	19.16±9.70b	15.10±9.43a
	单作 Sole cropping	29.24±2.72a	15.25±6.43a	30.91±0.59a	16.14±6.05a

少了 32.32%(P0)和 38.02%(P75);与单作对比,间作增加了扭黄茅氮和磷的吸收量,其中氮吸收量提高了 11.56%(P0)和 39.48%(P75),磷的吸收量增加了 20.53%(P0)。间作模式下,施磷提高间作系统扭黄茅氮吸收量 21.51%。与未施磷比较,施磷增加单作柱花草和单作扭黄茅磷吸收量,分别提高了 5.71%和 5.84%,降低了间作系统柱花草和扭黄茅对磷的吸收,分别减少了 3.18%和 17.85%。

## 3 讨论与结论

### 3.1 间作与施磷对牧草生长的影响

本试验中,一方面,2015 年移栽时间是 6 月 8 日,这个时期是扭黄茅生长旺盛期<sup>[6]</sup>;另一方面,扭黄茅对氮素较为敏感,2015 年土壤全氮含量高于 2016 年,扭黄茅对氮素吸收强生长快,而柱花草具有幼苗期生长缓慢的特性,导致柱花草在本文种植密度下间作系统为弱竞争作物,柱花草在间作系统的地上部生物量远低于单作。相同磷水平下,相对柱花草单作,间作显著降低了 2015 年柱花草生物量,但显著提高 2016 年(P75 水平)柱花草地下部生物量;相对扭黄茅,间作显著提高 2015 年(P0 水平)扭黄茅地上部生物量,间作对牧草根冠比没有显著影响。相同种植模式下,由于柱花草前期生长慢,因此无论是单作或间作,施磷均降低柱花草地上部生物量( $P<0.05$ );而施磷促进了单作和间作中扭黄茅生长,增加地上部和地下部生物量。

### 3.2 间作与施磷对牧草间作体系生产力的影响

磷在土壤中的扩散系数很小,因此植物磷主要是通过根系从土壤中吸收获得,保持根区土壤适当的磷水平能够使植物根系最大限度地活化和利用根际土壤磷<sup>[17]</sup>。间套作是一种在我国各地广泛运用的种植技术模式,可以增加作物产量,改变土壤氮和磷的有效性<sup>[18-19]</sup>,尤其是豆科与禾本科构成的间套作体系,可提高作物的籽粒产量和植株地上部生物量<sup>[20]</sup>。本试验中,由于柱花草在间作系统地上部生物量远低于单作,当量比 LER 小于 1;而 2016 年移栽时间是 7 月 1 日,这个时期扭黄茅进入分枝期<sup>[6]</sup>,加上 2016 年土壤全氮含量低于 2015 年,扭黄茅生长缓慢,间作中柱花草的生长未受影响,与单作系统柱花草地上部生物量比较相差较小,当量比 LER 大于 1;与未施磷对比,施磷提高间作系统的当量比和生产力。在本试验的株行距限制条件下,由于扭黄茅生长势强抑制柱花草生长,柱花草在与扭黄茅间作的种间竞争中表现为弱竞争优势作物,所以柱花草在间作体系中相对于扭黄茅的种间竞争能力 A 值均小于 0,因此,下一步应开展该两种植物发生竞争的最小距离研究。

### 3.3 间作与施磷对作物氮磷吸收的影响

一般情况下,植物间作存在地下部和地上部的相互作用,地上部主要是相互之间对光照的竞争,地下部主要是对土壤养分和水分的竞争,如地下部根系间的相互作用在间作产量优势中起重要作用。

用<sup>[21]</sup>。在间套作体系中,一种作物能改善另一种作物对土壤磷素的吸收。本试验表明,P0 水平下,由于柱花草通过生物固氮和活化土壤难溶性磷,为扭黄茅提供了更多的氮和磷<sup>[20]</sup>,相对单作,2015 年间作提高了扭黄茅对土壤氮磷的吸收,而显著降低了柱花草氮磷吸收量( $P<0.05$ );P75 水平结论同 P0 水平。同一种植模式,相对柱花草单作,施磷后提高了柱花草固氮能力,2015 年氮吸收量为增加趋势,2016 年氮吸收量为降低趋势;在与扭黄茅间作后,施磷增加 2015 年氮磷吸收量,2016 年为减少趋势。相对扭黄茅单作,施磷结果与柱花草单作一致;在与柱花草间作后,施磷增加 2016 年氮吸收量,说明间作可以提高土壤氮磷素的利用,对修复退化土壤肥效有一定作用。

#### 参 考 文 献:

- [1] 赵荣芳,邹春琴,张福锁. 长期施用磷肥对冬小麦根际磷、锌有效性及其作物磷锌营养的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(3): 368-372.
- [2] 李朝霞. 磷匮乏影响玉米根系发育机制的研究[D]. 济南: 山东大学,2011.
- [3] 卢树昌,陈清,张福锁,等. 河北果园主分布区土壤磷素投入特点及磷负荷风险分析[J]. 中国农业科学,2008,41(10):3149-3157.
- [4] 湛芸,何丙辉,赵秀兰,等. 小江流域农地水土流失对水体富营养化的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(4):31-34.
- [5] 焉莉,高强,张志丹,等. 自然降雨条件下减肥和资源再利用对东北黑土玉米地氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(4):1-6.
- [6] 龙会英,张德,金杰,等. 干热河谷典型生态脆弱区优良牧草栽培利用与评价[M]. 北京:科学出版社,2016:1-266.
- [7] 夏海勇. 种间相互作用和供磷强度对玉米间作系统生产力、根系分布和养分吸收利用的影响[D]. 北京:中国农业大学,2013.
- [8] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(27):11192-11196.
- [9] 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.
- [10] Mei P P, Gui L G, Wang P, et al. Maize/faba bean intercropping with rhizobia inoculation enhances productivity and recovery of fertilizer P in a reclaimed desert soil [J]. Field Crops Research, 2012,130(11):19-27.
- [11] 余常兵,孙建好,李隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(1):1-8.
- [12] 龙会英,张德,金杰,等. 干热河谷退化山地不同立地条件种植柱花草效应研究[J]. 热带农业科学,2011,31(8):5-10.
- [13] 展晓莹,张丽,刘晓斌,等. 高磷条件下不同磷效率小麦对磷的吸收及根际土壤磷组分差异[J]. 核农学报,2013,27(11): 1762-1770.
- [14] Willey R W. Intercropping — its importance and research needs. Part 2. Agronomy and research approaches [J]. Field Crop Abstract, 1979, 32(2):73-85.
- [15] 何道文,孙辉,黄雪菊. 利用 N-15 自然丰度法研究固氮植物生物固氮量[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(1):132-137.
- [16] 李玉英,余常兵,孙建好,等. 蚕豆/玉米间作系统经济生态施氮量及对氮素环境承受力[J]. 农业工程学报[J]. 2008,24(3):223-227.
- [17] Devau N, Hinsinger P, Cadre L E, et al. Fertilization and pH effects on processes and mechanisms controlling dissolved inorganic phosphorus in soils [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2011, 75(10):2980-2996.
- [18] Song Y N, Zhang F S, Marschner P, et al. Effect of intercropping on crop yield and chemical and microbiological properties in rhizosphere of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.) and faba bean (*vicia faba* L.) [J]. Biology and fertility of Soil, 2007,43(5): 565-574.
- [19] Zhang G, Yang Z, Dong S. Interspecific competitiveness affects the total biomass yield in an alfalfa and corn intercropping system [J]. Field Crops Research, 2011, 124(1):66-73.
- [20] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007,104(27): 11192-11196.
- [21] 张红刚. 蚕豆、大豆和玉米根际磷酸酶活性和有机酸的差异及其间作磷营养效应研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.