

# 种间相互作用对牧草间作体系生产力的影响

张 德, 龙会英

(云南省农业科学院热区生态农业研究所, 云南 元谋 651300)

**摘要:** 为了揭示种间相互作用对柱花草/黑籽雀稗间作体系生产力的影响, 试验设计三个处理, 分别是单作柱花草、单作黑籽雀稗、柱花草/黑籽雀稗间作, 观测了三个不同种植模式作物整个生育的物候期、整个植株生长量、生物量、生物量的当量比及不同种植体系土壤有机质、全氮和全磷的差异。结果表明: ① 种植牧草 270 天后, 间作体系地上部和地下部生物量的当量比分别是 3.05 和 3.52, 土地当量比大于 1, 表明柱花草/黑籽雀稗间种具有间作优势。② 与单作相比, 间作体系黑籽雀稗物候期推迟 5 天; 其生长量、生物量均高于单作, 株高、根长、干草产量和根系产量分别高于单作 9.67 cm、7.33 cm、345.50 g·株<sup>-1</sup>、131.67 g·株<sup>-1</sup>。与柱花草单作对比, 间作的分枝期、现蕾期、花期比单作分别推迟 5 天、15 天、5~15 天; 其生长量和生物量低于单作, 柱花草株高、根系深、根冠比、根瘤量、干草产量和根系产量分别低于单作 10.64 cm、0.54 cm、0.08、0.84 粒·株<sup>-1</sup>、14.29 g·株<sup>-1</sup> 和 1.48 g·株<sup>-1</sup>; ③ 间作体系土壤养分有机质、全氮、全磷比种植前增加的量分别为 0.039%、0.003%、0.001%。单作柱花草样地有机质、全氮比种植前增加的量分别为 0.063%、0.006%, 磷比种植前减少 0.001%; 单作黑籽雀稗样地有机质、全氮比种植前减少 0.017%、0.002%。表明, 柱花草的间作提高了样地土壤有机质、全氮和全磷含量; 柱花草在生物固氮过程中, 以磷固氮, 消耗磷素致使单作柱花草样地全磷量减少, 全氮量增加。

**关键词:** 种间相互作用; 牧草; 间作体系; 生产力; 土壤养分

中图分类号: S54 文献标志码: A

## Effects of interspecific interactions on productivity of the intercropping system of intercropping *Stylosanthes guianensis* / *Paspalum atratum*

ZHANG De, LONG Hui-ying

(Institute of Tropical Eco-Agricultural Sciences, Yunnan Academy of Agriculture Sciences, Yuanmou, Yunnan 651399, China)

**Abstract:** To uncover effects of interspecific interactions on productivity of the intercropping system of intercropping *Stylosanthes guianensis* / *Paspalum atratum*, three treatments, respective monoculture of *S. guianensis* and *P. atratum*, *P. atratum* / *S. guianensis* reciprocal intercropping, were designed to observe difference in growth, biomass, and equivalent ratio of the biomass of the whole plant, phenology, as well as soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus of sample plot under the three treatments in the whole growth period. The results showed the LER of biomass above-ground and underground was 3.05 and 3.52 respectively 270 days after planting in intercropping system and LER was greater than 1, which indicated that the intercropping system had its advantage. Compared with monoculture, phenology of *P. atratum* in intercropping system delayed for 5 days, and its growth and biomass were higher than those in monoculture. Its plant height, root length, dry yield and root yield were higher than those in monoculture by 9.67 cm, 7.33 cm, 345.50 g·strain<sup>-1</sup>, 131.67 g·strain<sup>-1</sup> respectively. Compared with monoculture, the stage of branch, flower buds and flowering of *S. guianensis* in intercropping system delayed for 5 days, 15 days and 5~15 days respectively, and its growth and biomass were lower than those in monoculture. Its plant height, root length, root shoot ratio were lower than those in monoculture by 10.64 cm, 0.54 cm, 0.08, 0.84 grain·strain<sup>-1</sup>, 14.29 g·strain<sup>-1</sup> and 1.48 g·strain<sup>-1</sup>. The increase in organic matter, total nitrogen and total phosphorus in the intercropping sample plot after planting was 0.039%

收稿日期: 2016-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361099); 云南省应用基础研究面上项目(2008CD182)项目; 云南省技术创新人才培养依托项目; 云南省农业科学院热区生态农业研究所科技计划项目(RQS 2008-1)

作者简介: 张 德(1964—), 男, 云南保山人, 本科, 研究员, 主要从事热区农业资源高效利用。E-mail: ynzhangde2004@sina.com。

通信作者: 龙会英(1965—), 研究员, 主要从事热区农业资源高效利用。E-mail: ynhuiying2003@sina.com。

0.003% and 0.001%. The increase in organic matter and total nitrogen in monoculture of *S. guianensis* was 0.063% and 0.006% after planting. The total phosphorus decreased by 0.001% after planting. Organic matter and total nitrogen decreased in monoculture of *P. atratum* by 0.017% and 0.002% after planting. It was concluded that *S. guianensis* used phosphobacteria for nitrogen fixation in BNF process. Phosphorus consumption led to the decrease in total phosphorus and increase in total nitrogen in monoculture of *S. guianensis*.

**Keywords:** interspecific interactions; intercropping system; productivity; soil nutrient

元谋干热河谷高温干旱,土壤肥力低<sup>[1-2]</sup>,生态环境脆弱,山地多优质地少。柱花草是热带、亚热带地区最重要的放牧和刈割兼用型豆科牧草,宜于在我国南方热带地区种植,适应性强,耐酸瘠土壤,产量高<sup>[3-4]</sup>。柱花草品质好,营养丰富,兼具饲料、绿肥、水保的功能,枝繁叶茂,根系发达并具大量根瘤菌,有固氮改土培肥、保持水土的作用,种植柱花草后,每公顷每年可固氮 225~300 kg<sup>[5-6]</sup>。黑籽雀稗适应性强,耐酸瘦土壤,耐涝和一定程度耐旱,在年降水 750 mm 以上的地区种植表现良好的高产丰产性能,分蘖能力强,表现出叶量大的特点,一般当年建植刈割草地可刈割 3~5 次,再生能力强,适口性好,牛、羊喜食,牧草产量高,对 N 肥反应敏感,常通过施 N 肥以提高其粗蛋白含量<sup>[7]</sup>,长期施用化肥导致耕地环境变差,还将引起水体和大气环境质量恶化<sup>[8-9]</sup>,水体富营养化<sup>[10]</sup>及农田土壤酸化<sup>[11]</sup>。如何实现即提高单位面积产量又有效减少肥料的施用量,我们需要寻找一条既能保证土地增产又能保证土壤健康的安全途径。多年来,我国农民在长期生产实践中掌握了间作耕作措施,能够充分利用光照、热量、水分、空气和土地等自然资源,既增加单位面积产量,又可减少肥料的投入和环境质量恶化。禾本科与禾本科间作在西北灌溉地区是一种集约化、高投入和高产出的种植模式,豆科/非豆科间作是分布最广的间作形式<sup>[12]</sup>,其间作优势主要来自于豆科作物生物固氮能力,间作提高了豆科作物的固氮效率<sup>[13]</sup>。本研究试图通过黑籽雀稗/柱花草间作,通过豆科作物生物固氮,减少黑籽雀稗氮肥施用量达到减肥增效的目的。本文通过研究不同的种植模式作物的物候期、生长量、生物量、土壤养分变化及间作土地当量比等方面,阐明禾本科与豆科牧草间作丰富物种多样性,对提高和稳定黑籽雀稗草地生态系统生产力和利用率、维持区域牧草持续生产、改善草地环境的促进作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验区位于金沙江干热河谷典型区云南省元谋

县,多年年均温度 21.9℃,最热月(5月)均温 27.1℃,最冷(12月)月均温 14.9℃,极端最高温 42℃,最低温 -1.3℃,≥0℃积温达 8 003℃·d,日均 7.3 h,日照率为 60%。全年降水量 614 mm,降水集中在 5—10 月,蒸发量 3 911 mm,年相对湿度 53%,年干燥度 2.08,旱季该值可达 16.2,年均太阳总辐射量 640.58 kJ·cm<sup>-2</sup>,年均日照时数 2 670 h。样地 0~20 cm 土层深有机质质量分数 0.838%,全氮质量分数 0.072%,速效磷 35.9 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 103.0 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 值 7.11。20~40 cm 土层深有机质质量分数 0.508%,全氮质量分数 0.086%,速效磷 40.9 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 132.00 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 值 7.2<sup>[14-15]</sup>。

### 1.2 供试材料

柱花草为热研 2 号柱花草,黑籽雀稗为热研 11 号黑籽雀稗,两个试验材料均引自中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所热带牧草研究中心。

### 1.3 试验设计

试验点设在云南省农业科学院热区生态农业研究所羊开窝基地人工生态恢复试验示范基地牧草资源综合研究区。采用完全随机区组设计,三个处理四个重复,处理分别是热研 2 号柱花草单作、热研 11 号黑籽雀稗单作、热研 2 号柱花草与热研 11 号黑籽雀稗间作。重复一观测不同种植模式下生育期和生长量,其它三个重复观测其生物量和土壤有机质、全氮和全磷变化。试验于 2012 年 5 月播种,采用育苗移栽方式,其中:柱花草(*S. guianensis*),播种前采用 80℃热水浸 3~5 min 晾干。7 月定植,株行距 0.5 m × 0.5 m,试验地不施底肥,按常规方法管理<sup>[16-17]</sup>。

### 1.4 测定指标

1.4.1 作物物候期观察 采用龙会英,沙毓沧,朱红业,等文献观察方法<sup>[18]</sup>,观察各参试牧草分枝期、现蕾或抽穗期、花期、结荚或灌浆期、种子成熟期,时间从 2012 年 8 月 15 日开始,每隔 5~7 天调查一次。

1.4.2 作物生长动态及植被盖度测定 作物于 8 月 15 日移栽,11 月 15 日观测作物植被盖度,植被盖度采用盖度框法进行测定,翌年 5 月观测植株绝对

株高<sup>[6]</sup>。

1.4.3 作物生物量测定及土地当量比计算 于 2013 年 5 月剖面挖根与清洗法测定整株作物根系总量(包含活根与死根量),自然风干后重量法测定各作物每株产量<sup>[19]</sup>。计数法测定柱花草根瘤量,3 次重复。土地当量比<sup>[20]</sup> = 两作物间作体系产量/单作产量之和。

1.4.4 土壤营养成份测定 以 0~20 cm 土层深,S 型采集作物种植前土壤样品,作为测定样地土壤养分本底数据,种植成活后第 4 月采集作物根际样品测定土壤有机质、土壤全氮和土壤全磷。3 次重复,样品测定及数据由云南悦分环境检测有限公司提供。

### 1.5 数据来源和处理

数据用 Microsoft Excel2003 进行整理,采用 SPS 软件进行统计分析,气象要素由元谋县气象局提供。

## 2 结果与分析

### 2.1 单作与间作系统柱花草和黑籽雀稗物候差异

物候期反映了植物的生长、发育等活动规律与生物的变化节候。从表 1 来看,与热研 11 号黑籽雀稗间作,热研 2 号柱花草分枝期 08-25—10-20,现蕾期 11-05—11-10,花期 11-10—11-20,结荚期 11-30—12-25,成熟期 12-30 开始。与柱花草单作对比,间作的分枝期、现蕾期、花期比单作分别推迟 5 天、15 天、5~15 天,后期单作和间作结荚期、成熟期相差不大。与柱花草间作,黑籽雀稗分枝期 08-20—09-10,现蕾期 10-30—11-05,花期 11-15—11-30,结荚期 11-20—11-25,成熟期 11-20 开始。与黑籽雀稗单作对比,间作体系黑籽雀稗现蕾期、花期、结荚期比单作体系均推迟 5 天。说明在柱花草和黑籽雀稗间作体系中,黑籽雀稗生长明显受到促进,生长茂盛,物候期推迟。

表 1 单作与间作系统各作物物候期(移栽时间:2012-08-15)

Table 1 Phenological period of crops in monoculture and intercropping(Time of planting: August 15, 2012)

种植模式 Pattern	作物 Crops	分枝期 (月-日) Branch (M-d)		现蕾或抽穗期 (月-日) Flower buds or heading stage(M-d)		花期 (月-日) Flowering stage (M-d)		结荚或灌浆期 (月-日) Period of pod of postulation(M-d)		成熟期 (月-日) Autumn (M-d)
		始 Begin	终 End	始 Begin	终 End	始 Begin	终 End	始 Begin	终 End	始 Begin
		单种 Monoculture	柱花草 <i>S. guianensis</i>	08-25	10-15	10-20	10-25	10-25	11-15	11-30
	黑籽雀稗 <i>P. atratum</i>	08-20	09-10	10-25	11-05	11-10	11-25	11-15	11-20	11-20
间种 Intercropping	柱花草 <i>S. guianensis</i>	08-25	10-20	11-05	11-10	11-10	11-20	11-30	12-25	12-30
	黑籽雀稗 <i>P. atratum</i>	08-20	09-10	10-30	11-05	11-15	11-30	11-20	11-25	11-20

### 2.2 单作与间作系统热研 2 号柱花草和热研 11 号黑籽雀稗生长量的比较

植被盖度反映植被的茂密程度和植物进行光合作用面积的大小。柱花草和黑籽雀稗在不同种植体系中有差异( $P < 0.05$ )。间作体系中柱花草盖度比单作柱花草减少 40.66%,黑籽雀稗减少 36.00%;间作体系中黑籽雀稗盖度比单作减少降低 1.66%,比柱花草减少 36.00%。与单作比较,间作柱花草株高、根系深、根冠比分别低于单作 10.64 cm、0.54 cm 和 0.08;间作黑籽雀稗株高、根系深、根冠比分别高于单作 9.67 cm、7.33 cm 和 0.02。说明柱花草和黑籽雀稗间作后,由于两作物之间的竞争,竞争能力强的禾本科牧草黑籽雀稗生长得到促进。

### 2.3 单作与间作系统热研 2 号柱花草和热研 11 号黑籽雀稗生物量比较

土地当量比(Land Equivalent Ratio, LER)常被用于衡量间作优势(Willey, 1979),LER > 1 表明间作比单作有利,LER < 1 表明单作比间作有利<sup>[20]</sup>。间作体系中,种植 9 个月柱花草根瘤量为 893.16 粒·株<sup>-1</sup>,低于单作 0.84 粒·株<sup>-1</sup>;干草量 124.08 g·株<sup>-1</sup>,低于单作 14.29 g·株<sup>-1</sup>;根系干重 7.57 g·株<sup>-1</sup>,低于单作 1.48 g·株<sup>-1</sup>;根冠比 0.06,与单作一致。与单作对比,间作体系黑籽雀稗种植 9 个月生物量高于单作,干草量 630.30 g·株<sup>-1</sup>,高于单作 345.50 g·株<sup>-1</sup>;根系干重 210.00 g·株<sup>-1</sup>,高于单作 131.67 g·株<sup>-1</sup>;根冠比 0.33,高于单作 0.05。说明柱花草/黑籽雀稗间作体系中,黑籽雀稗生长受到促进致使其生物量增加,而柱花草生长受到抑制致使

其生物量减少,详见表 3。从图 1 和图 2 可看出,作物种植 60 天,单作和间作体系黑籽雀稗地上和地下部干物质积累量较一致,90 天后间作体系黑籽雀稗干物质积累量远远高于单作,而间作体系柱花草干

物质积累量则低于单作。以牧草地上部和地下部生物量为依据,与单作对比,间作样地土地当量均大于 1,说明柱花草/黑籽雀稗间作体系比单作具有优势。

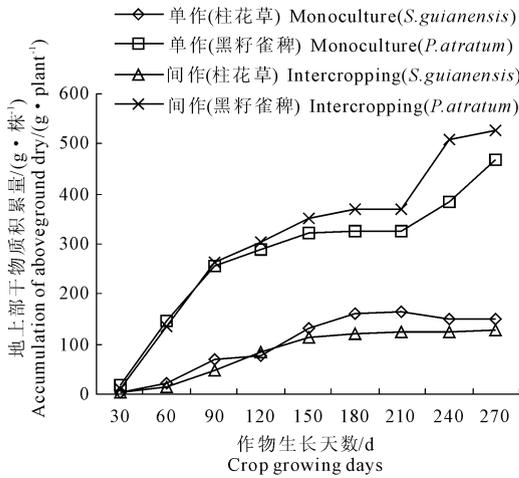


图 1 单作与间作作物地上部分干物质积累量  
Fig.1 Dry matter accumulation of crops aerial part in Monoculture and intercropping

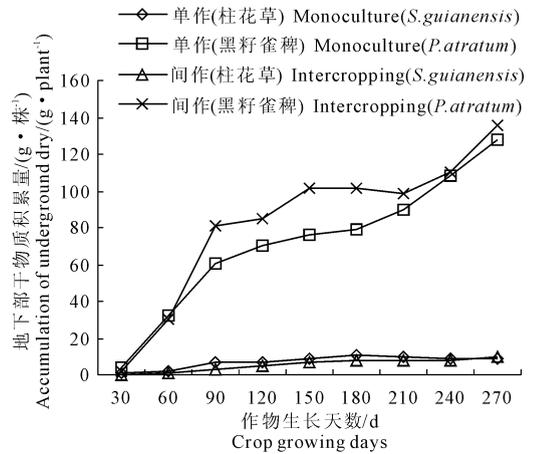


图 2 单作与间作作物地下部分干物质积累量  
Fig.2 Dry matter accumulation of crops underground part in Monoculture and intercropping

表 2 单作与间作系统各作物的生长量(观测时间:2013-05-15)

Table 2 Growth of crops in monoculture and intercropping(Observing time: May 15, 2013)

种植模式 Pattern	作物 Crops	株高 Height/cm	根系深 Depth/cm	根冠比 Root cap ratio	盖度 Coverage/%
单作 Monoculture	柱花草 <i>S. guianensis</i>	90.67 ± 9.61	49.00 ± 5.20	0.54	99.33 ± 0.58*
	黑籽雀稗 <i>P. atratum</i>	80.33 ± 6.11	46.67 ± 2.31	0.58	96.33 ± 5.51
间作 Intercropping	柱花草 <i>S. guianensis</i>	80.03 ± 4.24	49.54 ± 7.07	0.62	58.67 ± 10.02
	黑籽雀稗 <i>P. atratum</i>	90.00 ± 4.24	54.00 ± 0.00	0.60	94.67 ± 7.77

\* 表示单作柱花草总盖度显著高于间作中柱花草 ( $P < 0.05$ )。

\* represents the total cover of the *S. guianensis* in monoculture treatment is significantly higher than that in intercropping treatment ( $P < 0.05$ ).

表 3 单作与间作系统各作物的生物量

Table 3 The biomass of crops in monoculture and intercropping

种植模式 Pattern	作物 Crops	根瘤量/(粒·株 <sup>-1</sup> ) Amount of root nodules /(Grain·plant <sup>-1</sup> )	干草量/(g·株 <sup>-1</sup> ) Amount of plant /(g·plant <sup>-1</sup> )	根系干重/(g·株 <sup>-1</sup> ) Root dry weight /(g·plant <sup>-1</sup> )	根产量/ 草产量 Root yield
单作 Monoculture	柱花草 <i>S. guianensis</i>	903.00 ± 296.47	148.37 ± 61.38	9.05 ± 1.54	0.06
	黑籽雀稗 <i>P. atratum</i>	0	284.80 ± 82.45	78.33 ± 19.67	0.28
间作 Intercropping	柱花草 <i>S. guianensis</i>	893.16 ± 163.34	124.08 ± 28.43	7.57 ± 2.51	0.06
	黑籽雀稗 <i>P. atratum</i>	0	630.30* ± 95.18	210.00* ± 9.48	0.33*

间作土地当量比(地上部生物量)

LER of Intercropping (biomass aboveground)

3.05

间作土地当量比(地下部生物量)

LER of Intercropping (biomass underground)

3.52

注: \* 表示黑籽雀稗在单作和间作条件下差异,显著性是 0.05。

Note: \* represents the significant differences of *P. atratum* between monoculture and intercropping ( $P = 0.05$ )

## 2.4 单作与间作系统热研 2 号柱花草和热研 11 号黑籽雀稗根际土壤养分比较

间作对土壤有机质、养分的影响如表 4。在间作体系中,种植作物后根际土壤养分有机质、全氮、全磷比种植前增加的量分别为 0.039%、0.003%、0.001%。单作体系中,单作柱花草样地有机质、全氮比种植前增加的量分别为 0.063%、0.006%,磷比

种植前减少 0.001%;单作黑籽雀稗样地有机质、全氮比种植前减少 0.017%、0.002%,全磷量无变化。对比单作,间作体系种植后根际土壤养分有机质、全氮增加的量低于单作柱花草,但高于单作黑籽雀稗;全磷增加的量高于单作,黑籽雀稗无变化。说明柱花草在生物固氮过程中,以磷固氮,消耗磷素致使单作柱花草样地全磷量减少,全氮量增加。

表 4 单作与间作种植前后土壤有机质、全氮和全磷增加的量

Table 4 Increase in organic matter, total nitrogen and total phosphorus in soil before and after monoculture and intercropping

取样时间 Sampling time	种植样地 Sample plot of plant	有机质 Organic matter /%	全氮 Total nitrogen (N, %)	全磷 Total phosphorus (P, %)
种植作物前 Beforecrop - planting	柱花草单作 <i>S. guianensis</i> monoculture	0.731	0.036	0.016
	黑籽雀稗单作 <i>P. atratu</i> monoculture	0.653	0.034	0.015
	柱花草/黑籽雀稗间作 <i>S. guianensis</i> / <i>P. atratum</i> intercropping	0.755	0.039	0.015
种植作物 4 个月 Four months After crop planting	柱花草单作 <i>S. guianensis</i> monoculture	0.794	0.042	0.015
	黑籽雀稗单作 <i>P. atratu</i> monoculture	0.636	0.032	0.015
	柱花草/黑籽雀稗间作 <i>S. guianensis</i> / <i>P. atratum</i> intercropping	0.794	0.042	0.016
种植牧草后的增加量 Increase after planting	柱花草单作 <i>S. guianensis</i> cv. Reyan 2 monoculture	0.063	0.006	-0.001
	黑籽雀稗单作 <i>P. atratu</i> cv. Reyan 11 monoculture	-0.017	-0.002	0
	柱花草/黑籽雀稗间作 <i>S. guianensis</i> / <i>P. atratum</i> intercropping	0.039	0.003	0.001

## 3 讨论

1) 有文献报道,发表的 50 多种间作套种模式,93% 以上的模式具有显著的间作产量优势<sup>[21]</sup>,在我国西北地区,蚕豆在蚕豆/玉米间作体系中大幅度增产<sup>[22]</sup>,小麦/玉米带田、蚕豆/玉米是河西内陆灌区主要的高产种植方式<sup>[23]</sup>。有学者认为,禾本科作物竞争土壤有效氮增加豆科植物结瘤固氮可能是这一体系氮素高效利用的主要途径,豆科植物的共生固氮作用相当于给系统施用了氮肥,从而增加了生态系统生产力<sup>[24]</sup>。而豆科植物的共生固氮作用也可以通过植物根际种间相互作用来调控<sup>[25-26]</sup>,当磷高效的豆科作物和禾本科作物间作时,有利于禾本科作物对磷的吸收利用<sup>[27-28]</sup>。本试验中,与单作对比,间作样地有机质、全氮、全磷增加的量高于单作黑籽雀稗,单作柱花草全磷量低于间作体系。说明柱花草在生物固氮过程中,以磷固氮,消耗磷素致使单作柱花草样地全磷量减少,全氮量增加,与阮松,2012<sup>[5]</sup>;张德,2015<sup>[14]</sup>;Temperton Vicky M,2007<sup>[15]</sup>研究一致。

2) 种内或种间竞争是自然界中生物存在的普遍形式,在豆科植物的根瘤中,有能够固氮的根瘤菌

与植物共生,根瘤菌将空气中的氮转化为植物能够吸收的含氮物质,从而使得植物生长良好,而植物则为根瘤菌提供有机物。本试验中,柱花草和黑籽雀稗在不同种植体系中物候、生长量、干物质积累量、土地当量比均发生变化。与单作对比,在间作体系中,由于柱花草生物固氮提高土壤氮素,促进黑籽雀稗生长,株高和盖度均高于单作;由于黑籽雀稗生长茂盛抑制柱花草生长,柱花草株高及分盖度低于单作柱花草。间作体系中黑籽雀稗干物质积累量显著高于单作黑籽雀稗,而柱花草低于单作,地上部和地下部土地当量比均大于 1,表明这两种牧草间作具有间作优势,是间作互利体系。说明间作系统里,由于柱花草生物固氮促使黑籽雀稗根系吸收氮量促进黑籽雀稗生长,柱花草生长受到抑制,干物质积累量低于单作。同时也表明不同物种组成的复合群体对于土地资源的利用具有补偿效应。

从地上部和地下部生物量来看,间作系统中,种间相互作用对系统作物生物量和生长具有一定影响,而间作后的作物在地上地下部分均不可避免存在竞争,种间导致竞争强的作物的生长高于竞争弱的作物,这与作物的植物学及生理生态特征有关。柱花草和黑籽雀稗间作后,两作物的地上部分存在

对光、热资源的竞争,间作后的黑籽雀稗生长迅速,其生长速率超过柱花草,接收光照和热量充足,黑籽雀稗在间作体系中的生长量及生物量高于柱花草。同理,其地下部分的根系由于作物生理生态差异,间作后的地下部分也存在根系竞争,与间作中的柱花草对比,竞争能力强的黑籽雀稗根系具有根系扎根深、根冠比大的特点,与李秋祝<sup>[12]</sup>、张伟<sup>[20]</sup>研究一致。

## 4 结 论

试验结果表明:与单作黑籽雀稗相比,间作体系黑籽雀稗整个植株株高、根长、干草产量和根系生物量显著高于单作的量(显著性是 0.05),土壤有机质、全氮和全磷增加的量高于单作黑籽雀稗样地。两种牧草间作体系地上部和地下部生物量土地当量比均大于 1,说明柱花草与黑籽雀稗间作具有间作优势,是两种牧草间作互利体系,说明种间相互作用可提高间作体系生产力,既增加黑籽雀稗单位面积产量,又可减少施 N 肥投入,如:种植柱花草后,每公顷每年可固氮 225 ~ 300 kg<sup>[5-6]</sup>。

## 参 考 文 献:

[1] LONG H Y, SHA Y C, ZHU H Y, et al. Selection of adaptive grass and frutex and their planting benefits in the arid-hot valleys of yuanmou [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2008, 13(3): 317-323.

[2] 龙会英,朱红业,金 杰,等.优良热带牧草在云南元谋干热河谷区域试验研究[J].热带农业科学,2008,28(4):41-46.

[3] 龙会英,张映翠,朱宏业,等.热研 2 号柱花草在元谋干热河谷区的栽培技术[J].中国草地,2003,(6):21-23.

[4] 龙会英,沙毓沧,朱红业,等.8 份圭亚那柱花草在元谋干热河谷的引种研究[J].西南农业学报,2007,20(5):1078-1084.

[5] 阮 松.番木瓜与柱花草间种模式研究[D].海口:海南大学,2012.

[6] 龙会英,何华玄,张 德,等.干热河谷退化山地柱花草品种(系)比较试验[J].草业学报,2011,20(6):230-236.

[7] 张 瑜,严琳玲,罗小燕,等.热研 11 号黑籽雀稗的栽培及管理技术[J].草业与畜牧,2014,(5):23-25.

[8] 李淑芹,张耀伟,闫摇雷,等.不同施肥水平对白菜硝酸盐积累的影响[J].东北农业大学学报,2003,34(2):152-156.

[9] Barbotin A, Lecomte C, Bouchard C, et al. Nitrogen re mobilization during grain filling in wheat: Genotypic and environmental effects[J].

Crop Science, 2005,45:1141-1150.

[10] 李生秀.植物营养与肥料学科的现状与展望[J].植物营养与肥料学报,1999,(5):193-205.

[11] 徐仁扣,D. R. Coventry.某些农业措施对土壤酸化的影响[J].农业环境保护,2002,21(5):380-385.

[12] 李秋祝.种间相互作用和供氧强度对不同间作系统间种优势、根系形态和氮素吸收的影响[D].北京:中国农业大学,2009.

[13] 范分良.蚕豆/玉米间作促进生物固氮的机制和应用研究.中国农业大学博士论文[D].北京:中国农业大学,2006.

[14] 张 德,龙会英,郑益兴,等.不同种植密度和栽培管理对辣木农艺性状的影响[J].西南农业学报,2014,27(5):1870-1873.

[15] 龙会英,张 德,张美艳,等.元谋干热河谷几种牧草凋落物分解动态研究[J].草地学报,2013,21(5):881-887.

[16] 张 德,龙会英,腾春荣.干热河谷退化山地芒果园间种和翻压柱花草的效应研究[J].热带农业科学,2015,35(1):17-22.

[17] 史亮涛,金 杰,张明忠,等.云南热带牧草栽培及利用技术[M].昆明:云南科技出版社,2009:61-65.

[18] 龙会英,沙毓沧,朱红业,等.干热河谷草和灌木资源引种及综合利用研究[M].昆明:云南科技出版社,2010:9-62.

[19] 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.

[20] 张 伟.南疆果粮间作体系种间根系交互与氮素吸收利用研究[D].北京:中国农业大学,2014.

[21] 李 隆.间套作体系豆科作物固氮生态学原理与应用[D].北京:中国农业大学出版社,2013.

[22] 李文学.小麦/玉米/蚕豆间作系统中氮、磷吸收利用特点及环境效应[D].北京:中国农业大学,2002.

[23] Li L, Zhang F S, Li X L, et al. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003,65:61-71.

[24] Temperton M, Mwangi N. Scherer-lorenzen michael schmid bernhard, buchmann nina, positive interactions between nitrogen-fixing legumes and four different neighbouring species in a biodiversity experiment[J]. Oecologia, 2007,151:190-205.

[25] 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[J]. Plant and Soil, 2004,262:45-54.

[26] 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[J]. Plant Soil, 2006,283:275-286.

[27] Li L, Tang C X, Renge k, et al. Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source[J]. Plant and Soil, 2003,248:297-303.

[28] 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 National Academy of Sciences (PNAS), 2007,104:11192-11196.