

生物多样性对牧草生产力、营养成分和氮循环的影响

廖智毅^{1,2}, 王敏^{1,2}, 朱珏³, 易爱军^{1,2}, 谭支良^{1,2}, 王克林^{1,2}

(1. 中国科学院 亚热带农业生态研究所 湖南 长沙 410125; 2. 中国科学院 环江喀斯特农业生态系统研究观测站 广西 环江 547200; 3. 湖南农业大学 动物科学技术学院 湖南 长沙 410128)

摘要: 为了探索喀斯特地区人工牧草生物多样性对牧草生产力、营养成分和氮循环的影响,并通过多样性效应(选择效应和生态位互补效应)揭示其内在机制。试验选择常见的6种牧草品种,采用随机牧草品种组合和区组试验设计,构建了不同多样性梯度的试验群落。测定指标包括:牧草生产力、营养价值、土壤氮和多样性效应。结果表明:牧草生物多样性提高了牧草生产力,对营养价值也有显著影响。生物多样性增强了土壤-植被氮循环,体现为牧草蛋白质产量、土壤总氮和有效氮增多。选择效应和生态位互补效应共同作用于多样性-生态系统功能关系,而选择效应是主体。选择效应有利于某些高产牧草如宽叶雀稗生长,对牧草生产力、营养价值及氮循环有较大影响。

关键词: 人工牧草生物多样性; 选择效应; 生态位互补效应; 氮; 喀斯特地区

中图分类号: S14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7091(2010)增刊-0243-07

Effect of Forage Diversity on Productivity, Forage Chemical Composition and Soil Nitrogen Profile

LIAO Zhi-yi^{1,2}, WANG Min^{1,2}, ZHU Jue^{2,3}, YI Ai-jun^{1,2}, TAN Zhi-liang^{1,2}, WANG Ke-lin^{1,2}

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Changsha 410125, China; 2. Huanjiang Experimental Station of Karst Agro-ecosystem, Huanjiang 547200, China; 3. College of Animal Science, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The present study was designed to exploring the effect of forage diversity on productivity, forage chemical composition and soil nitrogen profile by well-grown forage species in Karst region of southwestern China. The diversity effect, including selection and complementary effect, was employed to explore the underlying mechanism. Forage species included four legumes [White Clover (*Trifolium repens* L.), Red Clover (*Trifolium retense* L.), Alfalfa (*Medicago sativa* L.) and Common Aeschynomene Herb (*Aeschynomene americana* var. *americana*)], two no-legumes [Green Bristlegrass Herb (*Setaria anceps* Stapf ex Massey) and Broadleaf Paspalum (*Paspalum atratum* cv. *Reyan* 11.)]. Experimental treatments included monocultures of six species and mixtures of 2, 3, 4 and 6 species in a standard randomized block design. Productivity, forage chemical compositions, soil nitrogen content, selection and complementary effects were determined. Result showed that forage species diversity enhanced forage production and yield of CP except biculture. Forage species diversity showed a great impact on the nutritional value of forages, which was exhibit as decreased CP concentration and increased NDF and ADF concentration in the mixture of forage. In addition, forage species diversity also greatly affected the soil-plant N cycling, which was exhibit as increased crude protein production, soil total N and available N. Analysis of relative yield and diversity effect indicated that selection and complementary effect affected the diversity-ecosystem function, and selection effect was the main cause in our study. Selection effect facilitated some forage to grow in arid environment, and thus impact on the productivity and chemical composition of forage and soil nitrogen profile.

Key words: Forage species diversity; Selection effect; Complementary effect; Chemical composition; Nitrogen; Karst region

生物多样性与生态系统功能的关系受到生态学研究的广泛关注。天然草地植被地区的植物生物多

样性试验表明,植物多样性增加了生态系统生产力和稳定性^[1-3]。牧场种植混播群落生物,例如豆科

收稿日期: 2010-05-21

基金项目: 中国科学院西部行动计划重要方向项目(KZCX2-XB2-08); 中国科学院知识创新重要方向项目(0751012010)

作者简介: 廖智毅(1985-),男,硕士,主要从事反刍动物营养生态研究。

与非豆科植物,提高了牧草产量,减少野生植物入境^[4,5]。这种现象的潜在机制是多样性效应,即选择和生态位互补效应^[2]。生态位互补效应可以利用资源达到更高的使用效率。生态位互补(或资源互补)理论认为,多样性的增加使群落中物种功能特性(如根系深度、冠层高度、生长速度、竞争能力及对不良环境的耐受力等)的多样化增加,从而可实现对有限的资源在不同的时间、空间,以不同的方式进行利用,使资源利用率最大化,进而导致系统功能水平的提高。例如:深根系物种和浅根系物种组合,可最大限度地利用不同土层的水分;不同冠层结构的物种搭配,可有效利用空间资源和光能资源;不同物候期的物种构建的群落可在不同阶段充分利用有限的养分。同时,不同的物种对各种资源的利用程度及同种资源的不同形式的偏爱亦有所差异。因此,多样性程度较高的群落可实现资源利用的互补,减少系统中资源的浪费,使群落生产力达到较高的水平。选择效应来自于有特殊功能的优势生物品种。在研究生物多样性与牧草生产力之间的关系时,关键在于揭示这两种效应对物种丰富区域的牧草生产力所起的作用。

近年来,在提高牧草生物多样性对家畜产量的影响上,进行了许多研究。通过选择牧草品种,在牧草物种丰富的草场种植一些优势牧草品种,可以使放牧的牛群得到更高的产量^[6,7]。牛摄食各种各样的牧草对其有益处,如减少食物中毒、获得最佳反刍效益、维持瘤胃微生物多样性、自由采食牧草、均衡总摄食量^[6,7]。另外文献指出,混合牧草不改变干物质摄入量 and 机体新陈代谢速率,草地系统中混合牧草的复杂性不影响放牧产量^[8,9]。但是,目前很少有研究报道,增加混合牧草品种对混播群落营养价值的影响。

在大多数生态系统中,营养氮调节净生物量,植物和土壤含氮量^[10]。豆科植物由于其能进行生物固氮作用,为土壤提供了外源氮,而禾本科植物可利用土壤氮,对土壤氮含量有负性作用^[11,12]。目前,生物多样性对土壤氮含量的影响有较大争议。有研究表明,物种多样性增加了植物氮含量,减少了土壤有效氮含量^[13,14]。也有关文献报道,植物物种数与土壤有效氮含量没有相关性^[15]。但是,很少研究关注于牧草物种多样性对土壤-植被氮循环的影响,及土壤不同形态氮的影响(有效氮、硝态氮和铵态氮)。在不同牧草物种丰度的群落中,弄清土壤-植物氮循环机制有利于理解草地生态系统粗蛋白生产模式,为人工草地建设和持续利用提供参

考数据。

1 材料和方法

1.1 试验地点

试验样地建立在中国科学院环江喀斯特农业生态系统研究观察站(N24°44',E108°19',海拔302 m)。地势为桂西北喀斯特典型峰丛洼地(即四周高中间低),是全球最广阔的喀斯特岩溶地区之一。土壤为深色或棕色石灰土,土层较薄,一般为10~50 cm。年平均气温19℃,7月份气温为27.9℃,1月份平均气温10.1℃。年平均降雨量1389.1 mm,4~8月份为雨季,降雨量占全年的73.7%,9月至翌年3月份为旱季。年平均日照1451.1 h。整个地貌为低山丘陵,位于中亚热带季风气候区^[16],属典型的桂西北喀斯特峰丛洼地^[17]。表1显示了试验地土壤特征。

表1 土壤的化学和物理特性

Tab.1 Chemical and physical soil characteristics of field site

土壤特性 Soil characteristics	值 Value
化学特性 Chemical composition	
pH 值 pH value	7.6
总氮/(g/kg) Total N	5.4
总磷/(g/kg) Total P	1.0
速效磷/(mg/kg) Assimilable P	17.6
速效钾/(mg/kg) Exchangeable K	91.2
有机质/(g/kg) Organic matter	102.0
物理特性 Physical characteristics	
粗沙(0.2~2 mm) /% Coarse sand	3.2
细沙(0.2~0.02 mm) /% Fine sand	12.6
泥沙(0.02~0.002 mm) /% Silt	32.0
粘土(<0.002 mm) /% Clay	43.9

试验于2007年进行。选择了生长在中国西南部喀斯特地区长势良好的牧草物种库。4种豆科植物:白三叶、红三叶、紫花苜蓿和合萌;两种禾本科植物:非洲狗尾草和宽叶雀稗。单播密度为300株/m²。

1.2 试验设计

4种豆科植物,白三叶(*Trifolium repens* L.)、红三叶(*Trifolium pratense* L.)、紫花苜蓿(*Medicago pratense* L.)、合萌(*Aeschynomene americana* var. *americana*)。2种禾本科植物,宽叶雀稗(*Paspalum atratum* cv. *Reyan 11*)、非洲狗尾草(*Setaria anceps* Stapf ex Massey)。采用随机区组设计,设5个生物多样性水平,分别为1、2、3、4及6种组合。1组合为:白三叶、红三叶、紫花苜蓿、合萌、非洲狗尾草和宽叶雀稗。2组合为:宽叶雀稗+非洲狗尾草、白三叶+红三叶、宽叶雀稗+紫花苜蓿、紫花苜蓿+合萌、白三叶+合萌、合萌+红三叶。3组合为:白三叶+紫花苜蓿+合萌、红三叶+宽叶雀稗+合萌、非洲狗尾草

+ 宽叶雀稗 + 合萌。4 组合为: 红三叶 + 非洲狗尾草 + 紫花苜蓿 + 合萌、红三叶 + 宽叶雀稗 + 合萌 + 紫花苜蓿、红三叶 + 白三叶 + 紫花苜蓿 + 宽叶雀稗。6 组合为: 白三叶 + 红三叶 + 紫花苜蓿 + 合萌 + 非洲狗尾草 + 宽叶雀稗。按照传统的生物多样性实验设计^[18]。每个种在各处理中的播量按下式计算: 种 i 的实际播量 = 种 i 的理论播量 / (种 i 的种用价值 \times 种 i 所在处理的物种数)。小区牧草密度为 300 株/ m^2 。试验采用 6 重复, 供 114 个小区。每个小区 $2\text{ m} \times 3\text{ m}$, 含 0.5 m 缓冲带隔离。于 2007 年 3 月采用撒播法人工播种, 试验地建植后采用常规法进行田间管理, 即定期除草, 保持小区里无明显杂草。

1.3 样本和化学成分分析

2007 年 8 月底, 一次性收获和测定不同处理内各物种的地表生物量 (75°C 烘干), 以各群落的牧草生物多样性作为群落生产力指标。同时, 收集了 6 个牧草样品分析其化学成分 (如干物质、粗蛋白、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维)。用凯氏定氮法即总氮含量乘以 6.25 估算粗蛋白含量, 用 Van Soest 提到的方法测定中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维^[19]。每个小区采 9 个 $0 \sim 0.15\text{ cm}$ 的土样, 混合并测定不同形态的氮。称取 10 g 土壤, 加入 $40\text{ mL } 1\text{ mol/L}$ 的 KCl 浸提, 振荡 30 min , 过滤后在 -4°C 冰箱中保存, 按照 FIAstar5000 方法, 用流动注射分析仪 (FI-Astar 5000, FOSS, Switzerland) 测定提取液的总氮、铵态氮、硝态氮含量。用硝态氮和铵态氮估算土壤无机氮含量。采用蒸馏法分析测定有效氮含量。用凯氏定氮法计算总氮含量。

1.4 计算和统计分析

通过对比每个品种单播与混播的产量, 计算种 i 在混播群落中的相对产量 (RY_i), 计算方法如下:

$$RY_i = Y_{i\text{mix}} / Y_{i\text{mon}}$$

$Y_{i\text{mix}}$ 是混播群落中物种 i 的产量, $Y_{i\text{mon}}$ 是种 i 的

单播产量。混播群落的净效应 (ΔY)、生态位互补效应 (CEF) 和选择效应 (SEF) 采用 Loreau and Hector (2000) 方法, 计算方法如下:

$$\Delta Y = Y_0 - \sum Y_{i\text{mon}} / n$$

$$CEF = n \times (\sum \Delta RY_i / n) \times (\sum Y_{i\text{mon}} / n)$$

$$SEF = n \times \text{covariance}(\Delta RY_i, M_i) = \Delta Y - CEF$$

Y_0 是混播群落的实际产量值, $\sum Y_{i\text{mon}} / n$ 是混播群落理论产量值, n 为混播群落的物种数, ΔRY_i 是物种 i 在混播群落中的相对产量与理论值之差。2、3、4 及 6 种组合的群落 RY_i 理论值分别为 $1/2$, $1/3$, $1/4$ 和 $1/6$ 。 $\Delta Y > 0$ 表明混播群落中存在正的多样性效应; $\Delta Y < 0$ 表明混播群落中存在负的多样性效应。多样性效应是生态位互补效应和选择效应的总和。CEF > 0 , 说明混播群落中存在资源的互补利用; CEF $= 0$, 说明混播群落中不存在资源的互补利用; CEF < 0 , 说明混播群落中的种内相互排斥。SEF > 0 , 说明混播群落中出现特殊功能特征的优势生物品种; SEF ≤ 0 , 说明混播群落中没有出现特殊功能特征的优势生物品种。

数据用 SPSS 13.0 软件处理分析, 在不同的牧草品种多样性水平上, 用单因素分析 (牧草生产力、粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量、土壤有效氮、铵态氮、硝态氮、无机氮含量的差异。分析了在不同多样性水平下 (2、3、4 和 6) 混播群落净效应、互补和选择效应与零假设的 t 检验。用线性回归模型分析了不同生物多样性水平对牧草粗蛋白的产量和生产力的影响。

2 结果与分析

由图 1-A 可见, 混播群落牧草生产力随着生物多样性的提高呈线性上升趋势。由图 1-B 可见, 混播群落蛋白质产量随着生物多样性的提高呈线性上升趋势。

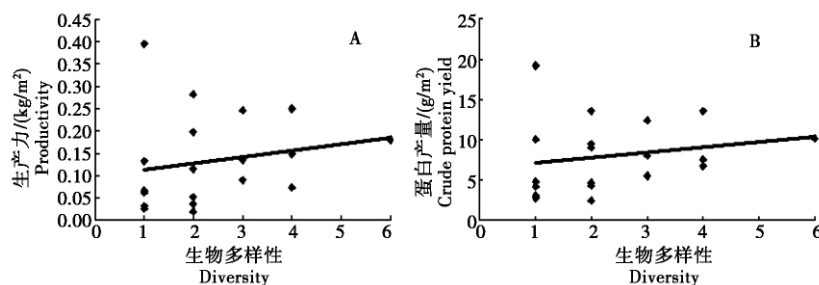


图 1 不同的牧草多样性水平对混播群落生产力 (A) 和粗蛋白产量 (B) 的影响

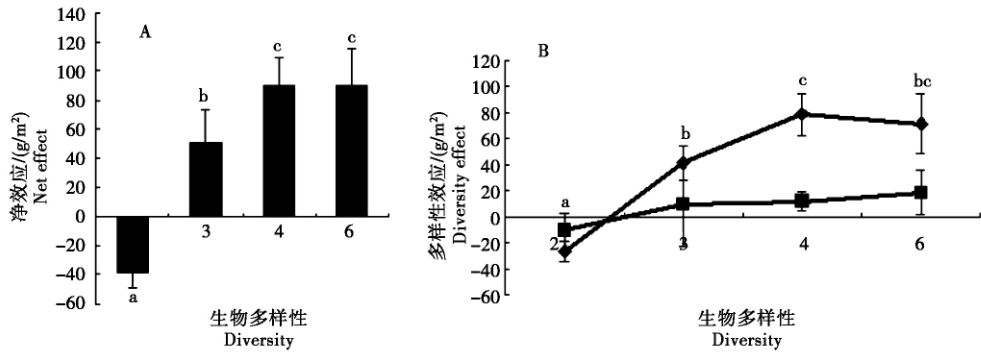
Fig. 1 Effect of different forage diversity levels on aboveground productivity (A) and yield of CP (B)

表 2 和图 2 进一步描述生物多样性对混播群落的净效应, 选择效应和生态位互补效应的影响。2 种牧草组合混播群落的净效应显著性小于 0 ($P <$

0.001) (表 2); 3、4 和 6 牧草组合混播群落的净效应都大于 0 ($P < 0.05$) (表 2); 牧草多样性显著提高了混播群落的净效应 (图 2-A) 4 和 6 牧草组合混

播群落的净效应最大(图 2-A)。2 种牧草组合混播群落的选择效应显著性小于 0 ($P < 0.001$); 3、4 和 6 牧草组合混播群落的选择效应都大于 0 ($P < 0.05$); 牧草多样性显著提高了混播群落的选择效应 4 牧草组合混播群落的选择效应最大; 2 种牧草

组合混播群落的生态位互补效应呈下降趋势; 3、4 和 6 牧草组合混播群落的生态位互补效应呈上升趋势。牧草多样性对混播群落的生态位互补效应无显著性影响。



数据显示平均值 ± 标准差。不同字母指示物种丰度间的显著差异 ($P < 0.05$)。

图 2 不同牧草多样性对净效应 (A)、选择效应 (◆) 和生态位互补效应 (■) (B) 的影响

Fig. 2 Effect of forage diversity on net effect (A) selection effect (◆) and complementary effect (■) (B)

表 2 不同多样性水平下混播群落净效应、
互补和选择效应与零假设的 t 检验结果

Tab. 2 The t test of deviations from the null
hypothesis for net complementary and selection effect
versus zero at each diversity level Forage diversity

	生物多样性 Forage diversity	t 值 t value	P 值 P value
净效应 Net effect	2	-3.69	0.001***
	3	2.22	0.04*
	4	4.64	0.001***
	6	3.53	0.02*
生态位互补效应 Complementary effect	2	-0.78	0.223
	3	0.29	0.387
	4	1.71	0.054
	6	1.10	0.166
选择效应 Selection effect	2	-3.46	0.001***
	3	3.20	0.003**
	4	4.89	<0.001***
	6	3.08	0.018*

注: ** . $P < 0.01$; *** . $P < 0.001$ 。下同。

Note: ** . $P < 0.01$; *** . $P < 0.001$. The same below.

由表 3 详细描述了试验 6 种牧草的生产力及营养成分。结果表明,混播群落中各牧草产量差异很大,例如,宽叶雀稗的生产力远远高于其他牧草品种,合萌的生产力为次高。另外,混播群落中各牧草产量差异很大(以干质量计),豆科类牧草粗蛋白含量(以干质量计)显著高于禾本科牧草,而禾本科牧草的酸性洗涤纤维(以干质量计)和中性洗涤纤维含量高于豆科类牧草。

表 4 表明,物种多样性对混播群落的粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量等营养成分有很大影响($P < 0.01$)。多样性显著降低了混播群落粗蛋白含量($P = 0.001$)。另外,多样性显著提高了混播群落中性洗涤纤维($P < 0.01$)和酸性洗涤纤维含量($P < 0.001$),其中 3 牧草组合混播群落中性洗涤纤维含量最高; 3 和 6 种牧草组合混播群落的酸性洗涤纤维含量最高。

表 3 植物牧草品种的生产力和营养成分

Tab. 3 Productivity and chemical composition of the planted forages species

	生产力/(g/m²) Productivity	粗蛋白 /(g/kg) CP	酸性洗涤纤维 /(g/kg) ADF	中性洗涤纤维 /(g/kg) NDF
禾本科 No-Legume				
非洲狗尾草 <i>Setaria anceps</i> Stapf ex Massery	66	45	395	664
宽叶雀稗 <i>Paspalum atratum</i> cv Reyan II	395	49	379	558
豆科 Legume				
白三叶 <i>Trifolium repens</i> L.	25	106	237	319
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.	32	129	339	426
红三叶 <i>Trifolium pratense</i> L.	62	77	372	424
合萌 <i>Aeschynomene americana</i> var. <i>americana</i>	133	121	324	411

表4 生物多样性对混播群落粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量的影响

Tab.4 Effect of forage diversity on CP, NDF and ADF concentration

生物多样性 Forage diversity	粗蛋白 /(g/kg) CP	中性洗涤 纤维/(g/kg) NDF	酸性洗涤纤 维/(g/kg) ADF
1	88	452	335
2	81	481	351
3	57	570	376
4	66	504	369
6	56	550	376
平均标准偏差 SEM	2.9	9.4	4.0
P	0.001***	<0.001***	0.002**

表5 生物多样性对土壤总氮、有效氮、铵态氮、硝态氮和无机氮的影响

Tab.5 Effect of forage diversity on total N available N, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and inorganic N in soil

生物多样性 Forage diversity	总氮/(g/kg) Total N	有效氮/(g/kg) Available N	铵态氮/(mg/kg) $\text{NH}_4^+ - \text{N}$	硝态氮/(mg/kg) $\text{NO}_3^- - \text{N}$	无机氮/(mg/kg) Inorganic N
1	3.89	1.16	15.3	8.1	23.4
2	4.00	1.33	16.4	11.2	27.6
3	5.02	1.50	15.1	10.7	25.7
4	5.28	1.50	13.7	10.3	24.0
6	4.53	1.58	14.9	10.0	25.0
标准差 SEM	0.12	0.03	0.29	0.47	0.61
P	<0.001***	<0.001***	0.03*	0.12	0.07

3 讨论

3.1 生物多样性对牧草生产力的影响

许多研究表明,在自然草地生态系统和人工草地生态系统方面,群落生产力随着生物多样性的增加而增加^[1-4,7]。在本研究中,牧草生物多样性对混播群落平均生产力有影响,其总体呈增加趋势。但是,在2种牧草组合中,混播群落的净效应显著低于0,生产力呈下降趋势。Lambers等^[20]报道在无豆科类植物的情况下,禾本科植物之间存在较强的竞争作用和生化相克作用,导致群落生产力下降。在本试验中,2种牧草组合混播群落中,有4/5是豆科+豆科或和禾本科+禾本科组合。这些具有相似特征的物种间组合,种间竞争较强,生产力呈下降趋势。3、4和6种牧草组合混播群落基本是由豆科+禾本科组成,净效应显著大于0。在这些混播群落中,物种间功能特征差异增大,种间竞争强度减弱,所组成的混播群落生产力显著提高。关于生物多样性-生产力关系,有文献报告群落生产力并不随物种数的增加而无限上升,而呈二次曲线方式变化,例如,当物种数大于5时,二者间不再有显著相关关系^[11,21]。在本研究中,6种牧草组合的净效应与4种牧草组合基本相同,提示4种牧草组合的多样性效应对群落生产力的促进作用可能到了饱和。

关于解释生物多样性-生产力关系的机制主要是多样性效应,其中包括生态性互补和选择效应。

表5详细描述了生物多样性对土壤中不同形态氮含量的影响。生物多样性显著影响土壤中总氮($P < 0.001$)和有效氮($P < 0.001$)和铵态氮($P < 0.05$)含量。总氮和有效氮显著增加,其中4种牧草组合混播群落中的总氮含量最高,6种牧草组合混播群落中有效氮含量最高,2种牧草组合混播群落中的铵态氮含量最高。有机氮(植物可吸收氮) = 总氮 - 土壤有效氮,计算得出,有机氮(植物可吸收氮)显著增加。另外,生物多样性使硝态氮和无机氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ + $\text{NO}_3^- - \text{N}$)的含量有增加趋势($P > 0.05$)。

在牧草生物多样性较丰富的群落中,牧草能更加有效地开发利用有限的资源,提高牧草生产力,进而使生态位互补效应显著增加^[22]。另外,在牧草生物多样性较丰富的群落中,选择效应使一些具有特殊功能特征的物种偶然地成为优势物种,并促进其他物种的生长。在本试验中,随着生物多样性增加,选择效应对混播群落生物多样性-生产力关系的贡献显著升高(牧草多样性大于2),生态位互补效应对混播群落生物多样性-生产力关系的贡献呈增加趋势。选择效应高于生态位互补效应,说明选择效应是引起生物多样性-生产力的主要影响因子。混播群落中出现了高产量的牧草品种,例如,宽叶雀稗的生产力显著高于其他牧草品种。另外,在混播群落中,生态位互补效应也起到了一定的作用。在中国西南部喀斯特地区,草场土壤是深色或棕色的石灰土,贮水能力很低,严重影响了植被的生产力^[23]。但是,一些具有发达根系的牧草品种(例如,宽叶雀稗)具有很好的抗旱性,能保持土壤水分,减少土壤水分的渗漏和蒸发,促进了其他牧草利用水分、扎根和生长^[24]。

3.2 生物多样性对牧草营养价值的影响

表3说明,各种牧草粗蛋白(CP)、中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)的营养价值有很大差异。豆科类牧草的粗蛋白含量显著高于禾本科类牧草,但是低于相关文献所提的。Fulkerson报道,5-8月份白三叶等豆科植物类牧草的粗蛋白与

碳水化合物之比为 2.1:1 到 3:1,表明粗蛋白含量较高,而中性洗涤纤维 NDF 为 37%,酸性洗涤纤维 ADF 为 17%^[25-27]。这些结果之间的差异可能是由生物多样性效应、牧草氮含量或收割时间的不同所引起的。禾本科植物类牧草 NDF 和 ADF 含量一般高于豆科植物类,如宽叶雀稗和非洲狗尾草的酸性洗涤纤维显著高于其他物种,是由于其半纤维素含量较高(由 NDF - ADF 算出)。

当生物多样性增多时,混合群落的粗蛋白含量减少。粗蛋白产量与土壤氮利用率和牧草生产力有显著相关性。本试验表明,生物多样性增加土壤氮利用率,减少混合群落的粗蛋白含量。White 等报道,生物多样性与植被营养价值之间有负相关性^[28],与本试验结果相一致。在生物多样性较丰富同时缺乏资源的环境中,低质量的物种可能成为优势种^[29]。对混合群落纤维含量作进一步测定,发现中性洗涤纤维 NDF 和酸性洗涤纤维 ADF 含量随着牧草生物多样性而增加,结果与 White 等试验结果一致。家畜产量与其摄入的牧草的营养价值有关,包括粗蛋白、中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维。为保证家畜的生产性能,在不考虑家畜的摄食行为的情况下,本研究推测,家畜对生物多样性丰富的混播群落的摄食量可能增多。因此,多样性效应(如互补和选择效应)可能调控着生物多样性 - 牧草营养价值关系,进而影响家畜的生产性能。

3.3 生物多样性对氮循环的影响

弄清氮循环机制在于揭示揭示植物氮与土壤氮之间的循环过程。在多样性较丰富的混播群落中,总氮和有效氮含量显著升高,无机氮含量没有发生改变,铵态氮含量显著下降。试验结果推测,生物多样性增加了土壤氮含量。此外,生物多样性增加了单位面积氮总量。这些结果说明,生物多样性增强了植物氮与土壤氮循环。但是,有研究报道了相反的结论。在生物多样性较丰富的混播群落中,土壤养分利用更加充分,植物氮利用率显著增强,增加生物多样性显著减少了土壤氮含量^[13,30]。在本研究中,主要牧草品种是豆科,其占有牧草的 2/3。豆科植物的根系中含有丰富的根瘤菌,具有固氮能力,可提高土壤中氮含量^[31,32]。禾本科牧草不具有固氮能力,其生长需要利用土壤氮,减少土壤中氮含量。豆科植物对其他植物生长有促进作用。在本试验中,高比例的豆科植物增加了土壤含氮量和混播群落的产氮量,成为生物多样性 - 氮循环关系的主要影响因子。然而,单播和混播群落土壤总氮低于其本底值,说明单播和混播群落消耗了土壤氮,这可

能是因选择效应所引起。选择效应促进了发达根系及产量较高的牧草宽叶雀稗的生长,宽叶雀稗利用其发达的根系从土壤中吸收和利用土壤氮素。

4 结论

生物多样性提高了牧草生产力。多样性中的选择效应是引起多样性和生产力之间的正相关关系的主要因素之一。生物多样性减少了牧草粗蛋白含量,显著增加了混播牧草中性洗涤纤维(NDF)和酸性洗涤纤维(ADF)含量。本试验中播种了高比例的豆科植物与非豆科植物,是牧草物种多样性提高土壤含氮量的主要因素。试验获得了高产量的宽叶雀稗,说明选择效应对混播牧草生产力及其营养成分和氮循环有显著影响。

参考文献:

- [1] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems [J]. *Nature*, 1996, 379: 718 - 720.
- [2] Loreau M, Hector A. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments [J]. *Nature*, 2001, 412: 72 - 76.
- [3] Tilman D, Reich P B, Knops J M *et al.* Diversity and productivity in a long-term grassland experiment [J]. *Science*, 2001, 294: 843 - 846.
- [4] Tracy B F, Sanderson M A. Productivity and stability relationships in mowed pasture communities of varying species composition [J]. *Crop Sci*, 2004, 44: 2180 - 2186.
- [5] Sanderson M A, Soder K J, Muller L D *et al.* Forage mixture productivity and botanical composition in pastures grazed by dairy cattle [J]. *Agron J*, 2005: 1465 - 1471.
- [6] Provenza F D. Acquired aversions as the basis for varied diets of ruminants foraging on rangelands [J]. *J Anim Sci*, 1996, 74: 2010 - 2020.
- [7] Tracy B F, Faulkner D B. Pasture and cattle responses in rotationally stocked grazing systems sown with differing levels of species richness [J]. *Crop Sci*, 2006, 46: 2062 - 2068.
- [8] Soder K J, Sanderson M A, Stack J L *et al.* Effects of forage diversity on intake and productivity of grazing lactating dairy cows over two grazing seasons [J]. *J Dairy Sci*, 2004, 87(Suppl. 1): 30.
- [9] Soder K J, Sanderson M A, Stack J L *et al.* Intake and performance of lactating cows grazing diverse forage mixtures [J]. *Dairy Sci*, 2006, 89: 2158 - 2167.
- [10] Jones D L, Shannon D, Murphy D V *et al.* Role of dissolved organic nitrogen (DON) in soil N cycling in grassland soils [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, 36: 749 -

- 756.
- [11] Hooper D U. The role of complementarity and competition in ecosystem responses to variation in plant diversity [J]. *Ecology* ,1998 ,79: 704 – 719.
- [12] Craine J M ,Tilman D ,Wedin D *et al.* Functional traits , productivity and effects on nitrogen cycling of 33 grass-land species [J]. *Funct Ecol* 2002 ,16: 563 – 574.
- [13] Scherer-Lorenzen M ,Palmberg C ,Prinz A *et al.* The role of plant diversity and composition for nitrate leaching in grasslands [J]. *Ecology* 2003 ,84: 1539 – 1552.
- [14] Oelmann Y ,Kreutziger Y ,Temperton V M *et al.* Nitrogen and phosphorus budgets in experimental grasslands of variable diversity [J]. *J Environ Qual* 2007a ,25: 396 – 407.
- [15] Symstad A J ,Tilman D ,Willson J *et al.* Species loss and ecosystem functioning: Effects of species identity and community composition [J]. *Oikos* ,1998 ,81: 389 – 397.
- [16] Liu Z ,Groves C ,Yuan D *et al.* South china Karst aquifer storm-scale hydrochemistry [J]. *Ground Water* ,2004 ,42: 491 – 499.
- [17] Wang K L. Environmental migration and sustainable development—A Case Study of Southwest China [J]. *Chinese Geographical Science* ,1998 ,8: 271 – 280 .
- [18] Schmid B ,Hector A ,Huston MA *et al.* The design and analysis of biodiversity experiments [M]// Loreau M , Naeem S ,Inchausti P. *Biodiversity and Ecosystem Functioning: Synthesis and Perspectives*. Oxford: Oxford Univ. Press 2004: 61 – 75.
- [19] Van Soest P J ,Robertson J B ,Lewis B A. Symposium: carbohydrate methodology ,metabolism and nutritional implications in dairy cattle. Methods for dietary fiber , neutral detergent fiber ,and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition [J]. *J Dairy Sci* ,1991 ,74: 3583 – 3597.
- [20] Lambers J H R ,Harpole W S ,Tilman D *et al.* . Mechanisms responsible for the positive diversity-productivity relationship in Minnesota grasslands [J]. *Ecol Lett* , 2004 ,7: 661 – 668.
- [21] 江小雷 张卫国 王 刚 等. 植物群落物种多样性对生态系统生产力的影响 [J]. *草业学报* 2004 ,13(6) : 8 – 13.
- [22] Van Ruijven J ,Berendse F. Positive effects of plant species diversity on productivity in the absence of legumes [J]. *Ecol Lett* 2003 ,6: 170 – 175.
- [23] LeGrand H E. Hydrological and ecological problems of Karst regions [J]. *Science* ,1973 ,179: 859 – 864.
- [24] Caldeira M C ,Ryel R J ,Lawton J H *et al.* Mechanisms of positive biodiversity-production relationships: insights provided by d13C analysis in experimental Mediterranean grassland plots [J]. *Ecol Lett* 2001 ,4: 439 443.
- [25] Fulkerson W J ,Neal J S ,Clark C F *et al.* Nutritive value of forage species grown in the warm temperate climate of Australia for dairy cows: Grasses and legumes [J]. *Livestock Sci* 2007 ,107: 253 – 264.
- [26] Fulkerson W J ,Neal J S ,Clark C F *et al.* Nutritive value of forage species grown in the warm temperate climate of Australia for dairy cows: Grasses and legumes [J]. *Livestock Sci* 2007 ,107: 253 – 264.
- [27] Fulkerson W J ,Slack K ,Hennessy D W *et al.* Nutrients in ryegrass (*Lolium* spp) ,white clover (*Trifolium repens*) and kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) pastures in relation to season and stage of re-growth in subtropical environment [J]. *Aust J Exp Agric* ,1998 ,38: 227 – 240.
- [28] White T A ,Barker D J ,Moorea K J. Vegetation diversity ,growth ,quality and decomposition in managed grasslands [J]. *Agric Ecosyst Environ* 2004 ,101: 73 – 84.
- [29] Hobbie S E. Effects of plant species on nutrient cycling [J]. *Trends Ecol Evol* 2004 ,7: 336 – 339.
- [30] Oelmann Y ,Wilcke W ,Temperton V M *et al.* . Soil and plant nitrogen pools as related to plant diversity in an experimental grassland [J]. *Soil Biol Biochem* 2007b ,71: 720 – 729.
- [31] Grahama P H ,Vance C P. Nitrogen fixation in perspective: an overview of research and extension needs [J]. *Field Crop Res* 2000 ,65: 93 – 106.
- [32] Spehn E M ,Scherer-Lorenzen M ,Schmid B *et al.* The role of legumes as a component of biodiversity in a cross-European study of grassland biomass nitrogen [J]. *Oikos* 2002 ,98: 205 – 218.