



# 一年生和多年生豆禾混播草地超产与多样性效应的比较

黎松松<sup>1</sup> 王宁欣<sup>1</sup> 郑伟<sup>1,2\*</sup> 朱亚琼<sup>1</sup> 王祥<sup>1</sup> 马军<sup>1</sup> 朱进忠<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; <sup>2</sup>新疆维吾尔自治区草地资源与生态重点实验室, 乌鲁木齐 830052

**摘要** 为了测度一年生和多年生豆禾混播草地的超产效应与植物多样性效应的关系, 明确一年生和多年生混播草地的高产优势, 探索豆禾混播草地多样性效应和超产效应对其生态功能的响应机制, 于2013–2015年在新疆伊犁地区昭苏盆地开展了3年的牧草产量观测试验。该试验设置3种牧草混播种类和混播比例, 分别为一年生豆禾混播草地(2种牧草混播, AM2)和多年生豆禾混播草地(2种牧草混播, PM2; 4种牧草混播, PM4; 6种牧草混播, PM6), 豆禾混播比例分别为6:4、5:5和4:6。结果表明: 1) 2013、2014年和3年平均值AM2的超产幅度小于PM2和PM6, 2015年AM2的超产幅度大于PM2、PM4和PM6; 混播群落生产力与群落组分中生产力最高物种单产以及各组分平均单产的差值表现出相似的规律。2) 2013、2014年和3年平均值AM2的互补效应大于PM2、PM4和PM6, AM2的选择效应则远小于互补效应, PM2、PM4和PM6的互补效应则比较稳定。3) 物种丰富度和物种均匀度与牧草产量(群落生产力)大部分情况下呈单峰的“饱和上升型”模式, 分别在4种牧草混播和豆禾混播比例为5:5时, 具有较高生产力。4) 多年生豆禾混播草地的互补效应、选择效应和多样性净效应均随生长年限的延长而呈下降趋势, 也导致了超产幅度、超产效应及其稳定性的下降。由此可见, 在建植初期, 互补效应和选择效应共同主导了多年生豆禾混播草地的超产效应, 而随着生长年限的延长, 选择效应则成为主要影响因素; 一年生豆禾混播草地的超产效应则一直受互补效应的影响。

**关键词** 物种丰富度; 物种均匀度; 超产效应; 互补效应; 选择效应; 多样性净效应; 生长年限

黎松松, 王宁欣, 郑伟, 朱亚琼, 王祥, 马军, 朱进忠 (2021). 一年生和多年生豆禾混播草地超产与多样性效应的比较. 植物生态学报, 45, 23-37. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0048

## Comparison of transgressive overyielding effect and plant diversity effects of annual and perennial legume-grass mixtures

LI Song-Song<sup>1</sup>, WANG Ning-Xin<sup>1</sup>, ZHENG Wei<sup>1,2\*</sup>, ZHU Ya-Qiong<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>, MA Jun<sup>1</sup>, and ZHU Jin-Zhong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Pratacultural and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Ürümqi 830052, China; and <sup>2</sup>Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Ürümqi 830052, China

### Abstract

**Aims** Our objective was to explore mechanisms underlying the effects of transgressive overyielding and plant diversity effects associated with legume-grass mixtures in Zhaosu Basin, Yili Prefecture, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China.

**Methods** Replicate plots ( $n = 3$ ) were sown in 2013 as legume and grass monocultures (8 in total, including *Vicia sativa*, *Avena sativa*, *Onobrychis viciaefolia*, *Bromus inermis*, *Trifolium pratense*, *Phleum pratense*, *Medicago sativa*, *Dactylis glomerata*), a two-species mixture (AM2, annual legume and grass; PM2, perennial legume and grass), a four-species mixture (PM4, 2 perennial legumes and 2 grasses), a six-species mixture (PM6, 3 perennial legumes and 3 grasses), and three mixed-ratio combinations (legume : grass = 6:4, 5:5 and 4:6). Total plot productivity was measured as forage yield (dry matter) each summer between 2013 to 2015, which were used to calculate transgressive overyielding effect (OV), transgressive overyielding effect 1 ( $OV_1$ ), and transgressive overyielding effect 2 ( $OV_2$ ). Plant diversity effects were determined by calculating the complementary effect (CE), selection effect (SEF), and net biodiversity effects ( $\Delta Y$ ).

收稿日期Received: 2020-02-24 接受日期Accepted: 2020-09-27

基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研计划重点项目(XJEDU2019Z18)、农业农村部“国家牧草现代产业技术体系”项目(CARS-34)、国家自然科学基金(31660692)和国家重点研发计划(2017YFE0109200)。Supported by the Key Project of University Research in Xinjiang Uygur Autonomous Region (XJEDU2019Z18), the “National Modern Forage and Grass Research System” Program of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs (CARS-34), the National Natural Science Foundation of China (31660692), and the National Key R&D Program of China (2017YFE0109200).

\* 通信作者Corresponding author (zw065@126.com)

**Important findings** The *OV* amplitudes of AM2 in 2013, 2014 and 3 years average were less than those of PM2 and PM6. The *OV* amplitude of AM2 in 2015 was greater than those of PM2, PM4 and PM6. The difference between the productivity of the mixed community and the yield of the most productive product species in the community components and the average yield of each species showed similar laws. *CE* of AM2 in 2013, 2014, and 3 years average was greater than PM2, PM4 and PM6 in the respective years. While *SEF* were much smaller than *CE* in AM2, changes in *CE* were relatively stable in PM2, PM4 and PM6. Fitted curves of species richness, species evenness, and forage yield (community productivity) predominantly showed a single maximum in PM4, yet productivity was highest in the 5:5 ratio plot. *CE*, *SEF*, and  $\Delta Y$  in perennial legume-grass mixtures decreased over time, which also led to declines in *OV* amplitude, *OV*<sub>1</sub> and *OV*<sub>2</sub>, and their stability. Thus, in the initial study year, *CE* and *SEF* jointly dominated *OV*, *OV*<sub>1</sub> and *OV*<sub>2</sub> in perennial legume-grass mixtures. Over the next two growing years, *SEF* became the main factor that influenced *OV*, *OV*<sub>1</sub> and *OV*<sub>2</sub> in perennial legume-grass mixtures. *OV*, *OV*<sub>1</sub> and *OV*<sub>2</sub> of annual legume-grass mixtures were all influenced by *CE* from 2013 to 2015.

**Key words** species richness; species evenness; transgressive overyielding effect; complementarity effect; selection effect; net effect of biodiversity; growth years

Li SS, Wang NX, Zheng W, Zhu YQ, Wang X, Ma J, Zhu JZ (2021). Comparison of transgressive overyielding effect and plant diversity effects of annual and perennial legume-grass mixtures. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 23-37. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0048

在豆科与禾本科植物间混作系统中, 间混作的豆禾植物在形态(焦念元等, 2006; 王平等, 2009)、生长发育节律(Cox *et al.*, 2017)、土壤养分资源利用(Li *et al.*, 2007, 2014; 王平等, 2010)、根系分布层位(宋日等, 2002; 朱亚琼等, 2018)上都存在着相互补充而非彼此竞争的可能(谢开云等, 2013), 因而, 豆禾间作系统通过改善其土壤养分(特别是氮)供给(肖焱波等, 2005; Li *et al.*, 2011; 赵财等, 2016), 提高了系统的产量或质量(王平等, 2007; 郑伟等, 2012; 陈远学等, 2013)。与此同时, 增加半人工草地或栽培草地物种多样性可以改善资源利用效率(空间生态位的差异), 增加种间正相互作用(Hendriks *et al.*, 2013)和选择效应(选择了高产物种)的可能(Hooper *et al.*, 2005; Finn *et al.*, 2013), 从而使物种/种群丰富度更高的系统生产力更高(Cardinale *et al.*, 2007; Atwater & Callaway, 2015)。这种比单播/单作系统生产力更高的现象称作超产效应(Loreau, 1998; Nyfeler *et al.*, 2009; Hector *et al.*, 2010), 在土壤肥力一般的半人工草地(Cardinale *et al.*, 2007)、施肥的栽培草地(Nyfeler *et al.*, 2009; 江小雷等, 2010; Finn *et al.*, 2013)和豆科与禾本科作物间混作的农作系统(Li *et al.*, 2003, 2007, 2011)均有报道。依据物种生态位添加分离方法, 将混播/混作群落生产力的增加量(多样性净效应)分解为群落互补效应(*CE*)和选择效应(*SEF*), 其中选择效应是指具有特殊性质的物种在群落占优势会影响生态系统过程, 而互补效应是指不同的物种具有特定的生态位, 实现了资源的合理分配, 导致资源利用总量增加(Loreau & Hector,

2001)。超产效应的产生可能是选择了高产物种/种群的结果(Grime, 1998; Huston *et al.*, 2000; Atwater & Callaway, 2015), 物种/种群属性(选择效应)控制着生态系统功能(Hooper *et al.*, 2005; Küchenmeister *et al.*, 2012; 王海东等, 2013); 也可能是间混作物种间生态位互补作用的结果(Tilman & Downing, 1994; Hector *et al.*, 1999; Nyfeler *et al.*, 2009), 互补效应决定着生态系统生产力(李昂等, 2012; Finn *et al.*, 2013; 王宇坤等, 2019); 或是二者共同起作用的结果(Loreau & Hector, 2001; Pacala & Tilman, 2001; Mulder *et al.*, 2002)。因此, 在农业生态系统中依据植物多样性-生产力关系的选择效应、互补效应或二者的共同作用, 使其产量、资源利用效率得到提升, 已成为促进农业可持续发展的重要措施(Finn *et al.*, 2013)。

植物多样性-生产力关系的选择效应、互补效应或二者的共同作用是否会受到生态系统建植时间的影响? 一年生与多年生间混作系统植物多样性-生产力关系的本质是否是一致的? 这不仅影响了我们理解植物多样性-生态功能关系的内涵与实质, 还影响了农业耕作实践中人们的选择。Zhang和Zhang (2006)经过文献统计与分析, 发现物种丰富度-生产力正相关和正选择效应主要出现在一年的试验中, 无论其建植的是一年生植物(江小雷等, 2005, 2010), 还是多年生植物(Nyfeler *et al.*, 2009; 李昂等, 2012); 长期的试验结果往往发现多年生草地中物种丰富度-生产力无显著关系(王海东等, 2013; 陈宁等, 2018)。Tilman等(2001)发现, 随着多年生植物生

长时间延长, 草地群落发生超产现象的比例、强度以及正多样性效应均呈增加趋势。而Mulder等(2002)则发现, 豆科植物在试验初期起到了正选择效应的作用, 物种丰富度-生产力呈正相关关系; 随着试验时间的延长, 豆科植物的正选择效应逐渐减弱。在多年生草地中, 群落稳定性是一个时间函数(张景慧和黄永梅, 2016), 不仅受到物种丰富度和均匀度的影响(Isbell *et al.*, 2009), 超产现象的存在还对多年生草地的功能稳定性起到了一定作用(Hector *et al.*, 2010; de Mazancourt *et al.*, 2013)。Biodiversity-Ecosystem Functioning (BEF)项目通过多年的研究也发现, 森林中植物多样性与生态系统功能的关系也受到群落建成时间的影响(Schuldt *et al.*, 2015)。由此可见, 通过多年的长期试验, 同时对比一年生间混作和多年生间混作系统的选择效应、互补效应或二者的共同作用, 对于正确理解建植时间对植物多样性-生产力关系的影响, 具有十分重要的科学意义。

在生产实践中, 一年生间混作应用范围更广: 在生长季节较短的地区, 可用于改善生态系统氮营养平衡(赵彩霞等, 2006; 刘文辉等, 2017), 促进草地动物蛋白质的形成(Russelle, 1992), 满足家畜冷季对饲草的需求(马春晖等, 1999; Lithourgidis *et al.*, 2006); 在生长季节较长, 光热资源较好的地区, 可与农作物轮作倒茬、复播, 对建立稳产、高产、高效和可持续的农业种植体系具有重要作用(杨学超等, 2012)。多年生间混作建植的初期(第1年)生长速度较慢, 难以在初期获得较高的经济产量, 其高产年份往往在建植的中期(第2–4年)(郑伟等, 2015), 相对来说占地时间长(常生华等, 2004), 往往难与常规作物进行轮作倒茬、复播(陈远学等, 2013), 需要与常规作物“争地”, 限制了其应用范围。但如果多年生间混作系统具有较好的生态功能稳定性, 其经济产量/品质稳定性较好, 则适合长期利用, 与一年生间混作系统相比则具有成本优势, 节省了种子、春季播种和秋季翻耕等费用, 多年综合收益较高(胡自治等, 2001; 郑伟等, 2015)。因此, 通过多年的长期试验, 同时对比一年生和多年生间混作系统的超产效应, 对于在生产实践中选择适宜的间混作系统类型, 具有十分重要的实践意义。

本研究以新疆昭苏地区的一年生和多年生豆禾混播草地为研究对象, 在2013–2015年分别测度了一年生与多年生豆禾混播草地的牧草产量, 计算了

二者的超产效应, 从群落层面(超产)和物种层面(超产效应)解析产生超产效应的原因, 并进一步对对比分析选择效应、互补效应对超产效应的贡献。根据群落构建理论、植物多样性对生态功能作用的时间机制, 试图检验以下假设: (1)豆禾混作系统的超产和超产效应是互补效应和选择效应联合主导的; (2)多年生豆禾混作系统的互补效应随建植时间的延长而下降, 影响植物多样性-生态功能的正效应; (3) 3年中每年的超产效应均是一年生豆禾混作大于多年生豆禾混作系统。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地点位于新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州昭苏县的昭苏马场(81.05°–81.08° E, 42.63°–43.25° N), 属温带大陆性半干旱气候。年平均气温2.7 °C,  $\geq 10$  °C积温1 416.8 °C, 无霜期85–100天, 年降水量512 mm, 降水集中于5–8月, 约占全年总降水量的68%, 年蒸发量1 261.6 mm, 是降水量的2.5倍, 积雪期158天, 积雪厚度20–60 cm。试验小区为2013年开垦的多年生人工草地, 该地段2013年以前的植被类型为天然草地(山地草甸)。群落主要优势种有: 鸭茅(*Dactylis glomerata*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)、新疆披碱草(*Elymus sinkiangensis*)、猫尾草(*Phleum pratense*)、草原糙苏(*Phlomis pratensis*)、草原老鹳草(*Geranium pratense*)、大叶橐吾(*Ligularia macrophylla*)等。盖度65%–100%, 草层高25–85 cm, 鲜草产量103 905 kg·hm<sup>-2</sup>。土壤为黑钙土, 土壤有机质含量为13.63%–14.89%, 全氮、全磷、全钾含量分别为9.53、2.16、12.20 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮、有效磷、有效钾含量分别为459.20、144.43、473.58 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验材料与设计

本研究的供试材料为燕麦(*Avena sativa*)、救荒野豌豆(*Vicia sativa*)、红车轴草(*Trifolium pratense*)、驴食草(又名红豆草)(*Onobrychis viciifolia*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、无芒雀麦、鸭茅和猫尾草。一年生豆禾混播草地试验为以豆禾混播比例为主的随机区组设计, 豆禾比为6:4、5:5和4:6, 燕麦和救荒野豌豆单播作为对照(CK), 共5个处理, 重复3次, 共15个小区。多年生豆禾混播草地试验为豆禾混播比例和混播种类+搭配为主的随机区组设计, a因素为

混播种类, 分别设2种牧草混播处理4个, 4种、6种牧草混播处理各1个; b因素为豆禾混播比例, 分别设6:4、5:5、4:6 (如出现豆科或禾本科多物种混播时, 该科各物种混播比例相同), 单播作为对照(CK), 共24个处理, 重复3次, 共63个小区。燕麦单播的播种量为180 kg·hm<sup>-2</sup>, 救荒野豌豆单播的播量为120 kg·hm<sup>-2</sup>; 紫花苜蓿、红车轴草、猫尾草单播的播种量为15 kg·hm<sup>-2</sup>, 鸭茅、无芒雀麦单播的播种量为30 kg·hm<sup>-2</sup>, 驴食草单播的播量为60 kg·hm<sup>-2</sup>; 混播比例按种子占单播重量的实际用价(种子纯净度与发芽率的乘积)来计算, 混播与单播密度相同。每小区3 m × 5 m, 条播, 行距15 cm, 播种深度2 cm, 播后覆土压实。前茬作物为春小麦, 整个生育期均不施肥, 不灌溉; 除杂草3次, 分别在返青后2周或出苗后2周、第1次除草20天后和刈割前1周。

表1 豆禾混播草地的混播比例及各组分播量

Table 1 Mixed sowing ratios and sowing quantity of legume-grass mixtures

处理编号 Treatment number	混播比例 Mixed ratio	豆科牧草 Legume		禾本科牧草 Grass	
		物种 Species	分播量 Sowing quantity (kg·hm <sup>-2</sup> )	物种 Species	分播量 Sowing quantity (kg·hm <sup>-2</sup> )
AM2-1	6:4	救荒野豌豆 <i>Vicia sativa</i>	72.00	燕麦 <i>Avena sativa</i>	60.00
AM2-2	5:5	救荒野豌豆 <i>V. sativa</i>	60.00	燕麦 <i>A. sativa</i>	75.00
AM2-3	4:6	救荒野豌豆 <i>V. sativa</i>	48.00	燕麦 <i>A. sativa</i>	90.00
PM2-A1	6:4	驴食草 <i>Onobrychis viciaefolia</i>	36.00	无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	12.00
PM2-A2	5:5	驴食草 <i>O. viciifolia</i>	30.00	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	15.00
PM2-A3	4:6	驴食草 <i>O. viciifolia</i>	24.00	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	18.00
PM2-B1	6:4	驴食草 <i>O. viciifolia</i>	36.00	猫尾草 <i>Phleum pratense</i>	6.00
PM2-B2	5:5	驴食草 <i>O. viciifolia</i>	30.00	猫尾草 <i>P. pratense</i>	7.50
PM2-B3	4:6	驴食草 <i>O. viciifolia</i>	24.00	猫尾草 <i>P. pratense</i>	9.00
PM2-C1	6:4	红车轴草 <i>Trifolium pratense</i>	9.00	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	12.00
PM2-C2	5:5	红车轴草 <i>T. pratense</i>	7.50	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	15.00
PM2-C3	4:6	红车轴草 <i>T. pratense</i>	6.00	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	18.00
PM2-D1	6:4	红车轴草 <i>T. pratense</i>	9.00	猫尾草 <i>P. pratense</i>	6.00
PM2-D2	5:5	红车轴草 <i>T. pratense</i>	7.50	猫尾草 <i>P. pratense</i>	7.50
PM2-D3	4:6	红车轴草 <i>T. pratense</i>	6.00	猫尾草 <i>P. pratense</i>	9.00
PM4-1	6:4	驴食草 <i>O. viciifolia</i>	18.00	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	6.00
		红车轴草 <i>T. pratense</i>	4.50	猫尾草 <i>P. pratense</i>	3.00
PM4-2	5:5	驴食草 <i>O. viciifolia</i>	4.50	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	7.50
		红车轴草 <i>T. pratense</i>	3.75	猫尾草 <i>P. pratense</i>	3.75
PM4-3	4:6	驴食草 <i>O. viciifolia</i>	12.00	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	9.00
		红车轴草 <i>T. pratense</i>	3.00	猫尾草 <i>P. pratense</i>	4.50
PM6-1	6:4	驴食草 <i>O. viciifolia</i>	12.00	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	4.00
		红车轴草 <i>T. pratense</i>	3.00	猫尾草 <i>P. pratense</i>	2.00
		紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	3.00	鸭茅 <i>Dactylis glomerata</i>	2.00
PM6-2	5:5	驴食草 <i>O. viciifolia</i>	10.00	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	5.00
		红车轴草 <i>T. pratense</i>	2.00	猫尾草 <i>P. pratense</i>	2.50
		紫花苜蓿 <i>M. sativa</i>	2.00	鸭茅 <i>D. glomerata</i>	2.50
PM6-3	4:6	驴食草 <i>O. viciifolia</i>	8.00	无芒雀麦 <i>B. inermis</i>	6.00
		红车轴草 <i>T. pratense</i>	2.50	猫尾草 <i>P. pratense</i>	3.00
		紫花苜蓿 <i>M. sativa</i>	2.50	鸭茅 <i>D. glomerata</i>	3.00

表中出现豆科或禾本科多物种混播时, 该科各物种混播比例相同。

When multiple species of Leguminosae or Gramineae are mixed in the table, the proportion of mixed sowing of species in this family is the same.

### 1.3 取样时间和样品处理

一年生豆禾混播草地牧草地上生物量测定时间为每年的7月30日左右, 多年生豆禾混播草地牧草地上生物量测定时间为每年的7月15日左右。在每小区的对角线取5个1 m × 1 m的样方, 齐地面刈割, 65 °C下恒温烘干至恒质量, 分种称量。以牧草地上生物量表征群落产量。

### 1.4 超产、超产效应和多样性效应的测度方法

超产(OV)为混播群落生产力与该群落组分种单播生产力或该群落组分其他混播组合的生产力的差值。

$$OV = B_{\text{ploy}} - B_{\text{mno}} \quad (1)$$

式中,  $B_{\text{ploy}}$ 为混播群落产量,  $B_{\text{mno}}$ 为混播群落组分种中的平均单产或该群落组分其他混播组合的产量,  $OV > 0$ , 表明存在超产。

超产效应1 ( $OV_1$ )为混播群落生产力超过该群落组分种中生产力最高产物种的单产。

$$OV_1 = (B_{\text{ploy}} - B_{\text{imno-max}})/B_{\text{imno-max}} \quad (2)$$

式中,  $B_{\text{imno-max}}$ 为混播群落组分种中最高产物种的单产;  $OV_1 > 0$ , 表明存在超产效应。

超产效应2 ( $OV_2$ )为混播群落生产力超过该群落内各组分种的平均单产。

$$OV_2 = (B_{\text{ploy}} - B_{\text{mno-mean}})/B_{\text{mno-mean}} \quad (3)$$

式中,  $B_{\text{mno-mean}}$ 为混播群落中各组分种的平均单产;  $OV_2 > 0$ , 表明存在超产效应。 $OV_2$ 解释了混播群落生产力与混播组分单播生产力之间的关系, 而 $OV_1$ 强调了混播物种成分的差异与超产效应之间的联系 (Siebenkäs *et al.*, 2016)。

按照Loreau和Hector (2001)的方法, 将混播群落中生产力的增加量(多样性的净效应)分离出选择效应和互补效应。

$$\Delta Y = Y_O - Y_E = N \text{ mean } (\Delta RY \times M) + N \text{ cov } (\Delta RY, M) \quad (3)$$

式中,  $\Delta Y$ 为多样性净效应,  $Y_O$ 为混播群落的实际产量,  $Y_E$ 为以单播产量为基础计算出的混播群落期望产量,  $M$ 为混播群落中各物种单产的平均产量,  $\Delta RY$ 为混播群落中各物种相对产量的变化量(各物种的实际相对产量与其期望相对产量之差),  $N$ 为混播群落的物种数,  $N \text{ mean } (\Delta RY \times M)$ 为互补效应值( $CE$ ),  $N \text{ cov } (\Delta RY, M)$ 为选择效应值( $SEF$ )。当 $\Delta Y = 0$ , 植物多样性对生产力无影响(零假设), 当 $\Delta Y > 0$ 时, 表示群落高产受物种生态位互补作用影响,  $\Delta Y < 0$ 时, 表示群落中多物种竞争导致群落减产。

## 1.5 数据处理

通过Microsoft Excel 2010软件对数据进行初步整理和常规计算, 再利用SPSS 19.0软件进行统计分析, 即用一般线性模型分析对数据进行双因素方差分析, 统计完成后用Origin 8.0制图。采用q检验(SNK)法和最小差异显著(LSD)法对产量、超产效应、多样性效应进行差异显著性检验。

## 2 结果和分析

### 2.1 一年生和多年生豆禾混播草地牧草产量、超产和超产效应的比较

由表2可知, 从不同年度来看, 2013、2014年AM2产量均显著高于多年生混播草地( $p < 0.05$ ), PM2-C和PM2-D产量显著低于除PM2-B外其他多年

生混播草地( $p < 0.05$ ); 与单播相比, 2013年PM2-A、PM2-B、PM4和PM6增产较高, 达0.28–0.42  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 2014年PM2-A、PM2-B、PM4增产较高, 达0.17–0.28  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 与PM2相比, 2013年PM4和PM6增产分别为0.42和0.32  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 2014年的则分别为0.29和0.23  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 与PM4相比, 2013年PM6增产为0.32  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 2014年的则为0.22  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。2015年AM2和PM2-D产量显著高于其他多年生混播草地( $p < 0.05$ ); 与单播相比, AM2增产较高, 达0.16  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 与PM2和PM4相比, 均未产生增产。从3年平均值来看, AM2产量显著高于多年生混播草地( $p < 0.05$ ), PM2-C和PM2-D产量显著低于其他多年生混播草地( $p < 0.05$ ); 与单播相比, PM2-A、PM2-B、PM6增产较高, 达0.14–0.19  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 与PM2相比, PM4和PM6增产分别为0.22和0.20  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 与PM4相比, PM6增产不明显。各年份及3年平均值PM2-D豆禾产量比显著高于其他混播草地( $p < 0.05$ ), 其他混播草地的豆禾产量比均小于40%。

从混播种类来看, 2013年AM2的 $OV_1$ 显著低于PM2-A、PM4和PM6 ( $p < 0.05$ ); 2014年PM4的 $OV_1$ 显著高于其他混播种类( $p < 0.05$ ), AM2和PM6的 $OV_1$ 均为负值; 2015年AM2的 $OV_1$ 显著高于PM4和PM6 ( $p < 0.05$ ); 从3年平均值来看, PM2-A、PM4的 $OV_1$ 显著高于其他混播种类( $p < 0.05$ )。从混播比例来看, 各混播比例间 $OV_1$ 在各年份及3年平均值间无显著差异( $p > 0.05$ ); 随着建植年份的增加, 各混播比例 $OV_1$ 呈下降趋势。从各混播组合来说, PM2和PM4各组合的 $OV_1$ 显著高于其他混播( $p < 0.05$ )。从混播种类来看, 2013年AM2的 $OV_2$ 显著低于PM2-A、PM4和PM6 ( $p < 0.05$ ); 2014年AM2和PM6的 $OV_2$ 显著低于PM2-A、PM4 ( $p < 0.05$ ), 且均为负值, PM4的 $OV_2$ 显著高于PM2-A ( $p < 0.05$ ); 2015年AM2的 $OV_2$ 显著高于PM4和PM6 ( $p < 0.05$ ); 从3年平均值来看, 各混播种类处理间无显著差异( $p > 0.05$ )。从混播比例来看, 各混播比例间 $OV_2$ 在各年份及3年平均值间无显著差异( $p > 0.05$ ); 2013年 $OV_2$ 高于其他年份。从各混播组合来说, 各混播组合的 $OV_2$ 无显著差异( $p > 0.05$ )。

### 2.2 一年生和多年生豆禾混播草地牧草产量多样性效应的比较

由图1可知, 从混播物种来看, 2013、2014年AM2的 $CE$ 均显著高于其他混播种类( $p < 0.05$ ); 2015

表2 不同混播种类下牧草产量、超产和豆科牧草产量比的比较(平均值±标准误)

Table 2 Comparison of forage yield, overyielding and legume yield proportion under different mixed patterns (mean ± SE)

年份 Year	处理编号 Treatment number	产量 Yield (kg·m <sup>-2</sup> )		超产 Overyielding (kg·m <sup>-2</sup> )			超产效应1 Transgressive overyielding effect 1 (OV <sub>1</sub> )	超产效应2 Transgressive overyielding effect 2 (OV <sub>2</sub> )	豆科产量比 Legume propor- tion (%)
		混播处理 Mixed treatment	单播对照 Monoculture control	与单播相比 Difference by monoculture control	与PM2相比 Difference by PM2	与PM4相比 Difference by PM4			
2013	AM2	1.26 ± 0.11 <sup>a</sup>	1.22 ± 0.37	0.04			0.07 ± 0.14 <sup>b</sup>	0.08 ± 0.05 <sup>b</sup>	12.33 ± 1.52 <sup>c</sup>
	PM2-A	0.70 ± 0.06 <sup>b</sup>	0.39 ± 0.12	0.28			0.77 ± 0.13 <sup>a</sup>	0.92 ± 0.24 <sup>a</sup>	21.67 ± 5.40 <sup>b</sup>
	PM2-B	0.68 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.40 ± 0.15	0.28			0.15 ± 0.09 <sup>b</sup>	0.62 ± 0.21 <sup>ab</sup>	27.03 ± 17.02 <sup>b</sup>
	PM2-C	0.28 ± 0.07 <sup>c</sup>	0.22 ± 0.06	0.06			-0.09 ± 0.04 <sup>c</sup>	-0.31 ± 0.17 <sup>c</sup>	34.00 ± 5.53 <sup>b</sup>
	PM2-D	0.28 ± 0.05 <sup>c</sup>	0.24 ± 0.13	0.04			-0.13 ± 0.11 <sup>c</sup>	0.08 ± 0.03 <sup>b</sup>	81.67 ± 3.47 <sup>a</sup>
	PM4	0.73 ± 0.07 <sup>b</sup>	0.31 ± 0.06	0.42	0.42		0.86 ± 0.15 <sup>a</sup>	1.54 ± 0.35 <sup>a</sup>	29.33 ± 3.79 <sup>b</sup>
	PM6	0.63 ± 0.10 <sup>b</sup>	0.28 ± 0.10	0.35	0.32	0.32	0.62 ± 0.15 <sup>a</sup>	1.30 ± 0.24 <sup>a</sup>	32.33 ± 18.13 <sup>b</sup>
2014	AM2	0.75 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.79 ± 0.33	-0.04			-0.15 ± 0.06 <sup>c</sup>	-0.06 ± 0.06 <sup>cd</sup>	32.33 ± 1.53 <sup>b</sup>
	PM2-A	0.33 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.14 ± 0.02	0.19			0.55 ± 0.17 <sup>b</sup>	0.19 ± 0.06 <sup>b</sup>	10.00 ± 9.64 <sup>d</sup>
	PM2-B	0.26 ± 0.04 <sup>cd</sup>	0.09 ± 0.03	0.17			0.23 ± 0.13 <sup>b</sup>	0.07 ± 0.03 <sup>cd</sup>	21.33 ± 11.59 <sup>c</sup>
	PM2-C	0.19 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.16 ± 0.11	0.03			-0.02 ± 0.01 <sup>c</sup>	-0.15 ± 0.10 <sup>d</sup>	15.67 ± 5.13 <sup>cd</sup>
	PM2-D	0.15 ± 0.03 <sup>d</sup>	0.10 ± 0.07	0.05			0.30 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.10 ± 0.02 <sup>b</sup>	52.33 ± 15.57 <sup>a</sup>
	PM4	0.41 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.13 ± 0.06	0.28	0.18		1.01 ± 0.17 <sup>a</sup>	0.36 ± 0.03 <sup>a</sup>	13.67 ± 6.43 <sup>cd</sup>
	PM6	0.35 ± 0.04 <sup>bc</sup>	0.32 ± 0.21	0.03	0.12	0.22	-0.76 ± 0.02 <sup>d</sup>	-0.07 ± 0.04 <sup>cd</sup>	12.00 ± 6.56 <sup>cd</sup>
2015	AM2	0.36 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.21 ± 0.10	0.16			0.17 ± 0.14 <sup>a</sup>	0.80 ± 0.17 <sup>a</sup>	29.33 ± 8.33 <sup>c</sup>
	PM2-A	0.25 ± 0.04 <sup>c</sup>	0.27 ± 0.07	-0.02			0.01 ± 0.09 <sup>ab</sup>	0.64 ± 0.18 <sup>ab</sup>	4.33 ± 1.15 <sup>d</sup>
	PM2-B	0.29 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.39 ± 0.16	-0.10			-0.04 ± 0.06 <sup>b</sup>	0.25 ± 0.11 <sup>b</sup>	10.67 ± 0.58 <sup>d</sup>
	PM2-C	0.33 ± 0.03 <sup>ab</sup>	0.37 ± 0.15	-0.04			-0.30 ± 0.12 <sup>d</sup>	-0.08 ± 0.04 <sup>c</sup>	8.33 ± 2.31 <sup>d</sup>
	PM2-D	0.36 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.31 ± 0.13	0.05			-0.06 ± 0.13 <sup>b</sup>	-0.18 ± 0.11 <sup>c</sup>	80.67 ± 4.04 <sup>a</sup>
	PM4	0.25 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.87 ± 0.29	-0.62	-0.08		-0.31 ± 0.06 <sup>d</sup>	-0.07 ± 0.06 <sup>c</sup>	42.26 ± 4.62 <sup>b</sup>
	PM6	0.31 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.27 ± 0.14	0.04	-0.02	-0.56	-0.21 ± 0.06 <sup>bc</sup>	0.29 ± 0.06 <sup>bc</sup>	21.67 ± 2.31 <sup>c</sup>
3年平均 Three years average	AM2	0.80 ± 0.25 <sup>a</sup>	0.74 ± 0.34	0.06			0.03 ± 0.07 <sup>b</sup>	0.27 ± 0.10 <sup>a</sup>	21.33 ± 2.08 <sup>b</sup>
	PM2-A	0.46 ± 0.10 <sup>b</sup>	0.27 ± 0.08	0.19			0.44 ± 0.10 <sup>a</sup>	0.58 ± 0.12 <sup>a</sup>	21.00 ± 10.44 <sup>b</sup>
	PM2-B	0.43 ± 0.07 <sup>b</sup>	0.29 ± 0.17	0.14			0.10 ± 0.23 <sup>ab</sup>	0.15 ± 0.20 <sup>ab</sup>	23.33 ± 10.41 <sup>b</sup>
	PM2-C	0.26 ± 0.03 <sup>c</sup>	0.25 ± 0.12	0.01			0.04 ± 0.10 <sup>b</sup>	-0.20 ± 0.10 <sup>b</sup>	19.33 ± 1.53 <sup>b</sup>
	PM2-D	0.23 ± 0.05 <sup>c</sup>	0.22 ± 0.09	0.01			-0.01 ± 0.08 <sup>b</sup>	-0.21 ± 0.24 <sup>b</sup>	74.67 ± 4.04 <sup>a</sup>
	PM4	0.48 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.44 ± 0.12	0.04	0.22		0.52 ± 0.14 <sup>a</sup>	0.61 ± 0.18 <sup>a</sup>	29.67 ± 2.89 <sup>b</sup>
	PM6	0.46 ± 0.04 <sup>b</sup>	0.29 ± 0.13	0.17	0.12	0.02	-0.09 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.51 ± 0.14 <sup>a</sup>	28.00 ± 11.53 <sup>b</sup>

相同年份同列不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。处理编号同表1。

Different lowercase letters within the same column of the same year indicate significant differences ( $p < 0.05$ ). Treatment number see Table 1.

年PM2-A的CE显著高于其他混播种类( $p < 0.05$ ); 从3年平均值来看, AM2的CE显著高于其他混播种类( $p < 0.05$ )。从混播比例来看, 各混播比例间CE在各年份及3年平均值间无显著差异( $p > 0.05$ ); 2013年CE高于其他年份。从各混播组合来看, AM2-3和AM2-2之间CE无显著差异( $p > 0.05$ ), 但显著高于其他混播组合( $p < 0.05$ )。从混播物种来看, 2013年AM2的SEF显著低于PM2-A、PM4和PM6 ( $p < 0.05$ ); 2014年AM2的SEF也显著低于PM2-A、PM4和PM6 ( $p < 0.05$ ), PM2-A的SEF显著低于PM4和PM6 ( $p <$

0.05); 2015年AM2的SEF则显著高于其他混播种类( $p < 0.05$ ), PM6的SEF显著高于PM2-A ( $p < 0.05$ ); 从3年平均值来看, AM2的SEF显著低于PM2-A、PM4和PM6 ( $p < 0.05$ )。

从混播比例来看, 各混播比例间SEF在各年份及3年平均值间无显著差异( $p > 0.05$ ); 2013年SEF低于其他年份。AM2各混播组合间SEF无显著差异( $p > 0.05$ ), AM2-3显著高于PM2-A、PM4和PM6的各混播组合 ( $p < 0.05$ )。2013年AM2的 $\Delta Y$ 均显著低于PM2-A、PM4和PM6 ( $p < 0.05$ ); 2014年AM2的 $\Delta Y$ 也



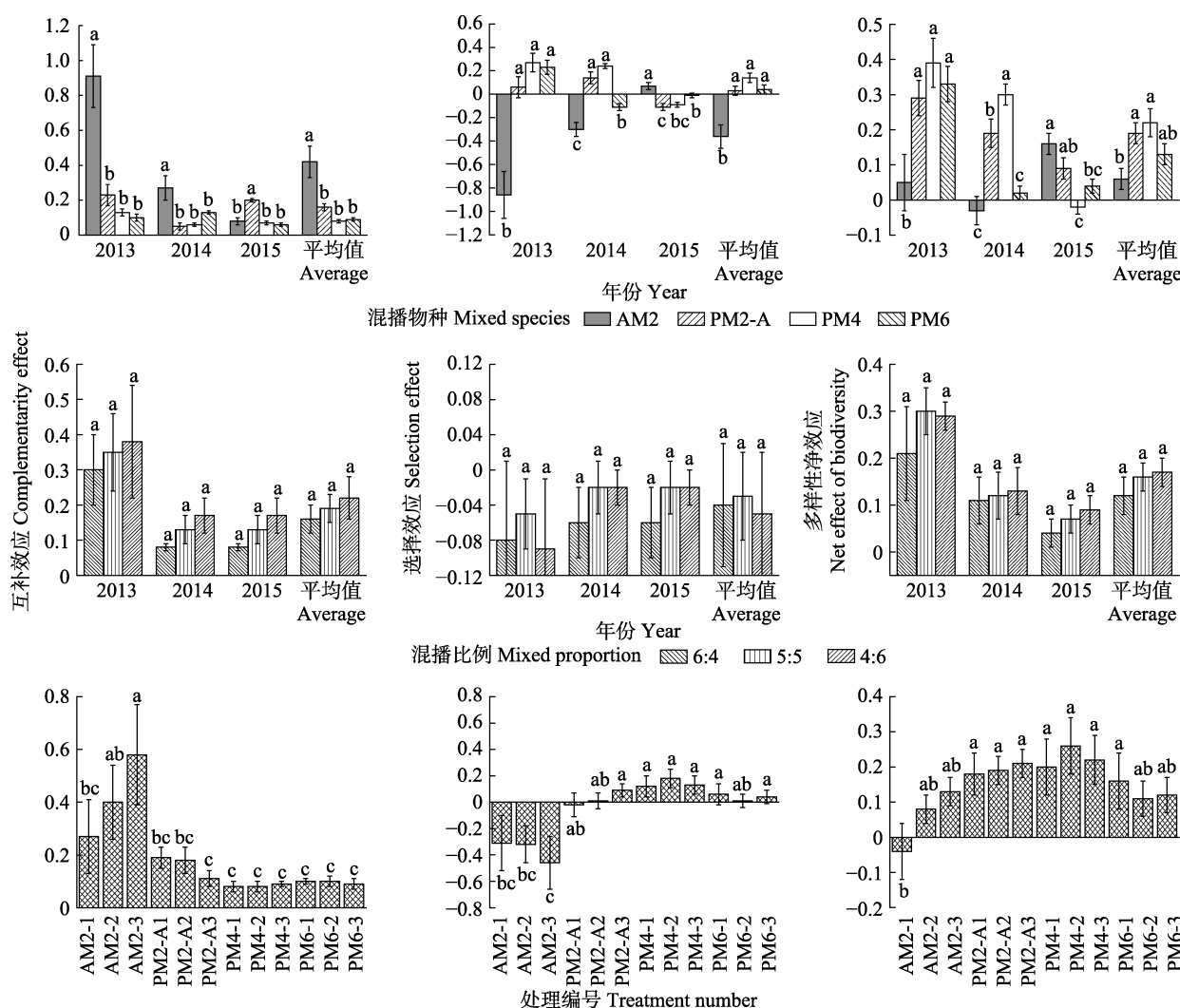


图1 不同混播物种、混播比例和处理间(3年平均 $\pm$ 标准误)互补效应、选择效应和多样性净效应的比较。不同小写字母表示各处理间差异显著( $p < 0.05$ )。混播物种和处理编号同表1。

**Fig. 1** Comparison of complementarities effect, selection effect and net effects of biodiversity under different mixed species, mixed proportion and treatments (three years average  $\pm$  SE). Different lowercase letters within the same year indicate significant difference ( $p < 0.05$ ). Mixed species and treatment number see Table 1.

显著低于PM2-A和PM4 ( $p < 0.05$ ), 2015年AM2的 $\Delta Y$ 则显著高于PM4 ( $p < 0.05$ ); 从3年平均值来看, AM2的 $\Delta Y$ 显著低于PM2-A和PM4 ( $p < 0.05$ )。从混播比例来看, 各混播比例间 $\Delta Y$ 在各年份及3年平均值间无显著差异( $p > 0.05$ ); 且呈逐年下降趋势。从各混播组合来看, AM2-1的 $\Delta Y$ 显著低于PM2-A、PM4的各组合及PM6 ( $p < 0.05$ )。牧草产量、 $OV_1$ 、 $OV_2$ 、 $CE$ 、 $SEF$ 和 $\Delta Y$ 的双因素方差分析(表3)表明, 不同混播种类间牧草产量、 $OV_1$ 、 $CE$ 、 $SEF$ 和 $\Delta Y$ 差异极显著( $p < 0.05$ ); 不同混播比例间上述指标差异不显著( $p > 0.05$ ), 混播种类与混播比例间的交互效应差异不显著( $p > 0.05$ )。

### 2.3 物种丰富度和均匀度对牧草产量的影响

由图2可知, 物种丰富度(混播种类)与牧草产量

之间在2013和2014年呈二次曲线函数关系, 其拟合模型分别为 $y = -0.0448x^2 + 0.3618x + 0.0347$  ( $R^2 = 0.3868$ ,  $p < 0.01$ ),  $y = -0.0309x^2 + 0.2544x - 0.0947$  ( $R^2 = 0.5604$ ,  $p < 0.01$ )。即牧草产量随着物种丰富度的增加先上升, 当物种数达到一定水平(4种)后开始呈现下降趋势。物种丰富度与牧草产量出现这种“上升-下降”变化的关系, 可能是因为随着混播物种的增加群体在空间结构上达到饱和或对于土壤养分的需求加剧所致。2015年牧草产量与物种丰富度的关系不明显, 可能是因为禾草处于竞争优势地位, 而豆科牧草处于竞争劣势地位(驴食草、紫花苜蓿和红车轴草对群体生物量的贡献率分别为5.68%、6.77%和8.03%), 无法对植物多样性-生态功能产生有效的正向影响。

表3 混播物种与混播比例的双因素差异分析  
Table 3 Two-way ANOVA analysis of mixed species and mixed proportion

参数 Parameter	变异来源 Source of variation	自由度 <i>df</i>	均方根 Mean square	<i>F</i>	<i>p</i>
产量 Yield	混播物种 Mixed species	6	0.852	12.756	0.000**
	混播比例 Mixed proportion	2	0.005	0.080	0.923
	年份 Year	2	18.983	96.640	0.000**
	混播物种×混播比例 Mixed species × Mixed proportion	9	0.017	0.262	0.994
	混播物种×年份 Mixed species × Year	9	2.746	13.978	0.000**
	混播比例×年份 Mixed proportion × Year	4	0.013	0.068	0.991
	混播物种×混播比例×年份 Mixed species × Mixed proportion × Year	12	0.046	0.235	0.996
	误差 Error	171	0.067		
	总计 Total	192			
互补效应 Complementary effect	混播物种 Mixed species	3	0.665	10.564	0.000**
	混播比例 Mixed proportion	2	0.030	0.473	0.625
	年份 Year	2	0.285	20.190	0.000**
	混播物种×混播比例 Mixed species × Mixed proportion	6	0.070	1.106	0.365
	混播物种×年份 Mixed species × Year	6	0.130	9.221	0.000**
	混播比例×年份 Mixed proportion × Year	4	0.018	1.258	0.295
	混播物种×混播比例×年份 Mixed species × Mixed proportion × Year	12	0.006	0.445	0.939
	误差 Error	96	0.063		
	总计 Total	108			
选择效应 Selection effect	混播物种 Mixed species	3	1.324	12.407	0.000**
	混播比例 Mixed proportion	2	0.004	0.035	0.966
	年份 Year	2	0.337	1.148	0.323
	混播物种×混播比例 Mixed species × Mixed proportion	6	0.033	0.313	0.929
	混播物种×年份 Mixed species × Year	6	5.210	17.742	0.000**
	混播比例×年份 Mixed proportion × Year	4	0.134	0.455	0.768
	混播物种×混播比例×年份 Mixed species × Mixed proportion × Year	12	0.137	0.468	0.927
	误差 Error	96	0.107		
	总计 Total	108			
多样性净效应 Net effect of biodiversity	混播物种 Mixed species	3	0.143	4.168	0.008**
	混播比例 Mixed proportion	2	0.022	0.630	0.535
	年份 Year	2	1.405	15.086	0.000**
	混播物种×混播比例 Mixed species × Mixed proportion	6	0.022	0.637	0.701
	混播物种×年份 Mixed species × Year	6	2.450	26.300	0.000**
	混播比例×年份 Mixed proportion × Year	4	0.007	0.077	0.989
	混播物种×混播比例×年份 Mixed species × Mixed proportion × Year	12	0.058	0.625	0.815
	误差 Error	96	0.034		
	总计 Total	108			

\*\*,  $p < 0.01$ .

牧草产量3年平均值得二次函数的关系,说明物种丰富度在一定程度上对混播草地的牧草产量具有正效应,当超过阈值后会产生负效应。由图2和表4可知,AM2的牧草产量与物种均匀度(混播比例)之间在2013、2015年和3年平均值得二次曲线函数关系,即牧草产量随着物种均匀度的增加先上升,

当物种均匀度达到一定水平(豆禾混播比例为5:5)后开始呈现下降趋势;2014年呈线性函数关系,即牧草产量随着物种均匀度的增加呈线性下降趋势。PM2-A的牧草产量与物种均匀度之间在2013、2014、2015年和3年平均值得二次曲线函数关系;PM4的牧草产量与物种均匀度之间在2013、2014年和3年平



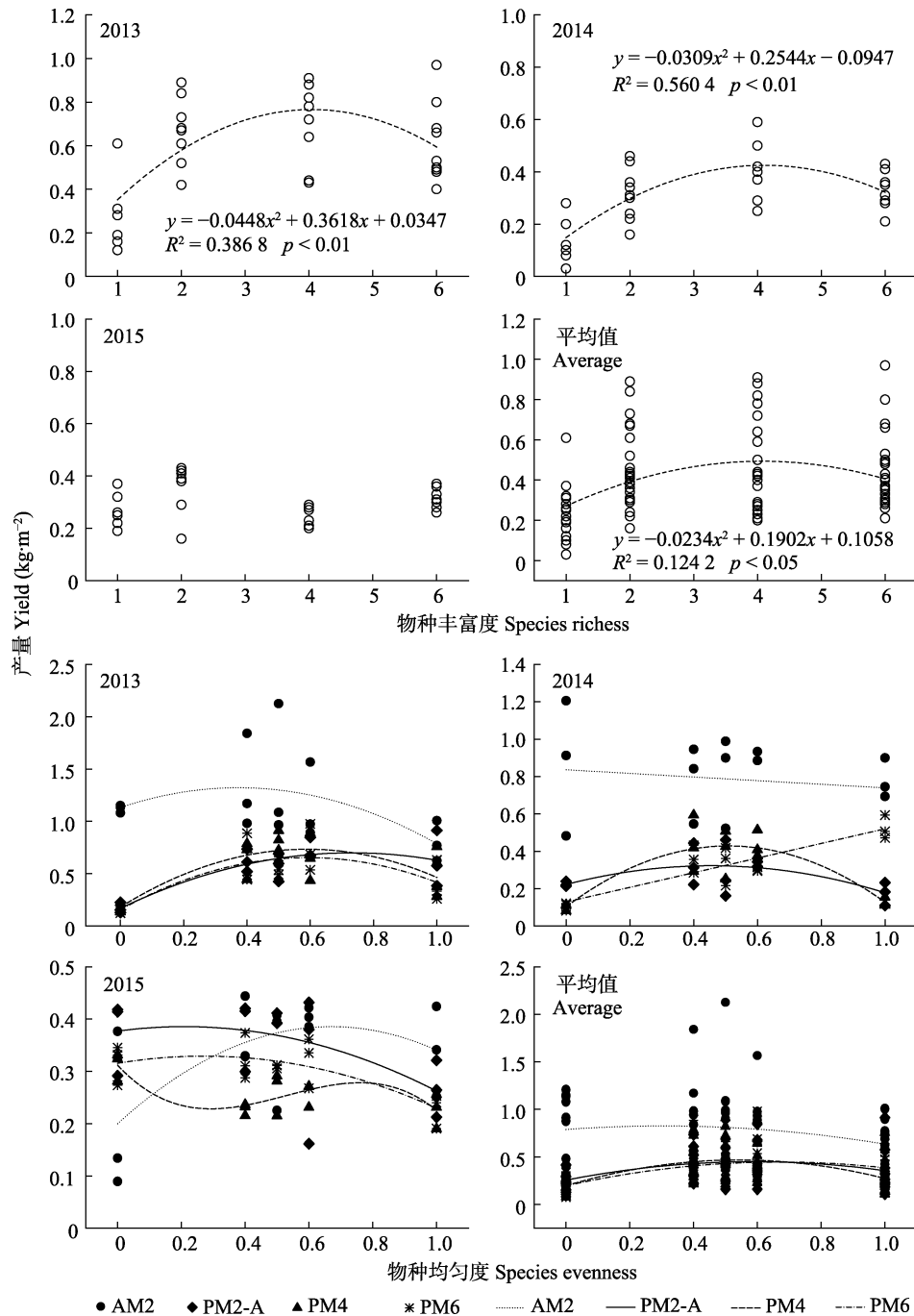


图2 物种丰富度和均匀度与牧草产量的关系。AM2、PM2-A、PM4、PM6同表1。

Fig. 2 Relationship between species richness, evenness and forage yield. AM2, PM2-A, PM4, PM6 see Table 1.

均值都呈二次曲线函数关系, 2015年呈三项式函数关系; PM6的牧草产量与物种均匀度在2013、2015年和3年平均值都呈二次曲线函数关系, 2014年呈线性增加趋势。

#### 2.4 多样性效应与增产效应、超产效应和建植时间的关系

由图3可知, 将 $OV_1$ 与 $CE$ 、 $SEF$ 和 $\Delta Y$ 进行拟合, 发现 $OV_1$ 与 $CE$ 呈负相关的发展趋势( $p > 0.05$ ), 而与

$SEF$ 和 $\Delta Y$ 均呈显著正相关关系( $p < 0.05$ )。由图4可知, PM2-A的 $CE$ 、 $SEF$ 和 $\Delta Y$ 均呈现2013年显著高于2014年, 2014年显著高于2015年; PM4和PM6的 $CE$ 表现为2013和2014年差异不显著但显著高于2015年; 而 $SEF$ 为2014年显著高于2015年, 2015年显著高于2013年;  $\Delta Y$ 呈现2014年显著高于2013和2015年; 从年际间的变化趋势来看PM2-A、PM4和PM6的 $CE$ 、 $SEF$ 和 $\Delta Y$ 均随建植时间的延长呈下降趋势。由图5

可知, 随建植时间的延长, PM2-A处理 $OV_1$ 和 $OV_2$ 的变异系数均呈增加趋势, PM4处理 $OV_1$ 的变异系数也呈增加趋势, 但 $OV_2$ 的变异系数呈下降趋势; PM6处理 $OV_1$ 和 $OV_2$ 的变异系数也均呈增加趋势。

表4 物种均匀度与牧草产量的函数拟合模型  
Table 4 Function fitting models between species evenness and forage yield

年份 Year	处理编号 Treatment number	拟合曲线 Fitting curve	$R^2$	$p$
2013	AM2	$y = -1.3682x^2 + 1.0218x + 1.1065$	0.282 5	>0.05
	PM2-A	$y = -1.0161x^2 + 1.4789x + 0.1569$	0.688 1	<0.01
	PM4	$y = -1.6284x^2 + 1.8951x + 0.1763$	0.667 3	<0.01
	PM6	$y = -1.3567x^2 + 1.624x + 0.1476$	0.601 7	<0.01
2014	AM2	$y = -0.0333x + 0.7827$	0.002 7	>0.05
	PM2-A	$y = -0.6501x^2 + 0.5594x + 0.2012$	0.416 8	<0.05
	PM4	$y = -1.2421x^2 + 1.2671x + 0.0981$	0.777 1	<0.01
	PM6	$y = 0.3897x + 0.1251$	0.769 9	<0.01
2015	AM2	$y = -0.6322x^2 + 0.8796x + 0.0887$	0.782 0	<0.01
	PM2-A	$y = -0.2212x^2 + 0.1058x + 0.3687$	0.307 4	<0.05
	PM4	$y = -1.125x^3 + 1.7721x^2 - 0.7338x + 0.3097$	0.603 1	<0.01
	PM6	$y = -0.1765x^2 + 0.0925x + 0.3122$	0.535 4	<0.01
3年平均 Three years average	AM2	$y = -0.7384x^2 + 0.7472x + 0.6114$	0.042 2	>0.05
	PM2-A	$y = -0.5024x^2 + 0.6473x + 0.2434$	0.164 4	<0.05
	PM4	$y = -0.9286x^2 + 1.0004x + 0.1930$	0.258 7	<0.05
	PM6	$y = -0.5301x^2 + 0.7211x + 0.1922$	0.237 5	<0.05

处理编号同表1。  
Treatment number see Table 1.

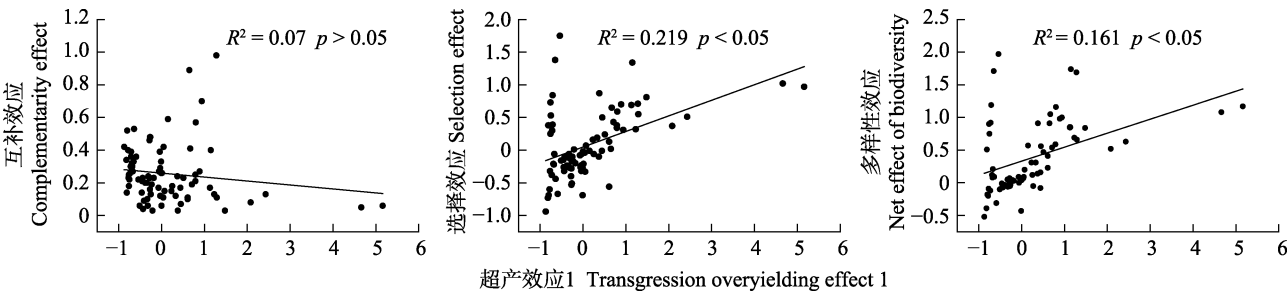


图3 超产效应1与互补效应、选择效应和多样性效应的关系。  
Fig. 3 Relationship between transgressive overyielding effect 1 and complementary effect, selection effect and net effect of biodiversity.

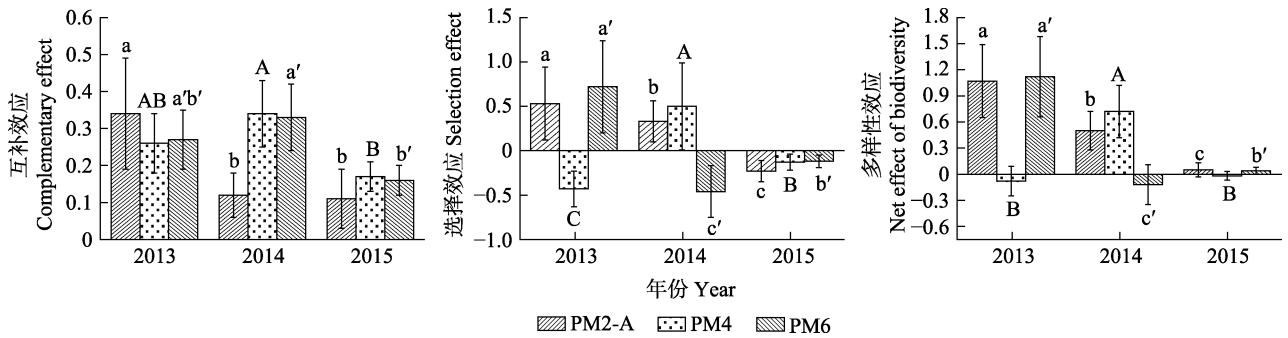


图4 互补效应、选择效应和多样性效应的年际间变化(平均值±标准误)。不同小写字母、大写字母和a'、b'和c'等符号分别表示PM2-A、PM4和PM6年际间的差异显著( $p < 0.05$ )。PM2-A、PM4、PM6同表1。  
Fig. 4 Change of the complementary effect, selection effect and net effect of biodiversity with establishment years (mean  $\pm$  SE). Different lowercase letters, uppercase letters, and a', b' and c' symbols respectively indicate significant differences of PM2-A, PM4 and PM6 treatments from 2013 to 2015 ( $p < 0.05$ ). PM2-A, PM4, PM6 see Table 1.

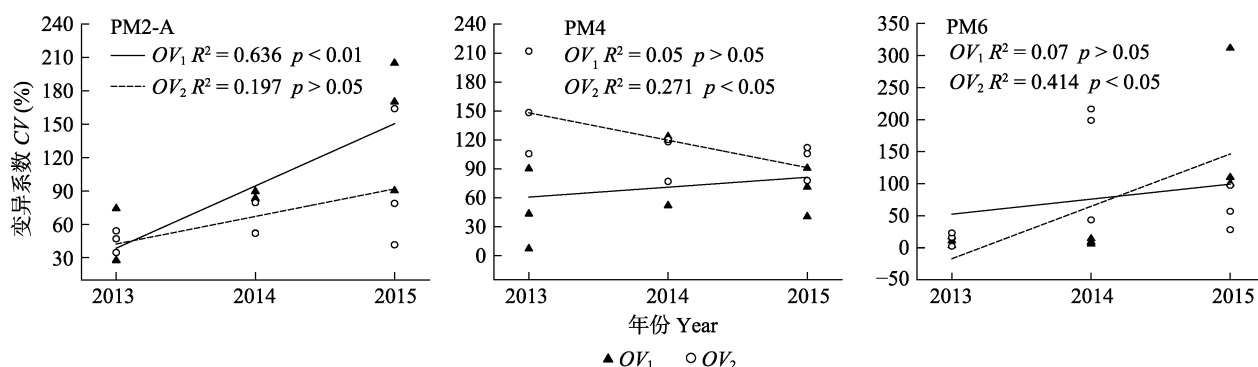


图5 PM2-A、PM4和PM6处理超产效应(OV)稳定性分析。PM2-A、PM4、PM6同表1。

Fig. 5 Stability analysis of transgressive overyielding effect (OV) for PM2-A, PM4 and PM6. CV, coefficient of variation. PM2-A, PM4, PM6 see Table 1.

### 3 讨论

#### 3.1 生长时间对超产效应和多样性效应的影响

超产效应可作为解释植物多样性与群落或生态系统生产力正相关的重要证据(Hector *et al.*, 1999; Tilman *et al.*, 2001; Beckage & Gross, 2006; Li *et al.*, 2014)。对于农业生产来说, 超产效应1 ( $OV_1$ , 混播/混作的产量高于组分中产量最高的单播/单作)的发现是具有重要实践意义的, 其可用于指导提高土地产出效率(赵彩霞等, 2006), 还可应用在提高土壤养分的利用效率(Li *et al.*, 2014)和土地空间的利用效率(焦念元等, 2006)等方面。现有的半人工或人工草地以及农作物间混作试验发现的超产效应, 并由此推断植物多样性与群落或生态系统生产力正相关的研究中, 很多是以建植当年或以一年生植物/作物的表现作为证据(Li *et al.*, 2007; 江小雷等, 2010; 王宇坤等, 2019)。如果以多年生植物建植的混播/混作群落, 则发现随着生长时间的延长, 超产效应和多样性效应均会发生变化。本试验中, 2013年所有混播组合均产生了超产效应, 2014年所有的多年生牧草混播组合也均产生了超产效应, 2015年则只有PM2-D和PM6产生了超产效应, 且超产效应呈下降趋势(表2); 2015年不同混播种类和混播比例的 $OV_1$ 均小于2013和2014年, 2014年不同混播种类和混播比例的 $OV_2$ 则小于2013和2015年(表1)。相关研究也证实, 生长多年后, 有些物种会几乎消失在混播群落中, 有些物种则产量占比(相对产量)大幅减少(Küchenmeister *et al.*, 2012), 那么建植早期的由强优势物种主导的选择效应和 $OV_1$ 就会减弱; 有些物种建植前期表现较好, 有些物种则在整个观测期内

表现稳定(Frankow-Lindberg *et al.*, 2009),  $OV_2$ 和选择效应则变化较小。因此, 混播物种属性(选择效应)及混播后物种间相互作用类型、强度(互补效应)的变化影响了超产效应。本试验中, 2013年不同混播种类和比例的互补效应大于2014和2015年, 选择效应也是大于2014和2015年(除AM2外), 多样性净效应则与互补效应表现出相似的规律(图1, 图4)。因而, 本试验的互补效应、选择效应和多样性净效应均表现出随生长时间的延长而下降的趋势, 进而导致了超产效应的下降和超产效应稳定性的下降(图5)。这与Tilman等(2001)和李昂等(2012)的研究结果不一致, 这可能与上述群落受到了土壤肥力的影响(施肥)有关。

与此同时, 生长时间还影响了超产效应与多样性效应的关系。本试验中, 超产效应与互补效应呈正相关关系, 与选择效应和多样性净效应则呈负相关关系(图3), 且选择效应值小于互补效应(图1), 说明互补效应是影响超产的主要贡献者。该结果得到了许多实验的证实(Loreau & Hector, 2001; 代巍等, 2009; 李昂等, 2012)。但 $OV_1$ 与互补效应呈负相关关系, 与选择效应和多样性净效应则呈正相关关系(图3), 且随着生长年限的延长, 超产效应与多样性效应的变化趋势相同(图1, 图4), 这表明在多年生豆禾混播系统建植前期, 选择效应对生态系统功能的响应优先于互补效应, 但互补效应的稳定性优于选择效应。故而在建植后期, 互补效应的作用则更为关键。朱四喜等(2014)则发现在物种多样性与生态功能的关系中选择效应比互补效应更普遍, 与本试验的结果基本吻合。本试验中的一年生豆禾混播草地的超产效应和多样性净效应年际间变化呈“V”

形变化, 互补效应和选择效应则向趋异方向变化(图1; 表1)。一年生豆禾混播草地的超产效应主要受互补效应的影响, 与多年生豆禾混播草地基本一致。

### 3.2 生长时间对物种丰富度和均匀度与生产力间关系的影响

提高表现效应(超产效应)是物种丰富度调控群落功能(生产力和稳定性)的内在机制之一, 而超产效应的发生机制与选择效应和互补效应有着密切的关系(Hector *et al.*, 2010; 张景慧和黄永梅, 2016)。物种丰富度对群落生产功能的研究尚未明确解析出普遍性结论, 但是在草地生态系统和农作物系统上, 物种丰富度对群落生产力存在正效应得到了多数学者的证实(Hector *et al.*, 1999; 江小雷等, 2005; Finn *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2014)。本研究也进一步证实多年生混播草地物种丰富度在一定程度上对群落生产性能具有促进作用, 其变化规律呈单峰格局(2013、2014年和3年平均), 较高物种丰富度具有较高生产力(图2), 这与江小雷等(2005, 2010)、朱四喜等(2014)的研究结果一致。这种物种丰富度与生产力关系的“饱和上升型”模式, 则说明人工草地生产力在较低物种丰富度时就达到饱和(Hooper *et al.*, 2005; 朱四喜等, 2014)。但年际间物种丰富度和群落生产力之间的关系是有波动的, 2015年则呈双峰格局(图2)。由于混播物种间的竞争作用和物种本身属性(如生长速度、生长寿命、对不良环境的耐受性能等)会随着生长年限的延长而产生变化, 导致物种属性及其相互作用成为控制生长后期物种丰富度-生产力关系的主导因素(Pacala & Tilman, 2001; Hector *et al.*, 2010; 朱四喜等, 2014)。

物种多样性包括物种丰富度或指定区域内的物种数量, 还包括物种均匀度或群落中物种间生物量分布(Wilsey & Potvin, 2000)。物种均匀度不仅是功能多样性的重要组分(陈超等, 2016), 还是影响种群间变异和群落变异的重要因素(Thibaut & Connolly, 2013)。对于豆禾混作系统来说, 物种的混播比例, 特别是豆科牧草的混播比例可以作为物种均匀度表征物种多样性或功能多样性(Nyfelner *et al.*, 2009; Küchenmeister *et al.*, 2012)。本试验中, 物种均匀度与生产力的关系也呈单峰“饱和上升型”模式(2013、2014年和3年平均), 即当豆科牧草混播比例为5:5时群落生产力达到峰值(图2; 表4)。这种情景下, 增加豆科牧草比例, 期望通过此措施增加群体养分

(主要是土壤氮养分)供应达到增加群落生产力的目的无法实现(赵财等, 2016)。随着生长年限的延长, 物种均匀度与生产力的关系也发生了变化, 但大部分混播组合呈单峰“饱和上升型”模式(图2; 表4)。陈超等(2016)指出, 当物种均匀度的增加程度大于多样性种间差异的减少程度(物种丰富度减少)时, 功能多样性还可增加, 进而导致生产力增加。本试验中物种丰富度影响了牧草产量(生产力)、超产效应和多样性效应的变化, 而物种均匀度和物种均匀度与物种丰富度的互作效应均没有影响上述指标的变化(表3)。因而, 本试验中均匀度的增加程度并没有影响到功能多样性, 从而增加群落生产力。这可能与本试验设计的豆禾混播比例较高有关。

## 4 结论

在新疆昭苏地区建植的一年生和多年生豆禾混播草地均可产生超产效应, 有利于当地草牧业的健康发展。(1)在建植初期, 互补效应和选择效应共同主导了多年生豆禾混播草地的超产效应, 而随着生长年限的延长, 互补效应则成为主要影响因素; 一年生豆禾混播草地的超产效应则一直受互补效应的影响。(2)多年生豆禾混播草地的互补效应、选择效应和多样性净效应均随生长年限的延长而呈下降趋势, 也导致了超产效应的下降。(3)一年生豆禾混播草地的超产效应在建植的第1、2年以及3年平均均可低于多年生豆禾混播草地, 只有在建植第3年才高于多年生豆禾混播草地。由此可见, 合适的混播种类、种类搭配和混播比例可以使多年生豆禾混播草地的生产优势大于一年生豆禾混播草地。

## 参考文献

- Atwater DZ, Callaway RM (2015). Testing the mechanisms of diversity-dependentoveryielding in a grass species. *Ecology*, 96, 3332-3342.
- Beckage B, Gross LJ (2006). Overyielding and species diversity: What should we expect? *New Phytologist*, 172, 140-148.
- Cardinale BJ, Wright JP, Cadotte MW, Carroll IT, Hector A, Srivastava DS, Loreau M, Weis JJ (2007). Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 18123-18128.
- Chang SH, Hou FJ, Yu YW, Nan ZB (2004). Vegetation and soil characteristic of three forage legume pastures on the

- Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 932-937. [常生华, 侯扶江, 于应文, 南志标 (2004). 黄土丘陵沟壑区三种豆科人工草地的植被与土壤特征. *生态学报*, 24, 932-937.]
- Chen C, Zhu ZH, Li YN, Yao TH, Pan SY, Wei XH, Kong BB, Du JL (2016). Effects of interspecific trait dissimilarity and species evenness on the relationship between species diversity and functional diversity in an alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 661-674. [陈超, 朱志红, 李英年, 姚天华, 潘石玉, 卫欣华, 孔彬彬, 杜家丽 (2016). 高寒草甸种间性状差异和物种均匀度对物种多样性与功能多样性关系的影响. *生态学报*, 36, 661-674.]
- Chen N, Zhang YJ, Zhu JT, Li JX, Liu YJ, Zu JX, Cong N, Huang K, Wang L (2018). Nonlinear responses of productivity and diversity of alpine meadow communities to degradation. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 50-65. [陈宁, 张扬建, 朱军涛, 李军祥, 刘瑶杰, 俎佳星, 丛楠, 黄珂, 王荔 (2018). 高寒草甸退化过程中群落生产力和物种多样性的非线性响应机制研究. *植物生态学报*, 42, 50-65.]
- Chen YX, Liu J, Chen XP, Zhang CC, Huang W, Tang YQ, Xu KW (2013). Dry matter accumulation, yield and nitrogen use efficiency of crops rotation and intercropping systems in Sichuan. *Journal of China Agricultural University*, 18(6), 68-79. [陈远学, 刘静, 陈新平, 张朝春, 黄蔚, 唐义琴, 徐开未 (2013). 四川轮套作体系的干物质积累、产量及氮素利用效率研究. *中国农业大学学报*, 18(6), 68-79.]
- Cox S, Peel MD, Creech JE, Waldron BL, Eun JS, Zobell DR, Miller LR, Snyder DL (2017). Forage production of grass-legume binary mixtures on Intermountain Western USA irrigated pastures. *Crop Science*, 57, 1742-1753.
- Dai W, Zhang R, Du ZB, Wang F (2009). Soil fertility and species identity control community productivity in an experimental plant community in an area of subalpine meadow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 45-52. [代巍, 张荣, 独占彪, 王璠 (2009). 土壤肥力和物种属性决定亚高寒草甸实验群落的生产力. *植物生态学报*, 33, 45-52.]
- de Mazancourt C, Isbell F, Larocque A, Berendse F, de Luca E, Grace JB, Haegeman B, Polley HW, Roscher C, Schmid B, Tilman D, van Ruijven J, Weigelt A, Wilsey BJ, Loreau M (2013). Predicting ecosystem stability from community composition and biodiversity. *Ecology Letters*, 16, 617-625.
- Finn JA, Kirwan L, Connolly J, Sebastià MT, Helgadottir A, Baadshaug OH, Belanger G, Black A, Brophy C, Collins RP, Cop J, Dalmannsdóttir S, Delgado I, Elgersma A, Fothergill M, *et al.* (2013). Ecosystem function enhanced by combining four functional types of plant species in intensively managed grassland mixtures: a 3-year continental scale field experiment. *Journal of Applied Ecology*, 50, 365-375.
- Frankow-Lindberg BE, Halling M, Höglind M, Forkman J (2009). Yield and stability of yield of single- and multi-clover grass-clover swards in two contrasting temperate environments. *Grass and Forage Science*, 64, 236-245.
- Grime JP (1998). Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology*, 86, 902-910.
- Hector A, Hautier Y, Saner P, Wacker L, Bagchi R, Joshi J, Scherer-Lorenzen M, Spehn EM, Bazeley-White E, Weilenmann M, Caldeira MC, Dimitrakopoulos PG, Finn JA, Huss-Danell K, Jumpponen A, *et al.* (2010). General stabilizing effects of plant diversity on grassland productivity through population asynchrony and overyielding. *Ecology*, 91, 2213-2220.
- Hector A, Schmid B, Beierkuhnlein C, Caldeira MC, Diemer M, Dimitrakopoulos PG, Finn JA, Freitas H, Giller PS, Good J, Harris R, Höglberg P, Huss-Danell K, Joshi J, Jumpponen A, *et al.* (1999). Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science*, 286, 1123-1127.
- Hendriks M, Mommer L, de Caluwe H, Smit-Tiekstra AE, van der Putten WH, de Kroon H (2013). Independent variations of plant and soil mixtures reveal soil feedback effects on plant community overyielding. *Journal of Ecology*, 101, 287-297.
- Hooper DU, Chapin III FS, Ewel JJ, Hector A, Inchausti P, Lavorel S, Lawton JH, Lodge DM, Loreau M, Naeem S, Schmid B, Setälä H, Symstad AJ, Vandermeer J, Wardle DA (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75, 3-35.
- Hu ZZ, Dong SK, Long RJ (2001). Evaluation of ecological efficiency of mixed pastures with perennial grasses in alpine region of China//China Association of Agricultural Science Societies, Chinese Grassland Society. *Grassland Science Outlook of 21 Century—Proceedings of International Prataculture (Grassland) Congress*. 482-487. [胡自治, 董世魁, 龙瑞军 (2001). 高寒地区多年生禾草混播草地生产——生态效益评价//中国农学会, 中国草原学会. 21世纪草业科学展望——国际草业(草地)学术大会论文集. 482-487.]
- Huston MA, Aarssen LW, Austin MP, Cade BS, Fridley JD, Garnier E, Grime JP, Hodgson J, Lauenroth WK, Thompson K, Vandermeer JH, Wardle DA (2000). No consistent effect of plant diversity on productivity. *Science*, 289, 1255a. DOI: 10.1126/science.289.5483.1255a.
- Isbell FI, Polley HW, Wilsey BJ (2009). Biodiversity, productivity and the temporal stability of productivity: patterns and processes. *Ecology Letters*, 12, 443-451.
- Jiang XL, Li WQ, Yue J, Hao M, Zhang WG, Liu YJ, Li F (2010). Effects of available soil space on the diversity-productivity relationship of species. *Journal of Lanzhou*

- University (Natural Sciences)*, 46(6), 62-67. [江小雷, 李伟琦, 岳静, 郝敏, 张卫国, 刘允佳, 李飞 (2010). 土壤有效空间对物种多样性-生产力关系的影响. *兰州大学学报(自然科学版)*, 46(6), 62-67.]
- Jiang XL, Zhang WG, Duan ZH (2005). Effects of complementarity on diversity-productivity relationship. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 523-529. [江小雷, 张卫国, 段争虎 (2005). 资源互补效应对多样性-生产力关系的影响. *植物生态学报*, 29, 523-529.]
- Jiao NY, Ning TY, Zhao C, Wang Y, Shi ZQ, Hou LT, Fu GZ, Jiang XD, Li ZJ (2006). Characters of photosynthesis in intercropping system of maize and peanut. *Acta Agronomica Sinica*, 32, 917-923. [焦念元, 宁堂原, 赵春, 王芸, 史忠强, 侯连涛, 付国占, 江晓东, 李增嘉 (2006). 玉米花生间作复合体系光合特性的研究. *作物学报*, 32, 917-923.]
- Küchenmeister F, Küchenmeister K, Wrage N, Kayser M, Iselstein J (2012). Yield and yield stability in mixtures of productive grassland species: Does species number or functional group composition matter? *Grassland Science*, 58, 94-100.
- Li A, Zhang M, Du GZ (2012). Impacts of species composition, richness, sowing density, and soil nutrients on the complementary effect of plant communities. *Chinese Journal of Ecology*, 31, 2443-2448. [李昂, 张鸣, 杜国祯 (2012). 物种组成、丰富度、播种密度和土壤养分对群落补偿效应的影响. *生态学杂志*, 31, 2443-2448.]
- Li CJ, Li YY, Yu CB, Sun JH, Christie P, An M, Zhang FS, Li L (2011). Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in northwest China. *Plant and Soil*, 342, 221-231.
- Li L, Li SM, Sun JH, Zhou LL, Bao XG, Zhang HG, Zhang FS (2007). Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 11192-11196.
- Li L, Tilman D, Lambers H, Zhang FS (2014). Plant diversity and overyielding: insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture. *New Phytologist*, 203, 63-69.
- Li L, Zhang F, Li X, Christie P, Sun J, Yang S, Tang C (2003). Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 65, 61-71.
- Lithourgidis AS, Vasilakoglou IB, Dhima KV, Dordas CA, Yiakoulaki MD (2006). Forage yield and quality of common vetch mixtures with oat and triticale in two seeding ratios. *Field Crops Research*, 99, 106-113.
- Liu WH, Zhang YJ, Shi SL, Sun J, Wei XX (2017). Effect of variety, fertilization and mixture sowing on oat biomass allocation in the alpine cultivated pasture. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 23, 398-407. [刘文辉, 张英俊, 师尚礼, 孙建, 魏小星 (2017). 高寒地区燕麦(*Avena sativa* L.)人工草地生物量分配对施肥和混播措施的响应. *植物营养与肥科学报*, 23, 398-407.]
- Loreau M (1998). Separating sampling and other effects in biodiversity experiments. *Oikos*, 82, 600-602.
- Loreau M, Hector A (2001). Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412, 72-76.
- Ma CH, Han JG, Li HX, Mao PS, Rong YP (1999). The dynamical studies on biomass, quality and interspecific competition in annual forage crop swards. *Acta Agrestia Sinica*, 7(1), 62-71. [马春晖, 韩建国, 李鸿祥, 毛培胜, 戎郁萍 (1999). 一年生混播草地生物量和品质以及种间竞争的动态研究. *草地学报*, 7(1), 62-71.]
- Mulder C, Jumpponen A, Högborg P, Huss-Danell K (2002). How plant diversity and legumes affect nitrogen dynamics in experimental grassland communities. *Oecologia*, 133, 412-421.
- Nyfelers D, Huguenin-Elie O, Suter M, Frossard E, Connolly J, Lüscher A (2009). Strong mixture effects among four species in fertilized agricultural grassland led to persistent and consistent transgressive overyielding. *Journal of Applied Ecology*, 46, 683-691.
- Pacala S, Tilman D (2001). The transition from sampling to complementarity//Kinzig A, Pacala S, Tilman D. *The Functional Consequences of Biodiversity: Empirical Progress and Theoretical Extensions*. Princeton University Press, Princeton.
- Russelle MP (1992). Nitrogen cycling in pasture and range. *Journal of Production Agriculture*, 5, 13-23.
- Schuldt A, Bruehlheide H, Härdtle W, Assmann T, Li Y, Ma K, von Oheimb G, Zhang J (2015). Early positive effects of tree species richness on herbivory in a large-scale forest biodiversity experiment influence tree growth. *Journal of Ecology*, 103, 563-571.
- Siebenkäs A, Schumacher J, Roscher C (2016). Resource availability alters biodiversity effects in experimental grass-forb mixtures. *PLOS ONE*, 11, e0158110. DOI: 10.1371/journal.pone.0158110.
- Song R, Mu Y, Wang YL, Wu CS, Guo JX (2002). Effects of intercropping of maize and soybean on the morphological character of roots. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 34(3), 83-86. [宋日, 牟瑛, 王玉兰, 吴春胜, 郭继勋 (2002). 玉米、大豆间作对两种作物根系形态特征的影响. *东北师大学报(自然科学版)*, 34(3), 83-86.]
- Thibaut LM, Connolly SR (2013). Understanding diversity stability relationships: towards a unified model of portfolio effects. *Ecology Letters*, 16, 140-150.
- Tilman D, Downing JA (1994). Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 367, 363-365.
- Tilman D, Reich PB, Knops J, Wedin D, Mielke T, Lehman C

- (2001). Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*, 294, 843-845.
- Wang HD, Zhang LL, Zhu ZH (2013). Effects of clipping and fertilizing on the relationships between species diversity and ecosystem functioning and mechanisms of community stability in alpine meadow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 279-295. [王海东, 张璐璐, 朱志红 (2013). 刈割、施肥对高寒草甸物种多样性与生态系统功能关系的影响及群落稳定性机制. *植物生态学报*, 37, 279-295.]
- Wang P, Wang TH, Zhou DW (2007). The productivity of grass-legume mixture in Songnen area of China. *Science-paper Online*, 2(2), 121-128. [王平, 王天慧, 周道玮 (2007). 松嫩地区禾-豆混播草地生产力研究. *中国科技论文在线*, 2(2), 121-128.]
- Wang P, Zhou DW, Jiang SC (2010). Research on biological nitrogen fixation of grass-legume mixtures in a semi-arid area of China. *Acta Prataculturae Sinica*, 19(6), 276-280. [王平, 周道玮, 姜世成 (2010). 半干旱地区禾-豆混播草地生物固氮作用研究. *草业学报*, 19(6), 276-280.]
- Wang P, Zhou DW, Zhang BT (2009). Coexistence and interspecific competition in grass-legume mixture. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 2560-2567. [王平, 周道玮, 张宝田 (2009). 禾-豆混播草地种间竞争与共存. *生态学报*, 29, 2560-2567.]
- Wang YK, Ding XF, Wang XP, Wu M, Gao SB, Yang X, Zhao NX, Gao YB (2019). Genotypic diversity of a dominant species *Leymus chinensis* inhibited ecological function of species diversity in the Inner Mongolia Steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 1507-1516. [王宇坤, 丁新峰, 王小平, 吴曼, 高韶勃, 杨雪, 赵念席, 高玉葆 (2019). 内蒙古典型草原建群种羊草基因型多样性抑制群落物种多样性的生态功能. *生态学报*, 39, 1507-1516.]
- Wilsey BJ, Potvin C (2000). Biodiversity and ecosystem functioning: importance of species evenness in an old field. *Ecology*, 81, 887-892.
- Xiao YB, Li L, Zhang FS (2005). The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and faba bean. *Scientia Agricultura Sinica*, 38, 965-973. [肖焱波, 李隆, 张福锁 (2005). 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究. *中国农业科学*, 38, 965-973.]
- Xie KY, Zhao Y, Li XL, He F, Wan LQ, Wang D, Han DM (2013). Relationships between grasses and legumes in mixed grassland: a review. *Acta Prataculturae Sinica*, 22(3), 284-296. [谢开云, 赵云, 李向林, 何峰, 万里强, 王丹, 韩冬梅 (2013). 豆-禾混播草地种间关系研究进展. *草业学报*, 22(3), 284-296.]
- Yang XC, Hu YG, Qian X, Ren CZ, Lin YC, Guo LC, Wang CL, Zeng ZH (2012). Effects of nitrogen application level on system productivity, nitrogen absorption and accumulation in mung bean || oat intercropping system. *Journal of China Agricultural University*, 17(4), 46-53. [杨学超, 胡跃高, 钱欣, 任长忠, 林叶春, 郭来春, 王春龙, 曾昭海 (2012). 施氮量对绿豆 || 燕麦间作系统生产力及氮吸收累积的影响. *中国农业大学学报*, 17(4), 46-53.]
- Zhang JH, Huang YM (2016). Biodiversity and stability mechanisms: understanding and future research. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 3859-3870. [张景慧, 黄永梅 (2016). 生物多样性与稳定性机制研究进展. *生态学报*, 36, 3859-3870.]
- Zhang QG, Zhang DY (2006). Resource availability and biodiversity effects on the productivity, temporal variability and resistance of experimental algal communities. *Oikos*, 114, 385-396.
- Zhao C, Chai Q, Qiao YY, Wang JK (2016). Effect of cereal-legume spacing in intercropping system on alleviating "N inhibition" in pea plants. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 24, 1169-1176. [赵财, 柴强, 乔寅英, 王建康 (2016). 禾豆间距对间作豌豆“氮阻遏”减缓效应的影响. *中国生态农业学报*, 24, 1169-1176.]
- Zhao CX, He WQ, Hu YG, Dong HM, She XL (2006). Effect of intercropping or mixture and harvest time on forage yield and quality of oat and pea under low soil nitrogen environment. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 23(4), 5-9. [赵彩霞, 何文清, 胡跃高, 董慧明, 余小玲 (2006). 低氮环境下燕麦与箭筈豌豆间混作与刈割时间对饲草产量及质量特性的影响. *干旱地区农业研究*, 23(4), 5-9.]
- Zheng W, Jianaerguli, Tang GR, Zhu JZ (2015). Effects of nitrogen addition on competitive ability and productive performance of legume-grass mixture. *Acta Agrestia Sinica*, 23, 422-425. [郑伟, 加娜尔古丽, 唐高溶, 朱进忠 (2015). 氮素添加对豆禾牧草种间竞争力与生产性能的影响. *草地学报*, 23, 422-425.]
- Zheng W, Zhu JZ, Jianaerguli (2012). A comprehensive evaluation of the productive performance of legume-grass mixture under different mixed sowing patterns. *Acta Prataculturae Sinica*, 21(6), 242-251. [郑伟, 朱进忠, 加娜尔古丽 (2012). 不同混播方式豆禾混播草地生产性能的综合评价. *草业学报*, 21(6), 242-251.]
- Zhu SX, Chang J, Ge Y, Wang H, Wang FY, Zhang JM, Su CH (2014). Effects of plant diversity on productivity and diversity effect in a full-scale constructed wetland. *Ecology and Environmental Sciences*, 23, 35-42. [朱四喜, 常杰, 葛滢, 王海, 王凤友, 张建民, 苏春花 (2014). 全尺度人工湿地中植物多样性对生产力与多样性效应的影响. *生态环境学报*, 23, 35-42.]
- Zhu YQ, Zheng W, Wang X, Guan ZX (2018). Effects plant spacing pattern on root morphological and architectural characteristics of legume-grass mixtures. *Acta Prataculturae Sinica*, 27(1), 73-85. [朱亚琼, 郑伟, 王祥, 关正翊 (2018). 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*, 27(1), 73-85.]

责任编辑: 梁存柱 编辑: 赵航