植物营养与肥料学报 2016, 22(5): 1393–1401
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.15421
http://www.plantnutrifert.org

适宜氮肥可提高人工羊草的抽穗数和种子产量

苏富源[1]，郝明德[1,2]*，牛育华[3]，郭胜安[4]
（1 西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西杨凌 712100；2 西北农林科技大学水土保持研究所，陕西杨凌 712100；3 陕西科技大学陕西农产品加工技术研究院，陕西西安 710021；4 宁夏盐池县农业综合开发办公室，宁夏盐池 751500）

摘要:【目的】施用氮肥是禾本科牧草种子高产的关键管理措施之一。为提高羊草种子产量，在人工羊草地上探讨施用氮肥对羊草种子产量及其构成因子的影响，以期为羊草种子生产提供理论和实践依据。【方法】试验于 2013～2015 年进行，以中科 2 号羊草 [*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel 'Zhongke No.2'] 为材料，设置 5 个氮肥处理水平，分别为 N 0、60、120、180、240 kg/hm^2，氮肥在返青期 (4 月上旬) 和种子完熟后 (7 月下旬) 施入，两个时期各施 1/2，羊草种子完熟时测定种子产量和产量构成因子。【结果】施氮量和年际对种子产量影响显著。随生长年限延长，羊草种子产量逐年增加。2013 年和 2014 年种子产量随施氮量增加呈先增加后降低的趋势，2013 年施用氮肥 104.9 kg/hm^2 时羊草产量最高，为 395.2 kg/hm^2，但氮肥对种子产量影响不显著，2014 年施用氮肥 173.5 kg/hm^2 时产量最高，为 857.8 kg/hm^2，较不施氮肥显著增加 56.0%。2015 年种子产量随施氮量增加而增加，施用氮肥 180 kg/hm^2 时种子产量达较高水平为 1865.0 kg/hm^2，与施用氮肥 240 kg/hm^2 差异不显著，较不施氮肥显著增加 206.5%。通径分析结果表明，种子产量与抽穗数呈极显著正相关 ($r = 0.883$，$P < 0.01$)，抽穗数对种子产量的直接作用最大为 0.717，分蘖数对种子产量的间接作用最大为 0.689，且主要是通过抽穗数产生，抽穗数对种子产量的贡献最大。2013 年施用氮肥羊草抽穗数差异不显著，其后两年随氮肥施用量增加抽穗数的变化趋势与产量相同。三年连续施用氮肥使 2014 年和 2015 年抽穗数显著增加，对种子生产有利。施用氮肥显著增加羊草植株穗长、小穗花数、结实粒数/穗和结实率，而对千粒重和小穗数影响不显著。抽穗数与穗长、千粒重和小花数/小穗呈显著负相关。【结论】随生长年限增加，羊草种子高产所需施氮量增大，羊草适宜施氮量为 104.9～180.0 kg/hm^2，2013 年以施氮 104.9 kg/hm^2 为宜，而 2014 年和 2015 年则以 180 kg/hm^2 左右为宜。抽穗数是影响种子产量的最关键因子，不受当年施用氮肥的影响，而与前一年种子完熟后施氮量和 8～10 月降雨量相关。抽穗数增加导致的穗长、千粒重和每小穗花数减少，可以通过添加氮素来给予补偿。

关键词: 羊草；施氮量；抽穗数；种子产量
中图分类号: S543.9　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)05–1393–09

Effects of nitrogen fertilizer on seed yield and yield components in artificial *Leymus chinensis* grassland

SU Fu-yuan[1], HAO Ming-de[1,2]*, NIU Yu-hua[3], GUO Sheng-an[4]
(*1 College of WaterResources and Architectural Engineering, Northwest A & F University' Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&FUniversity' Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Shaanxi Research Institute of Agriculture Products Technology, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 4 Ningxia Yanchi County Agricultural Comprehensive Development Office, Yanchi, Ningxia 751500, China*)

Abstract:【**Objectives**】The application of nitrogen fertilizer is one of the key measures to increase seed yield of Gramineous forage. In this study, a field experiment was conducted in artificial *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel grassland to understand the effects of nitrogen fertilizer on seed yield and its components, and to provide

收稿日期: 2015–10–12　　**接受日期:** 2015–12–21
基金项目: 国家科技支撑计划重大项目（2011BAD31B01）；宁夏农业综合开发土地治理科技推广项目（NTKJ-2014）资助。
作者简介: 苏富源（1988—），女，河南商丘人，硕士研究生，主要从事植物生理研究。E-mail：sufy1991@163.com
* 通信作者 E-mail：mdhao@ms.iswc.ac.cn

theoretical and practical basis for management of artificial *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel grassland. 【**Methods**】The experiment was conducted from 2013 to 2015 with *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel 'Zhongke No.2' as materials. The experiment included five nitrogen level treatments (N 0, 60, 120, 180, 240 kg/hm^2) with three randomized blocks. In each treatment, half of N fertilizer was applied at green stage (late March) and half at harvest stage (late July). Seed yield and yield components were measured at harvest stage. 【**Results**】The experimental years and N fertilizer had significant effects on seed yield. The yield increased gradually with experimental years. However, the seed yield was initially increased and then decreased in 2013 and 2014. In 2013, the optimal N rate was 104.9 kg/hm^2 with a highest seed yield of 395.2 kg/hm^2, but the yield was not significantly affected by N fertilizers. In 2014, the optimal N rate was 173.5 kg/hm^2 with a highest seed yield of 857.8 kg/hm^2, which was 56% higher than control treatment. In 2015, seed yield increased with N rate, with the highest yield of 1865 kg/hm^2 at N rate of 180 kg/hm^2, which was 206.6% higher than control treatment. The results of path analysis indicated that seed yield was significantly correlated with spike number (r = 0.883, P < 0.01). Spike number had largest direct path coefficient to seed yield (0.717) among all the variables, while tiller number had the highest indirect effect on seed yield through spike number, indicating that spike number contributes most to seed yield. Spike number was not affected by N treatmetn in 2013, but had similar responding pattern to N treatment to seed yiled in 2014 and 2015. The spike number increased significantly in 2014 and 2015 by consecutive application of N fertilizer among the three years. Furthermore, the application of N fertilizer significantly increased spike length, florets/spikelet, grain number/spike and seed setting rate, but did not affected 1000-seed weight and spikelet/spike. 【**Conclusions**】The optimal amount of N fertilizer for seed yield was 104.9–180.0 kg/hm^2 and increased with planting year increasing (104.9 kg/hm^2 in 2013 and 180.0 kg/hm^2 in 2014 and 2015). The spike number was the key factor influencing yield, which was not affected by N fertilizer application of current year, but was influenced by the precipitation from August to October and the amount of N fertilizer after mature stage in the previous year. The negative direct coefficient for spike number to spike length, 1000-seed weight and florets/spikelet could be offset by adding N fertilizer.

Key words: *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel; spike number; nitrogen application rate; seed yield

近年来，由于自然因素和人为因素，草原生态系统遭到严重破坏，致使草地面积减少，草地质量不断下降，对全球生态安全、环境质量及社会发展的负面影响日益严重。目前，我国约有 1000 万 hm^2 严重退化草地[1]。宁夏是我国五大牧区之一，由于该地区降水量少、土壤风蚀强烈、地表资源贫乏以及滥垦滥采、超载放牧等因素，使草原退化速度不断加快[2−3]，现有部分草场不能适应畜牧业生产的需要，冬、春季饲草缺乏，亟需改良和恢复。建植人工草地，发展集约经营的草场建设是实现草畜均衡生长，促进畜牧业发展的重要技术途径，也是恢复退化天然草地的有效途径[4]。

羊草 [*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel] 为禾本科赖草属植物，主要分布于我国东北部松嫩平原及内蒙古东部，具有抗寒、抗旱、耐盐碱和营养价值丰富等优良特性。羊草是多年生根茎型牧草，茎叶茂盛、根系发达，生长年限长达 10～20 年，可以增加土壤有机质和有效养分含量，培肥地力，是防止水土流失、治理土地退化、恢复和重建草原的优良草种。在宁夏回族自治区建植人工羊草地对畜牧业的发展和草原生态建设具有重要意义。牧草种子生产是作为人工草地建设、退化草地改良以及植被恢复等牧草生产和生态环境改良的重要物质基础[5]。在人工羊草地建设中，满足恢复和重建退化天然草地的羊草用种是羊草种子生产中的突出现实问题，然而羊草种子生产中存在抽穗率低 (20%～40%) 和结实率低 (30%～50%) 等问题[6−7]，严重影响着种子产量[8]，为大面积建植人工羊草地带来巨大障碍。针对羊草种子供需之间的矛盾，采取适宜的调控措施提高种子产量在生产上极为重要。

施用氮肥是禾本科牧草种子高产的关键管理措施之一，在建植的人工羊草地上施用氮肥能够增加生殖枝数量，对羊草种子生产有明显的促进作用[9]。施用氮肥对羊草种子生产影响的研究虽取得了一定

进展，但由于研究时间较短，研究水平较低，羊草种子产量低的问题依旧没有得到解决。施用氮肥对羊草种子产量及其产量构成因子影响的研究还缺乏深入细致的研究报道。鉴于此，本研究探讨了在人工羊草地上施用氮肥对羊草种子产量及其构成因子的影响，并通过有效的统计学方法确定影响羊草种子产量的关键构成因子和提高种子产量的途径，以期为羊草种子生产提供理论和实践依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2012～2015 年在宁夏盐池县城西滩上进行 (N 37°48′，E 107°17′)，海拔 1428 m，属典型的温带大陆性季风气候。供试土壤以淡灰钙土为主，土壤有机碳含量 2.81 g/kg，全氮 0.49 g/kg，全磷 0.52 g/kg，碱解氮 18.46 mg/kg，速效磷 4.15 mg/kg，速效钾 86.51 mg/kg，pH 8.06，肥力水平较低。年平均气温 8.3℃，年均无霜期 150 d；多年平均降水量 296.4 mm，主要集中在 7～9 月，年均日照时数 2867.9 h，太阳总辐射 592.07 kJ/cm^2。试验期间月平均气温和月降水量如图 1 所示。2012～2014 年的年平均气温分别为 8.6℃、9.5℃ 和 9.3℃，年总降水量分别为 308.0 mm、314.2 mm 和 347.1 mm。

1.2　试验材料

供试羊草品种为中科 2 号羊草，播种前对土地进行深翻，耙平，施入复合肥作为底肥，施肥量为 225 kg/hm^2。试验地年降雨量少，为确保土壤墒情，播前进行大水漫灌一次。2012 年 5 月 6 日采用人工条播种植，播深 2～3 cm，行距 60 cm，播种量 7.5 kg/hm^2，播种后进行田间管理，包括灌水、病虫害防治、除杂草等，播种当年没有开花结实，羊草在 2013 年 3 月下旬返青，5 月中旬孕穗，7 月中旬籽粒成熟。

1.3　试验设计

试验于 2013～2015 年进行，采取随机区组设计，设置了 5 个氮肥处理水平，年施氮 (N) 量为：0、60、120、180、240 kg/hm^2，分别以 N_0、N_1、N_2、N_3、N_4 表示，供试氮肥为尿素 (含 N 46%)。小区面积为 144 m^2，小区间隔 1 m，3 次重复，共 15 个小区。氮肥在返青期 (4 月上旬) 和种子完熟后 (7 月下旬) 以表面撒施的方法施入土壤，两个时期各施 1/2，在返青期施肥后立即灌水，灌水量 225 t/hm^2。

1.4　测定项目及方法

1.4.1 种子产量测定　每年羊草种子完熟时，各小区随机选取 3 个 1 m × 1 m 样方全部刈割，自然风干后脱粒、清选、称重，计算单位面积种子产量 (kg/hm^2)。

1.4.2 种子产量构成因子测定　每年羊草种子完熟时，在各小区随机选取 3 个 0.5 m × 0.5 m 的样方，刈割后测定羊草的分蘖数和抽穗植株的数量，计算抽穗率；在每个样方随机选取 10 个生殖枝和 10 个小穗，测定穗长、小穗数/穗、小花数/小穗、结实粒数/穗和结实率；测产获得的各小区种子风干、脱粒、清选后，随机挑选 1000 粒种子称重，重复 3 次，计算千粒重。

1.5　数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 进行数据处理和统计分析，分析时将不同试验年份也作为一个独立因素。

2　结果与分析

2.1　气候条件

2012～2015 年，年平均气温和月平均气温差异不大，但年降水量和月降水量间存在较大差异（图 1）。2014 年总降水量为 347.1 mm，高于 2012 年 (308.0 mm) 和 2013 年 (314.2 mm)。每年生长季 4～10 月的月降水量中，2013 年 6、7、10 月份，2014 年 4、9 月份，2015 年 5、8 月份降水量均明显高于同期的其他年份。

2.2　氮肥对羊草种子产量的影响

随生长年限延长，羊草种子产量逐年增加 (图 2)，2015 年种子产量分别是 2014 年和 2013 年的 1.93 和 4.13 倍。2013 年和 2014 年种子产量随施氮量增加呈先增加后降低的趋势，2013 年施用氮肥 104.9 kg/hm^2 时产量最高，为 395.2 kg/hm^2，但氮肥对羊草种子产量影响不显著，各处理间差异也未达显著水平。2014 年施用氮肥 173.5 kg/hm^2 时产量最高，为 857.8 kg/hm^2，较不施氮肥显著增产 56.0%，继续增施氮肥，种子产量下降，表现出施肥的负效应。2015 年羊草种子产量随施氮量增加而增加，施用氮肥 180 kg/hm^2 时种子产量达较高水平为 1865.0 kg/hm^2，较 120 kg/hm^2 处理有显著升高，较不施氮肥显著增加 206.5%。继续增加施氮量种子产量增幅变小，180 kg/hm^2 与施用氮肥 240 kg/hm^2 差异不显著。施氮量和年际的主效应以及交互作用对羊草种子产量影响极显著 ($P < 0.05$，表 1)。综合以上表明，种子产量在年际间变化较大，各年间最高种子产量的施氮量各不相同。

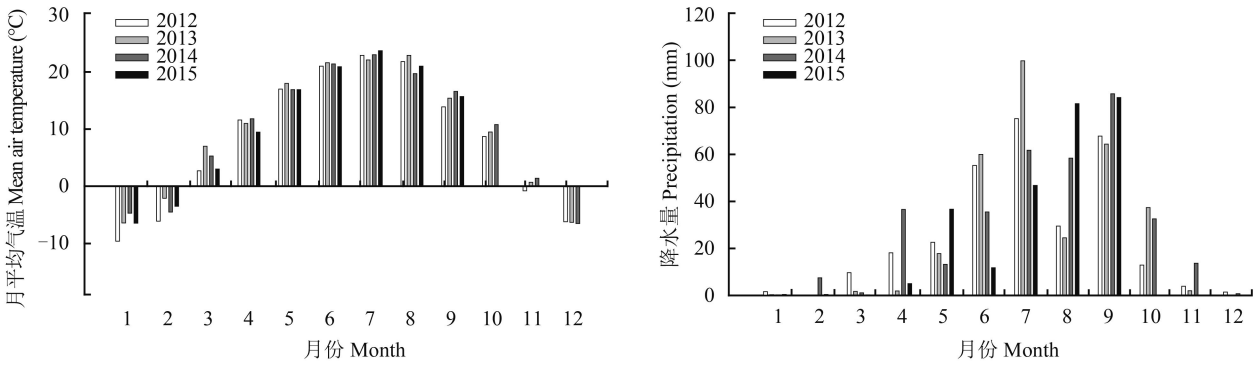

图 1 2012 年 1 月～2015 年 9 月间月平均气温和降水量

Fig. 1 Monthly air temperature and precipitation of the experimental site from January 2012 to September 2015

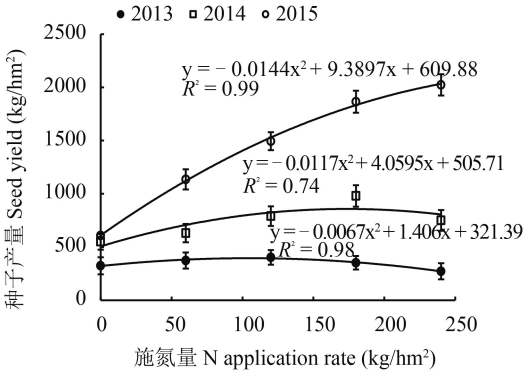

图 2 不同氮肥水平羊草种子产量

Fig. 2 Seed yield of *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel under different nitrogen rate

2.3 氮肥对羊草种子产量构成因子的影响

随着生长年限的延长，单位面积羊草分蘖数和抽穗数逐渐增加，2015 年分蘖数分别是 2014 年和 2013 年的 1.28 和 3.75 倍 (图 3A)，抽穗数则分别是 2.47 和 7.53 倍 (图 3B)。与 2013 年相比，抽穗率在 2014 年增加并不明显，而在 2015 年显著增加，增幅达 87.4%。羊草分蘖数随着施氮量增加呈不断上升趋势，3 年最大分蘖数均出现在施氮量 240 kg/hm² 时，较不施氮肥分别增加 51.2%、75.6%、62.0%。2013 年和 2014 年抽穗数/m² 随着施氮量的增加先增加后减少，但 2013 年差异不显著，说明抽穗数不受当年施用氮肥的影响；2014 年施氮量 180 kg/hm² 时抽穗数达到最大，较不施氮肥显著增加 25.4%；2015 年羊草抽穗数随着施氮量的增加呈不断上升趋势，施氮量 240 kg/hm² 时抽穗数达最大，较不施氮肥增加 166.9%。2013 年和 2014 年施用氮肥羊草抽穗率变化范围在 13.8%～31.3% 之间，均低于不施氮肥；2015 年随氮肥施用量的增加抽穗率先增大后减小，施用氮肥 120 kg/hm² 时达最大为 54.46%，较不施氮肥显著增加 69.71% (图 3C)。施氮量和年际的主效应以及交互作用对羊草分蘖数、抽穗数和抽穗率影响极显著 ($P < 0.05$，表 1)，尤其是年际影响效应更大。

随着生长年限延长，羊草穗长呈下降趋势，与

表 1 氮肥量和年际间种子产量和产量因子变异分析

Table 1 Seed yields and their component variance among nitrogen treatments and among the years

变异源 Variation	分蘖数 Tillers	穗数 Ear No.	抽穗率 Earing rate (%)	穗长 Spike length (cm)	小穗数/穗 Spikelets /spike	小花数/小穗 Florets /spikelet	穗粒数 Grain No. Per spike	结实率 (%) Seed setting	千粒重 1000-seed weight (g)	产量 Yield (kg/hm²)
施氮量 N rate (N)	63.834**	373.679**	3.197	12.285**	0.510	12.598**	10.798**	3.830	1.410	25.573**
年际 Year (Y)	275.068**	662.269**	70.803**	75.748**	0.521	8.911**	0.750	1.854	3.027	213.162**
Y × N	74.341**	418.271**	12.837**	3.178	0.774	1.996	0.249	1.538	0.434	13.615**

注（Note）：分析采用 2013～2015 年的数据 Analysis based on the data from 2013 to 2015；*、** 表示在 0.05、0.01 水平显著 Indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 levels.

2013 年相比，降幅分别为 18.6% 和 32.7% (图 3D)。随着施氮量的增加，穗长呈先增加后降低的趋势，3 年穗长的最大值均出现在施氮量 180 kg/hm² 时，较不施氮肥分别增加 36.6%、27.8% 和 31.9%。施氮量和年际的主效应以及交互作用对穗长影响显著 ($P < 0.05$)(表 1)。适当施用氮肥可以增加羊草小穗数 (图 3E)，但施氮量和年际的主效应以及交互作用对小穗数影响均不显著 (表 1)。与 2013 年相比，小花数在 2014 年无明显变化，而在 2015 年明显降低，降幅达 12.6%。增施氮肥有利于小花数的增加。2013 年和 2014 年施用氮肥 60 kg/hm² 小花数较不施氮肥差异不显著；施用氮肥 120、180 和 240 kg/hm² 显著增加小花数，2015 年施用氮肥 240 kg/hm² 时小花数显著高于对照处理 (图 3F)。施氮量和年际的主效应对小花数影响极显著 ($P < 0.05$，表 1)。

随着施氮量增加，羊草结实粒数呈先增加后降低的趋势，但 2014 年不同施氮量间差异不显著，2013 年施氮 120 kg/hm² 时结实粒数最多，较不施氮肥增加 37.5%，2015 年施氮 180 kg/hm² 时结实粒数最多，增幅为 25.6% (图 3G)。2013 年施氮量对结实率的影响没有规律性的变化。2014 年不同施氮量间结实率差异不显著，2015 年结实率随施氮量增加先增加后减少，施氮 120 kg/hm² 时结实率最大，较不施氮肥增加 20.9% (图 3H)。施氮量的主效应对结实粒数/穗和结实率影响显著，但年际的主效应及其与施氮量的交互作用对结实粒数和结实率影响均不显著 (表 1)。施用氮肥有利于千粒重的增加，2014 年种子千粒重高于 2013 年和 2015 年 (图 3I)，但施氮量和年际的主效应以及交互作用对羊草千粒重影响不显著 (表 1)。

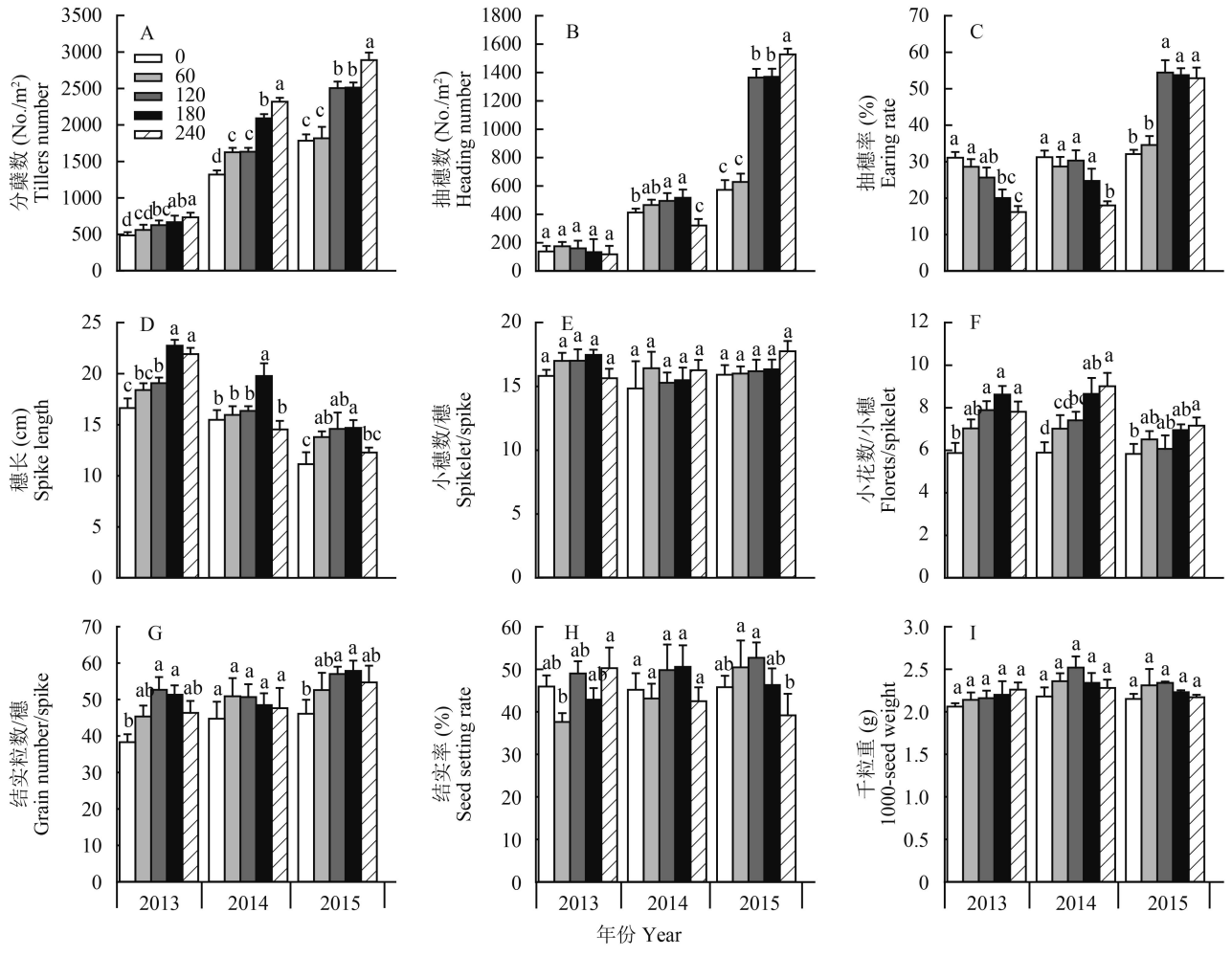

图 3　不同氮肥水平下羊草种子产量构成因子

Fig. 3　Seed yield components of *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel under different nitrogen rates

[注（Note）：方柱上不同字母表示处理间差异在0.05水平显著

Different letters above the bars represent significant difference among different treatments at 0.05 level.]

2.4 种子产量与产量构成因子的相关性分析和通径分析

种子产量与抽穗数呈极显著正相关 ($r = 0.883^{**}$, $P < 0.01$)，抽穗数对种子产量的直接作用最大 (0.717)，通过其他因子产生的间接作用较小，说明抽穗数对种子产量的作用主要来自于本身(表2、表3)。种子产量与分蘖数呈极显著正相关 ($r = 0.866^{**}$, $P < 0.01$)。分蘖数对种子产量的直接作用较小，间接作用最大 (0.689)，且主要是通过抽穗数产生的正效应，可能是由于分蘖数与抽穗数呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，较大的分蘖数是获得较高生殖枝的基础。种子产量和结实粒数呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，直接作用为 0.281，间接作用主要是通过分蘖数和抽穗数产生的正效应。穗长与种子产量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，穗长对种子产量的直接作用非常小，间接作用主要是通过分蘖数和抽穗数产生的负效应，因为穗长与分蘖数、抽穗数呈极显著负相关。小穗数与种子产量的相关系数较小，未达到显著水平；小穗数对种子产量的直接作用和间接作用均非常小，说明小穗数对种子产量的影响不明显。千粒重和小花数与种子产量呈负相关，但未达到显著水平，千粒重和小花数与抽穗数呈显著负相关，千粒重和小花数对种子产量的直接作用为较小的负效应，间接作用主要是通过抽穗数产生的负效应。抽穗数与穗长、千粒重和小花数呈显著负相关，说明抽穗数增加，导致生殖枝间养分、空间等竞争加剧，影响种子发育，导致穗长、千粒重和小花数降低，进而间接影响种子产量。

表2 产量构成因子及相关性状的相关性

Table 2 The correlation among yield components and other related characters

因子 Factor	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	Y
X_1	1							
X_2	0.820**	1						
X_3	0.533**	0.154	1					
X_4	–0.101	–0.382	0.117	1				
X_5	–0.703**	–0.709**	–0.211	0.087	1			
X_6	–0.037	0.082	0.102	–0.102	0.081	1		
X_7	–0.207	–0.426	0.263	0.203	0.502**	0.254	1	
Y	0.866**	0.883**	0.462**	–0.292	–0.629**	0.162	–0.258	1

注（Note）：X_1—分蘖数 Tillers；X_2—抽穗数 Heading number；X_3—结实粒数/穗 Grain number/spike；X_4—千粒重 1000-seed weight；X_5—穗长 Spike length；X_6—小穗数/穗 Spikelet/spike；X_7—小花数/小穗 Florets/spikelet；Y—种子产量 Seed yield. 相关系数通过 Pearson 双尾检验得出 Correlation coefficients calculated by the Pearson two-tailed test；分析采用 2013～2015 年的数据 Analysis based on the data from 2013 to 2015；* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关 Indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表3 种子产量构成因子的通径分析

Table 3 Path coefficient analysis of seed yield components

因子 Factor	r	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect							
			$X_1 \to Y$	$X_2 \to Y$	$X_3 \to Y$	$X_4 \to Y$	$X_5 \to Y$	$X_6 \to Y$	$X_7 \to Y$	合计
X_1	0.866	0.177		0.588	0.150	0.002	–0.058	–0.003	0.010	0.689
X_2	0.883	0.717	0.145		0.043	0.008	–0.058	0.007	0.020	0.166
X_3	0.462	0.281	0.094	0.110		–0.003	–0.017	0.009	–0.013	0.181
X_4	–0.292	–0.022	–0.018	–0.274	0.033		0.007	–0.009	–0.010	–0.270
X_5	–0.629	0.082	–0.124	–0.508	–0.059	–0.002		0.007	–0.024	–0.711
X_6	0.163	0.085	–0.007	0.059	0.029	0.002	0.007		–0.012	0.078
X_7	–0.258	–0.048	–0.037	–0.305	0.074	–0.004	0.041	0.022		–0.210

注（Note）：X_1—分蘖数 Tillers；X_2—抽穗数 Heading number；X_3—结实粒数/穗 Grain number/spike；X_4—千粒重 1000-seed weight；X_5—穗长 Spike length；X_6—小穗数/穗 Spikelet/spike；X_7—小花数/小穗 Florets/spikelet；Y—种子产量 Seed yield. 通径系数通过多元回归的方法得出 Path coefficient calculated by multiple linear regression；分析采用 2013～2015 年的数据 Analysis based on the data from 2013 to 2015.

3　讨论

3.1　氮肥对羊草种子产量的影响

许多研究表明氮肥对禾本科牧草种子增产有积极作用[10–12]，施用氮肥可刺激分蘖和干物质积累，影响花芽分化和种子产量的动态变化，最终影响种子产量。氮肥用量不足，不利于有效分枝开花结实，但氮肥施用过多，会出现疯长和倒伏现象，种子产量反而降低[13–14]，房丽宁等[15]对无芒雀麦的研究表明施氮量为 180 kg/hm^2 (春 60 kg/hm^2 + 秋 120 kg/hm^2) 时种子产量最高。马春晖等[16]的研究结果表明，在 2001～2003 年施用氮肥增加结缕草种子产量，2001 年未结实，2002 年施用氮肥 60 kg/hm^2 (春 20 kg/hm^2 + 秋 40 kg/hm^2) 时种子产量最高，2003 年施用氮肥 30 kg/hm^2 (春 10 kg/hm^2 + 秋 20 kg/hm^2) 时种子产量最高。本研究中氮肥在返青期和种子完熟后两个时期施入，羊草适宜施氮量为 104.9～180.0 kg/hm^2。不同建植年份，施肥效应不同，羊草适宜的施氮量为 104.9～180.0 kg/hm^2，2013 年应少施氮肥，以施氮 104.9 kg/hm^2 为宜；2014 年施氮 173.5 kg/hm^2 时种子产量最高，为 857.8 kg/hm^2；2015 年施氮 180 kg/hm^2 时种子产量达较高水平为 1865.0 kg/hm^2。随生长年限延长，种子高产所需施氮量增大，这可能是由于不同年份的降雨量不同，造成氮素的利用效率不同，因而各年间最高种子产量的施氮量不同。氮肥的用量与土壤、气候条件、牧草种类以及种子田建成时间有关。适量施用氮肥可以获得较高的种子产量，但在旱作条件下，环境和降水对产量的影响较大，所以具体的氮肥施用量应结合当地的条件来考虑。

统计分析表明，抽穗数对种子产量贡献最大。种子产量在年际间变化较大，主要是因为抽穗数的变化极为明显。杨允菲等[17]通过 16 年连续调查发现前一年 8～10 月份，低温、多雨、少光照对翌年生殖枝数量增加及生长有促进作用，其中，以前一年 8～10 月降水量的影响较为突出。本研究中 2012～2014 年的 8～10 月份降雨量逐年增加，2014 年 8～10 月份降雨量分别是 2013 年和 2012 年同期的 1.40 和 1.60 倍，2015 年抽穗数则是 2014 年和 2013 年的 2.47 和 7.53 倍，这表明该阶段的降雨量影响下一生长季的抽穗数量。水分对于植物总分蘖数量以及有效分蘖数量有着显著的促进作用[18]。植物对养分的吸收、运转和利用过程都依赖于土壤水分，土壤水分增加能提高氮素的矿化速率[19]，水分含量的高低在很大程度上决定着肥料的合理用量。不同年度间气候条件不一，导致氮肥处理后植物吸收利用程度不同，降雨充足的年份能促进氮素的吸收，因而各年间最高种子产量的施氮量不同。因此，建议在种子完熟后这个关键阶段采取浇水和施用氮肥等栽培措施，以提高翌年的抽穗数量。

3.2　氮肥对羊草种子产量构成因子的影响

徐荣等[20]的研究结果表明，施氮量为 90 kg/hm^2 (春 45 kg/hm^2 + 秋 45 kg/hm^2) 时可显著增加高羊茅的生殖枝数、每枝的小穗数、每穗小花数、小穗种子数。王俊峰等[21]发现不同时期施用氮肥对当年羊草的抽穗数没有显著影响。在本研究中 2013 年施用氮肥对羊草抽穗数影响不显著，但 2014 年和 2015 年施用氮肥使羊草抽穗数显著增加，这可能是因为返青苗主要来自于地下芽库中的芽[22–25]，直接来自种子萌发的植株很少，还不到地上植株数量的 1%[26]。羊草有性生殖过程跨越两个生长季，在种子完熟后地下芽和子株开始出现，经过低温春化作用后在翌年开始抽穗、开花、结实。在种子完熟后进行浇水和施用氮肥，母株的同化能力显著提高，进而促进这些对翌年抽穗有贡献的地下芽和子株的产生[27–28]。在本研究中，氮肥在返青期和种子完熟后两个时期施入，2013 年抽穗数差异不显著，说明羊草抽穗数量不受当年施用氮肥的影响，而与上一年夏季到秋季的子株有关[9, 29]。2014 年和 2015 年羊草抽穗数受前一年种子完熟后施用氮肥的影响显著增加。

春、秋季施氮的研究表明，对于许多禾本科牧草春季最佳施氮量有赖于上年秋季所施氮的数量[30]。前一年夏秋两季施氮促进形成大量分蘖株，而当年春夏季施氮则为每个分蘖的继续发育提供更多的营养，使其完全成熟并最终形成发育良好的花序。赵利等[31]对老芒麦的研究表明，在 2010 年夏季施用氮肥对千粒重影响显著，而对生殖枝和分蘖数影响不显著。龙忠富等[32]研究表明，在 2007～2009 年春秋两季施用氮肥可显著提高穗长、小穗数、种子数和千粒重。本研究中施用氮肥显著增加羊草植株穗长、小花数/小穗、结实粒数/穗和结实率，而对千粒重和小穗数/穗影响不显著，这可能与施肥时间不同有关。

种子产量是抽穗数和单株生殖枝生产力共同作用的结果。羊草在进行有性繁殖的同时，还进行无性繁殖，营养物质在生殖器官和其他器官之间存在

着竞争[33]。春季施肥浇水可以促进植物光合能力增强，植株内营养物质储量增加，减少器官之间养分的竞争[12, 34-35]。统计分析表明，抽穗数与穗长、千粒重和小花数/小穗呈显著负相关。在本研究中，施用氮肥不仅使羊草抽穗数增加，羊草植株穗长、小花数/小穗、结实粒数/穗和结实率也显著增加，施用氮肥虽然对植株千粒重和小穗数/穗影响不显著，但有利于千粒重和小穗数/穗的增加。这表明抽穗数增加导致的穗长、千粒重和小花数/小穗减少，可以通过添加氮素来给予补偿，这样产量的增幅更明显。2014 年和 2015 年穗长和小花数/小穗显著减少的原因可能是分蘖数和抽穗数较高，加之 2014 年和 2015 年 4～7 月份降雨量相对于 2013 年分别降低 20.0%、45.4%，单株生殖枝的水、氮供应减少，营养竞争加剧，转运到生殖枝的营养物质和能量减少，所以影响了穗的伸长，并导致小花数/小穗的退化，导致单株生殖枝生产力受到抑制。同时，抽穗数的增加对单株生殖枝生产潜力的下降有一定的互补效应，故 2014 年和 2015 年仍表现出较高的种子产量。这说明为提高种子产量，可以在抽穗当年采取施氮的措施，另外也可以考虑配以适当的浇水措施。

4 结论

随生长年限增加，羊草种子高产所需施氮量增大，2013 年以施氮 104.9 kg/hm^2 为宜，2014 年和 2015 年则以 180 kg/hm^2 左右为宜。抽穗当年在返青期和种子完熟后两个时期施入氮肥，羊草植株抽穗数、穗长、每穗小花数、结实粒数和结实率显著增加，但抽穗数不受当年施用氮肥的影响，而与前一年种子完熟后施氮量和 8～10 月份降雨量相关。抽穗数是影响产量的最关键因子，与穗长、千粒重和每穗小花数呈显著负相关，抽穗数增加导致的负效应，可以通过添加氮素来给予补偿。因此，首先建议在前一年种子完熟后，施用氮肥和浇水以提高抽穗数量；其次在抽穗当年返青后施用氮肥以提高穗长、小花数、结实粒数和结实率。

参 考 文 献：

[1] 陈宝书. 牧草饲料作物栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
Chen B S. The cultivation of forage crop [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001.

[2] 陈晓光, 苏占胜, 郑广芬, 等. 宁夏气候变化的事实分析[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(6): 43–47.
Chen X G, Su Z S, Zheng G F, *et al*. Analysis on climatic changes in Ningxia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(6): 43–47.

[3] 马红彬, 谢应忠. 宁夏中部干旱带草地生态农业体系建设研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 180–184.
Ma H B, Xie Y Z. Studies on construction of grassland agro-ecosystem in the drought region of middle Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 180–184.

[4] 牛书丽, 蒋高明. 人工草地在退化草地恢复中的作用及其研究现状[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1662–1666.
Niu S L, Jiang G M. Function of artificial grassland in restoration of degraded natural grassland and its research advance [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(9): 1662–1666.

[5] 李颖, 毛培胜. 牧草种子老化生理与修复研究进展[J]. 种子, 2013, 32(11): 48–53.
Li Y, Mao P S. Research progress on seed aging physiology and repair of forage seeds [J]. Seed, 2013, 32(11): 48–53.

[6] 张兆军, 张继涛, 王俊峰, 等. 羊草根茎顶芽分化组织分化的动态研究[J]. 草业学报, 2008, 17(1): 71–79.
Zhang Z J, Zhang J T, Wang J F, *et al*. A study on differentiation dynamics of Leymus chinensis rhizome apical bud meristems [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(1): 71–79.

[7] 王昱生. 羊草(*Leymus chinensis*)种群无性系种群动态的初步研究[J]. 生态学报, 1993, 4(13): 291–299.
Wang Y S. Dynamics of a colonel *Leymus chinensis* population in the Songnen Steppe in northeastern China [J]. Acta Ecology Sinica, 1993, 4(13): 291–299.

[8] Wang J F, Xie J F, Zhang Y T, *et al*. Methods to improve seed yield of Leymus chinensis based on nitrogen application and precipitation analysis [J]. Agronomy Journal, 2010, 102: 277–281.

[9] Wang J F, Li X Y, Li Z L, *et al*. Impacts of fall nitrogen application on seed production in *Leymus chinensis*, a rhizomatous perennial grass [J]. Agronomy Journal, 2013, 105(5): 1378–1384.

[10] 高朋, 李聪, 陈本建, 等. 施氮对老芒麦种子产量及其构成因子和种子活力的影响[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2010, (2): 126–131.
Gao P, Li C, Chen B J, *et al*. Effects of nitrogen fertilizer on seed yield, seed constitutive factors and seed vigor of *Elymus sibiricus* L [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2010, (2): 126–131.

[11] 江生泉, 李德荣, 韩建国, 等. 春季分施氮肥对新麦草种子产量及氮肥利用率的影响[J]. 草地学报, 2008, 16(5): 512–517.
Jiang S Q, Li D R, Han J G, *et al*. The effects of split-nitrogen application in spring on seed yield and nitrogen use efficiency in Russian wildrye [J]. Acta Agrestia Sinica, 2008, 16(5): 512–517.

[12] 马春晖, 韩建国, 张玲, 等. 施氮肥对高羊茅种子质量和产量组成的影响[J]. 草业学报, 2003, 12(6): 74–78.
Ma C H, Han J G, Zhang L, *et al*. Effect of nitrogen fertilizer application on seed quality and yield components of tall fescue in Xinjiang [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2003, 12(6): 74–78.

[13] 张锦华, 李青丰, 李显利. 旱作老芒麦种子产量构成因子的研究[J]. 中国草地, 2000, (6): 34–37.
Zhang J H, Li Q F, Li X L. Studies on the seed yield components of *Elymus sibiricus* without irrigation [J]. Grassland of China, 2000, (6): 34–37.

[14] 张小甫, 李锦华, 田福平, 等. 西藏拉萨地区不同施氮量对鸭茅产量的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(7): 192–195.

Zhang X F, Li J H, Tian F P, *et al*. Influence of different nitrogen fertilization on orchardgrass yield in the Lhasa area of Tibet [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2011, 20(7): 192–195.

[15] 房丽宁, 韩建国, 王培, 董君. 氮肥、植物生长调节剂和环境因素对无芒雀麦种子生产的影响[J]. 中国草地, 2001, 23(4): 31–36.
Fang L N, Han J G, Wang P, Dong J. Seed yield response of smooth brome to nitrogen, plant growth regulator and environmental influences [J]. Grassland of China, 2001, 23(4): 31–36.

[16] 马春晖, 韩建国, 孙洁峰, 等. 施氮肥对播种和分栽结缕草种子产量及其构成因素的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(9): 1328–1333.
Ma C H, Han J G, Sun J F, *et al*. Effects of nitrogen fertilizer on Zoysiagrass (*Zoysia japonica* Steud.) seed yields and yield components from seeding and transplanting [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(9): 1328–1333.

[17] 杨允菲, 杨利民, 张宝田, 李建东. 东北草原羊草种群种子生产与气候波动的关系[J]. 植物生态学报, 2001, 25(3): 337–343.
Yang Y F, Yang L M, Zhang B T, Li J D. Relationships between seed production in *Leymus chinensis* and climatic variation in natural meadows in northeastern China [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(3): 337–343.

[18] 宋江湖, 呼天明, 王佺珍, 等. 施N量与西藏野生垂穗披碱草种子产量及产量因子的相关性分析[J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2008, 36(5): 22–26.
Song J H, Hu T M, Wang Q Z, *et al*. Correlation analysis of nitrogen application rate and Tibetan wild *Elymus nutans* seed yield and its yield factors [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2008, 36(5): 22–26.

[19] Mohamed A R A. Nitrogen accumulation, seed yield and water use of three grain legumes species grown under different water regimes [J]. Egyptian Journal of Agronomy, 1999, 20: 1–3.

[20] 徐荣, 韩建国, 毛培胜, 等. 施肥对草坪型高羊茅种子产量及其组成的影响[J]. 草地学报, 2001, 9(2): 137–142.
Xu R, Han J G, Mao P S, *et al*. Effect of fertilization on the seed yield and yield component of Tall Fescue [J]. Acta Agrestia Sinica, 2001, 9(2): 137–142.

[21] 王俊峰, 穆春生, 张继涛, 等. 施肥对羊草有性生殖影响的研究[J]. 草业学报, 2008, 3(17): 53–58.
Wang J F, Mu C S, Zhang J T, *et al*. Effects of fertilizer on the sexual reproduction of *Leymus chinensis* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 3 (17): 53–58.

[22] Benson E J, Hartnett D C, Mann K H. Belowground bud banks and meristem limitation in tallgrass prairieplant populations [J]. American Journal of Botany, 2004, 91(3): 416–421.

[23] Dalgleish H J, Hartnett D C. Below-ground bud banks increase along a precipitation gradient of the North American Great Plains: a test of the meristem limitation hypothesis [J]. New Phytologist, 2006, 171(1): 81–89.

[24] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production [J]. Science, 2001, 291(5503): 481–484.

[25] Rogers W E, Hartnett D C. Temporal vegetation dynamics and recolonization mechanisms on different-sized soil disturbances in tallgrass prairie [J]. American Journal of Botany, 2001, 88(9): 1634–1642.

[26] Ryle G J A. The influence of date of origin of the shoot and level of nitrogen on ear size in three perennial grasses [J]. Annual Applied Biological, 1964, 53: 311–323.

[27] Wang R Z, Ripley E A, Zu Y G, *et al*. Demography of sexual and biomass allocation of grassland and dune Leymus chinensis: An analog for response to environment change [J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49: 289–299.

[28] 乔安海, 韩建国, 巩爱岐, 等. 氮肥对垂穗披碱草种子产量和质量的影响[J]. 草地学报, 2006, 14(1): 48–51.
Qiao A H, Han J G, Gong A Q, *et al*. Effect of nitrogen fertilizer application on *Elymus Nutans* seed quality and yield in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2006, 14(1): 48–51.

[29] Hill M J, Watkin B R. Seed production studies on perennial ryegrass, timothy and prairie grass [J]. Grass and Forage Science, 1975, 30(2): 131–140.

[30] 陈志宏, 韩建国, 陈会敏, 等. 施氮对高羊茅种子产量组分和产量的影响[J]. 草地学报, 2005, 13(3): 215–218.
Chen Z H, Han J G, Chen H M *et al*. Effect of fertilizer-N on Tall Fescue seed yield and yield components of seed crop [J]. Acta Agrestia Sinica, 2005, 13(3): 215–218.

[31] 赵利, 王明亚, 毛培胜, 等. 不同氮磷处理对老芒麦种子产量、产量组分及根系的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(4): 662–668.
Zhao L, Wang M Y, Mao P S, *et al*. Selected nitrogen and phosphorus fertilizer applications affect seed yield, seed yield components and roots of *Elymus sibiricus* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(4): 662–668.

[32] 龙忠富, 刘华荣, 杨义成, 等. 氮肥对不同种植方式百喜草种子产量及其构成因素的影响[J]. 贵州农业科学, 2010 (9): 70–73.
Long Z F, Liu H R, Yang Y C, *et al*. Effects of nitrogen fertilizer on seed yield and yield components in of *Paspalum notatum* under different cropping patterns [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2010, (9): 70–73.

[33] 祝廷成. 羊草生物生态学[M]. 长春: 吉林科技技术出版社. 2004.
Zhu T C. Bioecology of *Leymus chinensis* [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 2004.

[34] 孙铁军, 韩建国, 赵守强, 岳薇. 施肥对新麦草种子产量及产量组分的影响[J]. 中国草地, 2005, 27(2): 16–21.
Sun T J, Han J G, Zhao S Q, Yue W. Effect of fertilizer on seed yield and yield components of Psathyrostachys juncea [J]. Grassland of China, 2005, 27(2): 16–21.

[35] 马春晖, 韩建国, 孙洁峰, 张泉. 火烧、施氮肥对结缕草种子产量和质量的影响[J]. 草地学报, 2007, 15(2): 113–117.
Ma C H, Han J G, Sun J F, Zhang Q. Effects of burning and nitrogen application on seed production and seed quality of *Zoysia grass* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2007, 15(2): 113–117.