DOI: 10. 11686/cyxb2025375
http://cyxb. magtech. com. cn
余琰昊, 闫萌, 牛浴林, 等. 氮磷运筹对环青海湖地区寒生羊茅种子生产的影响. 草业学报, 2026, 35(9): 22－33.
YU Yan-hao, YAN Meng, NIU Yu-lin, *et al*. Effects of nitrogen and phosphorus management on seed production of *Festuca kryloviana* in the Qinghai Lake region. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(9): 22－33.

氮磷运筹对环青海湖地区寒生羊茅种子生产的影响

余琰昊, 闫萌, 牛浴林, 秦燕*
(青海大学畜牧兽医科学院, 青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要: 探明氮磷配施措施对寒生羊茅种子产量的影响, 以期为种子生产提供理论依据和技术支撑。采用双因素随机区组试验设计, 在环青海湖地区开展了连续两年的寒生羊茅施肥试验, 设置 4 个氮肥水平和 3 个磷肥水平, 对 3 龄和 4 龄寒生羊茅种子产量及构成因子与经济效益进行了测定和分析。结果表明: 氮磷配施显著改善寒生羊茅农艺性状, 株高、茎粗、干草产量及穗长较对照均有不同程度提升, 其中株高在不同年份最优处理下分别达 107. 4、110. 5 cm, 茎粗最优处理下两年分别为 1. 1、1. 3 mm, 干草产量最优处理下两年分别达 6. 27、6. 41 t·hm^{-2}, 穗长最优处理下两年分别为 14. 5、15. 9 cm; 氮磷配施同时显著调控种子产量构成因子, 生殖枝数随施氮量的增加呈“先增后减”趋势, 最优处理下较对照分别提升 71. 8%、49. 6%, 千粒重对磷肥响应显著, 最优处理下较对照分别提升 23. 58%、13. 98%, 且相关性分析表明实际种子产量与生殖枝数、千粒重呈极显著正相关($P<0.01$)关系; 不同类型种子产量均受氮磷调控, 潜在种子产量、表现种子产量、实际种子产量在各年份最优处理下较对照均有明显提升, 其中实际种子产量 2023 年最优处理达 0. 92 t·hm^{-2}, 2024 年最优处理达 0. 78 t·hm^{-2}; 经济效益方面, 2023 年最高增收达 5. 72×10^3 CNY·hm^{-2}、最高肥料贡献率达 38. 96%, 2024 年最高增收达 2. 80×10^3 CNY·hm^{-2}、最高肥料贡献率达 23. 26%, 且氮肥 120 kg·hm^{-2}与磷肥 600 kg·hm^{-2}配施处理两年经济效益均稳定高效; 综合寒生羊茅种子产量及产量组分指标的隶属函数分析结果表明, 氮肥 120 kg·hm^{-2}与磷肥 600 kg·hm^{-2}配施为研究区最优施肥方案。

关键词: 寒生羊茅; 氮磷配施; 种子产量; 肥料贡献率; 经济效益

Effects of nitrogen and phosphorus management on seed production of *Festuca kryloviana* in the Qinghai Lake region

YU Yan-hao, YAN Meng, NIU Yu-lin, QIN Yan*
Academy of Animal and Veterinary Science, Qinghai University, Qinghai Provincial Key Laboratory of Germplasm Resources Utilization of Excellent Forage Grass on the Qinghai-Tibet Plateau, Xining 810016, *China*

Abstract: The aim of this study was to investigate the effects of combined nitrogen (N) and phosphorus (P) application on the seed yield of *Festuca kryloviana*, with an overall goal to provide a theoretical basis and technical support for its seed production. A field experiment with a two-factor randomized complete block design was conducted over two consecutive years in the Qinghai Lake region. *F. kryloviana* was cultivated under four nitrogen application levels and three phosphorus application levels, and the seed yield, its component factors, and economic benefits of 3-year-old (2023) and 4-year-old (2024) *F. kryloviana* were determined and analyzed. The results show that the combined application of N and P significantly improved the agronomic traits of *F. kryloviana*. All treatment

收稿日期: 2025-09-16; 改回日期: 2025-11-03
基金项目: 中央财政林草科技推广示范项目(青[2023]TG01)和现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-34)资助。
作者简介: 余琰昊(2000－), 男, 四川乐山人, 硕士。E-mail: 283649052@qq. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: mule119@163. com

groups showed increases in plant height, stem diameter, hay yield, and spike length compared with the control, although the magnitude of these increases varied. Specifically, under optimal treatments in 2023 and 2024, the maximum plant height reached 107.4 and 110.5 cm, respectively; the stem diameter reached 1.1 and 1.3 mm, respectively; the hay yield reached 6.27 and 6.41 t·ha^{-1}, respectively; and the spike length reached 14.5 and 15.9 cm, respectively. The combined application of N and P also significantly affected seed yield components. The number of reproductive branches initially increased and then decreased as the N application rate increased, and in 2023 and 2024 shoot numbers were increased by 71.8% and 49.6%, respectively, in the optimal treatments compared with the control group. The 1000-seed weight showed a significant response to P application, with increases of 23.58% and 13.98% in 2023 and 2024, respectively, in the optimal treatments compared with the control group. Correlation analyses indicated that the actual seed yield had extremely significant positive correlations with the number of reproductive branches and 1000-seed weight ($P<0.01$). Furthermore, different seed yield indexes (potential seed yield, expressed seed yield, and actual seed yield) were all regulated by N and P. Each year, the seed yields were obvious higher in the optimal treatments than in the control group. The actual seed yield reached 0.92 t·ha^{-1} in the optimal treatment in 2023 and 0.78 t·ha^{-1} in the optimal treatment in 2024. In terms of economic benefits, in 2023, the maximum yield increase was 5.72×10^3 CNY·ha^{-1}, and the maximum fertilizer contribution rate was 38.96%; in 2024, the maximum yield increase was 2.80×10^3 CNY·ha^{-1}, and the maximum fertilizer contribution rate was 23.26%. Notably, the treatment with 120 kg·ha^{-1} N combined with 600 kg·ha^{-1} P resulted in stable and high economic benefits in both years. A membership function analysis of seed yield and its components revealed that the combined application of 120 kg·ha^{-1} N and 600 kg·ha^{-1} P is the optimal fertilization scheme for this crop in this study area.

Key words: *Festuca kryloviana*; nitrogen-phosphorus combined application; seed yield; fertilizer contribution rate; economic benefit

青藏高原是地球的第三极[1],被誉为“亚洲水塔”[2],随着我国对青藏高原生态保护力度的加大,一系列生态建设工程的实施,对草种尤其是乡土草种的需求量激增。寒生羊茅(*Festuca kryloviana*)是通过全国草品种审定委员会审定登记的野生栽培品种,具有抗寒耐旱、耐贫瘠、青绿期长、根系发达、长寿命等特点,是适宜高寒区生态保护修复和人工草地建植的优选草种[3]。然而,寒生羊茅种子通常在秋季播种,并且第3年才有种子结实,种子产量与质量较低是制约其推广应用的关键因素。

氮、磷是植物生长发育必需的元素,在提高作物产量和品质方面发挥着积极作用[4-5]。同时,氮磷运筹对植物形态建成、生物量分配、种子形成以及肥料利用率等方面都有重要影响[6-7]。氮素是植物蛋白质、核酸、叶绿素、酶以及多种维生素的组成成分[8-9],在植物生长过程中表现活跃,具有移动性大、再利用率高的特点[10]。磷素是构成植物体多种重要化合物的成分,参与糖类、蛋白质和脂肪等多种代谢过程[11-12]。有关禾本科牧草施肥管理方面的研究表明,施氮肥有利于牧草植株发育[13]、干物质积累[14]和种子产量[15],磷肥能促进牧草分蘖和根系的生长[16-17]。刘启林等[8]的研究发现,氮肥、磷肥对老芒麦(*Elymus sibiricus*)株高、分蘖数、茎叶比及生殖枝数均有显著影响,并且以 60 kg N·hm^{-2}与 60 kg P·hm^{-2}配施,老芒麦饲草产量最高。石正海等[18]的研究发现氮磷肥对寒生羊茅种子生产有显著影响,施氮肥降低单位面积籽粒数和种子产量;施磷肥增加生殖枝数和单序籽粒数,提高种子产量;并推荐保水剂 30 kg·hm^{-2}与过磷酸钙 30 kg·hm^{-2}配合使用,种子产量可达 560 kg·hm^{-2}。鲍根生等[19]的研究认为,在青海海东地区当施用 75 kg N·hm^{-2}与 105 kg P·hm^{-2}时,燕麦(*Avena sativa*)的各项生产指标表现最好。左岩[20]在呼和浩特研究发现增施氮肥可明显提高3个羊茅(*Festuca*)品种(系)的种子产量。可见,氮磷肥对于禾本科草种饲草生产和种子生产至关重要,制定合理的氮磷配比应根据土壤养分状况、气候条件、作物种类及产量、品质要求综合考虑,才能达到高产优质、经济有效的目的。

团队前期已对寒生羊茅种子产量以及肥料利用效率进行了初步研究，发现寒生羊茅种子产量对磷肥敏感[18,21-22]。在此基础上，本研究采用速效磷肥喷施代替过磷酸钙基施，并增加氮磷肥施量范围和梯度，研究不同氮磷配施处理下寒生羊茅种子产量及构成因子的影响，并结合经济效益分析，筛选出适宜环青海湖地区寒生羊茅的最佳施肥量，为草种业发展及生态保护修复工程提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于青海省海北藏族自治州海晏县青海湖乡达玉日秀村海北州农牧综合服务中心试验基地(37°01′ N，100°51′ E)，海拔3156 m。该区域属于典型的高原大陆性气候，太阳辐射强，昼夜温差大。试验地多年平均气温0.9 ℃、降水量403 mm、蒸发量1432 mm，无绝对无霜期，积温为1856 ℃。土壤类型为栗钙土，试验地土壤pH 8.1，有机质4.56%，全氮0.45%，全磷(P_2O_5)0.18%。试验地2023和2024年月均气温以及降水量如图1所示。

1.2 试验设计

寒生羊茅种子生产大田试验于2021年7月中旬进行建植，150 kg·hm^{-2}磷酸二铵作为基肥，播种方式为人工条播，播量为12 kg·hm^{-2}，播深2～3 cm，行距为50 cm，小区间设1 m过道。种植当年不进行人工除草。2022年，在返青期通过移栽方式补齐断行，于拔节期追施75 kg·hm^{-2}尿素，分别在返青期、孕穗期、乳熟期人工除杂3次。

采用双因素随机区组试验设计(表1)，氮肥[尿素(N≥46%)]设4个水平；磷肥(磷酸二氢钠)设3个水平，12个处理，3次重复，共36个小区，小区面积3.0 m×3.5 m。分别于2023、2024年连续两年进行施肥处理，氮肥于返青期(4月下旬)开沟施入；磷肥在孕穗、抽穗期(6月中下旬)，选择傍晚无风天气间隔10 d分两次进行叶面喷施(称取分析纯磷酸二氢钠，按0.3%的重量浓度兑水溶解，充分混匀后即可使用)。分别在返青期、孕穗期人工除杂2次。

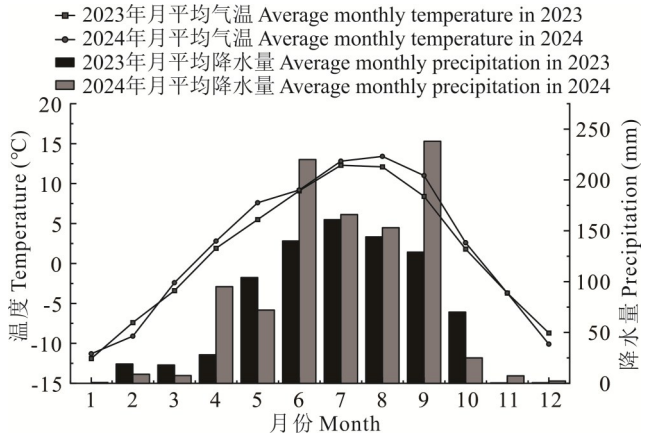


图1 试验地2023和2024年月平均气温和降水量

Fig. 1 Average monthly temperature and precipitation in the experimental area in 2023 and 2024

表1 试验施肥处理

Table 1 Fertilizer treatments of the experiment (kg·hm^{-2})

处理 Treatment	氮肥施量 Nitrogen fertilizer application	磷肥施量 Phosphorus fertilizer application	处理 Treatment	氮肥施量 Nitrogen fertilizer application	磷肥施量 Phosphorus fertilizer application
N_0P_0	0	0	N_2P_0	120	0
N_0P_1	0	300	N_2P_1	120	300
N_0P_2	0	600	N_2P_2	120	600
N_1P_0	60	0	N_3P_0	180	0
N_1P_1	60	300	N_3P_1	180	300
N_1P_2	60	600	N_3P_2	180	600

1.3 测定指标

寒生羊茅的开花期(7月上旬)时，在各小区随机选择10个生殖枝测定株高、茎粗、每生殖枝小穗数、每穗小花数；成熟期(8月中下旬)时，在各小区随机选择10个生殖枝测定穗长、每穗粒数。各小区随机选择3个1 m样段测定生殖枝数[21]。收获时各小区随机选择3个1 m×1 m的样方将脱粒后的草样风干测定干草产量。随机挑选种子1000粒，重复3次测得种子千粒重。参照宋建超[23]的方法计算寒生羊茅的潜在种子产量和表现种子产量，公式如下：

$$\text{潜在种子产量} = \text{生殖枝数} \times \text{小穗数} \times \text{小花数} \times \text{千粒重} \times 10^{-2}$$

$$\text{表现种子产量} = \text{生殖枝数} \times \text{小穗数} \times \text{每穗粒数} \times \text{千粒重} \times 10^{-2}$$

实际种子产量在成熟期(8月中下旬)收获脱粒风干、清选后称重。参照刘启林等[8]的方法计算寒生羊茅的经济收益，公式如下：

经济效益(CNY·hm^{-2})=种子产量(kg·hm^{-2})×种子价格(CNY·kg^{-1})+干草产量(kg·hm^{-2})×干草价格(CNY·kg^{-1})−肥料费(CNY·hm^{-2})−人工费(CNY·hm^{-2})

增收=施肥区经济产量(CNY·hm^{-2})−对照区经济产量(CNY·hm^{-2})

肥料贡献率(%)=[施肥区经济产量(CNY·hm^{-2})−对照区经济产量(CNY·hm^{-2})]/施肥区经济产量(CNY·hm^{-2})×100

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 对试验数据进行初步整理,用 SPSS 22.0 软件进行方差分析和显著性检验,用 Duncan 法进行多重比较,评估氮、磷及其交互作用对产量构成因子的影响,用 Origin 2025 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷添加对寒生羊茅农艺性状的影响

氮肥对寒生羊茅的株高、茎粗和干草产量有极显著的影响($P<0.001$,表 2);磷肥对株高、茎粗和穗长有显著影响($P<0.05$);年份对株高、茎粗、穗长有极显著影响($P<0.001$),氮肥和磷肥的交互作用对茎粗和穗长有极显著的影响($P<0.001$);氮肥和年份的交互作用对于株高、茎粗以及穗长有显著影响($P<0.05$);磷肥和年份的交互作用对茎粗有显著影响($P<0.05$)。株高在 N_2P_2(2023 年)和 N_2P_0(2024 年)处理下较大,分别为 107.4 和 110.5 cm,较 N_0P_0 分别提升了 10.3% 和 15.1%。在相同施磷的情况下,株高随着施氮量的增加呈现先增后减的趋势;N_2P_0 处理下的茎粗最大,分别为 1.1(2023 年)和 1.3 mm(2024 年),较 N_0P_0 分别提升了 44.7% 和 64.5%;干草产量在 N_2P_2(2023 年)和 N_3P_1(2024 年)处理下较大,分别为 6266.6 和 6414.2 kg·hm^{-2},较 N_0P_0 分别提升了 41.3% 和 30.4%;氮磷处理均显著提高了两年的穗长,均在 N_0P_2 处理下最大,分别为 14.5 和 15.9 cm,较 N_0P_0 分别提升了 16.7% 和 14.6%(图 2)。

表 2 年际间不同氮磷添加下寒生羊茅农艺性状的方差分析

Table 2 Interannual analysis of variance (ANOVA) of agronomic traits in *F. kryloviana* under different nitrogen and phosphorus additions

因子 Factors	株高 Plant height		茎粗 Stem diameter		干草产量 Hay yield		穗长 Spike length	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
氮肥 Nitrogen fertilizer (N)	27.931	<0.001	49.085	<0.001	7.987	<0.001	1.701	0.167
磷肥 Phosphorus fertilizer (P)	4.112	0.017	5.526	0.005	0.167	0.847	3.741	0.025
年份 Year (Y)	29.026	<0.001	65.652	<0.001	6.704	0.011	35.282	<0.001
氮肥×磷肥 N×P	2.613	0.018	4.673	<0.001	1.961	0.075	6.000	<0.001
氮肥×年份 N×Y	3.786	0.011	4.036	0.008	0.632	0.595	4.730	0.003
磷肥×年份 P×Y	0.345	0.708	4.736	0.010	0.484	0.617	0.407	0.666
氮肥×磷肥×年份 N×P×Y	1.280	0.266	0.367	0.899	0.810	0.564	1.748	0.110

2.2 不同氮磷添加对寒生羊茅产量构成因子的影响

氮肥对生殖枝数和种子千粒重有极显著的影响($P<0.001$,表 3);磷肥对小花数和小穗数有极显著的影响($P<0.001$);年份对生殖枝数、小花数、小穗数和千粒重有极显著的影响($P<0.001$);氮肥和年份的交互作用对生殖枝数有极显著的影响($P<0.001$),对种子千粒重有显著影响($P<0.05$);磷肥和年份的交互作用对生殖枝数有显著的影响($P<0.05$);三者的交互作用仅对生殖枝数有显著的影响($P<0.05$)。

氮磷肥配施影响寒生羊茅种子产量的构成因子(图 3),随着氮磷肥施用量的增加,生殖枝数呈现先增后减的趋势,除 2023 年 N_1P_2 处理之外,相同施磷梯度下,施氮处理组的生殖枝数均显著高于不施氮对照组($P<0.05$),2023 年在 N_2P_1 处理下最大,2024 年在 N_2P_2 处理下最大,分别较 N_0P_0 提高了 71.8% 和 49.6%。在相同氮磷配施处理下,2024 年寒生羊茅的生殖枝数多数高于 2023 年。在相同施磷条件下,多数处理随着施氮量的增加,小花数也

随之增加，在2023年N_2P_0及2024年N_2P_2处理下最大。小穗数的变化趋势与小花数基本一致。2024年，在P_1条件下，中氮(N_2)与高氮(N_3)处理的小穗数分别增至24.7和27.5，相较于对照处理组，增幅分别为28.6%和43.2%。每穗粒数在2023年于N_2P_0(6.73粒)与N_3P_0(6.53粒)处理下表现较优，但至2024年，各处理该指标普遍下降，降幅为12.8%～19.3%，其中N_2P_2处理降至5.73粒。此外，施氮增加了千粒重，在2023年试验中，同一磷梯度下N_0处理的千粒重均低于所有施氮处理。其中，2023年N_3P_1的千粒重最高，为0.74 g，较N_0P_0提高了23.58%。2024年N_2P_0最高，为0.64 g，较N_0P_0提高了13.98%。

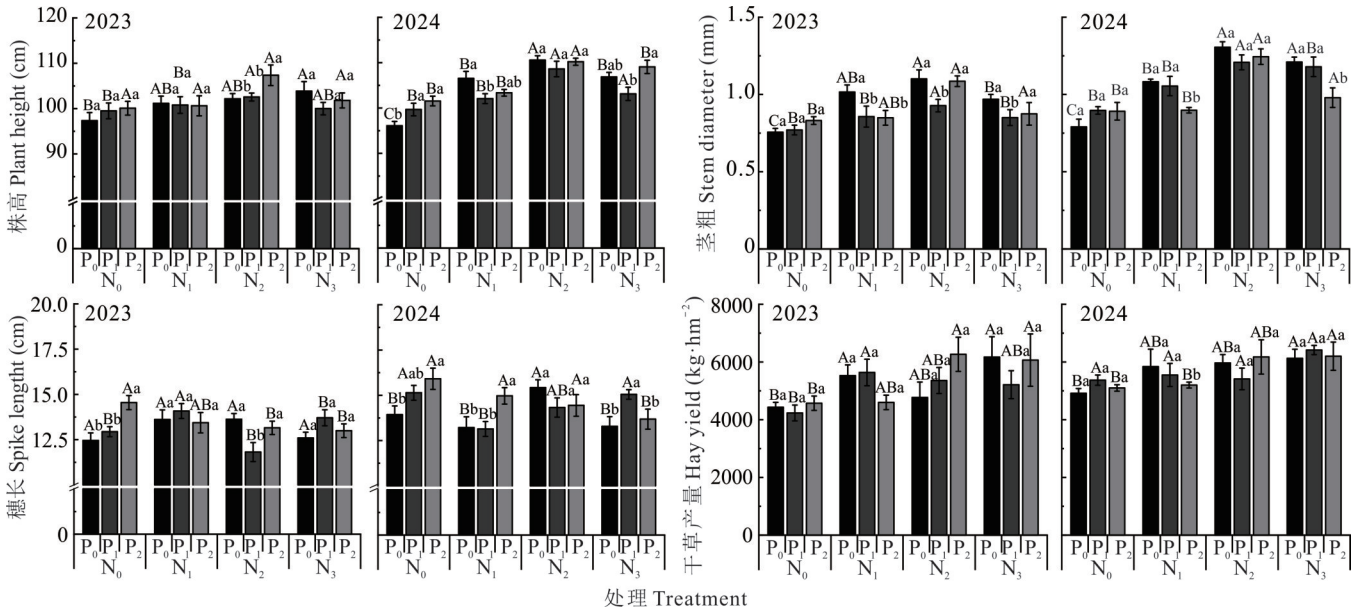


图2 2023和2024年不同施肥处理下寒生羊茅的农艺性状

Fig. 2 Agronomic traits of *F. kryloviana* under different fertilization treatments in 2023 and 2024

不同大写字母表示同一磷水平下氮处理间差异显著，不同小写字母表示同一氮水平下磷处理间差异显著($P<0.05$)。Different uppercase letters indicate significant differences among nitrogen treatments at the same phosphorus level, and different lowercase letters indicate significant differences among phosphorus treatments at the same nitrogen level ($P<0.05$).

表3 年际间不同氮磷添加下寒生羊茅种子产量构成要素的方差分析

Table 3 Interannual analysis of variance (ANOVA) of seed yield components of *F. kryloviana* under different nitrogen and phosphorus additions

因子 Factors	生殖枝数 Number of reproductive branches		小花数 Number of florets		小穗数 Number of spikelet		每穗粒数 Number of grains per panicle		千粒重 1000-seed weight	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
氮肥 Nitrogen fertilizer (N)	26.758	<0.001	4.655	0.004	2.041	0.112	4.050	0.009	8.251	<0.001
磷肥 Phosphorus fertilizer (P)	3.071	0.050	41.967	<0.001	60.192	<0.001	10.523	0.002	3.626	0.030
年份 Year (Y)	18.999	<0.001	43.130	<0.001	59.184	<0.001	10.170	0.002	123.208	<0.001
氮肥×磷肥 N×P	1.132	0.348	0.363	0.901	1.225	0.298	0.296	0.938	1.996	0.072
氮肥×年份 N×Y	6.363	<0.001	0.817	0.487	3.040	0.032	0.737	0.532	3.937	0.010
磷肥×年份 P×Y	3.207	0.044	0.187	0.829	1.683	0.190	0.950	0.390	2.640	0.076
氮肥×磷肥×年份 N×P×Y	3.522	0.003	1.009	0.423	0.784	0.584	0.550	0.769	1.698	0.127

2.3 不同氮磷添加对寒生羊茅种子产量的影响

施用氮肥对寒生羊茅的潜在种子产量、表现种子产量以及实际种子产量均有极显著的影响($P<0.001$，表

4)；磷肥对于寒生羊茅的潜在种子产量和表现种子产量有显著的影响($P<0.05$)；年份对寒生羊茅的潜在种子产量有显著影响($P<0.05$)；氮肥和磷肥的交互作用对实际种子产量有显著影响($P<0.05$)。

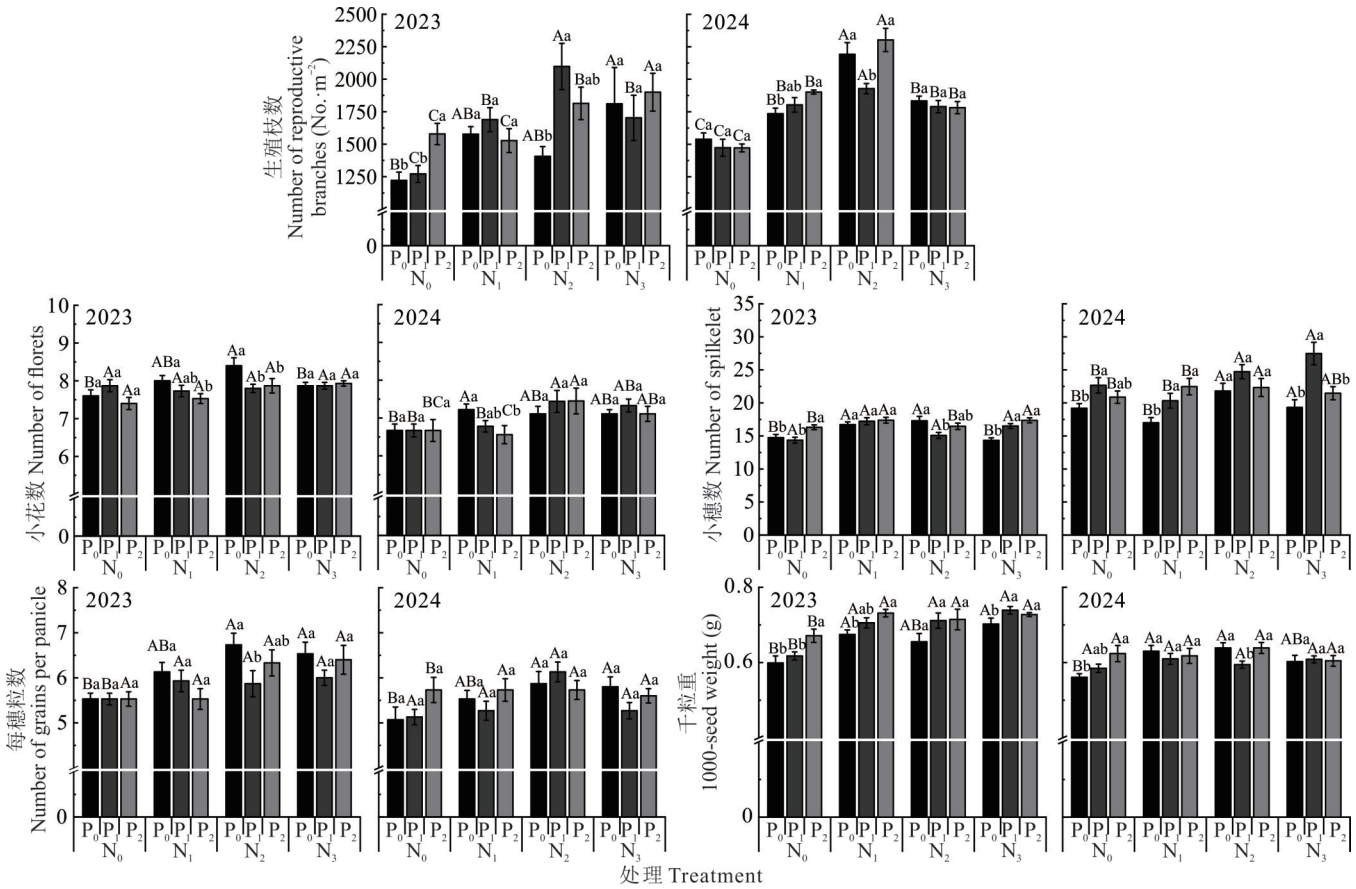


图 3　年际间不同处理对寒生羊茅种子产量构成因素的影响

Fig. 3　Effects of different treatments on seed yield components of *F. kryloviana* across years

表 4　年际间不同氮磷添加下寒生羊茅种子产量的方差分析

Table 4　Interannual analysis of variance (ANOVA) of seed yield in *F. kryloviana* under different nitrogen and phosphorus additions

因子 Factors	潜在种子产量 Potential seed yield		表现种子产量 Expressed seed yield		实际种子产量 Actual seed yield	
	F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
氮肥 Nitrogen fertilizer (N)	12.979	<0.001	8.817	<0.001	16.431	<0.001
磷肥 Phosphorus fertilizer (P)	6.722	0.004	4.984	0.015	0.934	0.406
年份 Year (Y)	5.336	0.029	2.916	0.100	2.438	0.131
氮肥×磷肥 N×P	0.379	0.886	0.339	0.910	3.807	0.007
氮肥×年份 N×Y	0.811	0.500	0.351	0.789	2.083	0.127
磷肥×年份 P×Y	2.500	0.102	0.396	0.677	0.643	0.534
氮肥×磷肥×年份 N×P×Y	0.819	0.525	0.773	0.553	1.024	0.413

氮磷施肥处理提高了寒生羊茅的潜在种子产量、表现种子产量以及实际种子产量(表 5)。两年间，不同氮磷添加下的潜在种子产量均明显高于 N_0P_0。2023 年在 N_2P_1 处理下潜在种子产量最大，为 2010.88 kg·hm^{-2}，较 N_0P_0 提高了 134.56%，且多数处理与 N_0P_0 有显著差异($P<0.05$)；2024 年 N_2P_2 潜在种子产量最大，为 2218.73 kg·hm^{-2}，较 N_0P_0 提升 90.5%。氮肥增产效应显著，N_2 水平下各处理平均产量较 N_0 各处理提升 76.5%～134.5%。表

现种子产量2023年在N_3P_2处理下最高，为1680.00 kg·hm^{-2}，而2024年在N_2P_0处理下最大，为1833.31 kg·hm^{-2}，与N_0P_0相比分别提高了136.57%和133.72%。2023和2024年的实际种子产量分别在N_3P_0和N_2P_2处理下最大，为919.17和781.46 kg·hm^{-2}，较N_0P_0分别提高了75.92%和46.87%。

表5 氮磷肥配施对寒生羊茅潜在种子产量、表现种子产量和实际种子产量的影响

Table 5 Effects of combined application of nitrogen and phosphorus fertilizers on the potential seed yield, expressed seed yield, and actual seed yield of *F. kryloviana* (kg·hm^{-2})

处理 Treatments	潜在种子产量 Potential seed yield		表现种子产量 Expressed seed yield		实际种子产量 Actual seed yield	
	2023	2024	2023	2024	2023	2024
N_0P_0 (CK)	857.31±144.46e	1164.72±61.25d	710.14±15.65d	784.40±65.39d	522.50±46.70c	532.08±12.68fg
N_0P_1	885.48±156.31e	1287.15±169.42cd	689.31±73.85d	909.92±130.20cd	517.43±74.27c	373.89±11.27h
N_0P_2	1434.13±226.98cd	1398.54±139.93cd	861.32±51.87d	1117.25±93.70bcd	497.20±103.79c	488.40±11.11g
N_1P_0	1509.74±181.35bcd	1696.27±349.99abcd	1177.58±95.03c	1295.52±237.57bc	675.43±90.49bc	603.86±21.09de
N_1P_1	1692.93±275.93abcd	1402.58±78.48cd	1474.89±143.84ab	1089.22±48.66cd	780.22±230.53ab	604.70±25.08de
N_1P_2	1519.97±363.61bcd	1766.02±231.33abcd	1340.39±271.41bc	1537.64±149.52ab	645.83±96.99bc	639.69±10.41cd
N_2P_0	1513.43±266.93bcd	2125.72±172.60ab	1217.86±83.11c	1833.31±178.15a	668.80±152.78bc	720.00±17.08b
N_2P_1	2010.88±403.47a	1972.63±182.13abc	1483.46±175.66ab	1535.56±111.99ab	746.17±135.17ab	682.54±19.31bc
N_2P_2	1575.40±213.18abcd	2218.73±278.41a	1174.39±115.77c	1803.44±206.55a	823.75±133.60ab	781.46±23.64a
N_3P_0	1325.67±205.64d	1468.02±150.83bcd	1134.88±106.87c	1128.43±103.50bcd	919.17±336.73a	574.60±16.79ef
N_3P_1	1798.34±157.54abc	1864.74±191.77abcd	1448.34±155.28b	1292.63±110.95bc	792.50±147.26ab	657.27±14.50cd
N_3P_2	1946.87±361.48ab	1745.01±147.28abcd	1680.00±45.30a	1267.24±126.17bc	687.20±154.66bc	735.34±31.27ab

同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。In the same column, the different lowercase letters mean significant difference at the 0.05 level.

对2023和2024年两年间寒生羊茅种子产量及其构成要素的相关性分析表明(表6)，除了小穗数和穗长之外，寒生羊茅种子产量构成要素与种子产量均表现出正相关关系。其中，千粒重、生殖枝数、小花数、每穗粒数与种子产量均呈现出极显著正相关($P<0.01$)关系。种子产量和产量构成要素之间的相关性由强到弱依次是生殖枝数、小花数、千粒重、每穗粒数、小穗数和穗长。

表6 寒生羊茅种子产量性状相关性分析

Table 6 Correlation analysis of seed yield traits in *F. kryloviana*

指标 Index	种子产量 Seed yield	千粒重 1000-seed weight	生殖枝数 Number of reproductive branches	小穗数 Number of spikelet	每穗粒数 Number of grains per panicle	小花数 Number of florets	穗长 Spike length
种子产量 Seed yield	1.000	0.298**	0.373**	−0.046	0.289**	0.299**	−0.059
千粒重 1000-seed weight		1.000	−0.078	−0.152*	0.094	0.224**	−0.036
生殖枝数 Number of reproductive branches			1.000	0.228**	0.168*	−0.050	0.050
小穗数 Number of spikelet				1.000	−0.235**	−0.286**	0.458**
每穗粒数 Number of grains per panicle					1.000	0.389**	−0.049
小花数 Number of florets						1.000	0.192**

*表示在0.05水平相关性显著；**表示在0.01水平相关性显著。* indicates significant correlation at the 0.05 level, ** indicates significant correlation at the 0.01 level.

2.4 寒生羊茅种子产量构成因素的综合评价

根据2023和2024年不同氮磷配施处理下的种子产量及产量组分指标的平均值来计算隶属函数值(表7)，隶属函数值越高，表明对寒生羊茅种子产量的正向作用越大。结果得出两年间不同氮磷肥配施处理对寒生羊茅种

子生产影响的排名依次为：N_2P_2>N_3P_2>N_2P_0>N_3P_1>N_3P_0>N_1P_1>N_2P_1>N_1P_0>N_1P_2>N_0P_2>N_0P_1>N_0P_0（2023年）；N_2P_2>N_2P_0>N_2P_1>N_3P_2>N_3P_1>N_3P_0>N_1P_0>N_1P_2>N_1P_1>N_0P_2>N_0P_1>N_0P_0（2024年）。两年的综合分析都表明 N_2（120 kg·hm^{-2}）和 P_2（600 kg·hm^{-2}）的氮磷肥施用量最有利于寒生羊茅种子的生产。

表 7　不同氮磷添加对寒生羊茅种子产量及构成因素的隶属函数值排名

Table 7　Ranking of membership function values for seed yield and its components of *F. kryloviana* under different nitrogen and phosphorus fertilization additions

年份 Year	处理 Treatments	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	平均值 Average	排名 Rank
2023	N_0P_0	0.148	0.000	0.000	0.138	0.200	0.000	0.000	0.069	12
	N_0P_1	0.362	0.216	0.133	0.010	0.467	0.000	0.057	0.178	11
	N_0P_2	0.000	0.274	0.517	0.647	0.000	0.000	0.407	0.264	10
	N_1P_0	0.639	0.379	0.540	0.780	0.600	0.500	0.406	0.549	8
	N_1P_1	0.709	0.345	0.762	0.950	0.333	0.333	0.533	0.566	6
	N_1P_2	0.591	0.328	0.946	1.000	0.133	0.000	0.349	0.478	9
	N_2P_0	0.477	0.482	0.401	0.972	1.000	1.000	0.211	0.649	3
	N_2P_1	0.634	0.520	0.803	0.246	0.400	0.278	1.000	0.554	7
	N_2P_2	1.000	1.000	0.825	0.697	0.467	0.667	0.676	0.762	1
	N_3P_0	0.661	0.650	0.740	0.000	0.467	0.833	0.673	0.575	5
	N_3P_1	0.698	0.266	1.000	0.710	0.467	0.389	0.549	0.583	4
	N_3P_2	0.598	0.446	0.919	0.991	0.533	0.722	0.774	0.712	2
2024	N_0P_0	0.388	0.000	0.000	0.210	0.124	0.000	0.081	0.115	12
	N_0P_1	0.000	0.248	0.307	0.541	0.124	0.062	0.002	0.183	11
	N_0P_2	0.281	0.378	0.807	0.369	0.124	0.625	0.000	0.369	10
	N_1P_0	0.564	0.720	0.886	0.000	0.742	0.437	0.317	0.524	7
	N_1P_1	0.566	0.413	0.627	0.318	0.247	0.188	0.398	0.394	9
	N_1P_2	0.652	0.503	0.730	0.522	0.000	0.625	0.517	0.507	8
	N_2P_0	0.849	1.000	1.000	0.459	0.618	0.750	0.866	0.792	2
	N_2P_1	0.757	0.865	0.429	0.739	0.989	1.000	0.549	0.761	3
	N_2P_2	1.000	0.975	0.999	0.510	1.000	0.625	1.000	0.873	1
	N_3P_0	0.492	0.743	0.534	0.223	0.618	0.688	0.435	0.533	6
	N_3P_1	0.695	0.486	0.611	1.000	0.865	0.188	0.383	0.604	5
	N_3P_2	0.887	0.897	0.560	0.427	0.618	0.500	0.373	0.609	4

R_1～R_7分别表示种子产量、株高、千粒重、小穗数、小花数、每穗粒数和生殖枝数的隶属函数值。R_1－R_7 represent the membership function values of seed yield, plant height, 1000-seed weight, number of spikelet, number of florets, number of grains per panicle and number of reproductive branches, respectively.

2.5　经济效益

为进一步明确施肥对寒生羊茅种子及干草的经济影响，通过计算其经济效益、增收值及肥料贡献率得出以下结果：单施氮肥及氮磷配施处理的增收值均高于不施肥处理，而单施磷肥处理的增收值两年均为负值。从增收值来看，最高值分别出现在2023年的N_3P_0处理和2024年的N_2P_2处理，依次为5723.48和2806.20 CNY·hm^{-2}；单施磷肥处理则相反，2023和2024年的增收值分别低至－1338.07和－2876.42 CNY·hm^{-2}。在处理稳定性方面，N_2P_2表现最优，2023－2024年的经济效益分别为12724.25和12062.40 CNY·hm^{-2}，且肥料贡献率均超过20%，是唯一在两年内均保持高效益的氮磷配施处理。肥料贡献率的最大值同样对应增收值最高的处理，2023年N_3P_0处理和2024年N_2P_2处理的肥料贡献率分别达到38.96%和23.26%，为各处理中的最高值（表8）。

表8 不同氮磷添加对寒生羊茅种子经济效益的影响

Table 8 Effects of different nitrogen and phosphorus additions on the economic benefits of *F. kryloviana* seeds

处理 Treatments	2023			2024		
	经济效益 Economic benefits (CNY·hm^{-2})	增收 Increase income (CNY·hm^{-2})	肥料贡献率 Fertilizer contribution rate (%)	经济效益 Economic benefits (CNY·hm^{-2})	增收 Increase income (CNY·hm^{-2})	肥料贡献率 Fertilizer contribution rate (%)
N_0P_0	8967.50	0.00	0.00	9256.20	0.00	0.00
N_0P_1	8191.45	−776.05	−9.47	6379.78	−2876.42	−45.08
N_0P_2	7629.43	−1338.07	−17.54	7656.00	−1600.20	−20.90
N_1P_0	11154.02	2186.52	19.60	10173.90	917.70	9.02
N_1P_1	12398.55	3431.05	27.67	9739.50	483.30	4.96
N_1P_2	9711.45	743.95	7.66	9799.35	543.15	5.54
N_2P_0	10671.43	1703.93	15.97	11798.00	2541.80	21.54
N_2P_1	11647.69	2680.19	23.01	10709.85	1453.65	13.57
N_2P_2	12724.25	3756.75	29.52	12062.40	2806.20	23.26
N_3P_0	14690.98	5723.48	38.96	9509.57	253.37	2.66
N_3P_1	12143.25	3175.75	26.15	10475.34	1219.14	11.63
N_3P_2	10460.00	1492.50	14.27	11222.10	1965.90	17.52

3 讨论

3.1 氮磷配施对寒生羊茅生长发育的调控及产量构成的影响

氮磷配施对牧草的调控作用贯穿营养生长与生殖生长全过程，既显著改善农艺性状，又定向优化产量构成因子，为种子高产奠定双重基础[24−26]。本研究中，氮磷配施使寒生羊茅的株高、茎粗、干草产量及穗长较对照均有提升，与王辛有等[27]对长穗偃麦草(*Elytrigia elongata*)的研究结论一致。氮素促进蛋白质合成[28]，适量氮磷可扩展光合面积、增强物质积累[29]。施用量达到120 kg·hm^{-2}时寒生羊茅的干草产量便趋于稳定，说明过量的施氮并不能有效提高寒生羊茅的干草产量，这与宋建超等[30]在垂穗披碱草(*Elymus nutans*)上的研究结果一致。Law等[31]的研究认为株高和产量正相关，但是寒生羊茅2024年株高普遍高于2023年，实际种子产量却降低，这一差异可能与两方面因素有关：本试验氮肥开沟施入利用率高，可能导致植株营养生长过旺(如茎秆徒长)，抢占生殖生长所需的光合产物；同时2024年授粉期降水偏多(图1)，抑制花粉活力与授粉效率，进一步加剧结实率下降。此外，本试验结果显示穗长与种子产量呈负相关关系，而周巍[32]认为适度增加穗长有利于粒数增加。出现差异的原因可能是环青海湖地区风力较强，过长穗部易导致植株倒伏，破坏群体通风透光条件，反而降低籽粒灌浆效率[33]；这提示穗长对产量的作用存在适宜范围，超过一定阈值反而不利。在产量构成因子中，生殖枝数与千粒重是影响寒生羊茅种子产量的核心因子，二者与实际产量均呈极显著正相关($P<0.01$)关系。生殖枝数随施氮量增加呈“先增后减”趋势，适量氮肥可促进分蘖芽向生殖枝分化，过量氮则诱导其向营养枝转化[34−35]，与王明亚等[36]对老芒麦研究的氮素调控机制一致；而2024年生殖枝数普遍高于2023年，推测与4龄植株根系更发达、养分吸收能力强于3龄植株有关。磷肥对千粒重有明显影响，可能是因为环青海湖地区栗钙土全磷仅0.18%，属磷限制型土壤，叶面喷施600 kg·hm^{-2}磷肥可弥补土壤磷亏缺，且避免基施磷肥在高寒区易被固定的问题，促进光合产物向籽粒转运[37]，这与石正海等[18]的结论一致。

3.2 氮磷配施对寒生羊茅种子产量与经济效益的影响

石正海等[22]的研究发现配施氮磷肥可提高寒生羊茅种子产量，而综合隶属函数分析与经济效益数据发现，氮肥120 kg·hm^{-2}、磷肥600 kg·hm^{-2}(N_2P_2)是环青海湖地区寒生羊茅种子生产的最优方案，陈懂懂等[38]的研究表明，寒生羊茅生长2年后的土壤有机碳含量降低，无机碳显著增加，土壤总氮严重亏缺，说明寒生羊茅在多年生长

过程中容易发生氮素短缺。而本试验是在第3年开始施肥，弥补了土壤总氮的亏空，因此2023年在施氮量最大时种子产量也有最大值。这一结果与陈志宏等[39]在高羊茅(*Festuca elata*)上的研究相似，均表明在一定氮肥区间内种子产量存在最优值，但是最适施氮量因物种、土壤养分基础和栽培年限不同而存在差异；从产量与经济效益稳定性看，N_2P_2处理虽非单一年份产量最高，但两年实际产量均维持较高水平，且经济效益稳定(两年分别为12724.25、12062.40 CNY·hm^{-2})。对比而言，N_3P_0处理2023年增收最高(5723.48 CNY·hm^{-2})，但2024年增收骤降至253.37 CNY·hm^{-2}，稳定性差；单施磷肥处理两年增收均为负值，说明其对该区域寒生羊茅种子生产无实用价值。从生产实践看，N_2P_2处理稳定的特性，更契合环青海湖地区生态保护与草种规模化生产的双重需求，可为乡土草种高效繁育提供可靠技术支撑。

4　结论

不同氮磷配施比例均显著改善寒生羊茅的株高、茎粗、穗长并提升干草产量，其中以N_2P_2处理最为明显。生殖枝数与千粒重是决定寒生羊茅种子产量的关键因子。综合种子产量与经济效益分析，氮肥120 kg·hm^{-2}与磷肥600 kg·hm^{-2}两年平均实际种子产量达802.61 kg·hm^{-2}，且具有较高的经济效益。故推荐其氮磷运筹方式作为环青海湖地区寒生羊茅高产高效的农艺措施。

参考文献 References：

[1] Qiu J. China: the third pole. Nature, 2008, 454(7203): 393－396.

[2] Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, *et al*. Importance and vulnerability of the world's water towers. Nature, 2020, 577(7790): 364－369.

[3] Shi Z H, Liang G L, Liu W H, *et al*. Overview of research on the adaptability of *Festuca ovina* in alpine regions. Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2019, 49(2): 61－63.
石正海, 梁国玲, 刘文辉, 等. 西北羊茅在高寒地区的适应性研究概况. 青海畜牧兽医杂志, 2019, 49(2): 61－63.

[4] Bartzialis D, Giannoulis K D, Gintsioudis I, *et al*. Assessing the efficiency of different nitrogen fertilization levels on sorghum yield and quality characteristics. Agriculture, 2023, 13(6): 1253.

[5] Peçanha D A, Freitas M S M, Vieira M E, *et al*. Phosphorus fertilization affects growth, essential oil yield and quality of true lavender in Brazil. Industrial Crops and Products, 2021, 170: 113803.

[6] Zhou Y, Li Z Y, Li Y Q, *et al*. Moderate deep banding of phosphorus enhanced winter wheat yield and fertilizer uptake efficiency by promoting nutrient absorption and translocation of pre-anthesis nutrient. Field Crops Research, 2025, 322: 109728.

[7] Zhang B B, Wang Y J, Liu H J, *et al*. Optimal phosphorus management strategies to enhance crop productivity and soil phosphorus fertility in rapeseed-rice rotation. Chemosphere, 2023, 337: 139392.

[8] Liu Q L, Wang X J, Wang J L, *et al*. Effect of nitrogen and phosphorus combined application on forage yield of *Elymus sibiricus* in an alpine region. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(6): 193－202.
刘启林, 王小军, 王金兰, 等. 氮磷配施对高寒区老芒麦饲草产量的影响. 草业学报, 2025, 34(6): 193－202.

[9] Zhao J J, Zheng W, Zhou D Y, *et al*. Effect of endophytic diazotroph on yield and photochemical efficiency of alfalfa under different nitrogen application levels. Pratacultural Science, 2025, 42(4): 980－990.
赵晶晶, 郑伟, 周道媛, 等. 不同施氮水平下植物内生固氮菌对紫花苜蓿产量及光化学效率的影响. 草业科学, 2025, 42(4): 980－990.

[10] Chen L, Wang X L, Mao J P, *et al*. Dynamic changes of fruit development and comprehensive quality evaluation of different yellow-flesh kiwifruit cultivars. Non-wood Forest Research, 2024, 42(1): 220－231.
陈璐, 王小玲, 毛积鹏, 等. 不同黄肉猕猴桃品种果实发育动态变化及品质综合评价. 经济林研究, 2024, 42(1): 220－231.

[11] Shen Q R. Soil and fertilizer sciences. Beijing: Higher Education Press, 2021.
沈其荣. 土壤肥料学通论. 北京: 高等教育出版社, 2021.

[12] Hao H C. Characterization and health assessment of tobacco-planting soils in tobacco-rice rotation in Chenzhou. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2025.
郝汉驰. 郴州烟稻轮作植烟土壤特征与健康评价. 长沙: 中南林业科技大学, 2025.

[13] Xu Z H, Yu H Y, Yang H, *et al*. The effect of nitrogen and phosphorus fertilizer combined application on the yield and nutrition

value in vegetative growth and reproductive growth stages of local *Elymus sibiricus*. China Feed, 2024(19):137－145.
徐正辉, 俞慧云, 杨浩, 等. 营养及生殖生长关键期氮磷肥配施对老芒麦产草量及营养价值的影响. 中国饲料, 2024(19): 137－145.

[14] Zhang X J, Wei J J, Chen C J, *et al*. Optimization of annual nitrogen fertilizer application to increase the productivity of a forage triticale-silage maize multiple cropping system in an irrigated area. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 38－52.
张晓娟, 魏娇娇, 陈彩锦, 等. 氮肥周年优化对灌区饲用小黑麦-青贮玉米复种系统生产力的影响. 草业学报, 2025, 34(4): 38－52.

[15] Xiao A P, Ma R, Wang B, *et al*. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium on seed yield and its components of *Stipa bungeana*. Pratacultural Science, 2026, 43(2): 321－333.
肖爱萍, 马榕, 王斌, 等. 氮磷钾配施对长芒草种子生产性能和发芽特性的影响. 草业科学, 2026, 43(2): 321－333.

[16] Yu A, Yang F, Zhang Y, *et al*. Influences of different phosphorus concentrations on the root distribution of *Stylosanthes* and black seed *Paspalum*. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(3): 219－224.
余爱, 杨帆, 张宇, 等. 不同施磷浓度对柱花草和黑籽雀稗根系分布的影响. 草业学报, 2011, 20(3): 219－224.

[17] Yu X N, Zhu P, Mao P S. Effects of nitrogenous fertilizer and phosphorus fertilizer applications on roots and seed yield of *Elymus sibiricus*. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(4): 637－643.
于晓娜, 朱萍, 毛培胜. 氮磷处理对老芒麦根系及种子产量的影响. 草地学报, 2011, 19(4): 637－643.

[18] Shi Z H, Liu W H, Zhang Y C, *et al*. Combined application of phosphorus fertilizer and super absorbent polymer with low nitrogen fertilizer rate enhanced seed yield of *Festuca kryloviana* Reverd. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(11): 1967－1976.
石正海, 刘文辉, 张永超, 等. 增磷减氮配合保水剂可提高多年生西北羊茅种子产量. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1967－1976.

[19] Bao G S, Zhou Q P, Han Z L. Effects of nitrogen and potassium fertilizer on yield and quality of oat. Pratacultural Science, 2008, 25(10): 48－53.
鲍根生, 周青平, 韩志林. 氮、钾不同配比施肥对燕麦产量和品质的影响. 草业科学, 2008, 25(10): 48－53.

[20] Zuo Y. Effect of fertilizer application type on seed yield and its constitutive factors in three fescue varieties (lines). Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
左岩. 施肥种类对3个羊茅品种(系)种子产量及其构成因子的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.

[21] Shi Z H. The seed formation and biomass distribution response of nitrogen and phosphorus fertilizers in alpine region for the *Festuca ovina*. Xining: Qinghai University, 2020.
石正海. 高寒地区羊茅种子形成和生物量分配对氮磷肥的响应. 西宁: 青海大学, 2020.

[22] Shi Z H, Liu W H, Zhang Y C, *et al*. Seasonal nitrogen and phosphorus co-application enhances productivity of *Festuca kryloviana* cv. Huanhu. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(1): 149－158.
石正海, 刘文辉, 张永超, 等. 季节性氮磷配施提升环湖寒生羊茅生产性能. 草业学报, 2024, 33(1): 149－158.

[23] Song J C. Effect of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer on seed yield, quality of *Elymus nutans* and soil properties of grassland in alpine region. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022.
宋建超. 氮磷钾肥配施对高寒区垂穗披碱草种子产量、质量和土壤特性的影响. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.

[24] Bi Y X, Yang G W, Wei Y Q, *et al*. Low legume-grass seeding ratio combined with phosphorus fertilization promotes forage yield and soil quality in managed grasslands. Agronomy for Sustainable Development, 2024, 44(4): 36.

[25] Shi Y J, Gao S, Zhou D H, *et al*. Fall nitrogen application increases seed yield, forage yield and nitrogen use efficiency more than spring nitrogen application in *Leymus chinensis*, a perennial grass. Field Crops Research, 2017, 214: 66－72.

[26] Wang Y T, Xie J H, Fan F, *et al*. Phosphorus fertilization enhanced overwintering, root system and forage yield of late-seeded alfalfa in sodic soils. Scientific Reports, 2024, 14(1): 18090.

[27] Wang X Y, Cao W X, Wang X J, *et al*. Herbage production and forage quality responses to cutting height and fertilization of legume-grass mixtures in the Hexi region. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(4): 99－110.
王辛有, 曹文侠, 王小军, 等. 河西地区豆禾混播草地生产性能对刈割高度与施肥的响应. 草业学报, 2021, 30(4): 99－110.

[28] Su M, Liu Q J, Zhang Z Z, *et al*. The impact of nitrogen application on antioxidant characteristics of dryland potato leaves and yield in the mountainous region of southern Ningxia, China. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(8): 1341－1354.
苏明, 柳强娟, 张正珍, 等. 施氮量对宁夏南部山区旱地马铃薯叶片抗氧化特性及产量的影响. 中国生态农业学报, 2024,

32(8): 1341－1354.

[29] Chtouki M, Laaziz F, Naciri R, *et al*. Interactive effect of soil moisture content and phosphorus fertilizer form on chickpea growth, photosynthesis, and nutrient uptake. Scientific Reports, 2022, 12(1): 6671.

[30] Song J C, Yu X J, Wei K T, *et al*. Effects of nitrogen application on production performance and nutritional quality of *Elymus nutans* in alpine region. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(7): 1555－1564.
宋建超, 鱼小军, 魏孔涛, 等. 施氮对高寒区垂穗披碱草饲草生产性能及营养品质的影响. 草地学报, 2021, 29(7): 1555－1564.

[31] Law C N, Snape J W, Worland A J. The genetical relationship between height and yield in wheat. Heredity, 1978, 40(1): 133－151.

[32] Zhou W. Study on the effect of wheat field with various foliar fertilizers. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018.
周巍. 多种叶面肥的小麦田间效果研究. 合肥: 安徽农业大学, 2018.

[33] Wen Z R, Liu H S, Xing G W, *et al*. Effects of chemical control agents and spraying time on stalk traits and yield formation of summer maize. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(22): 50－55.
文章荣, 刘汉松, 邢国文, 等. 化控剂和喷施时期对夏玉米茎秆性状和产量形成的影响. 江苏农业科学, 2024, 52(22): 50－55.

[34] Sun T J, Mao P C, Wang C, *et al*. Effect of nitrogen fertilizer and plant growth regulator on fertile tiller development of spring tiller in *Phleum pratense*. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(9): 37－44.
孙铁军, 毛培春, 王超, 等. 氮肥与生长调节剂对猫尾草春季分蘖生殖转化的影响. 中国草地学报, 2025, 47(9): 37－44.

[35] Tian G L, Zhou Y, Sun B, *et al*. Effects of nitrogen and transplanting density on the mechanisms of tillering dynamic of rice. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(4): 896－904.
田广丽, 周毅, 孙博, 等. 氮素及栽培密度影响水稻分蘖动态的机制. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 896－904.

[36] Wang M Y, Mao P S. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizer on seed yield, seed yield components and canopy NDVI of *Elymus sibiricus*. Pratacultural Science, 2014, 31(4): 683－688.
王明亚, 毛培胜. 施氮、磷肥对老芒麦种子产量、产量组分及成熟期冠层 NDVI 值的影响. 草业科学, 2014, 31(4): 683－688.

[37] Chen X X, Zhang W, Liang X Y, *et al*. Physiological and developmental traits associated with the grain yield of winter wheat as affected by phosphorus fertilizer management. Scientific Reports, 2019, 9(1): 16580.

[38] Chen D D, Li Q, Liu Z, *et al*. Effects of 9 forage species on soil properties in the alpine pastoral region of Qinghai Province. Grassland and Turf, 2016, 36(4): 41－47.
陈懂懂, 李奇, 刘哲, 等. 9种牧草对青海同德牧区土壤特性的影响. 草原与草坪, 2016, 36(4): 41－47.

[39] Chen Z H, Han J G, Chen H M, *et al*. Effect of fertilization-N on tall fescue seed yield and yield components of seed crop. Acta Agrestia Sinica, 2005, 13(3): 215－218.
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. 草地学报, 2005, 13(3): 215－218.