

DOI:10.11686/cyxb2024274

http://cyxb.magtech.com.cn

刘耀博, 裴淦, 刘琛琢, 等. 基于Meta分析中国老芒麦种子产量和产量组分对施肥的响应. 草业学报, 2025, 34(6): 85—98.

LIU Yao-bo, PEI Lu, LIU Chen-zhuo, et al. A meta-analysis of fertilizer response of seed yield and seed yield components in *Elymus sibiricus*. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(6): 85—98.

基于Meta分析中国老芒麦种子产量 和产量组分对施肥的响应

刘耀博^{1,2}, 裴淦^{1,2}, 刘琛琢^{1,2}, 李晓霞^{1,2*}, 邹博坤^{1,2*}

(1. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所草原中心, 北京 100091; 2. 青海省三江集团有限责任公司, 青海 西宁 810100)

摘要: 探究不同条件下老芒麦种子产量和产量组分对施肥的响应, 为我国乡土草种老芒麦种子生产提供理论基础。以中国为研究区域, 以不施肥老芒麦为对照, 通过整合分析已发表的相关田间试验数据, 采用整合分析法(Meta-analysis)定量研究老芒麦种子产量和产量组分对施肥的响应及与种植年限、种植行距和区域性因素的关系。结果表明, 施肥可显著提高老芒麦的种子产量($P < 0.001$), 对其产量组分有积极影响, 以单施N肥和N、P、K肥配施的整体增产效果较明显; 施肥对老龄以及种植3~4年老芒麦的增产效果更好, 施肥可以明显延长老芒麦的生产年限; 施肥对30 cm行距种植的老芒麦增产效果最好; 在不同气候、土壤条件的生长区域, 如年平均降水量400~800 mm的半湿润区, 年均温-0.3至8℃区域, 常年耕种沙壤土或土壤养分不均衡的土壤类型区域, 施肥对老芒麦种子产量都有较好的增产效果。

关键词: 种子产量; 产量组分; 种植年限; 种植行距; 施肥类型; 区域性因素

A meta-analysis of fertilizer response of seed yield and seed yield components in *Elymus sibiricus*

LIU Yao-bo^{1,2}, PEI Lu^{1,2}, LIU Chen-zhuo^{1,2}, LI Xiao-xia^{1,2*}, ZOU Bo-kun^{1,2*}

1. Grassland Centre, Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry Sciences, Beijing 100091, China; 2. Qinghai Sanjiang Group Co., Ltd, Xining 810100, China

Abstract: The objective of this study was to investigate the fertilizer response of seed yield and seed yield components of *Elymus sibiricus* under different conditions, in order to provide theoretical guidelines for seed production of *E. sibiricus*, a native grass species in China. Published research conducted in China was analysed, with unfertilized *E. sibiricus* serving as the control. By analysing the data from relevant field experiments, the response of seed yield and yield components of *E. sibiricus* to fertilizer application was quantitatively investigated, along with the effect of stand age, row spacing and regional factors. The results showed that fertilization significantly increased the seed yield of *E. sibiricus* ($P < 0.001$), and had a positive effect on its yield components. The most obvious effects were an overall yield increase from a single application of nitrogen fertilizer and from combined application of N, phosphorus and potassium fertilizers. The effect of fertilizer application on yield of *E. sibiricus* was better in stands planted for 3—4 years and on *E. sibiricus* planted with a row spacing of 30 cm, and fertilizer

收稿日期: 2024-07-16; 改回日期: 2024-09-05

基金项目: 重要生态修复草种质资源挖掘与创新利用(CAFYBB2022XA002)资助。

作者简介: 刘耀博(2001—), 男, 陕西安康人, 在读硕士。E-mail: sx_liuyaobo@foxmail.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lixiaoxia@caf.ac.cn; 1007900400@qq.com

obviously prolonged the production life of *E. sibiricus* stands. With respect to different climatic and soil conditions, fertilizer application had a better effect on the seed yield of *E. sibiricus* in semi-humid areas with an average annual precipitation of 400–800 mm, in areas with an average annual temperature of -0.3 to 8°C , in areas with sandy loam soil, or where soil nutrient imbalances occur through year-round cultivation.

Key words: seed yield; yield components; planting year; planting row spacing; fertilizer type; regional factors

老芒麦(*Elymus sibiricus*)是禾本科披碱草属优质的多年生乡土草种,原产于中国东北、西北和西南等地区^[1],其不仅是草甸群落和高寒草甸草原中的建群种和优势种,也是中国北方重要的饲草生产用种^[2]。老芒麦除了拥有优良的饲草性能,还具备抗旱、抗寒、耐盐碱等生态适应性^[3]。目前我国草原仍存在不同程度的退化、沙化和盐渍化等现象,草原生态保护修复的任务依然十分艰巨,生态修复草种需求量巨大,此外国内畜牧业集约化发展步伐加快,使优质牧草需求快速增加^[4]。老芒麦作为兼具生产和生态性能的多年生优质牧草,其种子的需求量逐年上升,但在老芒麦种子生产中存在种子产量较低且不稳定,种子产量随着种植年限的变化大等问题^[5]。已有研究表明,合理的施肥管理可以很好地补充老芒麦种子生长发育所需的营养物质,从而提高其种子的产量^[6–8]。

在禾草种子生产中,种子产量主要依赖于单位面积上产量组分的提高^[8],施肥作为生产中重要的可调控技术措施,直接影响了老芒麦的种子产量和产量组分以及其经济效益。毛培胜等^[6]在国内较早开始研究施肥对老芒麦种子产量的影响,其在河北省承德市鱼儿山牧场的研究表明,施肥对于老芒麦的种子产量有明显的影 响,最多可增产 56%,而相较于种植年限 2 年的老芒麦,种植年限 3 年的老芒麦种子产量和质量受施肥的影响更大,已有研究^[5,9–10]表明老芒麦种子产量随着种植年限的增加变化幅度很大,以种植年限 2 年的种子产量最好,之后逐年下降,而施肥对于种植年限 3 年的老芒麦种子产量的影响则比种植年限 2 年的更大。已有大量研究表明施肥对产量的影响与种植区域气候、种植行距、施肥次数等有关。赵利等^[11]在河北省张家口塞北管理区的研究表明,施加适量磷肥对老芒麦种子产量最大可增加 47.61%,但施加过度的磷肥会对种子产量产生负效益。高朋等^[8]在甘肃省酒泉市的研究得出了适宜当地老芒麦生长的氮需求量为 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,可使种子产量增加 9%~21%,季节性施肥差异不显著。王明亚^[5]在河北省丰宁坝上鱼儿山牧场以及青海海北藏族自治州的研究表明,春秋分施的种子产量高于春季 1 次施入和秋季 1 次施入,春秋分施更有利于提高氮肥的利用效率。唐凤^[12]在新疆农业大学三坪实习基地的研究也表明分两次施入氮肥明显比一次施入氮肥对老芒麦种子产量的影响更大,种子产量较氮肥一次性施入提高了 25.94%,游明鸿等^[13]在四川省阿坝州红原县邛溪镇的研究表明,行距和施肥对于老芒麦种子产量的影响显著,而播种量影响较小,合理的行距下施肥才能发挥肥料的全部效益。此外,也有研究表明^[9–10]过度施加其他肥料也会对种子产量产生负效益,但试验地区不同施肥产生负效益的浓度也不相同。

为进一步明晰老芒麦种子产量和产量组分对施肥的响应,老芒麦生长年限、种植行距、区域性环境因素(温度、降水量和土壤性质)等是否会影响施肥的效果,本研究采用定量综合评价研究结果的 Meta 分析法,基于全国尺度下老芒麦种子产量的数据,以不施肥为对照组,以施肥为处理组,定量分析不同生境条件、生长年限以及种植行距下老芒麦种子产量对施肥的响应,以期为国内老芒麦种子生产规模化提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 数据来源与分析

基于 CNKI、Web of Science 和万方 3 个文献数据库,设置“老芒麦”(E. sibiricus/Siberian wildrye)、“施肥”(fertilizer)、“种子产量”(seed yield/yield)和“中国”(China)作为主要关键词进行检索,整理公开发表的我国施肥老芒麦种子产量的田间试验文献共 105 篇。设置以下标准进一步剔除不合格文献以减少 Meta 分析结果发生偏倚:1. 文献中提供田间试验所在的详细位置或经纬度;2. 田间试验的数据组要有对照数据以体现老芒麦种子产量和产量组分对施肥响应的变化;3. 田间试验的数据测量方法要一致,在文献中以数字或者图表形式展现。去

除重复以及不符合标准的文章后,共收录 28 篇文献,提取文献中以下数据,包括老芒麦的产量、产量组分、种植年限、种植行距、试验地地理位置信息(包括田间试验所在区域、土壤类型、经纬度、年降水量、海拔以及年平均温度)、施肥类型、肥料浓度,并利用 Excel 软件建立数据库。对数据库进行提炼,所涉及的老芒麦种植年限有 1、2、3、4、7 和 8 年;种植行距的划分有 15、20、25、30、40、45、50 和 60 cm;所涉及的施肥类型分为单施肥和复合施肥,单施肥有氮肥(N)、磷肥(P)、钾肥(K)、有机肥(M)、微量肥料硼(B)、微量肥料锰(Mn)、微量肥料锌(Zn)以及微量肥料钼(Mo);复合施肥有氮磷肥配施(NP)、氮钾肥配施(NK)、磷钾肥配施(PK)、氮磷钾肥配施(NPK)。在施肥类型的基础上进行如下划分:以年平均降水量进行区域划分,有干旱区(降水量<200 mm)、半干旱区(降水量 200~400 mm)、半湿润区(降水量 400~800 mm)和湿润区(降水量>800 mm);按照土壤类型划分为棕壤、栗钙土、草甸土、黑钙土、绵土和黑垆土、棕钙土、砂壤土。最终收集到的数据有 229 条(表 1 和表 2),最终纳入 Meta 分析文献数据库的试验地区有 14 个(表 3)。

表 1 数据分组及样本数分布 1

Table 1 Data grouping and sample size distribution 1

组别 Groups	年平均降水量 Average annual precipitation				土壤类型 Soil type						
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
样本数 Sample size	14	148	67	0	2	79	4	40	18	14	72

注: P₁~P₄ 依次为干旱区(降水量<200 mm)、半干旱区(降水量 200~400 mm)、半湿润区(降水量 400~800 mm)和湿润区(降水量>800 mm); T₁~T₇(有的区域存在多种土壤类型)依次为棕壤、栗钙土、黑垆土、黑钙土、栗钙土和草甸土、栗钙土和黑钙土、砂壤土。

Note: The classification of the climatic zones (P₁~P₄) is as follows: arid zone (precipitation <200 mm), semi-arid zone (precipitation is 200 to 400 mm), semi-humid zone (precipitation is 400 to 800 mm), and humid zone (precipitation >800 mm). The soil types T₁~T₇ (with some areas where multiple soil types exist) are brown loam, chestnut-calcium loam, black clay loam, black calcareous loam, chestnut-calcium loam and meadow loam, chestnut-calcium loam and black calcium soil, and sandy loam in order.

表 2 数据分组及样本数分布 2

Table 2 Data grouping and sample size distribution 2

组别 Groups	种植年限 Planting year (yr)						种植行距 Planting row spacing (cm)							
	1	2	3	4	7	8	15	20	25	30	40	45	50	60
样本数 Sample size	50	77	73	23	12	21	33	5	21	72	4	8	14	18

注: 数据中存在跨年统计的数据;数据中有未采用条播方式种植的试验。

Note: The data contains cross-year statistics, and the data included experiment that did not use drill seeding.

1.2 数据分析

1.2.1 标准差计算 Meta 分析中标准差是一项基础数据,用于计算各研究的权重。在种子产量和产量组分数据提取过程中,文献中如果缺少了标准差(standard deviation, SD)数据,则通过以下公式进行计算^[14]:

$$SD = SE \times \sqrt{N} \quad (1)$$

式中: N 代表样本量,如果文献中既没有列出标准差(SD),也没有列出标准误差(standard error),则标准差(SD)按照平均值的 0.1 进行设置。

1.2.2 效应量计算 为表现老芒麦种子产量和产量组分对于肥料的响应,本研究用效应值 ln R 来表示,计算公式如下^[15]:

$$R = \frac{X_e}{X_c} \quad (2)$$

$$\ln R = \ln \left(\frac{X_e}{X_c} \right) = \ln X_e - \ln X_c \quad (3)$$

式中: R 代表效应比; X_e 代表施肥老芒麦种子产量或产量组分的平均值; X_c 代表不施肥老芒麦种子产量或产量组分的平均值。

表3 试验地点以及施肥类型

Table 3 Test site and fertilizer type

序号 No.	试验地点 Test site	经纬度 Longitude and latitude	施肥类型 Fertilizer type
1	青海省海南藏族自治州同德县 Tongde County, Hainan Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province	E 100°20';N 35°9'	NP、NPK
2	青海省牧草良种繁殖场 Pasture Seed Breeding Farm, Qinghai Province	E 100°20';N 35°20'	NPK
3	青海省海南州共和县江西沟乡上社村 Xiangshangshe Village, Jiangxigou Township, Republican County, Hainan Prefecture, Qinghai Province	E 100°22'25";N 36°35'32"	N、P、NP、M
4	青海省同德县尕巴松多镇 Gabasongduo Township, Tongde County, Qinghai Province	E 100°35'31";N 35°14'48"	N
5	青海省海北藏族自治州海晏县 Haiyan County, Haibei Tibetan Autonomous Prefecture, Qinghai Province	E 100°52';N 36°59'	N
6	宁夏回族自治区固原市 Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region	E 106°9'39";N 36°5'24"	NP、NPK
7	内蒙古农业大学牧草试验地 Inner Mongolia Agricultural University Pasture Experimental Site	E 111°42'38";N 40°48'45"	B、Mn、Zn、Mo
8	河北省张家口塞北管理区 Zhangjiakou Saibei Management Area, Hebei Province	E 115°39'—115°52'; N 41°45'—41°58'	N、P
9	河北省涪源县 Guyuan County, Hebei Province	E 115°51';N 41°52'	N、P
10	内蒙古锡林郭勒盟多伦县 Duolun County, Xilin Gol League, Inner Mongolia	E 115°55'—116°54'; N 41°46'—42°39'	N、P、K、NP、 NK、PK、NPK、 B、Mn、Zn、Mo
11	河北省丰宁坝上鱼儿山牧场 Yu'er Mountain Ranch, Fengning Dam, Hebei Province, China	E 116°9';N 41°44'	N
12	河北省承德市中国农业大学科技攻关实验站 Experimental Station for Science and Technology Research, China Agricultural University, Chengde City, Hebei Province, China	E 140°16';N 41°44'	N
13	新疆乌鲁木齐市头屯河区 Toutunhe District, Urumqi, Xinjiang	E 87°35';N 43°56'	N
14	甘肃省酒泉市大业草种公司上坝基地 Gansu Jiuquan Daye Grass Seed Company Shangba Base	E 98°30';N 39°37'	N

注：施肥类型有氮肥(N)、磷肥(P)、钾肥(K)、有机肥(M)、微量肥料硼(B)、微量肥料锰(Mn)、微量肥料锌(Zn)、微量肥料钼(Mo)、氮磷肥配施(NP)、氮钾肥配施(NK)、磷钾肥配施(PK)、氮磷钾肥配施(NPK)。

Note: The types of fertilizers applied include nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), organic fertilizers (M) and boron (B), manganese (Mn), zinc (Zn), molybdenum (Mo) as a trace fertilizer, nitrogen-phosphorus (NP), nitrogen-potassium (NK), phosphorus-potassium (PK), and nitrogen-phosphorus-potassium (NPK).

综合效应值 $\ln R^*$ 采取加权计算的方法获得,利用每个样本特定的权重 w 以弥补不同样本之间的精确性差异。加权效应量 $\ln R^*$ 以及置信区间(confidence interval, CI)可以通过 $\ln R$ 计算得出^[16]:

$$w = \frac{1}{v} \quad (4)$$

$$v = \frac{S_e^2}{N_e X_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c X_c^2} \quad (5)$$

$$\ln R^* = \frac{\sum_{i=1}^k w_i \ln R_i}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad (6)$$

$$S(\ln R^*) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k w_i}} \quad (7)$$

$$95\% CI = \ln R^* \pm 1.96S(\ln \bar{R}) \quad (8)$$

式中: S_e 代表施肥老芒麦种子产量或产量组分的标准差; S_c 代表不施肥老芒麦种子产量或产量组分的标准差; N_e 为施肥老芒麦种子产量或产量组分数据的样本量; N_c 代表不施肥老芒麦种子产量或产量组分数据的样本量; k 为样本数; i 代表第*i*个样本; S 代表标准差。

将效应值 $\ln R$ 转化为相对变化率(产量或产量组分) Y 以更加直观地反映老芒麦种子产量和产量组分对于施肥的响应效果。

$$Y = [\exp(\ln R) - 1] \times 100\% \quad (9)$$

式中:若 Y 的 95% 置信区间全部大于 0, 则说明施肥对于老芒麦种子产量和产量组分有显著的正效应;若 Y 的 95% 置信区间全部小于 0, 则说明施肥对于老芒麦种子产量和产量组分有显著的负效应;若 Y 的 95% 置信区间包含 0, 则说明施肥对于老芒麦种子产量和产量组分无显著影响^[17]。

1.2.3 异质性检验 在进行 Meta 分析时,异质性检验 Q 统计量的结果可以用于分析各个研究样本数据之间是否存在异质性,可以用于选择固定效应或者随机效应模型。当 Q 的显著性检验 $P_Q < 0.05$ 时,选择随机效应模型;当 Q 的显著性检验 $P_Q \geq 0.05$ 时,选择固定效应模型。

1.2.4 发表偏倚检验 发表偏倚是小样本数据效应的一种常见现象,会降低分析结果的精度,小样本通常比大样本研究存在更大的处理效应,会产生发表偏倚^[18]。一般采用回归检验法进行发表偏倚检验。

1.2.5 亚组分析 根据前文中的分类组别进行更详细的亚组分析以寻找数据异质性的来源与原因。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 进行统计和分析数据,使用 WebPlotDigitizer 4.2 软件进行图片数据提取,采用 Metawin 2.1 软件进行 Meta 数据分析,使用 GraphPad Prism 8 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 老芒麦种子产量和产量组分的偏倚性检验

老芒麦种子产量以及千粒重、生殖枝数 $\cdot m^{-2}$ 、小穗数/生殖枝、小花数/小穗、可育小花数(种子数)/小穗这些产量组分在施肥条件下效应值分布情况如图 1 所示。K-S(Kolmogorov-Smirnov)检验的结果表明老芒麦种子产量以及千粒重、生殖枝数 $\cdot m^{-2}$ 、小穗数/生殖枝、小花数/小穗、可育小花数(种子数)/小穗这些产量组分在施肥条件下效应值的频率分布均不符合正态分布,因此本研究综合效应值以及 95% CI 的计算使用非参数估计法^[19]。

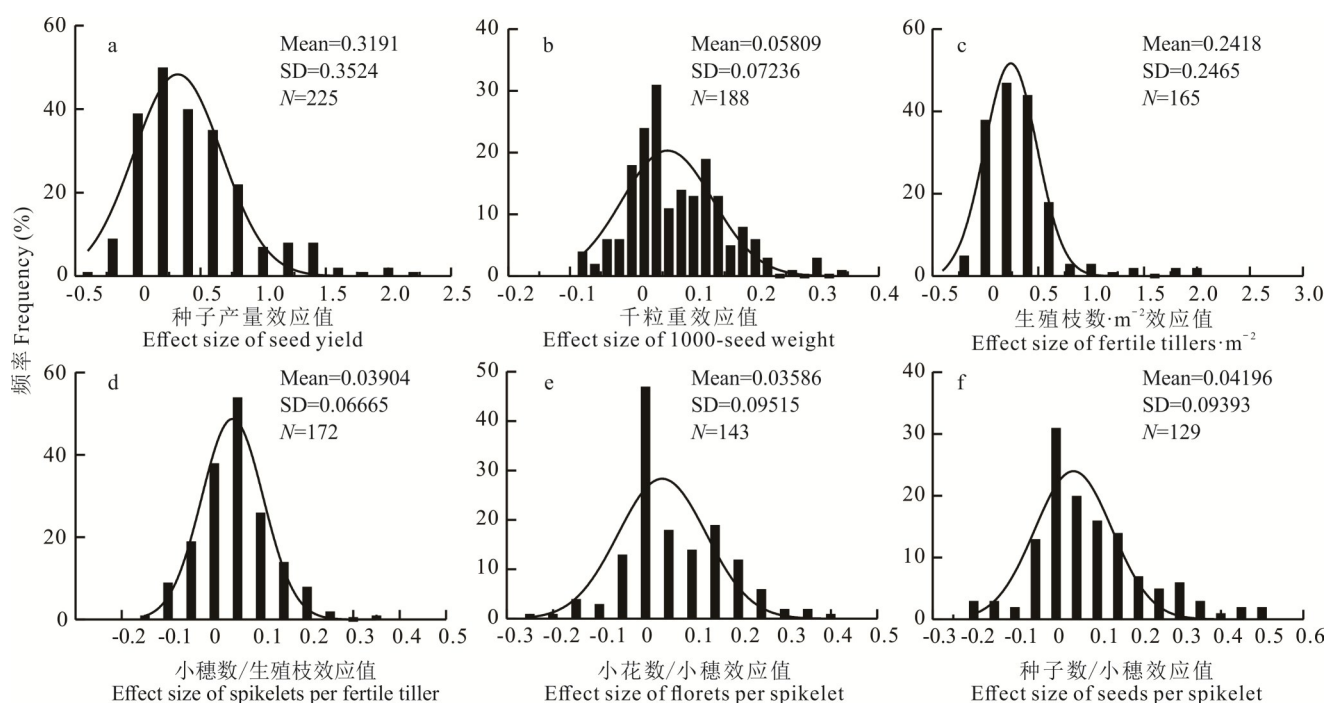


图 1 老芒麦种子产量以及产量组分效应值的频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of effect size for seed yield components and seed yield of *E. sibiricus*

Mean、SD、N 分别为数据平均值、标准差以及组数。实线代表高斯函数拟合曲线。Mean: The average value; SD: Standard deviation; N: Number of groups. Solid lines represent a Gaussian-fitted curve.

2.2 种植年限对老芒麦种子产量和产量组分施肥效果的影响

与对照组(不施肥)相比,施肥对于不同种植年限老芒麦的种子产量和产量组分大部分具有增益的效果。在种子产量方面,不同种植年限之间存在显著差异 $[P_R < 0.01, \text{Prob}(\text{Rand})]$,种植年限为3、4和8年的老芒麦种子产量受到的增产效果更好,分别为73.7%、138.4%和52.3%,而增产效果较差的是种植年限1、2和7年的,仅有19.7%、29.7%和26.0%。多年累积种子产量方面,种植2、3年以及种植2、3、4年的增产率分别为9.32%和57.72%(图2a)。种植年限3、4和8年的老芒麦种子千粒重 $(P_R < 0.05)$ 受到的增产效果更好,分别为9.0%、8.7%和7.1%,种植年限为1和2年的千粒重增产率相对较低,分别为5.0%和5.6%,而累积种植2、3、4年千粒重的增产率为13.3%(图2b)。施肥对生殖枝数 $\cdot \text{m}^{-2}$ 的增产效果在种植年限为3、4和8年 $(P_R < 0.01)$ 的影响较大,增产率分别为51.1%、104.4%和34.0%,而种植年限1和2年受到的影响较小,为14.7%和15.9%,累积种植2、3、4年的增产率为34%(图2c)。在小穗数/生殖枝方面,种植年限3和4年 $(P_R < 0.01)$ 的受到影响较大,分别为10.7%和8.1%,种植年限1、2和8年的受到影响较小,分别为0.2%、3.9%和1.2%,而累积种植2、3、4年的增产率为10.7%(图2d)。施肥对种植年限1年老芒麦小花数/小穗产生负效益,减产率为2.8%,对种植年限2、4、3年 $(P_R < 0.01)$ 的增产率依次为11.6%、10.8%和3.5%,累积种植2、3、4年的增产率为13.1%(图2e)。种植年限1年的可育小花数(种子数)/小穗的产量同样受到了负效益,减产率为2.6%,种植年限为3、2和4年 $(P_R < 0.01)$ 的增产率分别为17.0%、11.0%和6.8%,累积种植2、3、4年的增产率为12.7%(图2f)。

2.3 种植行距对老芒麦种子产量和产量组分施肥效果的影响

种植行距是影响老芒麦种子产量和产量组分的关键因素之一。在种子产量方面,不同种植行距之间有着显

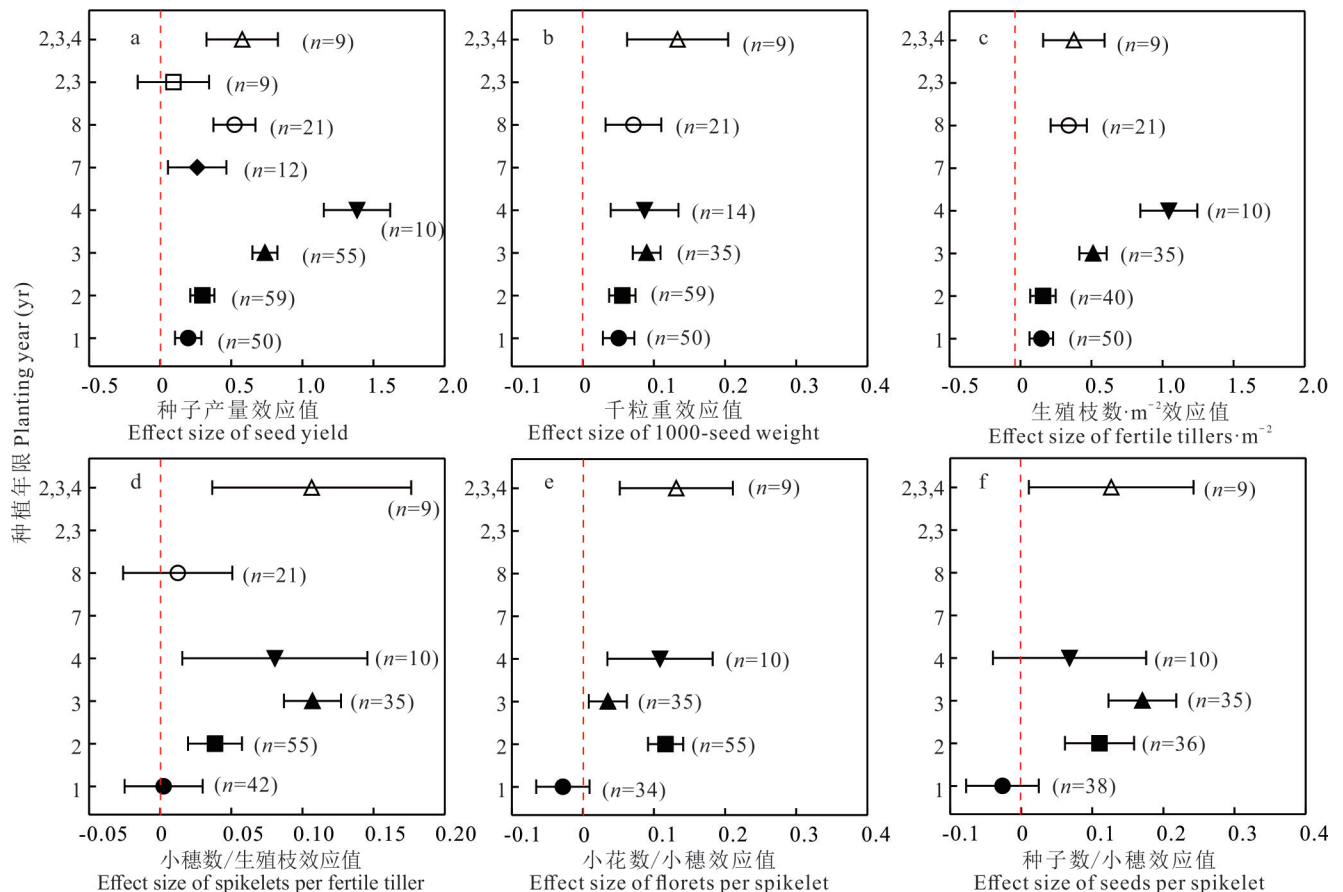


图2 种植年限对老芒麦种子产量和产量组分施肥效果的影响

Fig. 2 Effect of planting year on fertilisation effect of seed yield components and seed yield of *E. sibiricus*

n 为观测数;虚线为0值。下同。 n is the number of observations; The dotted line is the value of 0. The same below.

著差异($P_R < 0.01$), 种植行距在 30 cm 的老芒麦种子产量受到施肥的影响最大, 增产率为 76.1%, 其次是种植行距为 45 和 15 cm, 其增产率分别为 71.0% 和 42.7%, 而种植行距在 50 和 25 cm 的老芒麦种子产量受到的影响较小, 增产率分别为 5.0% 和 9.4% (图 3a)。千粒重受到施肥效果影响最大的种植行距为 30 cm ($P_R < 0.01$), 增产率为 12.3%, 其次为种植行距 20 cm, 增产率为 11.7%, 而在种植行距为 40 cm 时千粒重受到施肥效果的影响最小, 增产率为 1.5% (图 3b)。生殖枝数 $\cdot m^{-2}$ 受到施肥效果影响最大的是种植行距 30 cm ($P_R < 0.01$), 增产率为 53.8%, 其次是种植行距分别在 45 和 15 cm, 增产率依次为 37.7% 和 34.0%, 而生殖枝数 $\cdot m^{-2}$ 在种植行距 20 cm 时施肥效果受到了负面影响, 减产率为 3.7% (图 3c)。种植行距在 30 cm ($P_R < 0.01$) 时小穗数/生殖枝受到施肥的影响最大, 增产率为 11.26%, 其次为种植行距在 45 cm 时增产率为 5.7%, 而在种植行距为 50 cm 时表现出施肥的负效益, 减产率为 3% (图 3d)。施肥对小花数/小穗在种植行距为 45、30 和 60 cm ($P_R < 0.01$) 时表现正面效益, 增产率分别为 12.9%、9.8% 和 2.4%, 而在种植行距为 50 和 25 cm 时表现负面效益, 减产率为 7.5% 和 0.1% (图 3e)。可育小花数(种子数)/小穗在种植行距为 30 cm ($P_R < 0.01$) 时受到的影响最大, 增产率为 18.2%, 在种植行距为 50 cm 时受到负面影响, 减产率为 7.2% (图 3f)。

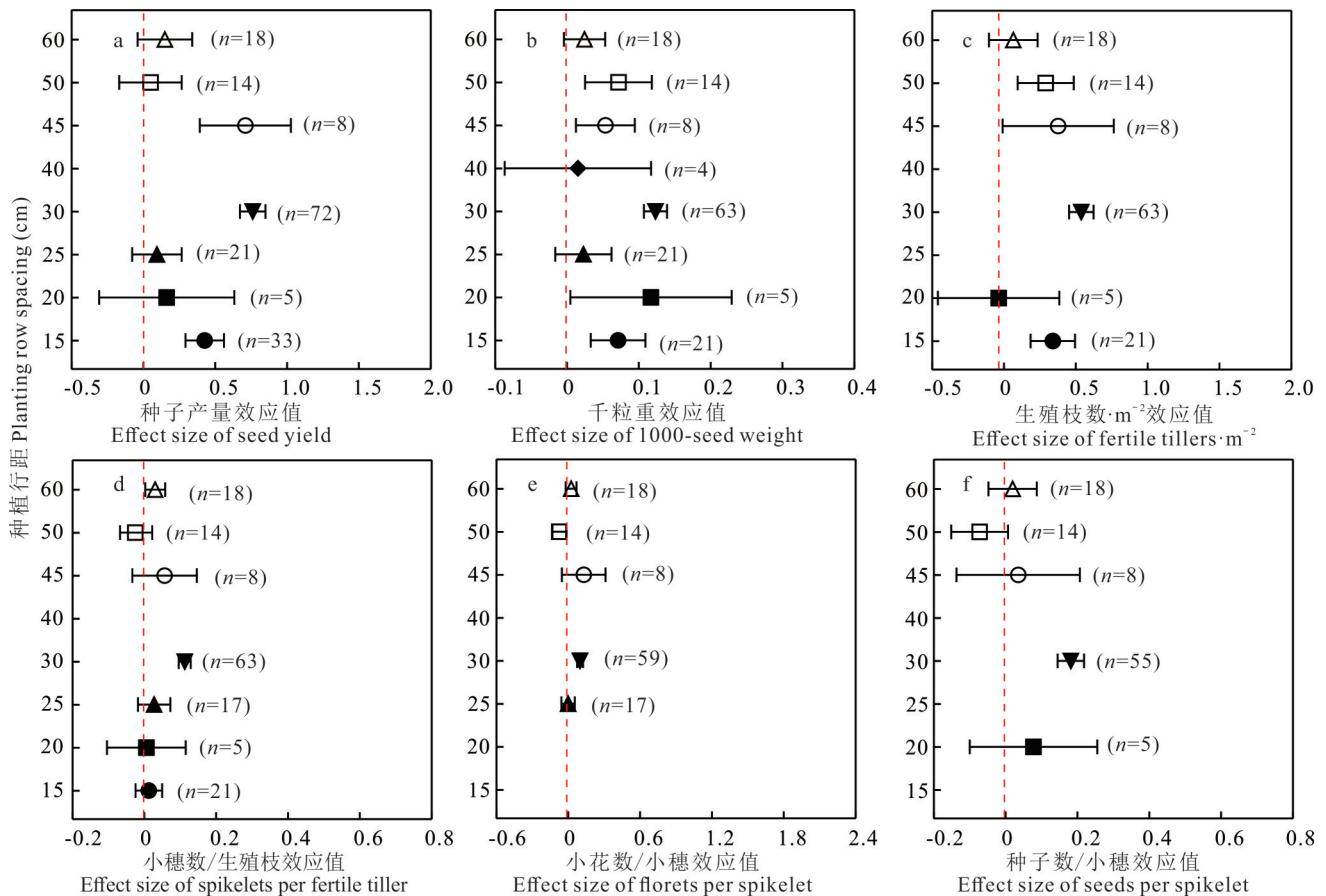


图 3 种植行距对老芒麦种子产量和产量组分施肥效果的影响

Fig. 3 Effect of planting row spacing on fertilisation effect of seed yield components and seed yield of *E. sibiricus*

2.4 施肥类型对老芒麦种子产量和产量组分的影响

与对照组的的老芒麦相比(不施肥), 施肥极显著提高了老芒麦的种子产量($P < 0.001$)。单施 N 的增产效率最高, 达到了 53%; 其次是 NP 配施处理和 NPK 配施处理, 其增产率分别达到了 45.9% 和 44.7% (图 4a)。对老芒麦千粒重($P < 0.001$) 影响最大的是单施 N, 增产率达到了 8.1%; 其次是 NPK 配施处理和 NP 配施处理, 增产率分别达到了 7.7% 和 5.5%; 单施 B、Zn、Mn、Mo 这几种微量元素对千粒重的影响不明显, 增产率基本都不足 1%,

Mo元素对千粒重有负效益,降低了5.4%(图4b)。与单施P肥仅增长7.8%相比,NPK配施处理和单施N肥对生殖枝数· m^{-2} ($P<0.001$)的增产率分别达到了31.9%和36.7%(图4c)。所有施肥处理对小穗数/生殖枝($P>0.05$)无显著影响(图4d)。相比于单施N肥的7.5%和单施P肥的3.1%的增产率,NP配施处理对小花数/小穗($P<0.05$)的降低率为0.1%(图4e)。所有施肥处理对可育小花数(种子数)/小穗($P>0.05$)无显著影响(图4f)。

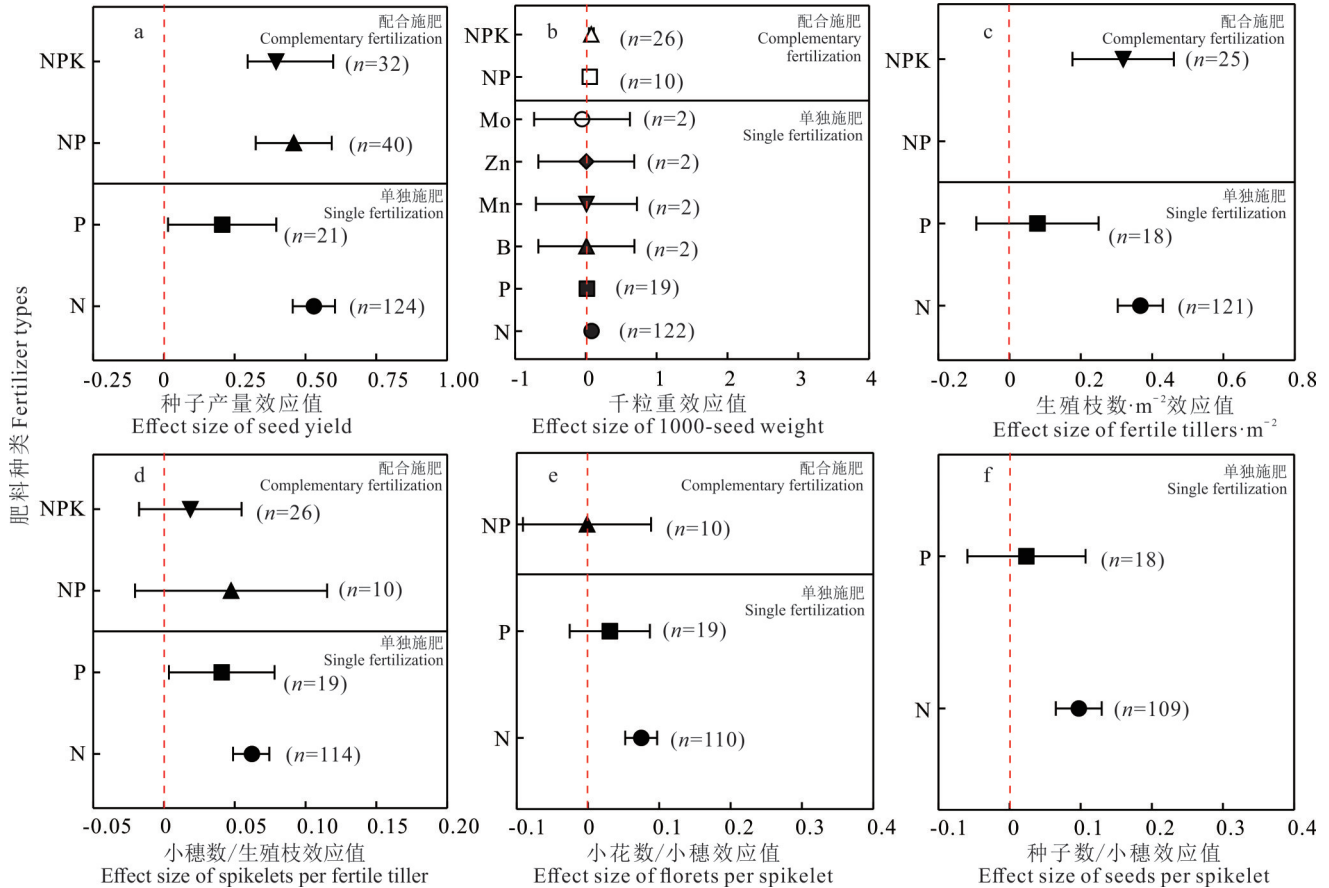


图4 施肥类型对老芒麦种子产量和产量组分的影响

Fig. 4 Effect of fertilizer types on fertilisation effect of seed yield components and seed yield of *E. sibiricus*

2.5 区域环境因素对老芒麦种子产量和产量组分的影响

2.5.1 年降水量 与不施肥相比较,不同降水量下老芒麦种子产量对施肥的响应有显著差异($P_R<0.01$)。在半湿润区,施肥对老芒麦种子产量的增产效果最好,达到64.9%,其次是半干旱区和干旱区,分别达到40%和5%(图5a)。千粒重在半湿润区受到肥料的增产效果最好,达到11.5%,其次是干旱区和半干旱区($P_R<0.01$),分别达到7.2%和5.8%(图5a)。在半干旱区,施肥对生殖枝数· m^{-2} 的增产效果最差,仅为22.6%,半湿润区和干旱区($P_R<0.01$)的增产效果都较好,分别为49.5%和29.1%(图5a)。施肥对小穗数/生殖枝在干旱区有减产的负面效果,减产率达到2.3%,在半干旱区和半湿润区($P_R<0.01$)的增产效果分别为6.6%和4.8%(图5b)。小花数/小穗在干旱区同样也受到了肥料的减产效果,达到了7.5%,在半湿润区和半干旱区($P_R<0.01$)的增产效果分别为16.4%和5.9%(图5b)。在半湿润区,施肥对可育小花数(种子数)/小穗的增产效果最好,达到14.2%,其次是在半干旱区($P_R<0.01$)达到9.9%,施肥在干旱区表现出减产的负面作用,减产率达到7.2%(图5b)。

2.5.2 年均温度 与对照相比较,老芒麦种子产量对施肥的响应在不同年均温下有显著差异($P_R<0.01$)。在年均温1.0℃时,施肥对老芒麦种子产量的影响最大,增产率为105.9%,其次是年均温为0.5和7.2℃时,增产率分别为78.4%和49.5%,在年均温为1.2℃时,施肥的影响最小,增产率仅为8.3%(图6a)。在年均温达到1.0℃

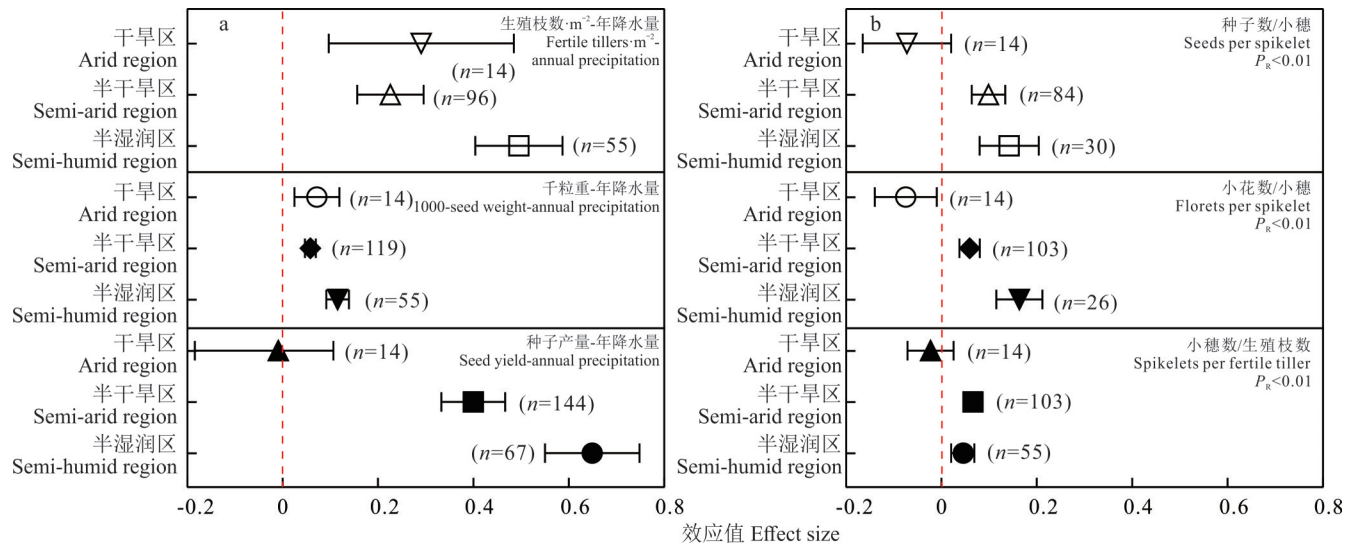


图 5 年降水量对老芒麦种子产量和产量组分施肥效果的影响

Fig. 5 Effect of annual precipitation on fertilisation effect of seed yield components and seed yield of *E. sibiricus*

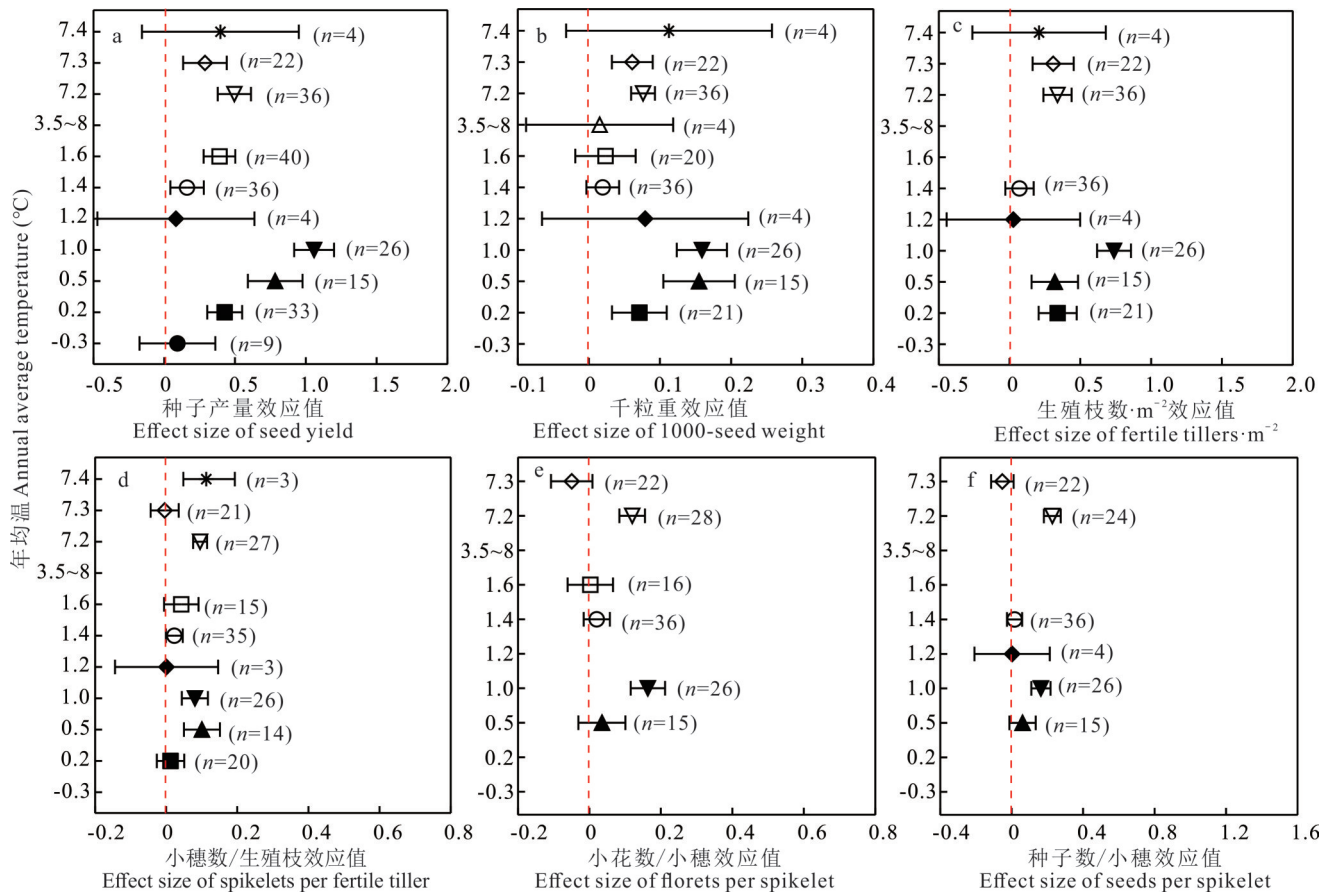


图 6 年均温对老芒麦种子产量和产量组分施肥效果的影响

Fig. 6 Effect of annual average temperature on fertilisation effect of seed yield components and seed yield of *E. sibiricus*

($P_R < 0.01$)时,千粒重受到的增产效果最好,为 15.9%,其次是年均温为 0.5 °C 时,增产率为 15.5%,在年均温为 3.5~8.0 °C 时,增产率最低,为 1.5%(图 6b)。在年均温为 1.2 °C ($P_R < 0.01$)时,施肥对生殖枝数· m^{-2} 的影响最小,增产率仅为 2.7%,增产效果最好的是年均温为 1.0 °C 时,增产率为 73.8%(图 6c)。施肥对小穗数/生殖枝在年均温为 7.3 °C ($P_R < 0.01$)时表现出了负面效益,减产率为 0.4%,在年均温为 0.5、7.2 和 1.0 °C 时的增产率较

高,依次为10.1%、9.5%和8.1%(图6d)。小花数/小穗同样是在年均温为7.3℃($P_R < 0.01$)时受施肥影响表现出4.9%的减产率,在年均温为7.2和1.0℃时有较高的增产率,分别为12%和16.4%(图6e)。在年均温为7.2℃($P_R < 0.01$)时,施肥对可育小花数(种子数)/小穗的增产效果最好,达到22.8%,其次是在年均温为1.0℃时,增产率为16.4%,在年均温为7.3℃时表现为负效益,减产率为5.2%(图6f)。

2.5.3 土壤类型 与不施肥相比,砂壤土施肥的综合增产效应最为显著,老芒麦种子产量($P_R < 0.01$)和产量组分[千粒重($P_R < 0.05$)、生殖枝数· m^{-2} ($P_R < 0.01$)、小穗数/生殖枝($P_R < 0.01$)、小花数/小穗($P_R < 0.01$)、可育小花数(种子数)/小穗($P_R < 0.01$)]的增产率依次为74.1%、8.4%、50.8%、9.4%、13.8%和19.3%(图7a~f)。而栗钙土、草甸土的施肥综合增产效应最低,老芒麦种子产量和产量组分的增产率分别为15.0%、2.4%、6.5%、2.8%、2.2%和2.0%(图7a~f)。栗钙土、黑钙土的施肥在小穗数/生殖枝、小花数/小穗、可育小花数(种子数)/小穗的生产上表现为负面效应,减产率分别为2.3%、7.5%和7.2%(图7a~f)。

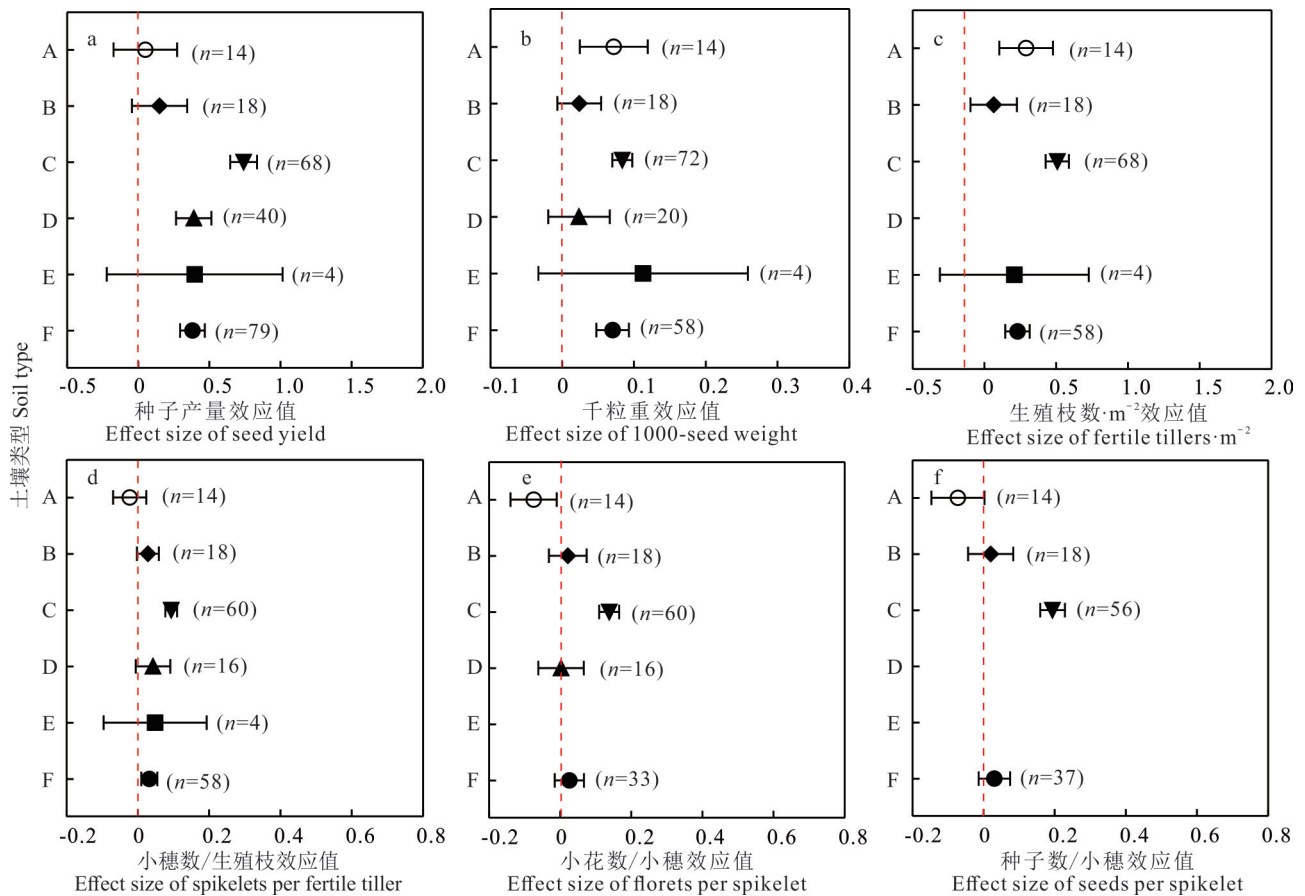


图7 土壤类型对老芒麦种子产量和产量组分施肥效果的影响

Fig. 7 Effect of soil type on fertilisation effect of seed yield components and seed yield of *E. sibiricus*

A: 栗钙土、黑钙土 Chestnut soil and chernozem; B: 栗钙土、草甸土 Chestnut soil and meadow soil; C: 砂壤土 Sandy loam; D: 黑钙土 Chernozem; E: 黑垆土 Dark loessial soil; F: 栗钙土 Chestnut soil.

3 讨论

3.1 老芒麦种子产量和产量组分对施肥的响应

施肥是提高作物产量和改善作物品质的重要措施^[15]。本研究的结果表明,施肥可以显著提高老芒麦的种子产量,对其产量组分有着积极影响,以单施N肥以及N、P、K肥配施的整体增产效应较明显。这与河北坝上的研究结果是一致的,氮是种子产量最主要的限制因子之一,施氮肥可大幅度地增加种子产量^[11]。而本研究表明,氮对老芒麦种子产量和产量组分普遍有促进的作用,除了对种子产量有显著影响外,对生殖枝数· m^{-2} 以及每小穗

种子数的影响最明显,这与宋江湖等^[20]对西藏野生垂穗披碱草(*Elymus nutans*)种子产量和产量组分的研究结果一致。而磷肥对种子产量的提高主要是通过增加植物的生殖枝数和千粒重这两个产量组分来提高,过度地施用磷肥会对老芒麦的种子产量造成负效益^[21],但比较来说,单施P肥对老芒麦种子产量的影响不如单施N肥,这可能是因为磷肥对根系生长的促进作用比氮肥更加明显^[22],而当营养更多地供给植物的地下部分后,由于竞争的关系,植物地上部的生长就会受到一定的抑制,进而导致种子产量的减少。适量的氮磷肥同时施用可以促进老芒麦健壮生长和籽实饱满以获得较高的种子产量,同时钾肥对促进老芒麦对氮磷的利用有着明显作用^[23],这是N、P、K肥配施整体增产效果明显的原因之一。此外,配施N、P、K肥增产效果较为明显的原因也可能是对土壤营养的平衡作用,使得草地生产力逐渐恢复和提高^[24]。

3.2 施肥对老芒麦种子产量和产量组分的影响因素分析

种植年限对老芒麦种子产量和产量组分有着显著的影响,对施肥响应也有着明显的影响,在3~4年的利用年限内基本都表现为随着种植年限的增长对于施肥的响应越明显,这与毛培胜等^[6]以及游明鸿^[25]的研究结果是一致的。老芒麦的生长以种植年限2~3年为最好,生殖枝这一影响种子产量的产量组分在枝条组分中占据的比例最大,之后逐年递减,而施肥可以很好地补充老芒麦生长以及种子生产所需要的养分,进而促进产量的提升,对于老龄老芒麦种子生产的促进也十分明显^[24]。相比而言,种植年限1~2年的老芒麦对于施肥的响应相对较小,推测其原因一是老芒麦的生长还未进入成熟期,施加的肥料更多地被老芒麦用于营养部分的生长,对生殖部分的生长不利;二就是老芒麦种子产量有着其本身的阈值,进入成熟期的老芒麦在肥料的作用下已经接近或者达到了这个阈值,再多的施肥可能都不会再促进老芒麦的种子生产,反而可能会抑制其生产。从种植年限2~4年整体的老芒麦种子产量和产量组分对施肥的响应来看,施肥对提升老芒麦种子生产的利用年限有着积极的作用。

种植行距通过影响老芒麦的种植密度对其种子产量和产量组分产生影响,也影响着老芒麦对肥料的吸收效果。在种植行距较大时,肥料主要通过影响老芒麦的单穗长和单穗重来影响种子产量,而种植行距较小时,肥料主要通过影响老芒麦单位面积上生殖枝数来影响种子产量,并且相比于较大的种植行距,种植行距越小施肥越容易造成徒长反而影响种子生产对肥料的利用^[10]。而对老芒麦种子产量最好的种植行距因品种和地区不同而异。游明鸿^[25]和陈立坤等^[26]在川西红原县的研究表明,在红原地区60 cm的种植行距是最利于老芒麦充分利用肥料进行种子生产的。而像王明亚^[5]、张维云等^[27]在河北张家口塞北管理区等其他地方进行的试验,选择30 cm行距的占多数,原因可能是方便管理以及在肥料用量较少的情况下就可以达到较好的增产效果。

降水量对农业生产有着很大的影响,也是影响作物利用肥料的关键因素。对于老芒麦种子生产来说,由于其自然分布区域主要集中在干旱、半干旱和半湿润区域,这些区域的天然降水是非灌溉条件下土壤水分补给的主要来源^[28],所以降水量也是影响老芒麦种子生产中肥效发挥的关键因素。本研究的结果表明,位于半湿润区的老芒麦种子产量和产量组分对施肥的响应最大,说明降水量较为充沛的地区,老芒麦的种子生产对肥料的利用就越好,这与李春荣^[29]的研究结果相一致。研究表明,老芒麦的适生年降水量为20~3033 mm,最适年降水量为596.2 mm^[30],最适降水量刚好处于半湿润区400~800 mm的区间范围内,干旱区和半干旱区的施肥增产效果也随着降水量的提高而提升,也可以通过人工设置垄沟聚集雨水的方式,人为提高土壤含水量,进而促进老芒麦的种子生产^[29]。

年均温是气候因素中影响老芒麦适生分布最关键的环境变量^[30],在老芒麦种子生产中也起着重要的作用。低温会限制氮肥的效应,降低了植物自身的固氮能力,从而提高了植物对外源氮素的吸收,进而使得氮肥的效益增大^[31]。老芒麦的适生年均温为-16.8至24.1℃^[30],本研究所提取的样本中,年均温分布在-0.3至8℃之间,在中国北方地区适生年均温范围之内,以单施N肥和N、P、K肥配施效果较好,在肥料增产中低温起到了关键性的作用,但同时也不能忽略降水和土壤的影响。

不同的土壤类型代表着不同的土壤理化性质,不同的土壤有着不同的养分构成,不同的土壤类型对土层中水分的分布有着显著影响^[32],进而影响植物的生长以及生产中对肥料的利用。砂壤土的保水保肥能力比较差^[33],本研究中搜集到样本的试验区域基本都为牧场和试验田这种连年播种的土地,土地肥力有所退化,加之不平衡的施

肥导致有效钾含量较高而速效磷和碱解氮的含量偏低^[5,9-10,12],所以表现出N、P肥配施对老芒麦种子产量和产量组分的增幅效果明显。栗钙土、黑垆土、黑钙土对肥效的响应效果都相近,其影响肥效的原因之一就是N、P、K肥的平衡施用,平衡施肥可以很好地改变土壤结构、提高养分以及微生物数量^[34],同时还可以提高土壤团聚体的稳定性,改善土壤的蓄水和供水能力,有利于土壤可持续利用^[35]。栗钙土、草甸土^[11,36-37]以及栗钙土、黑钙土^[8]对肥效的增幅不大甚至出现负效益,其原因可能是试验区域的土体营养较为丰富,额外添加肥料会导致氮磷等元素过多反而影响了种子生产,减弱了老芒麦对肥料的利用效率。

4 结论

1)施肥可以显著提升老芒麦的种子产量,对其产量组分有着积极影响,其中以单施N肥和N、P、K肥的配施整体增产效果较明显,但施肥量应该根据种植地的环境而进行确定。

2)施肥对于老龄以及种植年限3~4年的老芒麦增产效果更好,对种植年限1~2年的老芒麦种子生产提升不大,施肥可以明显地延长老芒麦的生产年限。

3)较低种植行距、较少肥料施入和较高种植行距、较多肥料施入都有利于老芒麦种子产量的提升,在种植行距为30 cm时,老芒麦种子产量对施肥的响应最明显。

4)在年降水量为400~800 mm的半湿润区,老芒麦种子产量对施肥的响应最明显,在生产中可以采取挖掘集水沟的方式或者及时灌溉来提升老芒麦的种子产量;在年均温-0.3至8℃这个区间施肥都有增产效果,生产中选择年均温在这个区间的地区进行老芒麦的种植;常年耕种砂壤土或者土壤养分不均衡的其他土壤类型,施肥都可以很好地促进老芒麦种子产量的提升,在生产时可依据当地实际土壤养分来调整施肥类型,以平衡施肥为佳。

参考文献 References:

- [1] Wang C Q, Wang H M, Zhou Q P, *et al.* Bibliometric analysis of *Elymus sibiricus* L. research literature. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2020, 35(5): 72-81, 86.
王传旗, 王红梅, 周青平, 等. 老芒麦研究文献计量分析. *草学*, 2020, 35(5): 72-81, 86.
- [2] Li L H. Responses of nitrogen use efficiency and dry matter distribution to nitrogen application level in seed production of *Elymus sibiricus*. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023.
李露红. 制种老芒麦氮素利用效率及干物质分配对施氮水平的响应. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023.
- [3] Chen M J, Jia S X. *Forage flora of China*. Beijing: China Agriculture Press, 2002.
陈默君, 贾慎修. 中国饲用植物. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [4] Wu B, He L J, Luo R, *et al.* Study on the response of carbon and nitrogen partitioning to nitrogen addition in *Elymus sibiricus*. *Grassland and Turf*, 2019, 39(6): 19-25.
武蓓, 何丽娟, 罗瑞, 等. 老芒麦体内碳氮分配对氮素添加的响应研究. *草原与草坪*, 2019, 39(6): 19-25.
- [5] Wang M Y. Roles of nitrogen application on seed yield and yield components in siberian wildrye. Beijing: China Agricultural University, 2018.
王明亚. 施氮对老芒麦种子产量及产量因子的作用. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [6] Mao P S, Han J G, Wang Y, *et al.* Effects of fertilization on seed yield and seed quality of *Elymus sibiricus*. *Pratacultural Science*, 2001, 18(4): 7-13.
毛培胜, 韩建国, 王颖, 等. 施肥处理对老芒麦种子质量和产量的影响. *草业科学*, 2001, 18(4): 7-13.
- [7] Zhang J H, Li Q F, Li X L. Studies on the seed yield components of *Elymus sibiricus* without irrigation. *Chinese Journal of Grassland*, 2000, 22(6): 35-38.
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. *中国草地学报*, 2000, 22(6): 35-38.
- [8] 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. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 42(2): 126-131.
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. *东北师大学报(自然科学版)*, 2010, 42(2): 126-131.
- [9] Luo J, Zhang S Z, Tang F, *et al.* Effect of nitrogen application on seed yield of *Elymus sibiricus* under different densities. *Grass-*

- Feeding Livestock, 2020, 41(3): 28–34.
- 罗金, 张树振, 唐凤, 等. 不同密度条件下施氮对老芒麦种子产量的影响. 草食家畜, 2020, 41(3): 28–34.
- [10] Li L H, Xu W N, Chen W G, *et al.* Effects of density and nitrogen level on agronomic traits and seed yield of *Elymus sibiricus*. Grass-Feeding Livestock, 2022, 43(4): 45–52.
- 李露红, 徐婉宁, 陈卫国, 等. 建植密度和施氮水平互作对老芒麦农艺性状和种子产量的影响. 草食家畜, 2022, 43(4): 45–52.
- [11] 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*. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(4): 662–668.
- 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. 草地学报, 2012, 20(4): 662–668.
- [12] Tang F. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation and seed yield of *Elymus sibiricus* L. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.
- 唐凤. 不同施氮条件对老芒麦干物质积累和种子产量的影响. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- [13] You M H, Liu J P, Zhang C B, *et al.* Effect of row space, sowing rate and fertilizing amount on yield of *Elymus sibiricus* L. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(24): 5196–5199, 5205.
- 游明鸿, 刘金平, 张昌兵, 等. 行距、播种量和施肥量正交对老芒麦产量影响的分析. 湖北农业科学, 2011, 50(24): 5196–5199, 5205.
- [14] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta analysis. Ecology, 2006, 87(1): 53–63.
- [15] Cai L, Wang L L, Luo Z Z, *et al.* Meta-analysis of yield effects of fertilization on alfalfa in China. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 838–848.
- 才璐, 王林林, 罗珠珠, 等. 中国苜蓿施肥产量效应的Meta分析. 干旱区地理, 2021, 44(3): 838–848.
- [16] Qi G P, Kang Y X, Yin M H, *et al.* Yield responses of wheat to crop residue returning in China: A meta-analysis. Crop Science, 2019, 59(5): 2185–2200.
- [17] Wang L L, Coulter J A, Palta J A. Mulching-induced changes in tuber yield and nitrogen use efficiency in potato in China: A meta-analysis. Agronomy, 2019, 9(12): 793–808.
- [18] Geng J, He T F, Li H K. Meta-analysis on impact of conservation tillage on winter wheat yield and yield composition in the north China plain. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 41(1): 158–165.
- 耿晶, 贺亭峰, 李海康. 保护性耕作对华北平原冬小麦产量组成影响的Meta分析. 四川农业大学学报, 2023, 41(1): 158–165.
- [19] Wang X Y, Yu X, Shen Y Y, *et al.* Fertilization increased alfalfa yield and nutritive value in northern China: A meta-analysis. Pratacultural Science, 2023, 40(1): 208–217.
- 王晓雨, 于鑫, 沈禹颖, 等. 整合分析施肥类型对中国北方紫花苜蓿产量和营养品质的影响. 草业科学, 2023, 40(1): 208–217.
- [20] 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. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2008, 36(5): 22–26.
- 宋江湖, 呼天明, 王俭珍, 等. 施N量对西藏野生垂穗披碱草种子产量及产量因子的相关性分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(5): 22–26.
- [21] Zhang J H, Li Q F, Li X L. Studies on the effects of nitrogen and phosphate on *Elymus sibiricus* without irrigation. Chinese Journal of Grassland, 2001, 23(2): 38–41.
- 张锦华, 李青丰, 李显利. 氮、磷肥对旱作老芒麦种子生产性能作用的研究. 中国草地学报, 2001, 23(2): 38–41.
- [22] Chen L J, Zou B J, Shi Y, *et al.* Effect of fertilization on root development, root metabolism of spring wheat and the mechanism of fertilization on soil water utilization. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 1995, 1(2): 26–32.
- 陈利军, 邹邦基, 史奕, 等. 旱地施肥对春小麦根系生长、代谢的影响及促进水分有效利用的机理. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 26–32.
- [23] He X, Li Q F, Suo Q Y. Effects of fertilizer applications on seed production and seed yield components of grasses in rain-fed cultivation practice I. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2001, 15(5): 79–83.
- 贺晓, 李青丰, 索全义. 旱作条件下施肥对老芒麦和冰草种子产量及构成的影响I-氮、磷、钾对牧草种子产量及构成的影响. 干旱区资源与环境, 2001, 15(5): 79–83.
- [24] Xu Z M, Zhou Q P, Liu Y F, *et al.* Effects of fertilization on the seed yield of *Elymus sibiricus*. Journal of Gansu Agricultural

- University, 2004, 46(6): 639—643.
- 徐智明, 周青平, 刘云芬, 等. 平衡施肥对老龄多叶老芒麦种子产量的影响. 甘肃农业大学学报, 2004, 46(6): 639—643.
- [25] You M H. Study on key technologies of seed production of *Elymus sibiricus* L. in the Sichuan northwestern plateau. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2012.
- 游明鸿. 川西北高原老芒麦种子丰产关键技术研究. 成都: 四川农业大学, 2012.
- [26] Chen L K, Shen M. The effect of different fertilization and row spacing on seed production of *Elymus sibiricus* L. cv. chuancao No. 2. Journal of Grassland and Forage Science, 2007, 28(9): 21—27.
- 陈立坤, 沈敏. 不同行距、不同施肥量处理对“川草2号”老芒麦种子生产的影响. 草业与畜牧, 2007, 28(9): 21—27.
- [27] Zhang W Y, Zhou Q P, Xu C T. Effect of fertilizer on procreative performance of *Elymus sibiricus* cv. Duo Ye in Gonghe area. Qinghai Prataculture, 2005, 14(2): 2—6.
- 张维云, 周青平, 徐成体. 共和地区施肥对多叶老芒麦生产性能的影响. 青海草业, 2005, 14(2): 2—6.
- [28] Zou H, Gao G Y, Zhu B, *et al.* Modeling of the response of soil moisture to precipitation in the restored grasslands of the Loess Plateau. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 890—898.
- 邹慧, 高光耀, 朱斌, 等. 黄土高原恢复草地土壤水分对降水响应及模拟. 干旱区研究, 2020, 37(4): 890—898.
- [29] Li C R. The effect of ridge-furrow collecting water planting on the growth and development and yield of *Elymus sibiricus* L. in semi-arid region. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- 李春荣. 半干旱地区垄沟集雨种植对老芒麦(*Elymus sibiricus* L.)生长和产量的影响. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [30] Han M L, Bai S Q, Sun S N, *et al.* Simulation of *Elymus sibiricus* L. distribution in Tibetan Plateau based on MaxEnt model. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(2): 374—382.
- 韩梦丽, 白史且, 孙盛楠, 等. 基于MaxEnt模型青藏高原老芒麦适生区模拟预测. 草地学报, 2021, 29(2): 374—382.
- [31] Yin M H, Ma Y L, Kang Y X, *et al.* Effects of nitrogen application on alfalfa yield and quality in China—A meta analysis. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(9): 36—49.
- 银敏华, 马彦麟, 康燕霞, 等. 氮素添加对中国苜蓿产量与品质效应的Meta分析. 草业学报, 2022, 31(9): 36—49.
- [32] Yi X S, Li G S, Yin Y Y, *et al.* Preliminary study for the influences of grassland degradation on soil water retention in the source region of the Yellow River. Journal of Natural Resources, 2012, 27(10): 1708—1719.
- 易湘生, 李国胜, 尹衍雨, 等. 黄河源区草地退化对土壤持水性影响的初步研究. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1708—1719.
- [33] Li X, Gou M M, Qu Z Y, *et al.* Effect of biochar on moisture characteristics of sandy loam soils. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(12): 280—283.
- 李兴, 勾芒芒, 屈忠义, 等. 生物炭对沙壤土水分特征的影响. 江苏农业科学, 2018, 46(12): 280—283.
- [34] Gao R P, Zhao P Y, Liu X Y, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil physicochemical and biological properties of chestnut calcareous soil in agro-pastoral ecotone. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(3): 552—560.
- 高日平, 赵沛义, 刘小月, 等. 长期施肥对农牧交错带栗钙土土壤理化性质及生物学特性的影响. 生态学杂志, 2023, 42(3): 552—560.
- [35] Zhang X Y, Wang C Y, Li J X, *et al.* Effects of different fertilization treatments on soil physical and chemical properties in semi-arid area. Journal of Jilin Agricultural University, 1—6[2022-07-14]. <https://doi.org/10.13327/j.jjla>.
- 张欣宇, 王呈玉, 李锦秀, 等. 不同施肥处理对黑钙土理化性质及产量的影响. 吉林农业大学学报, 1—6[2022-07-14]. <https://doi.org/10.13327/j.jjla>.
- [36] 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.
- [37] 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.