

DOI: 10.11686/cyxb2025102

http://cyxb.magtech.com.cn

李瑒琨, 本转林, 张筠钰, 等. 不同气候和土壤条件下施肥类型影响紫花苜蓿种子产量的整合分析. 草业学报, 2026, 35(2): 54-67.

LI Yang-kun, BEN Zhuan-lin, ZHANG Jun-yu, *et al.* A meta-analysis on the effect of fertilizer type on alfalfa seed yield under various climate and soil conditions. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(2): 54-67.

不同气候和土壤条件下施肥类型影响 紫花苜蓿种子产量的整合分析

李瑒琨^{1,2}, 本转林^{1,2}, 张筠钰^{1,2}, 杨惠敏^{1,2*}

(1. 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州大学草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 足量优质饲草供应是草地畜牧业高质量可持续发展的基础条件, 这就要求不断扩大紫花苜蓿等优质饲草种植面积。因此, 亟须扩大苜蓿种子生产以满足苜蓿种植的需求, 但不同气候土壤条件下施肥对苜蓿种子产量的影响仍没有一致结论。本研究以中国为研究区域, 采用整合分析(meta-analysis)方法, 研究了不同肥料类型对苜蓿种子产量的影响, 并探讨气候和土壤条件对施肥效应的影响。结果表明: 1) 施肥能显著提高苜蓿种子产量, 其中微量元素肥单施增产效果最好, 钾肥单施和氮钾肥配施会导致产量降低。2) 随年均降水量增加, 肥料单施的增产效果减弱而多肥料配施的增产效果增强。较高年均温度导致除微量元素肥单施外其他施肥类型的增产效果均减弱。3) 土壤因子对施肥效果的影响因施肥类型而异。较高土壤有机质和全氮含量导致大部分施肥类型的增产效果增强而微量元素肥单施的增产效果减弱。较高土壤碱解氮和速效磷含量降低了氮、钾单施的增产效果而增强了磷单施的增产效果, 对多肥料配施的增产效果影响不一致。较高土壤速效钾含量增强各施肥类型的增产效果。本研究可为中国不同气候和土壤下苜蓿种子生产的施肥管理措施优化提供借鉴。

关键词: 紫花苜蓿; 种子产量; 施肥类型; 施肥效应; 整合分析

A meta-analysis on the effect of fertilizer type on alfalfa seed yield under various climate and soil conditions

LI Yang-kun^{1,2}, BEN Zhuan-lin^{1,2}, ZHANG Jun-yu^{1,2}, YANG Hui-min^{1,2*}

1. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: Supply of high-quality forage in sufficient quantity is a fundamental requirement for the development of efficient and sustainable animal production systems. To attain this goal, continuous expansion of the planting area of high-quality forages such as alfalfa is required. There is thus an urgent need to expand alfalfa seed production to meet the demand for alfalfa planting, but there remains a lack of information about effects of fertilization on alfalfa seed yield under different climatic and soil conditions. This study comprised a meta-analysis to investigate the effects of different fertilizer applications on alfalfa seed yield in China and explored the interactions between the fertilizer effect and climate and soil conditions. The results showed: 1) Fertilization could significantly increase alfalfa seed yield, with the greatest yield increase observed with the application of micronutrient fertilizers alone, while the application of potassium fertilizer alone and the combined application of nitrogen and potassium fertilizers led to yield reduction.

收稿日期: 2025-03-25; 改回日期: 2025-05-22

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFD1300801)和国家牧草产业技术体系-青藏高原牧草栽培岗位科学家项目(CARS-34)资助。

作者简介: 李瑒琨(2002-), 男, 陕西商洛人, 在读硕士。E-mail: liyk2024@lzu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: huimyang@lzu.edu.cn

2) With increase in annual precipitation, the yield-enhancement effect of single fertilizer applications weakened, while the yield-enhancement effect of multi-fertilizer applications was strengthened. Higher annual temperatures resulted in weakening of the yield-enhancement effect, except in the case of micronutrient fertilizers alone. 3) The effect of soil factors on the fertilization effect varied significantly among different fertilization categories. Higher soil organic matter and total nitrogen content enhanced the yield-enhancement effect of most fertilization categories, while slightly weakening the yield-enhancement effect of micronutrient fertilizer application alone. Higher soil alkali-hydrolyzable nitrogen and available phosphorus content reduced the yield-enhancement effect of nitrogen and potassium application alone but increased the yield-enhancement effect of phosphorus application alone, with inconsistent effects on the yield-enhancement effects of multi-fertilizer applications. Higher soil available potassium content increased the yield-enhancement effect of all fertilization categories. In summary, this study provides guidance for optimizing fertilization management measures for alfalfa for seed production in different climatic regions and for different soils in China.

Key words: *Medicago sativa*; seed yield; type of fertilization; fertilizer effect; meta-analysis

草地畜牧业高质量可持续发展对足量优质饲草料供应的要求日增,只有不断扩大种植面积才能保证饲草料供应。种植结构调整、粮改饲等政策的实施也为扩大饲草料种植面积提供了强有力支持。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)属多年生豆科草本植物,是世界上栽培面积最大的牧草品种,也是我国最重要的牧草之一^[1]。在常用豆科牧草中,苜蓿粗蛋白含量最高,并具有产量和营养价值高、耐逆性强、利用周期长等特点^[2],被誉为牧草之王。我国苜蓿种植面积长期处于较高水平,但仍不能满足饲草保供的需求,也未能满足生态环境建设的需求。截至 2023 年,全球苜蓿种植面积约为 3.3×10^7 hm²,其中我国苜蓿种植面积约为 4.34×10^6 hm²,约占 13.2%^[3]。2012—2022 年,我国苜蓿草产量从 310 万 t 增加到 450 万 t,消费量从 455 万 t 增加到 690 万 t,进口量从 145 万 t 增加到 240 万 t,但每年的进口量仍无法满足市场需求,仍有 10~100 万 t 缺口^[4]。苜蓿种植面积的扩大和需求量的增加对苜蓿种子生产提出了更高的要求。

优质苜蓿种子供应量决定了种植面积,但我国目前苜蓿种子生产水平偏低、供应能力较弱,限制了饲草种植面积的扩大。截至 2017 年,我国苜蓿种子生产的种植面积仅为 3.83 万 hm²,种子单产达到 320 kg·hm⁻²,总产约 1.2 万 t。美国苜蓿种子生产的种植面积与我国相似,但种子单产达到 668 kg·hm⁻²,总产约 2.9 万 t^[5]。为满足建植更多苜蓿地以生产饲草的需求,我国每年都需要进口大量苜蓿种子。2017—2021 年,我国苜蓿种子进口量呈现快速增长的趋势,从 2017 年的 0.12 万 t 到 2021 年的 0.52 万 t,增幅达 4.1 倍^[6]。长期高度依赖种子进口不利于我国苜蓿产业和草地畜牧业的高质量发展。因此,亟须针对种子产量提升调控机制开展系统性的研究,以指导种子生产的管理。

施肥是增强苜蓿饲草生产性能的有效管理措施,前人研究得到了大量行之有效的技术和方法,提升了苜蓿生产力。研究表明,施肥在提升苜蓿产量、改善苜蓿品质方面有着显著的作用^[7-8]。但是,有关施肥对苜蓿种子生产影响的研究相对较少,也缺乏一致的结论。田新会等^[9]于甘肃研究氮磷钾配合施用对苜蓿种子产量的影响,发现特定施肥量下,氮磷钾配施使苜蓿种子产量有显著提升。鞠晓峰等^[10]于黑龙江省研究磷钾肥配比对苜蓿种子产量的影响,发现施肥可以提高苜蓿种子产量,而且磷、钾肥的不同配比会影响产量提高的幅度。马霞等^[11]于新疆维吾尔自治区研究不同施氮水平下接种根瘤菌对苜蓿种子产量的影响,发现低施氮条件有助于提高种子产量,高施氮条件则相反。前人的大量研究得到了适宜不同地区苜蓿种子生产的施肥方法,对各地区苜蓿种子生产具有借鉴意义。

我国苜蓿种子生产主要分布于北部和西部,但各地区气候土壤条件差异较大,以往研究相对零散,得到的施肥研究结果也并不一致。因此,亟须统筹全国各地的研究结果,分析不同气候和土壤下施肥调节苜蓿种子生产的效果,以更好地指导苜蓿种子生产的施肥管理。本研究使用 meta 分析方法,分析总结了不同降水、温度和土壤主

要养分特性下施肥类型对苜蓿种子产量的影响,以期为我国苜蓿种子生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源和处理

在 Web of Science(<https://www.webofscience.com>)和中国知网(<https://www.cnki.net>)两大文献检索平台进行中英文文献检索,收集了从2000年1月至2024年8月施肥对中国苜蓿种子产量影响相关的研究文献,中英文检索关键词为“苜蓿”“施肥”“苜蓿氮肥”“苜蓿磷肥”“苜蓿钾肥”和“种子产量”;“fertilization”“*Medicago sativa* or alfalfa or lucerne”“alfalfa N fertilizer”“alfalfa P fertilizer”“alfalfa K fertilizer”和“seed yield”。文献筛选的标准为:1)研究所在地必须为中国(不包括香港、澳门和台湾);2)文献中的“苜蓿”特指紫花苜蓿,其他苜蓿属植物不纳入研究范围;3)应有明确的试验重复数、各试验处理均值;4)同一试验数据在不同的文献中仅收录一次;5)试验数据测量方法一致且以数字或图表形式展示;6)试验包含配对的数据组,其中对照组为不施肥处理,处理组为施肥处理。筛选得到相关文献44篇,其中中文文献41篇,英文文献3篇。文献中涉及的研究地点分布于中国9个省、直辖市或自治区,相关气象数据和土壤理化性质见表1。

表1 文献中涉及的研究地点概况

Table 1 Overview of research sites described in the literature

研究地点 Research site [#]	年均降水 Annual average precipitation (mm)	年均温度 Mean annual temperature (°C)	土壤有机质 Soil organic matter (g·kg ⁻¹)	土壤全氮 Soil total ni- trogen (g·kg ⁻¹)	土壤碱解氮 Soil alkali-hydro- lyzable nitrogen (mg·kg ⁻¹)	土壤速效磷 Soil available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	土壤速效钾 Soil available potassium (mg·kg ⁻¹)
甘肃 Gansu (14)	48.4~600.0	7.3~8.9	1.58~11.30	0.24~0.94	22.23~59.45	6.03~30.70	109.00~231.00
新疆 Xinjiang (10)	150.0~228.0	7.5~7.6	12.48~19.36	1.55~1.56	14.20~25.69	12.00~37.00	230.30~338.80
宁夏 Ningxia (4)	250.0~430.0	7.4~7.7	0.51~26.36	0.43~2.03	19.80~114.60	4.44~13.97	9.87~209.00
青海 Qinghai (1)	391.0	0.1	4.80	0.06	—	6.00	129.50
内蒙古 Inner Mongolia (5)	225.0~400.0	1.6~7.2	12.02~13.00	0.72	1.48~72.70	2.05~40.45	75.81~98.33
黑龙江 Heilongjiang (6)	427.4~450.0	3.0~4.2	2.10~30.70	—	89.25	2.40~16.12	137.35~150.00
吉林 Jilin (2)	426.8	—	2.16	—	—	—	—
北京 Beijing (1)	628.9	12.5	1.64	0.09	72.20	23.00	101.00
西藏 Tibet (1)	400.0	8.2	19.60	1.31	81.00	5.31	22.00

注: #:研究地点后括号中数字表示涉及的文献篇数;“—”代表无数据。

Note: #:Numbers in parentheses after the study site indicate the number of articles covered; “—” means no data.

1.2 数据分组

根据文献所包含信息进行整理分析后发现,施肥对苜蓿种子产量的作用效果主要受施肥类型、土壤和气候条件等的影响。因此,对这3类因素进行分组。1)施肥类型分组如下:氮(N)、磷(P)、钾(K)单独施用,氮磷(NP)、磷钾(PK)、氮钾(NK)、氮磷钾(NPK)配施和微量元素肥(MicN)。2)气候条件分组如下:年均降水量分为 ≤ 200 mm、200~400 mm和 > 400 mm;年均温度分为 ≤ 7.5 °C和 > 7.5 °C。3)土壤条件分组如下:土壤有机质含量分为 ≤ 10 g·kg⁻¹、10~20 g·kg⁻¹和 > 20 g·kg⁻¹;土壤全氮含量分为 ≤ 1 g·kg⁻¹和 > 1 g·kg⁻¹;土壤碱解氮含量分为 ≤ 50 mg·kg⁻¹和 > 50 mg·kg⁻¹;土壤速效磷含量分为 ≤ 10 mg·kg⁻¹和 > 10 mg·kg⁻¹;土壤速效钾含量分为 ≤ 150 mg·kg⁻¹和 > 150 mg·kg⁻¹。在文献中,苜蓿品种并未明确说明,故未对品种进行分组。

1.3 整合分析

1.3.1 标准差计算 在整合分析中,计算权重时使用标准差(standard deviation, SD)。使用文献中已列出的SD,或根据数据计算SD;但若文献中没有列出SD且无法计算时,则以苜蓿产量或粗蛋白含量平均值的1/10作为相应处理的SD^[12]。

1.3.2 效应值计算 在本研究中,用效应值($\ln R$)来衡量施肥对苜蓿种子产量的影响^[13]。计算公式如下:

$$\ln R = \ln \left(\frac{X_e}{X_c} \right) = \ln X_e - \ln X_c \quad (1)$$

式中: X_c 为不施肥苜蓿种子产量平均值, X_e 为施肥苜蓿种子产量平均值。

对应指标 $\ln R$ 的方差 (variance, V) 计算公式为^[13]:

$$V = \frac{Se^2}{NeXe^2} + \frac{Sc^2}{NcXc^2} \quad (2)$$

式中: Sc 为不施肥苜蓿种子产量的标准差, Se 为施肥苜蓿种子产量的标准差, Nc 为不施肥处理的重复次数, Ne 为施肥处理的重复次数。

$\ln \bar{R}$ 表示处理组与对照组的差异程度, $\ln \bar{R}$ 越大则施肥效应越强。处理组 $\ln \bar{R}$ 由不同数据对的权重加和得到,计算公式如下^[13]:

$$\ln \bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k \tau \omega_i \ln R_i}{\sum_{i=1}^k \tau \omega_i} \quad (3)$$

$$S(\ln \bar{R}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k \tau \omega_i}} \quad (4)$$

$$\omega_i = \frac{1}{V_i} \quad (5)$$

式中: ω_i 为 i 的权重, k 为统计研究的数量。 $\ln R_i$ 代表第 i 个效应值 ($\ln R_i$)。 $S(\ln \bar{R})$ 代表 $\ln \bar{R}$ 的标准差。 V_i 代表上文的方差 (V)。

95% 置信区间 (confidence interval, CI) 如下计算:

$$95\% \text{CI} = \ln \bar{R} \pm 1.96S(\ln \bar{R}) \quad (6)$$

若 95% CI 与横坐标零点相交,则处理组与对照组无显著差异,反之则差异显著。其中 95% CI 的最小值大于零,则表明该处理对相应指标为正效应;若 95% CI 的最大值小于零,则为负效应^[14]。若不同处理间 95% CI 不重叠,则不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

通过施肥类型而改变的苜蓿种子产量百分比 (percentage change, PC) 可由以下公式得出^[15]:

$$\text{PC} = [\exp(\ln \bar{R}) - 1] \times 100\% \quad (7)$$

1.3.3 异质性检验 为探究进行 meta 分析时检验样本数据是否存在统计学意义上的差异,本研究对研究结果进行异质性 Q 检验^[16],公式如下。

$$Q = \sum_{i=1}^k \tau \omega_i (\ln R_i)^2 - \frac{(\sum_{i=1}^k \tau \omega_i \ln R_i)^2}{\sum_{i=1}^k \tau \omega_i} \quad (8)$$

当结果 $P > 0.05$ 时,使用固定效应模型 (fixed effect model); 当 $P < 0.05$ 时,使随机效应模型 (random effect model)。

1.3.4 偏倚检验 对施肥条件下,苜蓿种子产量的频率分布进行高斯曲线拟合,对数据进行 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验,95% CI 的计算采用非参数估计方法 (Bootstrap-ping)^[15]。

1.4 数据处理和统计分析

文献中数据展示为表,从表中直接获取数据;如展示为图,则使用 Get-Data Graph Digitizer 8 获取数据。使用 Excel 2021 进行数据整理,使用 Metawin 2.1 进行效应值和方差计算,使用 R(4.4.1) 进行异质性检验。效应值直方图和高斯曲线拟合使用 Origin Pro 2022 制作,森林图使用 GraphPad Prism 9.5.0 制作。

2 结果与分析

2.1 施肥影响苜蓿种子产量的综合效应

在分析施肥对苜蓿种子产量效应值的基础上,进行了效应量检验、异质性检验(表2)和偏倚检验(图1)。效应量检验显示 $Z=9.52(P<0.01)$,说明效应量非常显著,具有一定的统计学意义。异质性检验中显示 $Q=7249.13(P<0.01)$,说明文献样本数据不具备统计学上的差异,同时在meta分析中选择随机效应模型。

表2 施肥对苜蓿种子产量的综合效应量

Table 2 Effect sizes of fertilization on alfalfa seed yield

平均效应值 Mean effect size	95%置信区间95%CI		效应量检验 Effect size test		异质性检验 Heterogeneity test	
	上限 Upper limit	下限 Lower limit	Z	P	Q	P
0.15	0.12	0.18	9.52	<0.01	7249.13	<0.01

注: Z:效应量检验的统计量;Q:异质性检验的统计量。

Note: Z: The statistic of effect size test; Q: The statistic of heterogeneity test.

从图1可知,施肥影响苜蓿种子产量的效应值为-1.4351~1.4446。即相比于不施肥,施肥能够影响苜蓿种子产量变化幅度为-76.19%~324.01%,其效应平均值为0.150,表明施肥能平均提高苜蓿种子产量16.37%。总体来看,施肥能提高苜蓿种子产量,但波动较大。

2.2 施肥类型对苜蓿种子产量的影响

从图2可知,除K单施和NK配施导致减产外,其他施肥类型均能显著($P<0.05$)提高苜蓿种子产量。种子产量提高最多的施肥类型是MicN单施,平均增产23.64%。N单施的增产效果次之,平均增产17.92%。P单施和NP、PK、NPK配施增产幅度为11.13%~15.88%。K单施和NK配施分别导致种子产量平均减少4.89%和1.61%。

2.3 不同气候条件下施肥对苜蓿种子产量的影响

2.3.1 年平均降水量对施肥效应的影响

在不同年均降水量下,各施肥类型对种子产量的影响不同(图3)。随年均降水量增加,N、K、MicN单施的增产效果逐渐减弱,PK配施的增产效果逐渐增强,P单施和NP配施的增产效果先减弱后增强,而NPK配施的增产效果先增强后减弱。在年均降水量 ≤ 200 mm的地区(无NK配施研究),各施肥类型均提高苜蓿种子产量,其中N、P、MicN单施能显著($P<0.05$)增产(图3a)。MicN单施的增产效果最好,平均增产38.24%;P、N单施的效果次之,增产20%以上;K单施的效果最差,平均仅增产1.36%。在年均降水量200~400 mm的地区(无K单施和NK配施研究),除P单施导致减产7.84%外,其他施肥类型均提高种子产量,但仅MicN单施能显著($P<0.05$)增产,平均增产20.97%(图3b)。NPK配施平均增产30.72%,但波动较大。在年均降水量 >400 mm的地区(无N单施研究),除K单施和NK配施导致减产外,其他施肥类型均能显著($P<0.05$)提高种子产量(图3c)。NP配施的增产效果最好,平均增产55.33%;PK配施的效果次之,平均增产46.24%。K单施和NK配施分别导致苜蓿种子产量平均减少12.76%和1.61%。

2.3.2 年平均温度对施肥效应的影响

年均温度可改变施肥影响苜蓿种子产量的效果(图4)。较高温度增强了MicN单施的增产效果,减弱了其他施肥类型的增产效果。在年均温度 ≤ 7.5 °C的地区,除NK配施导致减产

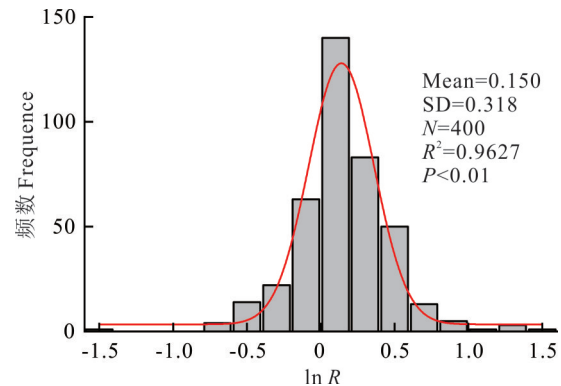


图1 苜蓿种子产量效应值的频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of effect size of alfalfa seed yield

Mean, SD, N, R^2 , P 分别代表数据平均值、标准差、组数、高斯拟合曲线的回归系数和 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 检验的 P 值。Mean, the average value; SD, standard deviation; N, number of groups; R^2 , R-Squared of a Gaussian distribution function; P, P-value of Kolmogorov-Smirnov test.

外,其他施肥类型均提高苜蓿种子产量(图 4a)。N、P 单施和 NP、PK、NPK 配施能显著 ($P < 0.05$) 增产。NP 配施的增产效果最好,平均增产 40.34%;NPK 配施和 N 单施的效果次之,增产效果分别为 20.70% 和 17.92%。NK 配施导致种子产量平均减少 1.61%。在年均温度 $> 7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地区(无 N 单施和 NK 配施研究),除 K 单施导致减产外,其他施肥类型均提高种子产量(图 4b)。MicN 单施能显著 ($P < 0.05$) 增产,平均增产 39.15%。K 单施导致种子产量平均减少 16.85%。

2.4 不同土壤条件下施肥对苜蓿种子产量的影响

2.4.1 土壤有机质含量对施肥效应的影响 不同地区的土壤有机质含量会影响施肥类型对苜蓿种子产量的增产效果(图 5)。随土壤有机质含量增加,P 单施和 NP、PK 配施的增产效果均先减弱后增强,N 单施和 NPK 配施的增产效果逐渐增强,而 K、MicN 单施的增产效果逐渐减弱。在土壤有机质含量 $\leq 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地区(无 NK 配施研究),各施肥类型均提高苜蓿种子产量,但仅 P、MicN 单施能显著 ($P < 0.05$) 增产(图 5a)。MicN 单施的增产效果最好,平均增产 32.83%;K 单施的效果最差,平均仅增产 1.36%。在土壤有机质含量为 $10\sim 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地区(无 K 单施和 NK、NPK 配施研究),各施肥类型均提高苜蓿种子产量,但仅 N、

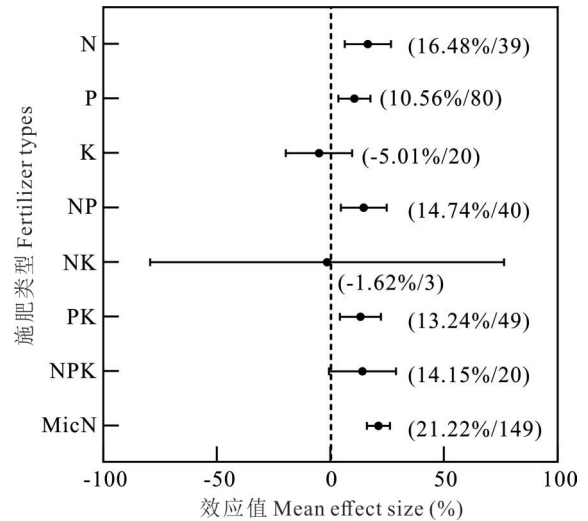


图 2 不同施肥类型对苜蓿种子产量的影响
Fig. 2 Effect of different types of fertilization on alfalfa seed yield

N: 氮、P: 磷、K: 钾、MicN: 微量元素肥单独施用;NP: 氮磷、PK: 磷钾、NK: 氮钾、NPK: 氮磷钾肥料配合施用;括号中左侧的百分数代表效应值;右侧的数字代表该施肥类型的文献中所取得的样本量。下同。N: nitrogen, P: phosphorus, K: potassium, MicN: micronutrient fertilizer alone; NP: nitrogen-phosphorus, PK: phosphorus-potassium, NK: nitrogen-potassium, NPK: nitrogen-phosphorus-potassium fertilizers applied in combination; Percentages on the left in parentheses represent the ln R; The numbers on the right represent the sample sizes obtained in the literature for that type of fertilizer application. The same below.

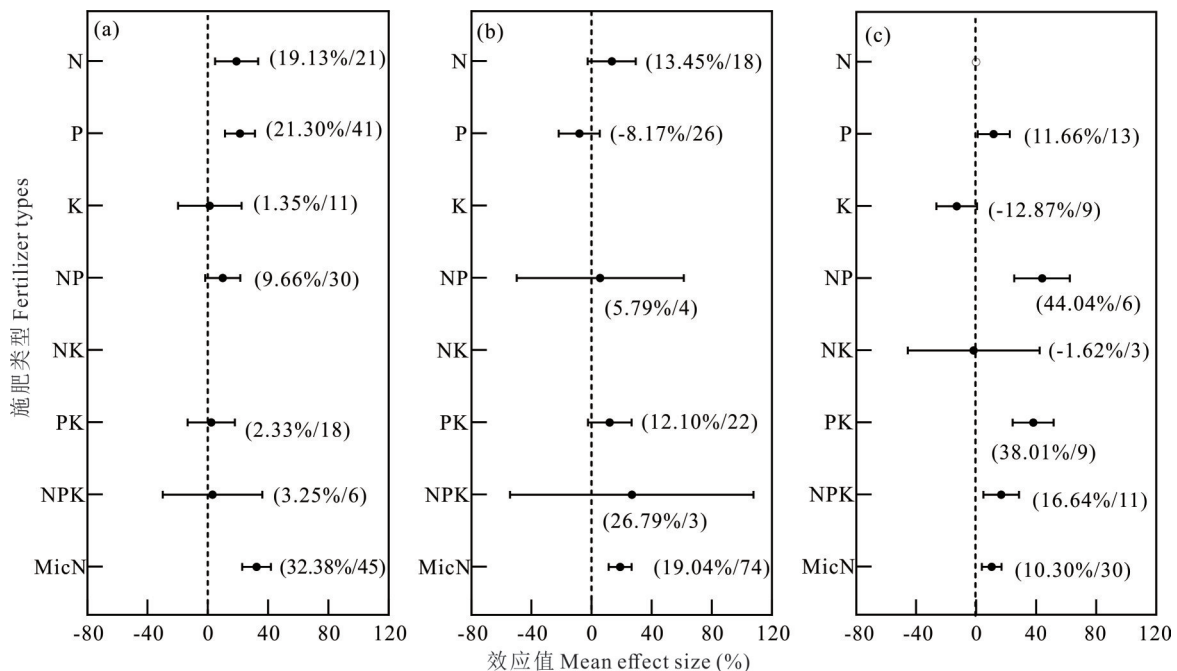


图 3 不同年均降水量下施肥对苜蓿种子产量的影响

Fig. 3 Effect of fertilization on alfalfa seed yield under different annual average precipitations

a, b, c: 年平均降水量 $\leq 200\text{ mm}$, $200\sim 400\text{ mm}$ 和 $> 400\text{ mm}$ 。a, b, c: mean annual precipitation $\leq 200\text{ mm}$, $200\sim 400\text{ mm}$ and $> 400\text{ mm}$.

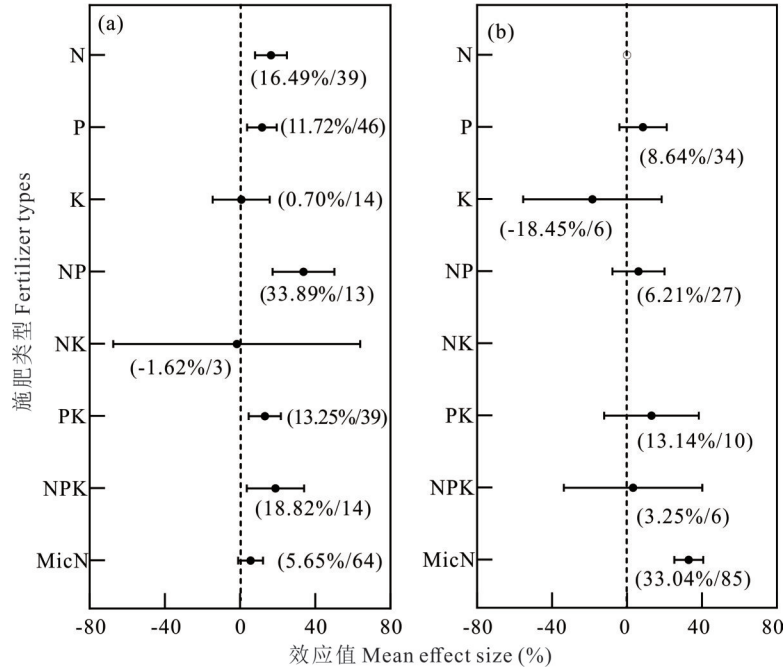


图4 施肥条件下不同年平均温度对苜蓿种子产量的影响

Fig. 4 Effect of different mean annual temperatures under fertilization conditions on seed yield of alfalfa

a和b: 年均温度 $\leq 7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $> 7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 a and b: mean annual temperatures $\leq 7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $> 7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

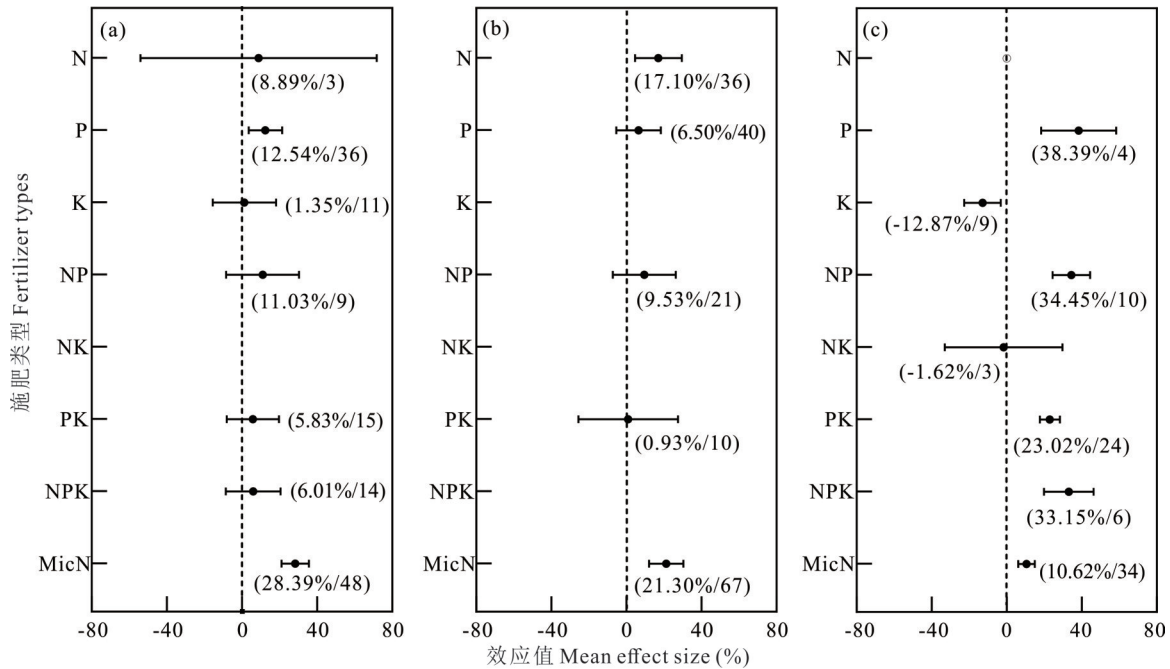


图5 施肥条件下不同土壤有机质含量对苜蓿种子产量的影响

Fig. 5 Effect of different soil organic matter contents on seed yield of alfalfa under fertilization conditions

a,b,c: 土壤有机质含量 $\leq 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $10\sim 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $> 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。 a, b, c: soil organic matter content $\leq 10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $10\sim 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $> 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

MicN单施能显著($P < 0.05$)增产(图5b)。MicN单施的增产效果最好,平均增产23.74%;PK配施的效果最差,平均仅增产0.93%。在土壤有机质含量 $> 20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地区(无N单施研究),除K单施和NK配施导致减产外,其他施肥类型均能显著($P < 0.05$)提高苜蓿种子产量(图5c)。P单施的增产效果最好,平均增产46.80%。K单施和NK配施分别导致种子产量平均减少12.07%和1.61%。

2.4.2 土壤全氮含量的影响 土壤全氮含量对不同施肥类型的增产效果有一定的影响(图 6)。较高土壤全氮含量增强了 N 单施和 NP、PK、NPK 配施的增产效果,而对 P、MicN 单施的增产效果影响不明显。在土壤全氮含量 $\leq 1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地区,除 K 单施和 NK 配施导致减产外,其他施肥类型均提高苜蓿种子产量(图 6a)。P、MicN 单施和 NP、PK 配施均能显著($P < 0.05$)提高苜蓿种子产量。其中 MicN 单施的增产效果最好,平均增产 23.62%。K 单施和 NK 配施分别导致种子产量平均减少 4.85% 和 1.61%。在土壤全氮含量 $> 1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地区(无 K 单施和 NK 配施研究),各施肥类型均提高种子产量,但仅 N、MicN 单施能显著($P < 0.05$)增产(图 6b)。NP、NPK 配施的增产效果较好,分别平均增产 55.58% 和 30.72%,但波动较大。

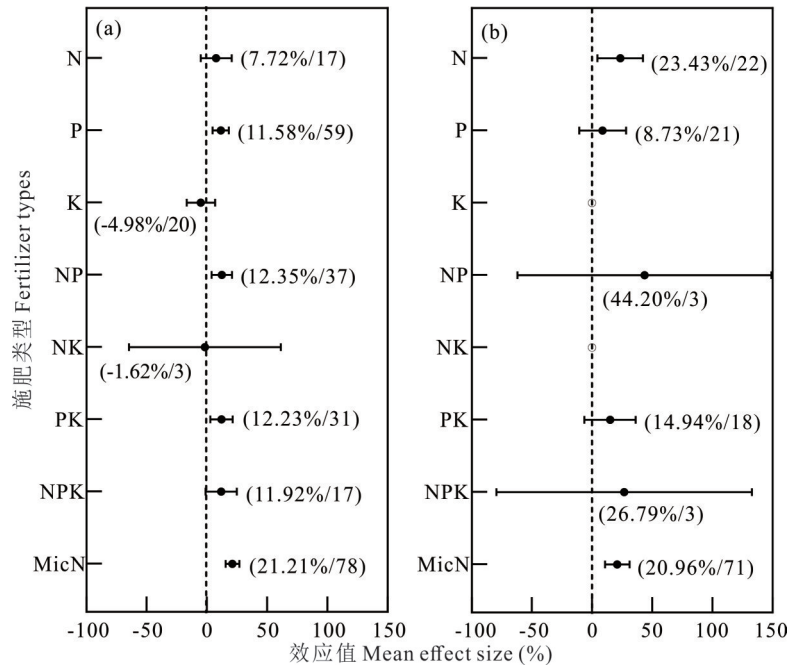


图 6 施肥条件下不同土壤全氮含量对苜蓿种子产量的影响

Fig. 6 Effects of different soil total nitrogen contents on seed yield of alfalfa under fertilization conditions

a, b: 土壤全氮含量 $\leq 1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $> 1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. a, b: soil total nitrogen content $\leq 1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $> 1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.4.3 土壤速效养分含量的影响 土壤速效养分含量对施肥增产效果影响较小(图 7)。较高土壤碱解氮含量减弱了 N、K 单施和 NP、NPK 配施的增产效果,而增强了 P、MicN 单施和 PK 配施的增产效果。在碱解氮含量 $\leq 50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地区,除 NK 配施导致减产外,其他施肥类型均提高苜蓿种子产量(图 7a)。N、P、MicN 单施和 NP 配施能显著($P < 0.05$)提高种子产量,其中 N 单施和 NP 配施分别平均增产 27.82% 和 55.42%。NK 配施导致种子产量平均减少 1.61%。在碱解氮含量 $> 50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地区(无 NK 配施研究),除 N、K 单施导致减产外,其他施肥类型均提高苜蓿种子产量(图 7b)。P、MicN 单施和 PK 配施能显著($P < 0.05$)增产,其中 P、MicN 单施分别平均增产 19.36% 和 30.73%。N、K 单施分别导致种子产量平均减少 9.90% 和 11.35%。

较高土壤速效磷含量可增强 P 单施和 NP 配施的增产效果,而减弱 N、MicN 单施和 PK 配施的增产效果(图 7c, d)。在土壤速效磷含量 $\leq 10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地区,除 K 单施和 NK 配施导致减产外,其他施肥类型均提高苜蓿种子产量,但仅 MicN 单施和 NP 配施能显著($P < 0.05$)增产(图 7c)。N、MicN 单施的增产效果较好,分别平均增产 41.86% 和 29.11%,但 N 单施的增产效果波动很大。K 单施和 NK 配施分别导致种子产量平均减少 1.71% 和 1.61%。在土壤速效磷含量 $> 10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的地区(无 NK、NPK 配施研究),除 K 单施导致减产外,其他施肥类型均提高苜蓿种子产量(图 7d)。N、P、MicN 单施和 PK 配施均能显著($P < 0.05$)增产。P 单施和 NP 配施的增产效果较好,分别平均增产 16.01% 和 55.58%,但 NP 配施的增产效果波动很大。K 单施导致种子产量平均减少 5.38%。

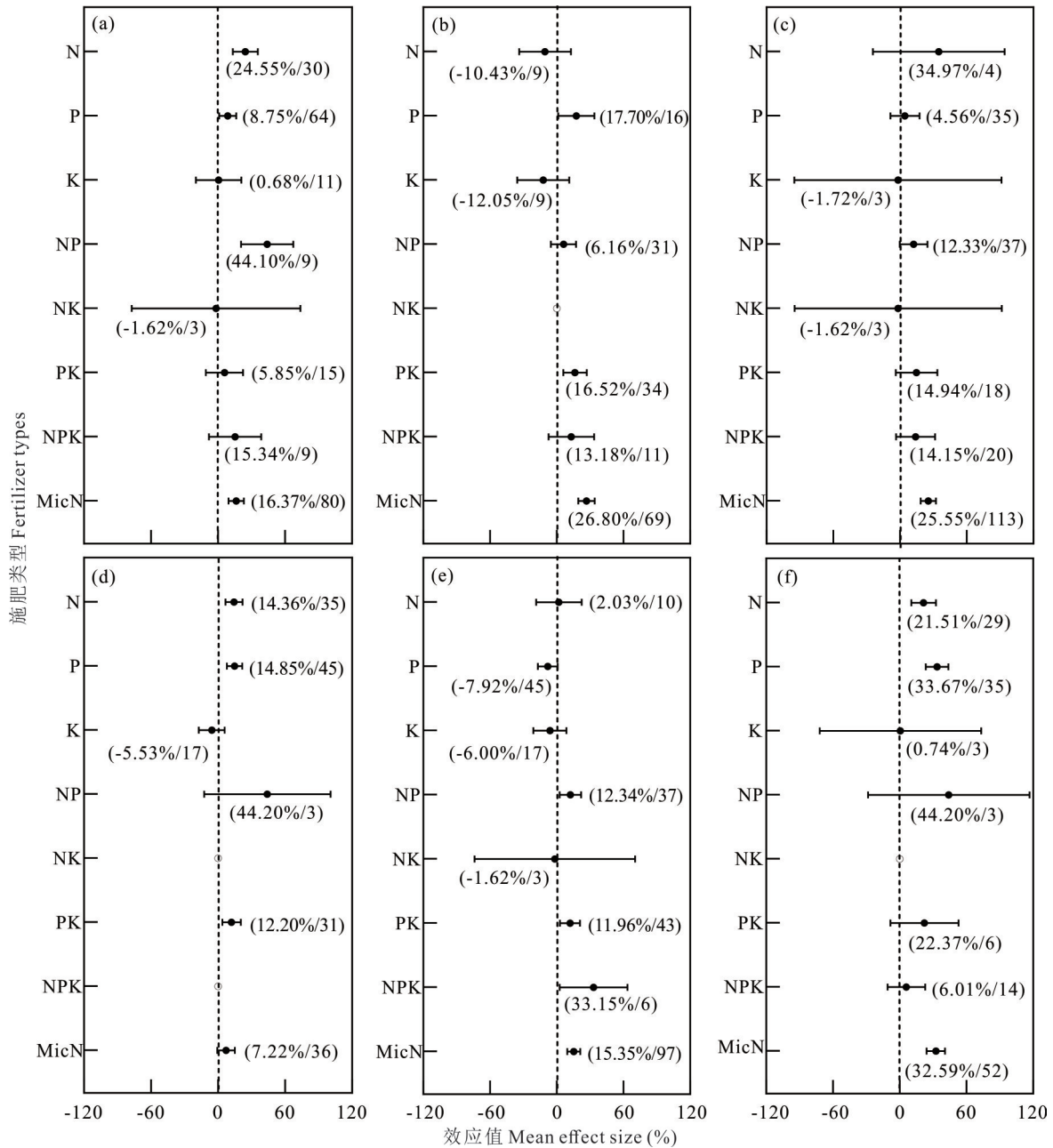


图7 施肥条件下不同土壤速效养分含量对苜蓿种子产量的影响

Fig. 7 Effects of different soil quick nutrient contents on seed yield of alfalfa under fertilization conditions

a, b: 土壤碱解氮含量 $\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $> 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; c, d: 土壤速效磷含量 $\leq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $> 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; e, f: 土壤速效钾含量 $\leq 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $> 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。a, b: soil alkali-hydrolyzable nitrogen content $\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $> 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; c, d: soil available phosphorus content $\leq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $> 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; e, f: soil available potassium content $\leq 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $> 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

较高土壤速效钾含量减弱了NPK配施的增产效果,而增强了其他施肥类型的增产效果(图7e, f)。在土壤速效钾含量 $\leq 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的地区,除P、K单施和NK配施导致减产外,其他施肥类型均提高苜蓿种子产量(图7e)。NP、PK、NPK配施和MicN单施均能显著($P < 0.05$)增产,其中NPK配施的增产效果最好,平均增产39.30%。P、K单施和NK配施分别导致种子产量平均减少7.61%、5.82%和1.61%。在土壤速效钾含量 $> 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的地区(无NK配施研究),各施肥类型均提高苜蓿种子产量(图7f),其中N、P、MicN单施能显著($P < 0.05$)增产。P、MicN单施和NP配施增产效果较好,分别平均增产40.03%、38.53%和55.58%,其中NP配施的增产效果波动很大。

3 讨论

3.1 施肥对苜蓿种子产量的增产效应

施肥是苜蓿增产提质的重要管理措施,不仅能大幅度提高苜蓿草产量,还能促进种子生产^[17]。本研究中,施肥能平均提高苜蓿种子产量 16.37%,其中 MicN 单施的增产效果最好,N、P 单施的增产效果较好,配合施肥也有不错的增产效果。相比之下,K 单施和 NK 配施等不仅没有增产效果反而会导致产量降低。本研究得出的施肥增产率高于国内其他相关报道,如毛小涛^[7]在内蒙古进行的连续 5 年施用氮肥、磷肥、硫肥、硼肥、钼肥和硒肥的试验研究和杜文华^[18]进行的氮磷钾配施和微量元素肥单施的研究结果。与饲草生产不同,种子生产中施肥对植物的调节作用差别较大。Wan 等^[19]的 meta 分析发现,施肥平均提高中国的苜蓿草产量 19.2%。说明施肥对苜蓿种子生产的增产效果略弱于饲草生产。种子生产须兼顾营养生长和生殖生长并最终侧重生殖生长,且养分在植物体内经过了更长代谢时间、作用效果更分散^[20]。此外,不同地区苜蓿种子生产中施肥的增产效果也有较大差异,如在美国和加拿大等地区对苜蓿施肥,除了严重缺肥的情况均未增加种子产量^[21],在欧洲部分地区施磷肥有显著提升^[22],在地中海地区施有机肥有不错的效果^[23],这可能是因为不同大洲的独特气候和土壤条件造成。

本研究中,MicN 单施能平均提高苜蓿种子产量 23.64%,是增产效果最好的施肥类型,且在不同气候和土壤条件下表现稳定。MicN 中包含硼、钼、硫、铁、硒、锰、锌、铜、钙等微量元素,是植物生长中重要的营养元素,对植物生长和高产具有重要作用^[24]。微量元素参与酶、激素和维生素等活性物质合成和活化,在植物花粉形成、受精等方面发挥着重要作用,对种子发育和形成有重要影响,其盈亏与种子产量密切相关^[7,25]。如植物缺硼可导致花粉粒变小、花药和花丝发育畸形、花粉活力下降等,最终结实率低而种子产量大幅降低;缺硼还可导致叶片变黄、光合作用减弱,从而降低种子产量^[26]。Dordas^[27]在希腊进行的施硼试验表明,其能达到 37% 的增产率。因此,在主要养分元素如 N、P 充足下,施 MicN 对种子产量有显著影响。但是,生产者目前对微量元素的增产提质作用了解较少,在生产中常忽视 MicN 的应用。因此,后续需加强有关研究,并在苜蓿种子生产中大力推广应用 MicN。

N 和 P 被普遍认为是植物生长发育中的重要大量元素,施 N 和 P 是行之有效的农业管理措施。苜蓿具有强大的固氮能力,施 N 以调节苜蓿生长的必要性依旧存在不一致意见^[28]。在苜蓿种子形成期,营养器官向生殖器官转移大量 N 素,促进生殖生长而抑制营养生长,同时根瘤固氮减弱,因此,对苜蓿补充 N 有助于种子的发育和结实^[29]。此外,干旱下苜蓿的固氮能力会下降^[30]。因此,为保证苜蓿正常生长发育,额外添加 N 非常必要。本研究中涉及的试验区域绝大多数位于干旱地区,施 N 大幅度提高了苜蓿种子产量,平均增产 17.92%。P 素在种子形成和发育中起到至关重要的作用^[31-32]。缺 P 会导致苜蓿种子无法发育成型,结实率低,种子产量大幅下降^[31]。苜蓿是强固氮植物,基于元素计量稳定性原因,对土壤 P 供应的需求相对于非固氮植物而言可能更大,因此,施 P 可提高种子产量^[33]。本研究中,P 单施提高苜蓿种子产量平均为 11.13%。前人在苜蓿种子生产中得到了类似结果^[32],也说明了施 P 在不同气候和土壤条件下的增产效果。但是,N、P 单施容易导致土壤单一养分过量或相对养分限制,造成资源浪费、污染或限制植物生长,因此,在许多情况下,并非最简便、最优的施肥管理选择。

与 N、P 单施相比,多肥料配施是一种平衡施肥方法,能同时补充多种元素,对种子形成有更全面的调节作用。本研究中,NP、PK、NPK 配施的综合增产率均约 15%。基于各养分的作用侧重点不同,多肥料配施可同时发挥不同养分的直接调节作用和养分间相互作用导致的间接影响,养分利用更充分,也更全面地协同促进生长发育^[34]。因此,在实际生产中,多肥料配施是简便易行、成本可控且增产效果有保证的施肥管理方法。

K 也是苜蓿生长过程中的必需元素,有助于维持光合能力、促进根系生长、增强固氮能力等,但在种子生产中的作用并不大,或者对苜蓿种子生产并无明显作用效果^[34]。本研究中,K 单施和 NK 配施均无增产效果,反而可能导致苜蓿种子产量降低,与王显国^[35]的研究结果一致。说明苜蓿生殖生长过程中对额外施 K 并无直接需求,可能与 K 是高活性元素,且土壤相对富 K 有关。不仅如此,过量 K 可能导致阳离子失衡,抑制其他养分的吸收利用,或干扰 N 代谢,从而导致减产^[36-37]。在 NK 配施情况下,N 增多还可抑制生物固氮,影响 N 吸收,最终导致减产^[38]。

3.2 不同气候条件下施肥的增产效果

苜蓿具有较强的水土保持性和耐旱性,也表现出高耗水的特性^[39]。在我国,干旱半干旱区是苜蓿主要种植区,土壤深层水分和自然降水是苜蓿生长的主要水源。在苜蓿生长后期,随土壤深层水分逐渐枯竭,自然降水成为主要水源。因此,在不进行额外灌溉情况下,自然降水量对苜蓿饲草和种子生产的影响极大,也会影响其对施肥管理措施的响应。本研究中,随年均降水量增加,N、P、K、MicN单施的增产效果均一定程度地减弱,而多肥料配施的增产效果则有一定增强。原因可能在于:1)肥料单施更易造成单一肥料过量,在降水较多时,流失损失更多,肥料利用率降低;2)施肥能缓解水分亏缺对植物生长的限制性影响,在水分供应较多时则作用较弱;3)干旱条件下,苜蓿根瘤菌数量和活力不足,K、P、MicN单施有利于根瘤菌形成和功能发挥,提高生物固氮效率;在水分供应较多时,苜蓿固氮能力较强,P、MicN单施对根瘤菌的促进作用不明显^[40-42]。相比之下,多肥料配施能平衡养分供应,在降水较多时更能发挥作用。

本研究中,较高年均温度导致除MicN单施外其他施肥类型的增产效果均减弱。高温会缩短苜蓿生育期,引起苜蓿开花提前和植物蛋白质变性,导致苜蓿易受病虫害的影响,最终降低种子产量^[43]。考虑到微量元素在酶、激素和维生素等活性物质合成和活化方面的作用,MicN单施或有助于苜蓿耐受高温,最终提高种子产量。在实际生产中,合理施用MicN不仅可以提高产量和品质,还可有效增强作物对病害、低温、高温和干旱的抗逆性^[44]。

3.3 不同土壤条件下施肥的增产效果

土壤条件影响种子和饲草生产的施肥效果^[45],但具体影响程度取决于土壤因子和施肥类型。土壤有机质是土壤中最大的元素库,可为植物提供超过95%的N和20%~70%的P,不仅能在分解时释放出维生素、氨基酸和激素等成分来刺激植物生长,还能影响微生物活动调节土壤养分循环^[46]。本研究中,随土壤有机质含量增加,N、P单施和NP、PK、NPK配施的增产效果逐渐增强,而K、MicN单施的效果减弱。因此,大部分施肥类型在较高土壤有机质含量下可能更易发挥作用,从而表现出更强的增产效果。与此相反,植物中K相对充足且活性高,而植物对微量元素的需求较少,K、MicN单施的增产效果在较高土壤有机质含量下更不明显,K单施甚至引起种子产量降低。土壤全氮是供应植物有效氮素的源和库,反映了土壤的整体氮素状况。本研究中,较高土壤全氮含量能增强N单施和NP、PK、NPK配施的增产效果,而减弱了P单施的增产效果。当土壤全氮含量较高时,土壤中微生物、酶等活性较高,有利于肥料的释放和吸收利用,从而更好地提高种子产量^[47]。但较高土壤全氮含量下P单施增产效果的减弱却无法解释,或须更多深入研究来阐明有关机制。

与土壤有机质和全氮不同,土壤速效养分是植物当下能直接吸收利用的养分,反映了即时土壤养分供给能力。本研究中,较高土壤碱解氮含量降低了N、K单施和NP、NPK配施的增产效果,增强了P、MicN单施和PK配施的增产效果。这种影响与土壤全氮含量对施肥增产效果的调节几乎完全相反。这种情况下,微生物、酶等对新加入肥料的“激活”作用可能不存在或较弱,反而可能是土壤已有较多易吸收利用N掩盖了新加入含N肥料的作用,其他养分相对限制而减弱了施肥增产效果,且也基于养分平衡的原因,增强了非N肥料的增产效果^[48]。较高土壤速效磷含量增强了P单施和NP配施的增产效果而减弱了N、K、MicN单施和PK配施的增产效果。土壤速效磷含量较高意味着较强磷酸酶活性因而可促进P和NP中P的释放和吸收利用^[49]。但较高土壤速效磷含量下其他施肥类型增产效果的减弱缺乏较一致的解释,尚待进一步研究。较高土壤速效钾含量导致除NPK配施外其他施肥类型的增产效果均增强。速效钾能促进苜蓿根系生长,提升了植物耐逆性和抗倒伏的能力^[18]。因此,较高土壤速效钾含量或意味着苜蓿根系较发达,有利于对新加入肥料的吸收利用。

4 结论

1)施肥能显著提高苜蓿种子产量,微量元素肥单施增产效果均较好,钾肥单施和氮钾肥配施会导致产量降低。2)随年均降水量增加,肥料单施的增产效果减弱而多肥料配施的增产效果增强。较高年均温度导致除微量元素肥单施外其他施肥类型的增产效果均减弱。3)土壤因子对施肥效果的影响在不同施肥类型间差异较大。较高土壤有机质和全氮含量导致大部分施肥类型的增产效果增强而微量元素肥单施的增产效果略减弱。较高土壤碱解氮和速效磷含量降低了氮、钾单施的增产效果而增强了磷单施的增产效果,对多肥料配施的增产效果影响不

一致。较高土壤速效钾含量可增强各施肥类型的增产效果。

参考文献 References:

- [1] Chmeliková L, Wolfrum S, Schmid H, *et al.* Seasonal development of biomass yield in grass-legume mixtures on different soils and development of above- and belowground organs of *Medicago sativa*. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(3): 329–346.
- [2] Hadidi M, Ibarz A, Pagan J. Optimisation and kinetic study of the ultrasonic-assisted extraction of total saponins from alfalfa (*Medicago sativa*) and its bioaccessibility using the response surface methodology. *Food Chemistry*, 2020, 309: 125786.
- [3] Zhou Y Z. Study on the extraction of spatial planting structure of alfalfa based on Sentinel-2 data. *South Agricultural Machinery*, 2024, 55(18): 62–65.
周杨振. 基于 Sentinel-2 数据的苜蓿空间种植结构提取研究. *南方农机*, 2024, 55(18): 62–65.
- [4] Li C J, Guo Q, Wang Z X. Study on the demand of alfalfa grass import in China. *China Feed*, 2025(3): 145–150.
李翠锦, 郭琦, 王姿璇. 我国苜蓿草进口需求研究. *中国饲料*, 2025(3): 145–150.
- [5] Wang X M, Zhang H, Song R, *et al.* Comparison of forage seed production between China and U. S. A. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(10): 2115–2125.
王雪萌, 张涵, 宋瑞, 等. 中美牧草种子生产比较. *草地学报*, 2021, 29(10): 2115–2125.
- [6] Wang X L, Zhu L, Jiang P, *et al.* Analysis on the plant quarantine approval of forage seeds imported from abroad from 2009 to 2021 in China. *Plant Quarantine*, 2023, 37(6): 62–68.
王晓亮, 朱莉, 姜培, 等. 2009–2021 年从国外引进牧草种子检疫审批情况分析. *植物检疫*, 2023, 37(6): 62–68.
- [7] Mao X T. Effects of continuous fertilization on yield and quality of alfalfa and soil mineral nutrients under non-irrigated conditions. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
毛小涛. 连续施肥对旱作苜蓿产量品质及土壤养分的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [8] Shan X H, Zhang Y L, Wang X G, *et al.* Effect of phosphorus fertilizer application rate on biomass accumulation and phosphorus absorption of alfalfa in planting year. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(8): 63–71.
单新河, 张运龙, 王显国, 等. 磷肥施用量对紫花苜蓿建植当年生物量累积和磷素吸收规律的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(8): 63–71.
- [9] Tian X H, Du W H. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer on seed yield and yield components of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Chinese Journal of Grassland*, 2008(4): 16–20.
田新会, 杜文华. 氮、磷、钾肥对紫花苜蓿种子产量及产量构成因素的影响. *中国草地学报*, 2008(4): 16–20.
- [10] Ju X F, Liu X P, Li G L, *et al.* Effect of different phosphorus and potassium fertilizer ratios on alfalfa seed yield. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2012(5): 85–87.
鞠晓峰, 刘香萍, 李国良, 等. 不同磷、钾肥比对紫花苜蓿种子产量的影响. *黑龙江畜牧兽医*, 2012(5): 85–87.
- [11] Ma X, Wang L L, Li W J, *et al.* Effects of different nitrogen levels on nitrogen fixation and seed production of alfalfa inoculated with rhizobia. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(1): 95–102.
马霞, 王丽丽, 李卫军, 等. 不同施氮水平下接种根瘤菌对苜蓿固氮效能及种子生产的影响. *草业学报*, 2013, 22(1): 95–102.
- [12] 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.
- [13] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150–1156.
- [14] Geisseler D, Scow K M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms—A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 54–63.
- [15] Wang L L, Li Q, Coulter J A, *et al.* Winter wheat yield and water use efficiency response to organic fertilization in Northern China: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 2020, 229: 105934.
- [16] Card N A. Applied meta-analysis for social science research. New York: Guilford Press, 2011.
- [17] Malhi S S, Goerzen D W. Improving yield in alfalfa seed stands with balanced fertilization. *Journal of Plant Nutrition*, 2010, 33: 2157–2166.
- [18] Du W H. Regulations on vegetative and reproductive growth of alfalfa (*Medicago sativa* L.). Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2005.

- 杜文华. 紫花苜蓿营养生长与生殖生长的调控. 兰州: 甘肃农业大学, 2005.
- [19] Wan W F, Li Y J, Li H G. Yield and quality of alfalfa (*Medicago sativa* L.) in response to fertilizer application in China: A meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1051725.
- [20] Zhang W H, Zhou Y C, Dibley K E, *et al.* Nutrient loading of developing seeds. *Functional Plant Biology*, 2007, 34(4): 314–331.
- [21] Clarence M R, Marble V, Brown D, *et al.* Seed production practices. *Agronomy Monographs Alfalfa and Alfalfa Improvement*, 1988: 985–1021.
- [22] Craiu D, Florea A, Gaidanov I, *et al.* Experimental results with lucerne seed crops in the Danube plain. *Probleme de Agrofitehnie Teoretică și Aplicată*, 1983, 5(2): 171–183.
- [23] Vasileva V, Kostov O. Effect of mineral and organic fertilization of alfalfa on some seed yield characteristics, root biomass accumulation and soil humus content. *Acta Agriculturae Serbica*, 2015, 20(39): 51–65.
- [24] Jiao W T, Chen W P, Chang A C, *et al.* Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: a review. *Environmental Pollution*, 2012, 168: 44–53.
- [25] Du W H, Tian X H, Cao Z Z, *et al.* Effects of micronutrients on seed yield and yield components of alfalfa. *Journal of Plant Nutrition*, 2009, 32(5): 809–820.
- [26] Chen T. Effect of irrigation and boron fertilization on seed yield and quality of new strains of alfalfa and sainfoin in Hexi region. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
陈涛. 灌溉与硼肥对河西地区紫花苜蓿和红豆草新品系种子产量及质量的影响. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [27] Dordas C. Foliar boron application improves seed set, seed yield, and seed quality of alfalfa. *Agronomy Journal*, 2006, 98(4): 907–913.
- [28] Yang J, Sui X Q, Wang X Y, *et al.* Effect of combined application of nitrogen fertiliser and compound nitrophenol sodium on the physiological characteristics and seed yield of alfalfa. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5): 1471–1478.
杨静, 隋晓青, 王鑫尧, 等. 氮肥与复硝酚钠复配施用对紫花苜蓿生理特性及种子产量的影响. *草地学报*, 2024, 32(5): 1471–1478.
- [29] Chen L L, Ren W, Mao P S, *et al.* Effects of nitrogen application on seed yield and nitrogen accumulation in alfalfa (*Medicago sativa*). *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(6): 98–104.
陈玲玲, 任伟, 毛培胜, 等. 氮素对紫花苜蓿种子产量与氮累积动态变化的影响. *草业学报*, 2017, 26(6): 98–104.
- [30] Zhu J Q, Lu H Z, Ma J, *et al.* Effects of N, P and K fertilizers on yield of alfalfa seed in Jiuquan City. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2020(5): 8–14.
朱建强, 路宏中, 马静, 等. 氮磷钾配施对酒泉市紫花苜蓿种子产量的影响. *甘肃农业科技*, 2020(5): 8–14.
- [31] Moir J, Jordan P, Moot D, *et al.* Phosphorus response and optimum pH ranges of twelve pasture legumes grown in an acid upland New Zealand soil under glasshouse conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 16(2): 438–460.
- [32] Xing L M. Effects of different phosphorus supply levels on the growth and functional diversity of rhizosphere microorganisms in alfalfa. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.
邢麟木. 不同供磷水平对苜蓿生长及根际微生物功能多样性的影响. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022.
- [33] Sterner R W, Elser J J. *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*. Princeton: Princeton University Press, 2003.
- [34] Lu J X, Sun Y. Research progress on the effect of fertilization on seed yield of alfalfa. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2013(5): 133–137.
陆继肖, 孙彦. 施肥对苜蓿种子产量影响的研究进展. *黑龙江农业科学*, 2013(5): 133–137.
- [35] Wang X G. Effects of density manipulation, cutting, fertilizer and growth regulator application on the characteristics related to alfalfa (*Medicago sativa* L.) seed yield and quality. Beijing: China Agricultural University, 2005.
王显国. 密度调控、施肥、刈割等措施对紫花苜蓿种子产量和质量的影响. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [36] Johnson R, Vishwakarma K, Hossen M S, *et al.* Potassium in plants: growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 172: 56–69.
- [37] Yang X Y, Xia T Y, Wu T. Potassium nutrient stress in plants: A review. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(18): 101–106.
杨晓燕, 夏体渊, 吴甜. 植物钾营养胁迫研究进展. *中国农学通报*, 2023, 39(18): 101–106.
- [38] Yang Z W, Shen Y Y, Xie T L, *et al.* Biological nitrogen fixation efficiency in soybean under different levels of nitrogen

- supply. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(3): 574–579.
- 杨子文, 沈禹颖, 谢田玲, 等. 外源供氮水平对大豆生物固氮效率的影响. *西北植物学报*, 2009, 29(3): 574–579.
- [39] Liu M G, Xu R, Yang H M. Response of alfalfa to soil moisture and effect of the irrigation. *Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition)*, 2019, 45(1): 16–22.
- 刘敏国, 许瑞, 杨惠敏. 紫花苜蓿的水分响应及灌溉效应. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2019, 45(1): 16–22.
- [40] Ren H Y, Xu Z W, Isbell F, *et al.* Exacerbated nitrogen limitation ends transient stimulation of grassland productivity by increased precipitation. *Ecological Monographs*, 2017, 87(3): 457–469.
- [41] Wen L. Effects of water deficit and nitrogen application on spring wheat growth and water and nitrogen use in Hexi region. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- 闻磊. 水分亏缺和施氮对河西地区春小麦生长和水氮利用的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [42] Athar M, Johnson D A. Nodulation, biomass production, and nitrogen fixation in alfalfa under drought. *Journal of Plant Nutrition*, 1996, 19(1): 185–199.
- [43] Elias E, Marklein A, Abatzoglou J T, *et al.* Vulnerability of field crops to midcentury temperature changes and yield effects in the Southwestern USA. *Climatic Change*, 2018, 148: 403–417.
- [44] Du W H, Tian X H, Cao Z Z. Influence of phosphorus, potassium and micro-nutrients on seed yield of alfalfa (*Medicago sativa*). *Grassland and Turf*, 2006(6): 15–18.
- 杜文华, 田新会, 曹致中. 施磷、钾肥及微肥对紫花苜蓿种子产量影响的研究进展. *草原与草坪*, 2006(6): 15–18.
- [45] Gossen B D, Ukrainetz H, Soroka J J. Effect of fertilizer on seed yield of alfalfa under irrigation in Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science*, 2004, 84(4): 1105–1108.
- [46] Witzgall K, Vidal A, Schubert D I, *et al.* Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4115.
- [47] Ali S, Liu K, Ahmed W, *et al.* Nitrogen mineralization, soil microbial biomass and extracellular enzyme activities regulated by long-term N fertilizer inputs: A comparison study from upland and paddy soils in a red soil region of China. *Agronomy*, 2021, 11(10): 2057.
- [48] Tong Y S, Zhang C P, Yu Y, *et al.* Response of microbiological properties to short-term nitrogen addition in perennial alpine cultivated grassland. *Environmental Science*, 2024, 45(12): 7316–7325.
- 童永尚, 张春平, 俞畅, 等. 多年生高寒栽培草地土壤微生物学特性对短期氮添加的响应. *环境科学*, 2024, 45(12): 7316–7325.
- [49] Liu Y L, Li Y, Zhang Y R, *et al.* Effects of long-term fertilization on phosphatase activities in paddy and dryland of yellow soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 948–955.
- 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期施肥对黄壤稻田和旱地土壤磷酸酶活性的影响. *土壤通报*, 2022, 53(4): 948–955.