

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.035

引用格式:付守全,蔡宗程,严虎,等.叶面喷施磷、钾、锌对梭罗草种子产量的影响及最优组合筛选[J].草地学报,2026,34(9):3517—3524

FU Shou-quan, CAI Zong-cheng, YAN Hu, et al. Effects of Foliar Application of Phosphorus, Potassium, and Zinc on the Seed Yield of *Kengyilia thoroldiana* and Screening for Optimal Combination[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3517—3524

叶面喷施磷、钾、锌对梭罗草种子产量的影响 及最优组合筛选

付守全^{1,2,3}, 蔡宗程^{1,2,3}, 严虎⁴, 吕亮雨^{1,2,3}, 李发毅^{1,2,3}, 保善存^{1,2,3},
张海蓉^{1,2,3}, 施建军^{1,2,3*}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 青海省高寒草地适应性管理重点实验室, 青海 西宁 810016; 4. 青海省林业工程监理中心有限公司, 青海 西宁 810003)

摘要:本研究旨在探究叶面喷施磷、钾、锌对梭罗草(*Kengyilia thoroldiana*)种子产量的影响,以突破其扩繁过程中种子产量低的瓶颈。试验设置4个梯度的磷酸二氢钾(KH_2PO_4)施用量[(A_1 :30 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), (A_2 :60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), (A_3 :90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), (A_4 :120 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)],并与定量硫酸锌(ZnSO_4) (6.25 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)进行叶面配施,测定梭罗草农艺性状、光合特性及种子产量等指标,并采用隶属函数法对各处理进行综合评价,筛选最优配施组合。结果表明,与对照(CK)相比, A_3 处理(90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ KH_2PO_4 +6.25 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ZnSO_4)显著提高了梭罗草草层高度、生殖枝高度和旗叶面积,增幅分别为44.45%、45.85%和45.15%。在光合特性方面, A_3 处理下旗叶的净光合速率和SPAD值分别较CK显著提高30.72%和54.10%。在种子产量方面, A_3 处理种子产量最高,达593.23 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较CK增加40.68%。主成分分析和隶属函数分析表明, A_3 处理综合评价D值最高,达0.93,其次为 A_2 处理(60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ KH_2PO_4 +6.25 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ZnSO_4),而CK表现最差。综上,叶面喷施 KH_2PO_4 与 ZnSO_4 能够促进梭罗草生长发育,改善光合性能,并提高种子产量。其中,90 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ KH_2PO_4 +6.25 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ZnSO_4 的联合叶面喷施方案效果最佳,为梭罗草种子生产提供了科学依据。

关键词:梭罗草;叶面喷施;磷酸二氢钾;硫酸锌;种子产量;隶属函数

中图分类号:S543.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3517-08

Effects of Foliar Application of Phosphorus, Potassium, and Zinc on the Seed Yield of *Kengyilia thoroldiana* and Screening for Optimal Combination

FU Shou-quan^{1,2,3}, CAI Zong-cheng^{1,2,3}, YAN Hu⁴, LÜ Liang-yu^{1,2,3}, LI Fa-yi^{1,2,3}, BAO Shan-cun^{1,2,3},
ZHANG Hai-rong^{1,2,3}, SHI Jian-jun^{1,2,3*}

(1. College of Animal Science and Veterinary Science, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 2. State Key Laboratory of Sanjiangyuan Ecology and Plateau Agriculture and Animal Husbandry jointly established, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 3. Key Laboratory of Adaptive Management of Alpine Grassland in Qinghai Province, Xining, Qinghai Province 810016, China; 4. Qinghai Forestry Engineering Supervision Center Co., Ltd, Xingning, Qinghai Province 810003, China)

Abstract: In order to overcome the bottleneck of low seed yield during its propagation process, this study investigated the effects of foliar application of phosphorus (P), potassium (K), and zinc (Zn) on the seed yield of

收稿日期:2025-11-03;修回日期:2026-01-11

基金项目:青海省林草局项目(青2024TG02);国家重点研发计划项目(2021YFC3201600)资助

作者简介:付守全(2002-),男,汉族,河南信阳人,硕士研究生,主要从事牧草经营管理研究,E-mail:13137602952@163.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:378605242@qq.com

Kengyilia thoroldiana. Four gradient levels of potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4), including $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (A_1), $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (A_2), $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (A_3), and $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (A_4), were combined with a fixed amount of zinc sulfate (ZnSO_4) ($6.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) for foliar co-application. Key agronomic traits, photosynthetic characteristics, seed yield, and nutritional quality were systematically evaluated. A membership function analysis was employed to conduct a comprehensive assessment of all treatments, enabling the identification of the optimal fertilization combination. Results showed that compared with control (CK), the A_3 treatment significantly increased the grass height, reproductive stem height, and flag leaf area of *Kengyilia thoroldiana* by 44.45%, 45.85%, and 45.15%, respectively. In terms of photosynthetic characteristics, the net photosynthetic rate and SPAD value of the flag leaf under the A_3 treatment were 30.72% and 54.10% higher than those under CK, respectively. Regarding seed yield, the A_3 treatment produced the highest yield, $593.23 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was 40.68% greater than CK. Principal component analysis (PCA) and membership function analysis revealed that the A_3 treatment had the highest comprehensive evaluation D value (0.93), followed by the A_2 treatment. The CK treatment exhibited the poorest performance in all evaluated parameters. In conclusion, foliar applications of KH_2PO_4 and ZnSO_4 enhanced the growth and development of *Kengyilia thoroldiana*, improved photosynthetic performance, and increased seed yield. The combined foliar application of $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ KH}_2\text{PO}_4 + 6.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ ZnSO}_4$ demonstrated the most effective outcome, providing a scientific basis for optimizing seed production in *Kengyilia thoroldiana*.

Key words: *Kengyilia thoroldiana*; Foliar spraying; Potassium dihydrogen phosphate; Zinc sulfate; Seed yield; Membership function

梭罗草(*Kengyilia thoroldiana*)为高寒草原乡土草种,具有生态适应性强、覆盖度高、抗逆性突出、对土壤要求不严等优良特性,被视为退化高寒草原生态恢复的理想物种^[1]。然而,由于其结实率低、种子产量低,难以满足规模化种植需求,且不具备机械化生产条件,限制了其在生态恢复工程中的广泛应用。因此,开展种子扩繁研究、提高种子产量,是推动梭罗草实现生态恢复规模化应用的关键环节。

营养调控是提升植物生殖生长性能的关键途径之一。研究表明,磷、钾及锌等必需矿质元素在禾本科植物花器官发育、授粉受精及籽粒灌浆等过程中发挥着重要作用^[2-4]。然而,在高寒地区,低温、强辐射和短生长季会影响土壤养分的矿化与有效性,加之磷、锌等元素易被土壤固定,根系吸收效率降低,常导致植物出现复合型营养失衡^[5-6]。叶面喷施因具有养分吸收迅速、避免土壤固定、精准施用等特性,是补充关键营养元素的有效方式^[7]。针对牧草种子产量提升,前人研究多聚焦于单一营养元素或特定营养组合的施用效应。耿智广等^[8]发现,在紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)生长季叶面喷施 0.3% KH_2PO_4 ,可使其种子产量提高 49.6%。Arpanahi等^[9]报道,在盐渍灌溉条件下对大麦(*Hordeum vulgare* L.)喷施 1% ZnSO_4 ,籽粒产量可达 $6118.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,增幅达 22.2%~29.0%。尽管上述策略在特定条件下表现出显著增产效果,但由于植物体内营养元素间存在复杂的协同与拮抗作用,单独补充某一种元素可能导致其他元素的相对缺

乏,其增产效应可能受限,尤其在高寒生态系统中更为突出。其中,磷与锌之间的相互作用尤为典型。适量磷可通过激活 PHR1 转录因子及相关转运蛋白(如 ZIP 家族),促进锌的吸收与转运;但过量磷则通过竞争吸收或沉淀形成等方式诱发锌的相对缺乏,进而抑制生殖发育^[10]。而锌的充足供应又可增强根系对磷的活化与吸收能力,形成正向反馈^[11]。此外,钾可通过维持细胞膜稳定性与酶活性,缓解离子失衡带来的生理胁迫,间接支持磷与锌的高效利用^[12]。因此,合理配施磷、钾与锌,可能在生理代谢层面实现协同增效,从而更有效地突破牧草种子低产的限制。

目前,磷、钾与锌的叶面协同施用在农作物中已有一定研究基础。例如,程培军等^[13]研究发现,喷施 KH_2PO_4 与 ZnSO_4 能有效改善烤烟(*Nicotiana tabacum* L.)叶片的光合性能,并使其产量显著提高 19.50%;Wang 等^[14]的研究则显示,喷施 KH_2PO_4 与 ZnSO_4 可显著提高冬小麦(*Triticum aestivum* L.)籽粒产量,增幅达 7.78%。然而,该施肥策略在梭罗草中的协同增效机制及其在种子生产上的应用研究尚属空白。哪种 KH_2PO_4 与 ZnSO_4 叶面配施比例能最大程度提高梭罗草种子产量? 基于此,本研究以梭罗草为研究对象,设置不同用量梯度的 KH_2PO_4 与 ZnSO_4 叶面配施,研究其对农艺性状、光合特性及种子产量的影响,明确最佳养分配施方案,旨在为梭罗草种子生产技术提供科学依据,助力其种子的规模化繁育。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区地处青海省果洛藏族自治州玛沁县(100°27′29″E, 34°23′27″N),属典型的高原大陆性气候区,海拔约3700 m,年均气温为-2.5℃,年降水量约为550 mm,年均日照时数达2500 h,牧草生长季约为150 d^[15]。

1.2 试验设计

供试材料为梭罗草,由青海省畜牧兽医科学院草原研究所提供。供试肥料为磷酸二氢钾(KH₂PO₄, P₂O₅≥52%, K₂O≥34%, 云南云天化农资连锁有限公司)和硫酸锌(ZnSO₄, Zn≥21%, 四川润尔科技有限公司)。试验采用随机区组设计原则, KH₂PO₄设置4个叶面施用量, CK处理1个, 共5个试验处理, 具体施用量见表1。每个处理3次重复。于2024年6月下旬进行开沟条播, 沟深2~3 cm, 行距20 cm, 播种量为22.4 kg·hm⁻², 小区面积20 m²(4 m×5 m), 设置1.0 m区间距, 共计15个小区。播种时, 以磷酸二铵和尿素作底肥, 施肥量均为150 kg·hm⁻², 播种后覆盖、压实土壤。于2025年6月下旬, 选择晴朗无风天气进行叶面喷施, 将KH₂PO₄溶于60 L清水, ZnSO₄溶于6.25 L清水。试验期间禁牧并设围栏保护, 不进行灌溉和其他农艺措施。

表1 各处理施肥量

Table 1 Fertilization amount of each treatment

处理 Treatment	磷酸二氢钾施用量 Application of KH ₂ PO ₄ / (kg·hm ⁻²)	硫酸锌施用量 Application of ZnSO ₄ / (kg·hm ⁻²)
CK	0	0
A ₁	30	6.25
A ₂	60	6.25
A ₃	90	6.25
A ₄	120	6.25

1.3 测定项目及方法

1.3.1 农艺性状测定 于2025年8月下旬, 在每个小区内随机选取10株生长整齐一致的梭罗草, 利用卷尺测定草层高度(即草丛中叶片主要集中分布的垂直高度)和生殖枝高度(即穗顶部最上端枝条顶端至地面的垂直距离)。采用赛默飞手持式叶面积测量仪测定旗叶叶面积, 使用游标卡尺测量植株基部茎粗。利用1 m×1 m样方框测定小区内梭罗草的盖度。

1.3.2 光合特性 于8月下旬选择晴朗天气, 每小区选取10株健康植株, 使用Li-Cor6800光合仪夹取旗叶, 测定净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间二氧化碳浓度等指标。使用手持式SPAD-502Plus叶绿素测定仪测定旗叶叶绿素相对含量(SPAD值)。

1.3.3 种子产量测定 穗长、穗宽: 于2025年8月下旬, 每小区随机选取10个成熟穗, 使用游标卡尺测量穗长和穗宽。穗长定义为穗末端至穗顶端的长度。穗宽为穗部在自然展开状态下的最大宽度。小穗数、每穗粒数、种子纵径及种子横径: 逐穗记录着生的小穗总数, 将统计过小穗数的穗样单独脱粒, 统计每穗籽粒数。使用游标卡尺测量种子纵径(种子最长轴)和种子横径(与纵径垂直方向的最大宽度)。种子产量: 种子成熟期, 在各小区随机选择3个具代表性且生长整齐的1 m样段, 人工刈割收获, 自然干燥后脱粒、清选、称重, 并换算出公顷产量。千粒重: 将各处理收获的种子清选后, 随机数取1000粒完整、成熟的种子, 用电子天平称重。

1.4 数据统计分析

所有数据均用Microsoft Excel 2016软件进行初步整理, 然后利用SPSS 27.0软件对数据进行单因素方差分析(最小显著差异法, $P<0.05$)。利用主成分分析将反映梭罗草生产性能的18个指标降维并筛选出综合指标, 然后采用隶属函数法对不同处理进行隶属函数综合评价^[16]。采用Origin 2022软件作图。

隶属函数值计算公式为:

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

权重计算公式为:

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j \quad (2)$$

综合评价值:

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) \times W_j] \quad (3)$$

上述公式中, X_j 表示第 j 个综合指标; $X_{\min}$, $X_{\max}$ 分别表示第 j 个综合指标的最小值和最大值;

$U(X_j)$ 表示第 j 个综合指标值的隶属函数值; P_j 为第 j 个综合指标的贡献率, W_j 表示第 j 个综合指标的权重; D 值为不同处理的综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对梭罗草农艺性状的影响

不同施肥处理对梭罗草的农艺性状具有显著

影响(图1)。在草层高度和生殖枝高度方面, A_3 处理表现最优,分别达到30.71 cm和45.65 cm,显著高于其他处理($P<0.05$);而对照(CK)最低,仅为21.26 cm和31.30 cm,显著低于其他处理($P<0.05$)。叶面积测定结果显示, A_3 处理的旗叶面积

最大,达6.43 cm²,较CK显著提高45.15%($P<0.05$)。在植被盖度方面,各处理介于76.00%~83.33%之间,除CK外,其他处理的盖度均超过80%。在茎粗方面, A_4 处理最大, A_3 处理次之,CK处理最小。

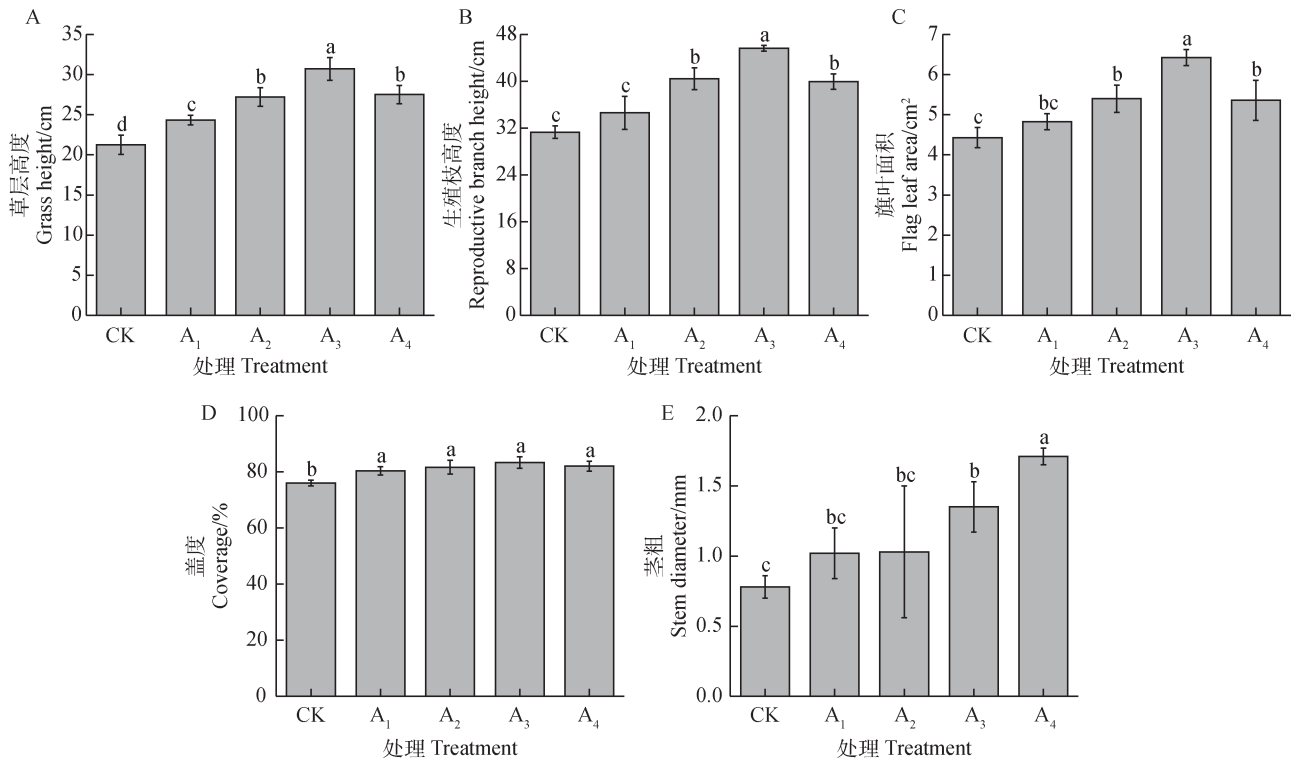


图1 不同施肥处理下梭罗草农艺性状变化

Fig. 1 Changes of agronomic characters of *Kengyilia thoroldiana* under different fertilization treatments

注:图A、图B、图C、图D和图E分别代表梭罗草的草层高度、生殖枝高度、旗叶面积、盖度和茎粗。柱上不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: Figure A, Figure B, Figure C, Figure D and Figure E represent the grass height, reproductive branch height, flag leaf area, coverage and stem diameter of *Kengyilia thoroldiana*, respectively. Different lowercase letters on the column represent significant differences between treatments ($P<0.05$). The same as below

2.2 不同施肥处理对梭罗草叶片光合特性的影响

不同施肥处理对梭罗草叶片光合特性影响显著(图2)。在各项光合参数中, A_3 处理表现最优,其SPAD值、净光合速率和气孔导度均达到最高,分别为32.70、10.85 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和0.36 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,较对照(CK)分别显著提高54.10%,30.72%和71.43%($P<0.05$),表明该处理有效增强了叶片的光能捕获能力与碳同化效率。胞间 CO_2 浓度介于411.22~477.24 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间,其中CK处理最高, A_2 处理次之, A_3 处理最低。此外, A_4 处理的蒸腾速率高达2.78 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,显著高于其他处理($P<0.05$),其次是 A_3 处理,而CK处理则处于最低水平。因此,本研究发现通过优化施肥可显著改善梭罗草的

叶绿体功能,提升气孔导度与 CO_2 同化效率,从而增强其光合生理性能,为高产栽培提供了生理基础。

2.3 不同施肥处理对梭罗草种子产量及产量构成因素的影响

不同施肥处理梭罗草种子产量及构成因素差异显著(表2)。 A_2 处理穗长最高,其次是 A_3 处理,两处理间无显著差异,但较CK分别显著提高26.36%和24.27%。穗宽介于1.05~1.14 cm之间, A_3 处理最高,比其他处理增加7.55%~12.87%,各处理间无显著差异。 A_3 处理小穗数、每穗粒数、种子横径、千粒重和种子产量均为最高,分别为17.19个、85.62个、2.34 mm、5.50 g和593.23 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,

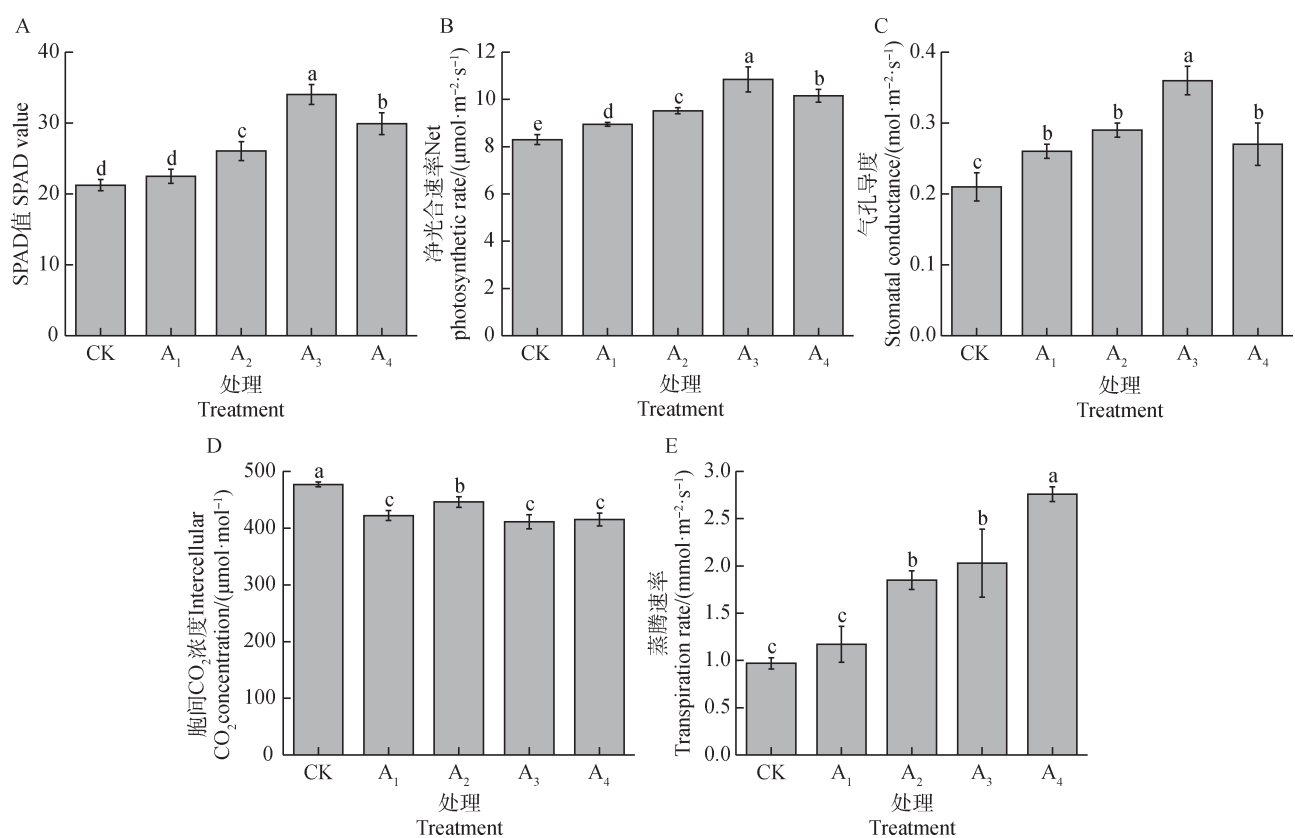


图2 不同施肥处理下梭罗草叶片光合特性的变化

Fig. 2 Changes of photosynthetic characteristics of *Kengyilia thoroldiana* leaves under different fertilization treatments

注:图A、图B、图C、图D和图E分别代表梭罗草旗叶的SPAD值、净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度和蒸腾速率
Note: Figure A, Figure B, Figure C, Figure D, and Figure E represent the SPAD value, net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercel-lular CO₂ concentration, and transpiration rate of the flag leaf of *Kengyilia thoroldiana*, respectively

较CK分别显著提高28.48%,29.61,28.58%,以A₂和A₃处理较高,均显著高于其他处理($P<0.05$),分别为8.68mm和8.51mm。

表2 不同施肥处理对梭罗草种子产量和构成要素的影响

Table2 Effects of different fertilization treatments on seed yield and components of *Kengyilia thoroldiana*

处理 Treatment	穗长 Spike length/ cm	穗宽 Spike width/ cm	小穗数 Spikelet number	每穗粒数 Number of grain per ear	种子纵径 Seed longitudinal diameter/mm	种子横径 Seed transverse diameter/mm	千粒重 Thousand-grain weight/g	种子产量 Seed yield/ (kg·hm ⁻²)
CK	4.78±0.34 ^c	1.05±0.01 ^a	13.38±0.67 ^b	66.06±4.79 ^b	7.32±0.35 ^b	1.82±0.09 ^b	5.06±0.11 ^c	421.69±26.23 ^c
A ₁	4.79±0.08 ^c	1.06±0.04 ^a	15.09±0.79 ^b	71.43±4.71 ^b	7.41±0.16 ^b	1.90±0.04 ^b	5.28±0.03 ^b	442.46±23.54 ^c
A ₂	6.04±0.20 ^a	1.01±0.06 ^a	14.20±1.04 ^b	74.59±3.73 ^b	8.68±0.620 ^a	2.03±0.07 ^a	5.31±0.06 ^b	523.62±29.08 ^b
A ₃	5.94±0.11 ^a	1.14±0.09 ^a	17.19±0.91 ^a	85.62±4.40 ^a	8.51±0.43 ^a	2.34±0.22 ^a	5.50±0.09 ^a	593.23±19.57 ^a
A ₄	5.23±0.29 ^b	1.03±0.11 ^a	14.41±1.18 ^b	72.45±5.67 ^b	7.54±0.82 ^b	1.87±0.15 ^b	5.40±0.05 ^{ab}	540.68±20.81 ^b

注:同列内不同小写字母表示0.05水平差异显著
Note: Different lowercase letters in the same column indicate the significant different level at the 0.05 level

2.4 不同施肥处理的综合评价

为综合评价不同施肥处理对梭罗草农艺性状、光合特性及种子产量的影响,本研究采用主成分分析(PCA)对18个相关指标进行降维处理。结果表明(表3),前三个主成分的特征值均大于1,累积贡献率达97.49%,能够充分反映原始数据的绝大部分信

息,适用于各处理的综合评价。第一主成分(PC1)特征值最高,达13.57,贡献率达75.36%,该主成分中,茎粗、盖度、胞间CO₂浓度、蒸腾速率、SPAD值、净光合速率和千粒重特征向量绝对值较大。第二主成分(PC2)特征值为2.27,贡献率为12.63%,其穗长、种子纵径和种子横径的特征向量绝对值较高。第三主

成分特征值为 1.710,贡献率为 9.50%,穗宽、小穗数和每穗粒数在该主成分中具有较大的特征向量绝对值。依次根据公式(1)和(2)计算出各处理的隶属函数值和 3 个主成分的权重,最后根据公式(3)计算出

不同处理的综合评价指数(D 值),D 值越大,表明处理的综合表现越优。结果表明(表 4),A₃处理的 D 值最高,达 0.93,综合表现最好;其次为 A₂处理;而 CK 最低,仅为 0.15,综合表现最差。

表 3 主成分特征向量及累计贡献率

Table 3 Principal component eigenvector and cumulative contribution rates

项目 Project	观测指标 Observation index	主成分 Principal constituent		
		1	2	3
特征值 Eigenvalue		13.564	2.274	1.710
贡献率 Contribution rate/%		75.354	12.632	9.501
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%		75.354	87.986	97.486
特征向量 Eigenvector	草层高度 Grass height	0.677	0.625	0.388
	生殖枝高度 Reproductive branch height	0.620	0.693	0.365
	茎粗 Stem diameter	0.993	0.013	0.063
	旗叶面积 Flag leaf area	0.538	0.651	0.526
	盖度 Coverage	0.737	0.519	0.318
	胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration	−0.796	−0.059	−0.503
	蒸腾速率 Transpiration rate	0.945	0.256	−0.145
	SPAD 值 SPAD value	0.764	0.476	0.358
	气孔导度 Stomatal conductance	0.409	0.637	0.648
	净光合速率 Net photosynthetic rate	0.761	0.488	0.412
	穗长 Spike length	0.271	0.960	0.075
	穗宽 Spike width	−0.044	0.029	0.964
	小穗数 Spikelet number	0.340	0.337	0.876
	每穗粒数 Number of grain per ear	0.400	0.386	0.829
	种子纵径 Seed longitudinal diameter	0.106	0.982	0.122
	种子横径 Seed transverse diameter	0.157	0.785	0.598
	千粒重 Thousand-grain weight	0.768	0.447	0.438
	种子产量 Seed yield	0.689	0.643	0.293

表 4 不同处理的综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation of different treatments

处理 Treatment	隶属函数值 Membership function value			D 值 D value	综合评价 Comprehensive assessment
	U(x ₁)	U(x ₂)	U(x ₃)		
CK	0.000	0.824	0.389	0.145	5
A ₁	0.316	0.772	0.000	0.345	4
A ₂	0.541	0.620	1.000	0.595	2
A ₃	1.000	1.000	0.235	0.926	1
A ₄	0.598	0.000	0.204	0.482	3
权重 Weight	0.773	0.130	0.097		

3 讨论

本研究结果表明,叶面喷施 KH₂PO₄与 ZnSO₄能显著改善梭罗草的农艺性状、光合特性及种子产量。其中 A₃处理(90 kg·hm^{−2} KH₂PO₄+6.25 kg·hm^{−2} ZnSO₄)效果最佳,与对照(CK)相比,该处理旗叶面积和净光合速率分别显著提高 45.15%和 30.72%,种子产量显著增加 40.68%,穗部发育指标(小穗数、每穗粒数、千粒重)均显著提升,综合评价 D 值高达 0.93。

在高寒荒漠区,碱性土壤中磷与锌易发生化学拮抗,严重制约梭罗草对这两种关键营养元素的吸收利用^[17]。与以往多数研究聚焦于单一营养元素施用或土壤基施不同,本研究通过叶面喷施 KH₂PO₄与 ZnSO₄,有效规避了土壤中磷、锌相互固定的问题。研究表明,在碱性土壤中,磷酸根(PO₄^{3−})易与锌离子(Zn²⁺)结合生成难溶性 Zn₃(PO₄)₂沉淀,导致二者生物有效性降低^[18]。Sacristán 等^[19]研究发现,土壤中过量施用磷肥会显

著抑制小麦对锌的吸收,导致植株出现缺锌症状。而本研究通过叶面喷施途径使磷和锌直接进入梭罗草叶片组织,绕过土壤固定过程,可能在细胞间隙或共溶体系中形成有利于协同吸收的微环境,从而提升养分利用效率。该策略与Kumar等^[20]在玉米上采用“P-Zn叶面共喷”以提高籽粒锌含量的研究思路相一致。

本研究发现,随着 KH_2PO_4 施用量的增加,各项指标呈现先上升后下降的趋势,其中 A_3 处理表现最优,显著提升草层高度、叶面积、净光合速率及种子产量,而 A_4 处理($120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ KH}_2\text{PO}_4+6.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ ZnSO}_4$)则出现抑制效应。这一趋势符合植物营养的“报酬递减规律”,说明在极端环境条件下,植物对多元素养分协同作用的高度敏感性与调控复杂性,且存在明确的生理阈值,超过该阈值后增益效应减弱甚至产生负面效应^[21]。这一结果与Wang等^[22]在苜蓿上施用 $0\sim 180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ P}_2\text{O}_5$ 所观察到的产量趋势基本一致。

在光合作用方面,净光合速率在 A_3 处理($90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ KH}_2\text{PO}_4+6.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ ZnSO}_4$)达到峰值, A_4 处理($120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ KH}_2\text{PO}_4+6.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ ZnSO}_4$)则显著下降。可能是因为在高寒荒漠强辐射、温差大、水分胁迫频繁的环境下,植物光合系统易受离子失衡影响。适量 KH_2PO_4 可通过促进ATP合成、稳定类囊体膜、调节 K^+ 依赖的气孔导度来增强光合能力^[23];但过量施用会导致 K^+ 过高,引发 Mg^{2+} 外排,抑制 Mg^{2+} -ATP酶活性,阻碍光合磷酸化,造成 A_4 处理光合下降^[24]。在种子产量及产量构成因素方面, A_3 处理梭罗草种子产量最高,小穗数、每穗粒数和千粒重均显著提升,这与Bashir等^[25]在小麦(*Triticum aestivum* L.)上的研究结果相似,可能是因为磷、钾、锌协同促进了生殖生长阶段的碳水化合物分配和穗部灌浆效率。磷为能量代谢和核酸合成提供基础,钾维持细胞膨压和酶活性,锌作为多种转运蛋白和酶的辅因子参与花粉发育和籽粒充实,三者协同可系统性优化资源向生殖结构的分配,有效缓解了梭罗草结实率低和种子产量低的瓶颈问题^[11]。

4 结论

叶面喷施 KH_2PO_4 与 ZnSO_4 能够促进梭罗草生长发育并提高种子产量。通过主成分分析和隶属

函数分析的综合评价, A_3 处理($90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ KH}_2\text{PO}_4+6.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ ZnSO}_4$)效果最好。在该处理下,梭罗草生殖枝高度、旗叶面积、净光合速率和种子产量分别较CK显著提高45.85%,45.15%,30.72%和40.68%。因此, $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ KH}_2\text{PO}_4+6.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{ ZnSO}_4$ 的叶面配施方案适合在玛沁县地区梭罗草种植中推广应用。

参考文献

- [1] LYU L Y, GAO P, XING Y F, et al. Bacterial community characteristics of *Kengyilia thoroldiana* rhizosphere soil in different topographic habitats of the Yellow River source region and their response to vegetation-soil factors[J]. Microorganisms, 2025, 13(11): 2438
- [2] 王思齐, 李昕悦, 陈润, 等. 喷施 KH_2PO_4 缓解小麦灌浆期高温胁迫对粒重形成抑制的作用机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(5): 861-869
WANG S Q, LI X Y, CHEN R, et al. Mechanism of KH_2PO_4 foliar application in alleviating the heat stress-induced inhibition of grain weight formation during the grain-filling stage of wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2025, 31(5): 861-869
- [3] KHAN F, SIDDIQUE A B, SHABALA S, et al. Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses[J]. Plants, 2023, 12(15): 2861
- [4] XUE Y F, XIA H Y, CHRISTIE P, et al. Crop acquisition of phosphorus, iron and zinc from soil in cereal/legume intercropping systems: a critical review[J]. Annals of Botany, 2016, 117(3): 363-377
- [5] RIETRA R P J J, HEINEN M, DIMKPA C O, et al. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(16): 1895-1920
- [6] JIANG L L, WEN G Q, LU J, et al. Machine learning in soil nutrient dynamics of Alpine grasslands[J]. Science of the Total Environment, 2024, 946: 174295
- [7] 石吕, 薛亚光, 石晓旭, 等. 不同硒肥喷施时期对2种富硒土壤水稻产量、米质及硒吸收的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2022, 39(3): 44-53
SHI L, XUE Y G, SHI X X, et al. Effects of the timing of spray-applying selenium fertilizer on rice yield, grain quality, and selenium absorption in two selenium-rich soils[J]. Barley and Cereal Sciences, 2022, 39(3): 44-53
- [8] 耿智广, 曹宏, 李可夫. 叶面施肥对紫花苜蓿种子产量及质量的影响[J]. 中国草食动物科学, 2016, 36(1): 40-44
GENG Z G, CAO H, LI K F. Effects of foliar application fertilizers on alfalfa seed yield and quality[J]. China Herbivore Science, 2016, 36(1): 40-44
- [9] ARPANAHI A K, MAHLOOJI M, MARASHI S K, et al. Evaluation of the effect of foliar zinc sulfate application on quality characteristics, yield, and yield components of barley culti-

- vars under irrigation water salinity conditions[J]. *Agriculture, Environment & Society*, 2024, 4(2): 119-129
- [10] FAN X N, ZHOU X Q, CHEN H, et al. Cross-talks between macro- and micronutrient uptake and signaling in plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 663477
- [11] ALAMGEER M, MUNIR H, HUSSAIN S, et al. Exploring the synergistic role of zinc in NPK fertilization on the agronomic performance of safflower (*Carthamus tinctorius*) [J]. *Horticulturae*, 2024, 10(12): 1243
- [12] MOSTOFA M G, RAHMAN M M, GHOSH T K, et al. Potassium in plant physiological adaptation to abiotic stresses [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 186: 279-289
- [13] 程培军, 李伟观, 徐敏, 等. KH_2PO_4 与硼、锌、钼配施对烤烟生长、产量及烟叶生理特性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2025(9): 111-118
- CHENG P J, LI W G, XU M, et al. Effects of potassium dihydrogen phosphate combined with boron, zinc and molybdenum on the growth, yield and tobacco leaves physiological activities of flue-cured tobacco[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2025(9): 111-118
- [14] WANG S X, LI M, LIU K, et al. Effects of Zn, macronutrients, and their interactions through foliar applications on winter wheat grain nutritional quality[J]. *PLoS One*, 2017, 12(7): e0181276
- [15] 吕亮雨, 施建军, 蔡宗程, 等. 三江源区干枯河道生境下光稈茅香典型群落结构及其物种多样性分析[J]. *青海大学学报*, 2024, 42(5): 1-8
- LÜ L Y, SHI J J, CAI Z C, et al. Typical community structure and species diversity analysis of *Anthoxanthum glabrum* (Trin.) Veldkamp in the dry river habitat in the Sanjiangyuan Region[J]. *Journal of Qinghai University*, 2024, 42(5): 1-8
- [16] 李洪磊, 王晓敏, 郑福顺, 等. 基于主成分和隶属函数分析的不同果色番茄品种引种初步评价[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(2): 402-411
- LI H L, WANG X M, ZHENG F S, et al. Preliminary evaluation of different fruit color tomato varieties introduction based on principal component and membership function analysis methods[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 43(2): 402-411
- [17] ZHANG M, SHI F, PENG S Y, et al. Trade-off strategy for usage of phosphorus fertilizer in calcareous soil-grown winter wheat: yield, phosphorus use efficiency, and zinc nutrition response[J]. *Agriculture*, 2024, 14(3): 373
- [18] ATHAR M, FATIMA S, ZAHRA A, et al. Optimizing wheat growth and zinc uptake with compost and rice husk in alkaline conditions[J]. *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1): 502
- [19] SACRISTÁN D, GONZÁLEZ - GUZMÁN A, BARRÓN V, et al. Phosphorus-induced zinc deficiency in wheat pot-grown on noncalcareous and calcareous soils of different properties[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, 65(2): 208-223
- [20] KUMAR R, RATHORE D K, MEENA B S, et al. Enhancing productivity and quality of fodder maize through soil and foliar zinc nutrition [J]. *Indian Journal of Agricultural Research*, 2016, 50(3): 259-263
- [21] FERREIRA I E P, ZOCCHI S S, BARON D. Reconciling the Mitscherlich's law of diminishing returns with Liebig's law of the minimum. Some results on crop modeling[J]. *Mathematical Biosciences*, 2017, 293: 29-37
- [22] 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 [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 18090
- [23] KAYOUMU M, IQBAL A, MUHAMMAD N, et al. Phosphorus availability affects the photosynthesis and antioxidant system of contrasting low-P-tolerant cotton genotypes [J]. *Antioxidants*, 2023, 12(2): 466
- [24] GRANSEE A, FÜHRS H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions [J]. *Plant and Soil*, 2013, 368(1): 5-21
- [25] BASHIR A, KHAN Q U, ALEM A, et al. Zinc and potassium fertilizer synergizes plant nutrient availability and affects growth, yield, and quality of wheat genotypes[J]. *Plants*, 2023, 12(12): 2241

(责任编辑 刘婷婷)