

柴达木盆地沙蒿氮磷钾肥料效应 与推荐施肥量初步研究

王 丹^{1,2} 谢乐乐^{1,2} 王彦龙^{1,2} 马玉寿^{*1,2} 刘 颖^{1,2}

(1.青海大学畜牧兽医科学院 青海西宁 810016 2.青海省高寒草地适应性管理重点实验室 青海西宁 810016)

摘要 为获得柴达木盆地沙蒿(*Artemisia desertorum*)种植的较优施肥配比以及初步推荐施肥量,采用“3414”肥料田间试验设计,设置氮、磷、钾3因素不同水平组合,通过比较不同施肥处理对沙蒿生长指标及地上生物量的影响,并结合肥料效应函数模型与频率分析法对试验结果进行评价。结果表明:(1)施肥显著促进沙蒿生长发育,不同施肥处理间株高、密度、盖度、冠幅及地上生物量差异显著($P<0.05$);(2)在氮、磷、钾3种养分中,不同养分缺失对沙蒿地上生物量的影响存在差异,其中氮和磷缺失对地上生物量的影响相对较大,钾缺失影响相对较小;(3)由频率分析法得出,柴达木盆地沙蒿的初步推荐施肥量为氮肥 $156.51\sim 220.64\text{ kg/hm}^2$,磷肥 $193.23\sim 269.63\text{ kg/hm}^2$,钾肥 $41.45\sim 57.98\text{ kg/hm}^2$,对应施肥配比为 $1:(1.222\sim 1.235):(0.263\sim 0.265)$ 。综上所述,该推荐施肥范围能够较好满足柴达木盆地沙蒿生长需求及荒漠生态系统养分管理要求,可为该区域沙蒿人工建植及荒漠生态恢复中的科学施肥提供参考依据。

关键词 柴达木盆地;沙蒿;氮磷钾配施;频率分析法;初步推荐施肥量

DOI:10.16249/j.cnki.2096-4617.2026.03.002

中图分类号 S147.2

文献标识码 A

文章编号 2096-4617(2026)03-016-11

引言

柴达木盆地位于青藏高原东北缘,受独特的地理位置与气候条件影响,呈现高寒、干旱、盐碱及强烈日照等特征^[1]。该区域降水量少、蒸发量大,盆地内大面积覆盖着风沙土和盐渍土,土壤贫瘠且有机质含量较低,严重缺乏氮、磷和钾等必需元素^[2-4]。在水、土、养分三重压力下区域生态系统受到严重威胁,一旦遭遇气候波动或人为干扰,极易出现草地退化和土地沙化等现象,致使生态恢复与重建面临严峻挑战^[1,5,6]。柴达木盆地作为“三北”工程的重要实施区域之一,其荒漠化治理和生态恢复工作对于整个工程的成功实施具有重要意义^[7]。

在我国干旱荒漠地区,沙蒿(*Artemisia desertorum*)作为菊科蒿属的多年生草本,常以建群种或优势种出现^[8,9]。沙蒿具有极强的生态适应性和优良的固沙性能,不仅能适应极端干旱、盐碱和贫瘠的土壤环境,

收稿日期:2026-04-09

基金项目:青海省帅才科学家负责制项目(2024-SF-101)。

第一作者简介:王丹,女,汉族,河南长垣人,青海大学畜牧兽医科学院博士研究生,主要研究方向为草地生态与环境保护。

通讯作者简介:马玉寿,男,汉族,青海西宁人,青海大学畜牧兽医科学院研究员,主要研究方向为退化草地治理恢复。

还能有效抵抗风蚀,是防风固沙和维持当地生态稳定的关键物种^[10,11]。此外,沙蒿是荒漠及半荒漠草原区重要的饲用植物资源之一,主要在冬春季作为放牧补饲资源利用;沙蒿种子及枝叶兼具食用、工业与药用价值,综合利用价值高^[12]。有研究表明,针对遏制荒漠草原退化的问题,目前多依赖人工补播乡土植物(适合当地气候和土壤条件)以恢复植被盖度与群落结构;在此过程中,科学合理的养分管理是提高补播生产性能的关键技术^[13-17]。沙蒿凭借其良好的生态适应性和治理成效,已成为沙化草地修复中应用前景较好的优势草种^[12],可为“三北”工程提供所需种子资源。然而,目前沙蒿的种源供给量不能满足生态修复工程的规模化需求。为此,探讨施肥措施对沙蒿生长的促进效应,以缩短其定植周期并提升效益,对于当前的荒漠化治理和生态修复实践具有应用价值。

施肥旨在使土壤供肥满足作物需求,在此过程中,氮、磷、钾不仅为植物提供营养物质,而且通过改善土壤条件,促进有机物分解而增加土壤肥力^[18-21]。除供给植物基本养分外,氮、磷、钾之间的相互影响对植物生长至关重要^[21,22]。氮素可直接参与蛋白质及核酸合成,供应失衡会严重影响植物营养生长与生殖发育^[23,24]。而磷素除了能够被植物直接利用外,还可以加快土壤中氮素矿化和硝化过程,从而释放更多的有效氮素供应作物需求,并能与其他元素如钾以及铁、锌等微量元素相互作用^[25,26]。钾素则主要调节细胞渗透压与酶活性,保障同化物转运,缺乏时会显著降低植株抗逆性并导致减产^[27,28]。目前关于沙蒿施肥的研究相对较少,而柴达木盆地尚缺乏氮磷钾配比相关试验结果。由于氮磷钾三者之间存在错综复杂的关系,其施用量以及比例不同会对肥料效应产生不同的影响,因此确定最适合的施用量及其比例,是科学施肥的基础。

本研究在柴达木盆地腹地(德令哈市尕斯库勒镇)开展了田间施肥试验,旨在探究不同氮磷钾配比对沙蒿建植初期形态指标(密度、株高、冠幅及盖度)与地上生物量的调控效应。结合肥料效应函数拟合结果,拟确定适宜当地的较优施肥配方与用量,以期为该区域沙蒿人工建植的养分管理提供数据支撑,为“三北”工程等生态恢复项目的精准实施提供技术参考。

1 材料与方法

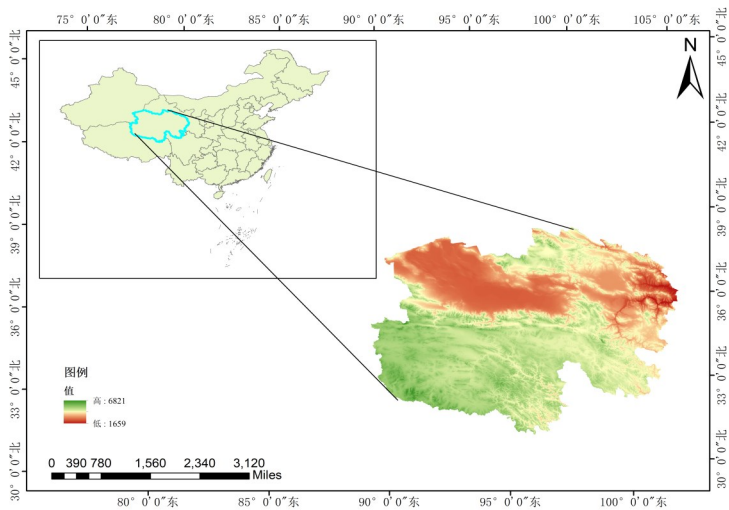
1.1 试验地概况

研究区位于青藏高原东北缘的柴达木盆地(图1),属典型内陆高原大陆性干旱区,水热条件时空异质性显著、蒸发较为强烈,区域景观多以荒漠为主^[29,30]。区域植被总体覆盖度较低,群落结构以耐旱灌木与多年生草本为主,呈现出对水分短缺的功能性状适应与生活型分化特征^[30,31]。

本试验于2025年5月(播种)至10月底(测定)在德令哈市尕斯库勒镇陶哈村进行,试验地位于N 37°16′11.70",E 97°27′4.86",海拔2 887 m,试验期间(5月20日—10月31日)日均温12.86℃,0℃积温2121.87℃,平均165 d,≥10℃积温1 919.25℃,平均128 d,日照时间1 664.23 h,降水量233.40 mm,降水量多集中在6—8月,占试验期间降水量的84.36%(图2)^[29,32]。试验地土壤基础肥力为全氮1.6 g/kg,全磷1.45 g/kg,速效磷15.0 mg/kg,速效钾388.3 mg/kg,速效氮41.1 mg/kg,pH值8.5,试验前作为荒漠植物引种栽培试验地。播种后,为确保种子能够萌发,对每个小区进行了少量灌溉,之后不再进行灌溉。整个生长季内,所有小区除草、水分管理处理均一致。

1.2 试验设计

试验用沙蒿种子采自德令哈市尕斯库勒镇野生生长区,千粒重约为0.391 5 g,经室内测定发芽率约为81%。本试验通过人工条播进行播种,行距设定为50 cm,深度控制在2~3 cm,并予以适当镇压。供试肥料:氮肥选用尿素(N≥46%),磷素肥料为过磷酸钙(P₂O₅≥12%),钾素肥料选用硫酸钾(K₂O≥52%)。施肥设



注:地图来源于标准地图服务(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>),审图号GS(2019)1822。
Notes: The map source from standard map service (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>), map review No. GS(2019)1822.

图1 试验区概况图

Fig.1 Overview of the experimental area

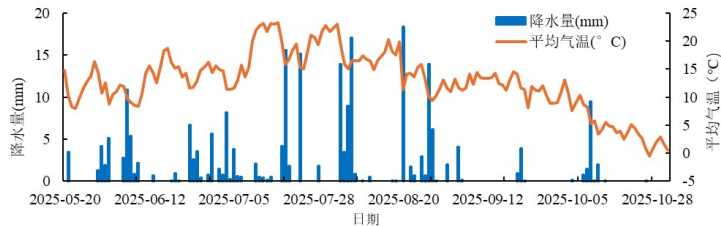


图2 试验期间日平均气温和降水量

Fig.2 Daily average temperature and precipitation during the experimental period

计基于“3414”二次回归模型展开。各因素分别设不施肥(0水平)、半量(1水平)、当地最佳推荐量(2水平)及1.5倍过量(3水平)。试验含14个施肥处理,全区随机排列为42个面积各15 m²的小区,每处理重复3次(见表1),本文氮、磷、钾肥施用量分别以N、P₂O₅和K₂O计。

表1 试验处理与施肥方案

Table 1 Experimental treatments and fertilization scheme

处理编号	处理	编码值			施肥量(kg/hm ²)		
		N	P	K	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0	0	0	0
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	2	2	0	300	60
3	N ₁ P ₂ K ₂	1	2	2	120	300	60
4	N ₂ P ₀ K ₂	2	0	2	240	0	60
5	N ₂ P ₁ K ₂	2	1	2	240	150	60
6	N ₂ P ₂ K ₂	2	2	2	240	300	60
7	N ₂ P ₃ K ₂	2	3	2	240	450	60
8	N ₂ P ₂ K ₀	2	2	0	240	300	0
9	N ₂ P ₂ K ₁	2	2	1	240	300	30
10	N ₂ P ₂ K ₃	2	2	3	240	300	90
11	N ₃ P ₂ K ₂	3	2	2	360	300	60
12	N ₁ P ₁ K ₂	1	1	2	120	150	60
13	N ₁ P ₂ K ₁	1	2	1	120	300	30
14	N ₂ P ₁ K ₁	2	1	1	240	150	30

1.3 测定项目及方法

测定工作在2025年10月底统一进行,此时气温已显著下降,沙蒿当年生植株停止生长,部分植株开始落叶。

1.3.1 密度与盖度

每小区全数计数存活沙蒿植株,换算成株/m²记为密度;盖度以目测估算法评估,以植被投影面积占小区总面积百分比计,重复观测3次取均值。

1.3.2 株高与冠幅

每小区随机挑选出10株生长良好的沙蒿,用卷尺测量其自然高度,即沙蒿基部到顶梢的高度,记为株高(精确至0.1 cm);冠幅则是量取沙蒿东西向和南北向直径的平均值,作为冠幅(精确至0.1 cm)。

1.3.3 地上生物量

每小区随机选取3株健康沙蒿,剪取沙蒿整株地上部分,采集后先经清水冲洗表面杂质,随后放入牛皮纸袋中转移至实验室。在105℃下杀青30 min,降至65℃持续鼓风至质量恒定,计算3株沙蒿平均单株干重,并结合小区植株密度换算单位面积地上生物量(g/m²),再换算为kg/hm²用于后续统计分析。

1.4 数据分析

1.4.1 数据统计分析

数据经Excel 2019与SPSS 27.0处理,对数据进行单因素方差分析(最小显著差异法, $P<0.05$);基于回归模型拟合氮磷钾配施效应,当拟合效果不佳时,则结合频率分析法确定最优施肥参数。

1.4.2 肥料效应函数方程建立

依据吴志勇等^[39]提出的肥料效应模型构建方案,对一元二次(1)、二元二次(2)及三元二次(3)方程进行参数求解与拟合,所得表达式如下:

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad (1)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 \quad (2)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_2x_3 + b_6x_1x_3 + b_7x_1^2 + b_8x_2^2 + b_9x_3^2 \quad (3)$$

式中, y 为沙蒿地上生物量(kg/hm²);式(1)中 x 表示氮、磷、钾肥中任意一种肥料的施用量;式(2)中 x_1 、 x_2 为氮、磷、钾任意两种肥料的配施量;式(3)中 x_1 、 x_2 、 x_3 为氮、磷、钾三种肥料的施用量; b_0 为回归常数, $b_1 \sim b_9$ 为肥料效应函数方程的系数。

1.4.3 频率分析法

频率分析法是一种通过统计在一定范围内出现次数而得到相应结论的一种统计方法。本研究参考李洪文等^[34]田间肥效试验数据分析方法,依据各施肥处理的地上生物量,统计不同施肥水平的频次及频率分布,据此确定氮、磷、钾肥的推荐施用量。具体计算公式如下:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_j} \sum_j^p u_j n_{ij} (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

式中, n_{ij} 表示 u_j 出现的次数, n_j 表示变量 X_i 出现的总次数。

$$S_{\bar{x}_i} = \frac{1}{\sqrt{n_j - 1}} * \sqrt{\sum_{j=0}^p (u_j - \bar{x}_i^2 * n_{ij})} \quad (5)$$

95%置信区间: $[\bar{x}_i - S_{\bar{x}_i} * t_{0.05}(n_j - 1)] \sim [\bar{x}_i + S_{\bar{x}_i} * t_{0.05}(n_j - 1)]$,查表可知。

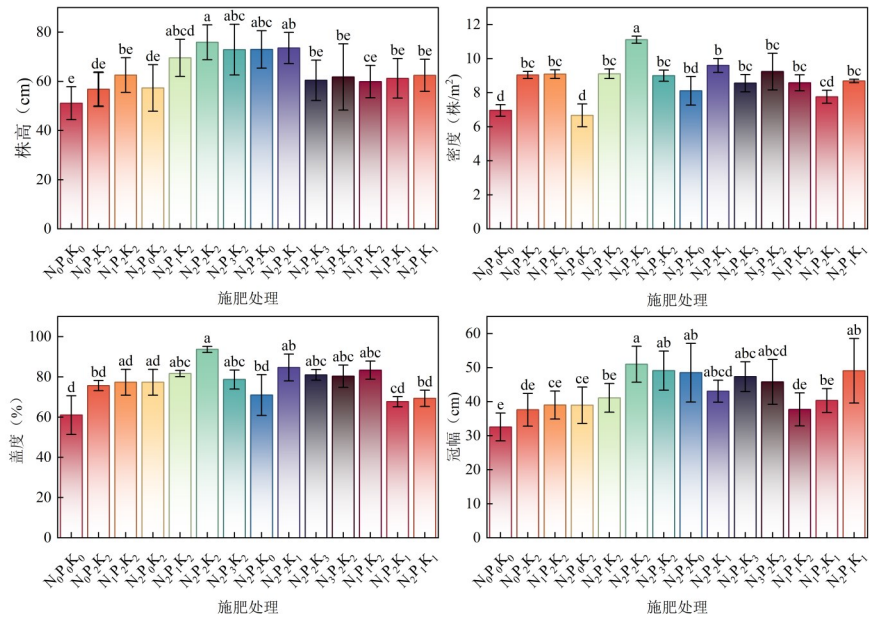
均数标准差:

$$S_x = \frac{S}{\sqrt{n_j}} \quad (6)$$

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对沙蒿性状的影响

结果表明(图3),与不施肥处理($N_0P_0K_0$)相比,施肥总体上提高了沙蒿株高、密度、冠幅、盖度和地上生物量。在N、P施肥量固定条件下(N_2P_2),随钾肥施用量增加,沙蒿株高、密度、冠幅及盖度等生长指标均呈先升后降趋势,并在 K_2 水平时达到峰值。在P、K施肥量固定条件下(P_2K_2),随氮肥施用量增加,株高、密度和盖度均呈先升后降趋势,并在 N_2 水平时最优;而沙蒿冠幅则随氮肥施用量增加呈持续增大趋势。在N、K施肥量固定条件下(N_2K_2),随磷肥施用量增加,株高、密度、冠幅及盖度仍呈先升后降趋势,在 P_2 水平时达到最大值。分析表明,施肥处理下的株高均高于未施肥处理($N_0P_0K_0$),但仅有 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_1$ 、 $N_2P_3K_2$ 、 $N_2P_1K_2$ 和 $N_2P_2K_0$ 显著大于 $N_0P_0K_0$;施肥处理密度均大于未施肥处理($N_0P_0K_0$),其中 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_1$ 、 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_1K_2$ 、 $N_1P_2K_2$ 、 $N_0P_2K_2$ 、 $N_2P_3K_2$ 、 $N_2P_1K_1$ 、 $N_1P_1K_2$ 和 $N_2P_2K_3$ 处理显著大于未施肥处理($N_0P_0K_0$);施肥处理冠幅均高于未施肥处理($N_0P_0K_0$),其中 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_3K_2$ 、 $N_2P_2K_0$ 、 $N_2P_2K_1$ 、 $N_2P_2K_3$ 、 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_1K_1$ 处理显著大于未施肥处理($N_0P_0K_0$);施肥处理盖度均大于未施肥处理($N_0P_0K_0$),其中 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_3K_2$ 、 $N_2P_2K_1$ 、 $N_2P_2K_3$ 、 $N_3P_2K_2$ 、 $N_1P_1K_2$ 显著大于未施肥处理($N_0P_0K_0$)。株高、密度、冠幅和盖度最大的处理均为 $N_2P_2K_2$,较未施肥处理($N_0P_0K_0$)分别提高了48.48%、66.70%、56.66%和53.55%。



注:采用最小显著差异法进行多重比较;图中不同小写字母表示各处理间在 $P<0.05$ 水平存在显著性差异。
Notes: Multiple comparisons were conducted using the minimum significant difference method; different lowercase letters indicate significant differences among the treatments at the $P<0.05$ level.

图3 不同施肥处理下沙蒿性状表现

Fig.3 Performance *Artemisia desertorum* traits under the different fertilization treatments

2.2 不同施肥处理对沙蒿地上生物量的影响

不同施肥处理间沙蒿地上生物量差异显著($P<0.05$),且各施肥处理的地上生物量均显著高于未施肥处理($N_0P_0K_0$)($P<0.05$)。各处理的地上生物量在602.22~1 030.00 kg/hm²之间,其中, $N_2P_3K_2$ 的沙蒿地上生物量最高,达1 030.00 kg/hm²,较未施肥处理($N_0P_0K_0$)显著提高了71.04%,其次, $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_1$ 、 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_0$ 、 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 和 $N_2P_0K_2$ 处理的地上生物量较高,分别较 $N_0P_0K_0$ 增加了64.76%、64.02%、58.67%、54.61%、53.32%、47.60%和45.57%, $N_2P_3K_2$ 与 $N_2P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_1$ 、 $N_3P_2K_2$ 、 $N_2P_2K_0$ 、 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_2K_3$ 、 $N_2P_0K_2$ 处理的

地上生物量差异不显著($P>0.05$),与其他处理差异显著($P<0.05$)。

2.3 氮、磷、钾缺素处理分析

缺氮、缺磷和缺钾处理结果表明(表2),3种缺素处理下沙蒿地上生物量均高于不施肥处理。不施肥水平($N_0P_0K_0$)下,沙蒿地上生物量为 602.22 kg/hm^2 ,相对地上生物量为 60.69% ,说明在该试验条件下土壤具有一定供肥能力,不施肥条件下地上生物量损失率为 39.31% 。以 $N_2P_2K_2$ 处理的地上生物量为基准,各缺肥处理的相对地上生物量表现为:缺钾处理(93.84%)>缺磷处理(88.35%)>缺氮处理(86.00%)。缺肥处理与 $N_2P_2K_2$ 处理的地上生物量差距依次为:缺氮(138.9 kg/hm^2)>缺磷(115.6 kg/hm^2)>缺钾(61.11 kg/hm^2),减产幅度分别为 14.00% 、 11.65% 和 6.16% 。结果表明,不同养分缺失对沙蒿地上生物量的影响存在差异,其中缺氮和缺磷处理对地上生物量的抑制作用相对较强,而缺钾处理影响相对较弱。

表2 氮、磷、钾缺素处理分析表
Table 2 Analysis of nitrogen, phosphorus and potassium deficiency treatments

处理	水平	地上生物量(kg/hm ²)	相对地上生物量(%)	地上生物量减产率(%)
$N_0P_0K_0$	0	602.22	60.69	39.31
$N_0P_2K_2$	N_0	853.33	86.00	14.00
$N_2P_0K_2$	P_0	876.67	88.35	11.65
$N_2P_2K_0$	K_0	931.11	93.84	6.16
$N_2P_2K_2$	$N_2P_2K_2$	992.22	100.00	0

2.4 氮、磷、钾肥交互效应

对氮、磷、钾肥交互效应的分析结果(图4)显示,当钾肥施用量处于 K_2 水平时,沙蒿地上生物量在 N_1 和 N_2 施氮量处理下均呈随磷肥施用量增加而增加的趋势,分别增加 23.33 kg/hm^2 和 68.89 kg/hm^2 ,增长率分别为 2.79% 和 7.46% 。当磷肥施用量处于 P_2 水平时,沙蒿地上生物量在 N_1 和 N_2 施氮量处理下仍显示为随钾肥施用量的增加而增加,分别增加 33.33 kg/hm^2 、 4.44 kg/hm^2 ,增长率各为 4.04% 、 0.45% 。表明 K_2 、 P_2 水平的钾肥和磷肥对氮肥肥效的发挥具有正向调控作用。

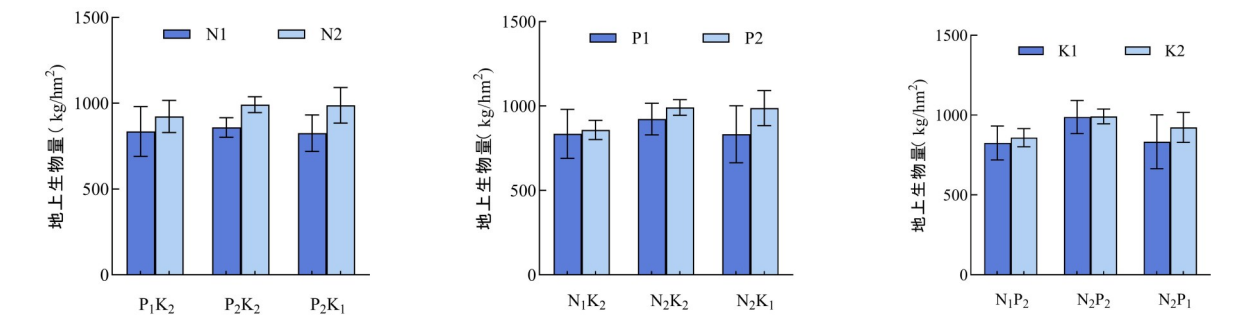


图4 氮、磷、钾交互效应分析

Fig.4 Analysis of interactive effect of nitrogen, phosphorus and potassium

钾肥施用量在 K_2 水平时, P_1 和 P_2 施磷量处理的沙蒿地上生物量均随施氮量增加而增加,分别增加 87.77 kg/hm^2 、 133.33 kg/hm^2 ,增长率各为 10.50% 、 15.52% 。氮肥施用量在 N_2 水平时,沙蒿的地上生物量在 P_1 和 P_2 施磷量处理下均显示随施钾量的增加而增加,各增加 90 kg/hm^2 、 4.44 kg/hm^2 ,增长率分别为 10.80% 、 0.45% 。表明 N_2 、 K_2 水平的氮肥和钾肥对磷肥肥效的发挥具有协同促进作用。

磷肥施用量在 P_2 水平时,在 K_1 和 K_2 施钾量处理下地上生物量均显示为随施氮量增加而增加,分别增加 162.22 kg/hm^2 和 133.33 kg/hm^2 ,增幅为 19.65% 、 15.52% 。当氮肥施用量处于 N_2 水平时, K_1 、 K_2 施钾量处理的沙蒿地上生物量随磷肥施用量增加而增加,分别增加 154.45 kg/hm^2 和 68.89 kg/hm^2 ,增幅分别为 18.53% 、 7.46% 。表明在 N_2 、 P_2 施肥条件下,钾肥的肥效能够得到更好的发挥。

2.5 氮、磷、钾肥料效应函数分析

2.5.1 一元、二元和三元二次肥料效应函数分析

本研究选取特定施肥处理的沙蒿地上生物量数据进行回归分析。在单因素分析中,分别固定N、P、K为2水平,构建了N、P、K的一元效应方程;在双因素分析中,依次提取氮磷、氮钾、磷钾两两交互的处理组合,拟合出二元效应方程;最后,基于全部试验处理的地上生物量数据,通过模拟寻优进行多元回归,确立了氮、磷、钾的三元综合肥料效应函数。

结果显示(表3),除氮肥一元二次函数的决定系数(R^2)偏低外,其余拟合方程的 R^2 均处于较高水平。 F 检验结果显示,仅PK和NPK肥效模型达到显著水平($P<0.05$),其余模型均未达显著水平($P>0.05$),不能用于确定氮、磷、钾的综合推荐施肥量。进一步分析三元二次效应方程发现,二次项系数出现正值、一次项系数出现负值,这一结果与肥料报酬递减律和二次数学函数曲线的特征相悖,因此判定该氮、磷、钾三元二次肥效方程为非典型肥效方程。综上,本研究部分拟合方程的回归效果不显著,无法运用边际分析法获取可靠的推荐施肥量,一元、二元及三元肥料效应函数模型均不适用。

表3 肥料效应拟合结果
Table 3 Fitting results of fertilizer effect

因素	肥料效应函数	R^2	P
N肥	$y=-0.0007N^2+0.6306N+838.4444$	0.6955	0.5518
P肥	$y=-0.0001P^2+0.3970P+874$	0.9900	0.1003
K肥	$y=-0.0444K^2+3.5926K+928.3333$	0.9789	0.1454
NP肥	$y=653.6398+1.1895N+0.4664P-0.0010N^2+0.0005P^2-0.0015NP$	0.8641	0.3059
NK肥	$y=408.6207+2.4349N+8.9384K-0.0010N^2-0.0302K^2-0.0283NK$	0.8321	0.3684
PK肥	$y=390.7280+1.8045P+10.6472K-0.00003P^2-0.0430K^2-0.0240PK$	0.9934	0.0164
NPK肥	$y=594.7144+0.6400N-0.1066P+6.0952K-0.0001N^2+0.0010P^2-0.0164K^2+0.0018NP-0.0118NK-0.0072PK$	0.9226	0.0203

2.5.2 沙蒿地上生物量频率分析

推荐施肥量的测算未采用常规的三元二次回归(因拟合模型缺乏典型性),因此由产量频次分析法进行寻优。以各施肥处理下沙蒿地上生物量均值(范围为602.22~1 030.00 kg/hm²)作为统计区间,分别统计N、P、K肥4个施肥水平下沙蒿地上生物量落入统计区间内出现的频次,并计算其次数、平均值、标准差、均数标准差及95%置信区间(表4)。结果显示,通过95%置信区间计算出的氮肥推荐施用量范围为156.51~220.64 kg/hm²;磷肥推荐施用量范围为193.23~269.63 kg/hm²;钾肥推荐施用量范围为41.45~57.98 kg/hm²;对应施用肥料配比为1:(1.222~1.235):(0.263~0.265),进一步对推荐施肥量范围对应的沙蒿地上生物量进行频率分析,按照公式(4)至(6)计算平均值、标准差和均数标准差,并采用 t 分布计算95%置信区间,得到沙蒿地上生物量的95%置信区间为847.73~922.91 kg/hm²。

表4 沙蒿地上生物量频率分析
Table 4 Frequency analysis on aboveground biomass of *Artemisia desertorum*

水平	N			P			K		
	施肥量(kg/hm ²)	次数	频率(%)	施肥量(kg/hm ²)	次数	频率(%)	施肥量(kg/hm ²)	次数	频率(%)
0	0	4	11.43	0	4	0.11.43	0	4	11.43
1	120	9	25.71	150	9	0.25.71	30	7	20.00
2	240	20	57.14	300	21	0.60.00	60	21	60.00
3	360	2	5.71	450	1	0.02.86	90	3	8.57
合计		35	100		35	100		35	100
$\bar{X}_i$ 均值	188.57			231.43			49.71		
标准差(S)	93.34			111.20			24.07		
均数标准差	15.78			18.80			4.07		
95%置信区间	156.51~220.64			193.23~269.63			41.45~57.98		

3 讨论

本研究旨在探讨不同施肥处理对沙蒿生长特性以及地上生物量的影响,并提出合理施肥方案。研究表明,施肥可以显著促进沙蒿的株高、密度、盖度和冠幅等性状的提升,与未施肥对照处理($N_0P_0K_0$)相比均表现出不同程度提高。其中,以 $N_2P_2K_2$ 处理施肥量效果较优,说明适量氮、磷、钾配施能够协同促进沙蒿生长。

从养分生态学机制来看,氮、磷、钾是植物生长发育所必需的营养元素,在植物生长发育过程中起着不可替代的作用^[35-37]。氮肥有助于促进植物叶部生长并提高光合作用速率,从而促进干物质质量积累^[38,39];磷肥增强根系发达程度以及抗性^[25,40,41];钾肥改变细胞内渗透压以及酶活性进而影响植物新陈代谢^[42]。上述机制共同解释了施肥显著提升沙蒿地上生物量的生理基础。此外,在不同比例施肥条件下,氮、磷、钾配合施用可使沙蒿地上生物量最大限度地增加,即 $N_2P_3K_2$ 处理下地上生物量最大,其次为 $N_2P_2K_2$ 处理。考虑到肥料施用量和成本, $N_2P_2K_2$ 处理下的施肥量较为合适。由此可以看出,生物量分配具有可塑性,依据最优分配假说,当环境资源有限的情况下,植物会选择分配较多生物量到能够获取关键资源的部分上,以便更有效地利用养分、水分和光照,从而更好地促进生长发育^[43-45]。

在养分限制格局方面,不同养分缺失对沙蒿地上生物量影响存在差异,其中氮、磷缺失影响作用较强,钾缺失影响较弱。土壤基况显示,速效钾含量较高,而速效氮与速效磷相对偏低,表明试验地以氮、磷为潜在限制因子,而钾素供应相对充足,这与养分缺失试验中“N和P限制强、K限制弱”的响应结果相一致。有学者认为氮添加使得土壤速效氮增多,满足植物所需养分从而促进植物生长进而增加地上生物量^[46-48],磷添加可提高土壤磷的有效性,从而使植物更易吸收利用;同时磷添加还能促进植物对土壤中有效氮的吸收,进而增加地上与地下生物量^[49];钾元素一般不是草地生态系统中的限制元素,但是和其他养分相互作用后可以提高地上生物量^[50]。同时,氮、磷、钾肥对沙蒿地上生物量具有交互效应:中量磷与中量钾配施可有利于氮肥肥效发挥,中量氮与中量钾配施有助于磷肥肥效发挥,而中量氮与中量磷配施则对钾肥效应具有促进作用;而不施肥处理($N_0P_0K_0$)的沙蒿地上生物量最低,说明适量施用氮、磷、钾肥可以有效提高沙蒿的地上生物量。上述结果表明,沙蒿对养分的响应并非单一线性关系,而是典型的多养分协同调控过程,与植物“最优分配假说”一致,即在资源受限条件下,植物通过调整生物量分配以最大化资源获取效率^[36,45]。

然而,本研究中传统的肥料效应函数分析并不理想。单因素回归模型均未达显著水平($P>0.05$)。进一步的双因素分析表明:NP、NK、PK配施方程中仅PK肥的 $P<0.05$,其他拟合方程回归亦不显著;而且,三元二次肥料效应函数方程的特征也不符合典型模型的要求(一次项系数不都为正,二次项系数不都为负),因此不能采用边际求导法计算沙蒿推荐施肥量。说明沙蒿对养分需求复杂,或者是传统模型不能很好地描述这种需求关系。这一结果与部分研究结论一致,植物生长响应往往偏离理想化二次效应模型,有学者认为植物对养分的吸收和利用受到很多外界因素和自身特性的影响,所以一般的函数模型不能很好地概括所有的关系^[51-54]。由于传统的肥料效应函数模型存在一定的不足之处,因此本研究采用频率分析法得出沙蒿的较优推荐施肥量及期望的目标地上生物量^[34]。通过95%置信区间计算出的该区域沙蒿推荐施用氮肥量为156.51~220.64 kg/hm²,平均值为188.57 kg/hm²;磷肥施用量为193.23~269.63 kg/hm²,平均值为231.43 kg/hm²;钾肥为41.45~57.98 kg/hm²,平均值为49.71 kg/hm²;N、P₂O₅、K₂O施用量比例为1:(1.222~1.235):(0.263~0.265),在此氮磷钾肥施用配比范围内,沙蒿地上生物量95%置信区间为847.73~922.91 kg/hm²。由此可见,氮磷钾配合施用有利于促进沙蒿生长以及生物量的增加,基于频率分析法给出

了合理化推荐施肥方案。

综上所述,本研究不仅为柴达木盆地沙蒿人工建植提供了可量化的施肥参数,也为干旱区灌丛、草本植物养分调控提供了参考依据。但仍需指出,本研究基于单一年份试验数据,对于多年生沙蒿群落的长期响应仍存在不确定性,未来仍须开展2~3年及以上的连续定位观测,以验证施肥效应的稳定性与持续性。此外,频率分析法无法反映施肥的边际经济效益与成本收益关系,未来应结合经济产投比分析进一步优化施肥量,以形成更具应用价值的管理模式,从而构建生产力提升与生态安全并行的可持续管理模式。

结 语

施肥处理促进了沙蒿株高、密度、盖度及地上生物量的提高,不同施肥处理间各生长指标存在显著差异($P<0.05$),且施肥处理均显著提高了沙蒿地上生物量。在氮、磷、钾3种养分中,不同养分缺失对沙蒿地上生物量的影响存在明显差异,其中氮素和磷素缺失对地上生物量的抑制作用较大,而钾素缺失的影响相对较小。基于频率分析,研究区沙蒿的初步推荐施肥量范围为:氮肥 $156.51\sim 220.64\text{ kg/hm}^2$;磷肥 $193.23\sim 269.63\text{ kg/hm}^2$;钾肥 $41.45\sim 57.98\text{ kg/hm}^2$ 。对应肥料施用配比为 $1:(1.222\sim 1.235):(0.263\sim 0.265)$,在此配比区间内,沙蒿地上生物量的95%置信区间为 $847.73\sim 922.91\text{ kg/hm}^2$ 。综上所述,柴达木盆地沙蒿人工建植应以氮、磷为主要调控养分,合理配施氮、磷、钾肥可显著提高植被生长表现与地上生物量,此结果可为柴达木盆地沙蒿人工建植的施肥管理提供参考。

参考文献

- [1] 陈豆,马雪洋,张玉枝,等.柴达木盆地东部尕斯库勒湖岩芯记录的过去近400 a区域环境变化[J].湖泊科学,2015,27(4):735-744.
- [2] 吴彤,王湘,焦菊英,等.柴达木盆地白刺沙堆剖面土壤化学计量特征[J].植物营养与肥料学报,2025,31(9):1724-1737.
- [3] 齐艳莹,李宗善,卢涵珏,等.塔里木盆地南缘不同灌木土壤“肥岛”效应及其垂直分布特征[J].生态学报,2026,46(2):1024-1033.
- [4] 牛浴林,全宗永,陈鹏伟,等.土壤改良剂对柴达木盐碱地燕麦生产性能的影响[J].草地学报,2026,34(4):1483-1491.
- [5] 孙燕,南维鸽,胡光印,等.柴达木盆地灌丛沙丘风沙沉积记录的气候环境演化[J].干旱区地理:1-13.[2026-09-02].<https://link.cnki.net/urlid/65.1103.X.20260328.1459.001>.
- [6] 郭博宇,金鑫,金彦香,等.高寒干旱区植被变化驱动机制的机器学习解析——气候变化与人类活动的贡献[J].生态学报,2026(8):1-15.
- [7] 张彪,朱佳顺,贺晓慧,等.生态工程背景下我国荒漠草原防风固沙功能研究综述[J].干旱区地理,2026,49(8):1653-1662.
- [8] 韩文娟,王铁娟,王昉永.5种蒿属沙生半灌木种子萌发耐旱性研究[J].种子,2015,34(2):42-45.
- [9] 陈嘉鑫,申建香,王磊,等.腾格里沙漠东南缘沙蒿根际与非根际土壤微生物群落结构及其多样性变化特征[J].微生物学报,2025,65(6):2529-2544.
- [10] 李易珺,郭树江,杨自辉.盐、干旱胁迫对沙蒿种子萌发与幼苗生理特性的影响[J].草原与草坪,2023,43(5):113-119.
- [11] 赵彦坤,柴成武,王方琳,等.沙蒿对3种伴生植物种子萌发与幼苗生长的化感作用[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2026(8):1-8.
- [12] 那木吉力才仁,海花.青海省温性荒漠植物沙蒿的栽培价值与栽培技术[J].青海草业,2022,31(4):36-38.
- [13] 于铁峰,刘晓静,吴勇,等.西北干旱灌区紫花苜蓿高产田施肥效应及推荐施肥量研究[J].草业学报,2019,28(8):15-27.
- [14] 王琴,王旭成,李小云,等.“3414”施肥效应对宁夏干旱区无芒雀麦种子产量和质量的影响[J].草地学报,2022,30(12):3470-3480.
- [15] 姚敏.补播和施肥对荒漠草原牧草品质及土壤养分的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
- [16] 姜海鑫.补播修复下荒漠草原植被变化及其驱动机制[D].银川:宁夏大学,2025.

- [17] 张丽萍,阿斯娅·曼力克,张生楹,等.不同修复措施对退化伊犁绢蒿荒漠草地修复效果的影响[J].草原与草坪,2025,45(4):36-43.
- [18] Yacoub M M, Al-Hamdany F M A, Almehemdi A F. Effect of some fertilizer combinations of nitrogen, phosphorus and potassium on some qualitative characteristics of quinoa in seed[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, 1252(1):012053.
- [19] Jiang X F, Guo J, Li S C, et al. Nitrogen, phosphorus and potassium formula fertilization model of *Lonicera japonica* Thunb in hilly and gully Loess Plateau of China[J]. PLoS One, 2025, 20(6):e0323828.
- [20] Weinstein M, Baram S, Yermiyahu U, et al. Nitrogen, phosphorus and potassium deficiencies impact the transition from juvenility to maturity in *Theobroma cacao* L.[J]. International Journal of Fruit Science, 2025,25(1):36-47.
- [21] Liu L, Liu Y, Qiu Z, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization management on plant and soil properties in grasslands with varying salinity - alkalinity[J]. Agronomy, 2026, 16(5):524.
- [22] Shi J, Lu Z, Lu T, et al. Long-term differential fertilization strategies enhance soil quality and microbial metabolic functions : Evidence from a 45-year field experiment[J]. Agriculture, 2026, 16(6):691.
- [23] 刘婧,缙倩倩,王国华,等.晋西北丘陵风沙区柠条锦鸡儿叶片与土壤生态化学计量特征[J].植物生态学报,2023,47(4):546-558.
- [24] 李茜,管圣,许明志,等.施氮量及追肥时期对苧麻生长生理和纤维产量的影响[J].中国麻业科学,2025,47(1):53-62.
- [25] 康利,杨嘉懋,孙一雄,等.不同水平氮磷施用对紫花苜蓿生产性能和饲用价值的影响[J/OL].草地学报,1-13.[2026-09-02].<https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20260325.1648.002>.
- [26] 祝文知,罗珠珠,李亮亮,等.氮磷添加缓解了紫花苜蓿土壤微生物养分限制[J].草地学报,2026,34(6):2099-2108.
- [27] Wang Z, Yao C, Yang Y, et al. Effects of foliar potassium fertilizer on photosynthetic capacity and expression of potassium and sugar transporters in peach (*Prunus persica*)[J]. Horticulturae, 2026,12(3):388.
- [28] Yu K, Zhang Z, Liu T, et al. Optimizing the application of potassium sulfate fertilizer based on the variation in soil mineral accumulation and tobacco growth:a 10-year field experiment[J]. Frontiers in Plant Science,2026,16:1748377.
- [29] 段成伟,杨鑫光,孙华方,等.柴达木盆地盐碱地禾谷类作物耐盐碱综合评价与筛选[J].干旱地区农业研究,2025,43(6):23-38.
- [30] 康文蓉,赵文智,张勇勇,等.柴达木盆地降水梯度下荒漠植被分布特征及影响因素[J].中国沙漠,2026,46(1):209-218.
- [31] 王廷艳,徐成体,蒲小剑,等.青海柴达木盆地盐碱地种草改土技术现状与实践[J].青海科技,2025,32(2):20-25+31.
- [32] 葛容琳,徐成体,王伟,等.柴达木盆地一年生豆科牧草生产性能与饲用品质评价[J].草原与草坪,2025,45(5):146-153.
- [33] 吴志勇,闫静,施维新,等.“3414”肥料效应试验的设计与统计分析[J].新疆农业科学,2008(1):135-141.
- [34] 李洪文,叶和生,李保华,等.田间肥效试验数据的频率分析和施肥决策[J].中国农学通报,2014,30(27):132-138.
- [35] 余倩茹,刘文新,樊学婷,等.基于“3414”试验的新疆草甸草原氮磷钾推荐用量研究[J/OL].草原与草坪,1-15.[2026-09-02].<https://link.cnki.net/urlid/62.1156.s.20260331.1335.002>.
- [36] 辛小娟,王刚,杨莹博,等.氮、磷添加对亚高山草甸地上/地下生物量分配的影响[J].生态科学,2014,33(3):452-458.
- [37] 苗慧锋,黄高鉴,王科,等.不同施肥水平对三年生黄芩产量和品质的影响及肥料效应研究[J].核农学报,2024,38(9):1790-1797.
- [38] Shi W H, Wang K C, Zhou J F, et al. Effects of nitrogen forms on adaptive strategies of Moso bamboo seedlings under low-phosphorus conditions[J]. Advances in Bamboo Science, 2025, 10:100133.
- [39] 余注光,罗家儒,李裕华,等.施氮对柘子苗期生长及主要生理特性的影响[J].西南林业大学学报(自然科学),2026,46(2):45-52.
- [40] Fang X Y, Zhao Z Y, Li Y T, et al. Optimum nitrogen, phosphorous, and potassium fertilizer application increased chrysanthemum growth and quality by reinforcing the soil microbial community and nutrient cycling function[J]. Plants, 2023,12(23):4062.
- [41] 胡文锦,曹立娟,石斌红,等.施磷量对宁夏雨养区紫花苜蓿种子生产性能及土壤性质的影响[J/OL].草原与草坪,1-11.[2026-09-02].<https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20260401.1337.011>.
- [42] 段敏杰,干珠扎布,郭佳,等.施肥对藏北高寒草地植物多样性及生产力的影响[J].西北农业学报,2016,25(11):1696-1703.
- [43] Soratto R P, Fernandes A M. Phosphorus effects on biomass accumulation and nutrient uptake and removal in two potato cultivars[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(3):1225-1236.
- [44] McCarthy M C, Enquist B J. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation[J]. Functional Ecology, 2007, 21(4):713-720.

- [45] 党海红,何克燕,王倩,等.氮添加对退化人工草地青海扁茎早熟禾生长特征与生物量分配的影响[J/OL].草业科学,1-19. [2026-09-02].<https://link.cnki.net/urlid/62.1069.s.20251213.1436.002>.
- [46] Wu Q, Ren H Y, Bisseling T, et al. Long-term warming and nitrogen addition have contrasting effects on ecosystem carbon exchange in a desert steppe[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(11):7256-7265.
- [47] Bai W, Wang G X, Xi J Y, et al. Short-term responses of ecosystem respiration to warming and nitrogen addition in an alpine swamp meadow[J]. European Journal of Soil Biology, 2019, 92:16-23.
- [48] Guo Q, Hu Z M, Li S G, et al. Nitrogen-induced changes in carbon fluxes are modulated by water availability in a temperate grassland[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(12): e2021JG006607.
- [49] Shi J Y, Gong J R, Baoyin T T, et al. Short-term phosphorus addition increases soil respiration by promoting gross ecosystem production and litter decomposition in a typical temperate grassland in northern China[J]. Catena, 2021, 197:104952.
- [50] Fay P A, Prober S M, Harpole W S, et al. Grassland productivity limited by multiple nutrients[J]. Nature Plants, 2015,1:15080.
- [51] 刘华,李明,田永强,等.基于“3414”试验的黄芩氮磷钾肥推荐施肥量研究[J].黑龙江农业科学,2021(11):26-31.
- [52] 赵俊福,何晗颖,张明泽,等.基于“3414”试验的切花芍药氮磷钾推荐施肥量研究[J].中国土壤与肥料,2024(5):70-77.
- [53] 康平德,杨少华,戚淑威,等.基于“3414”方案的长喙乌头氮磷钾施肥量研究[J].农学报,2025,15(10):37-44.
- [54] 廖雨.氮磷钾配施对新疆藜麦养分吸收、产量和品质的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2025.

Preliminary Study on the Effects of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Fertilizer on *Artemisia Desertorum* in the Qaidam Basin and Amount of Recommended Fertilization

WANG Dan^{1,2} XIE Lele^{1,2} WANG Yanlong^{1,2} MA Yushou^{*1,2} LIU Ying^{1,2}

(1.College of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai University, Xining 810016, China;

2.Key Laboratory of Adaptive Management of Alpine Grassland of Qinghai Province, Xining 810016, China)

Abstract: To obtain the optimal fertilization ratio and preliminary recommended on amount of fertilization for cultivating *Artemisia desertorum* in the Qaidam Basin, "3414" field fertilizer experiment was conducted with different levels of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium. The effects of different fertilization treatments on growth indices and aboveground biomass of *Artemisia desertorum* were compared, and the experimental data were comprehensively evaluated by adopting the fertilizer response function model and frequency analysis. The results indicated that: (1) Fertilization significantly promoted the growth and development of *Artemisia desertorum*, and significant differences were observed in plant height, population density, coverage, canopy width and aboveground biomass between the different fertilization treatments ($P < 0.05$); (2) Different Nutrient deficiency exerted differential effects on the aboveground biomass of *Artemisia desertorum*. Nitrogen and phosphorus deficiencies produced relatively great inhibitory effects on aboveground biomass, while the influence of potassium deficiency was relatively slight; (3) As determined by frequency analysis, the preliminary recommended amount of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer for *Artemisia desertorum* in the Qaidam Basin were $156.51 \sim 220.64 \text{ kg/hm}^2$, $193.23 \sim 269.63 \text{ kg/hm}^2$ and $41.45 \sim 57.98 \text{ kg/hm}^2$ respectively, and the corresponding N:P:K fertilization ratios was $1:1.222 \sim 1.235:0.263 \sim 0.265$. In summary, this recommended fertilization range can sufficiently meet the nutrient demands for the growth of *Artemisia desertorum* and the nutrient management requirements of desert ecosystem in Qaidam Basin, and can provide a reference for the scientific fertilization on artificial planting of *Artemisia desertorum* and ecological restoration in this region.

Keywords: Qaidam Basin, *Artemisia desertorum*, combined application of nitrogen, phosphorus and potassium, frequency analysis method, preliminary recommended amount of fertilization

[责任编辑:张建伟]