

汪依妮, [刘洪来], 张明均, 等. 贵州岩溶山区人工草地群落特征和生产性能对不同氮磷施肥组合的响应[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 228–233.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.11.057

贵州岩溶山区人工草地群落特征和生产性能 对不同氮磷施肥组合的响应

汪依妮¹, [刘洪来]¹, 张明均², 杨 丰², 王建立¹, 柳 鑫¹, 田思惠¹, 田晓龙¹, 赵学春¹

(1. 贵州大学动物科学学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州省草地技术试验推广站, 贵州贵阳 550025)

摘要:采用氮肥和磷肥完全交互组合方式, 通过 36 个施肥水平组合, 研究氮肥、磷肥不同施肥水平组合对贵州岩溶山区人工草地群落特征、草地产量和经济效益的影响。结果表明, 氮肥和磷肥处理可以显著提高人工草地群落的高度、盖度和密度, 群落高度随氮肥和磷肥施肥量的增加呈逐渐升高的趋势, 群落盖度和密度呈现先增大后减小的趋势; 随施肥量的增加, 草地群落多样性均有一定程度的增加, 其中, Shannon – Weiner 多样性指数和 Simpson 多样性指数随氮肥量的增加先增大后减小, 随施磷肥量的增加先减小后增大; Pielou 均匀度指数和 Sorenson 相似性系数随氮肥和磷肥施肥量的增加呈现先增加后降低的趋势; 牧草净产值和效益增加值在 N2P4(氮肥: 100.00 kg/hm², 磷肥: 150.00 kg/hm²) 施肥处理下达到最大, 牧草净产值为 2 311.65 元/hm², 效益增加值为 948.84 元/hm²; 氮肥、磷肥施肥量与牧草产量的二元肥效方程为: $Y = 867.68 + 7.67N + 0.07N^2 + 78.39P - 3.23P^2 + 0.15NP$, 得出最大牧草产量为 2 651.30 kg/hm², 此时的施肥组合为氮肥 180.50 kg/hm²、磷肥 45.50 kg/hm²; 最佳效益施肥组合为施氮肥 100.00 kg/hm²、磷肥 50.00 kg/hm²。

关键词:施肥方式; 人工草地; 群落特征; 牧草产量; 经济效益

中图分类号: S812.29

文献标志码: A

文章编号: 1002-1302(2018)11-0228-06

施肥是管理人工草地的重要措施, 是维持草地生态系统营养平衡、产量和品质的必要手段^[1-2], 合理施肥是培育草地和防止草场退化的有效措施。牧草产量受多种因素的共同影响, 其中施肥对牧草产量的影响最为显著^[3], 而且是管理者可以控制的最重要因素之一^[4]。通过施肥调控可以使草地物种组成和产量保持在较为理想的水平^[5], 但过量施肥不仅抑制牧草生长, 同时还造成肥料浪费和环境污染等问题, 影响草地植物的正常生长和品质^[6-7]。

贵州高原地处亚热带西部, 境内由于海拔的升高, 具有温带湿润气候特点。地形支离破碎, 山地立体特征明显, 土壤风化淋溶强烈, 有机质矿化快, 人工草地中牧草所需的各种矿质养分被大量淋失, 草地土壤肥力低下, 施肥量普遍比东部平原地区高 20% 左右^[8]。贵州现有的 18 万 hm² 人工草地, 因施肥或利用不当导致退化的草地达 11.98 万 hm², 合理施肥成为本区域草地持续发展的关键技术措施^[9]。

关于我国南方人工草地合理施肥的研究主要集中在牧草产量和牧草营养对施肥的反应方面, 在试验设计上以单因素为主, 鲜有 2 个、多个因素及它们的交互效应对草地影响的研究。

贵州岩溶山区氮肥和磷肥是人工草地群落肥力的主要限制因子, 单独施氮或磷增产幅度都比较低^[10], 只有通过氮肥、磷肥的合理搭配施用才能充分发挥肥料的作用^[11-12], 迅速补充草地土壤中所缺的营养元素, 提高牧草的产量和质量^[13]。本研究旨在探讨贵州省岩溶山区人工草地群落特征和生产性能对氮、磷施肥组合的短期响应及氮、磷施肥的最佳组合, 并对人工草地生产的经济效益进行分析, 为贵州岩溶山区草地生产的合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省农业科学院畜牧兽医研究所麦坪基地 (26°15′~26°25′N, 106°29′~106°37′E, 平均海拔 1 050 m), 距离贵阳市花溪区中心城区 17 km, 地处长江、珠江分水岭和南明河上游, 属亚热带季风湿润气候带, 岩溶地貌发育典型。年均降水量 1 100~1 200 mm, 最冷月均温 4.5℃, 极端最低温 -6.0℃, 极端最高温 35.0℃, 无霜期 270 d, 日照时数 1 354 h, ≥0℃和 ≥10℃年积温分别为 5 400 h 和 4 600 h。土壤类型以黄壤为主, pH 值 4.5~5.5, 0~30 cm 土层中全氮含量为 0.17%, 速效氮含量为 153.11 mg/kg, 速效磷含量为 12.56 mg/kg。

研究区内的人工草地以撒播的方式建植于 2008 年春夏之交, 地势较平坦, 坡度小于 5°, 草地群落以多年生黑麦草和白三叶为共优势种, 盖度约为 80%, 草地利用方式为围栏放牧, 放牧强度约为 7 只羊/hm²。

收稿日期: 2017-09-07

基金项目: 国家自然科学基金地区项目 (编号: 31560670); 贵州省科技计划课题 (编号: 黔科合 NY 字 [2012] 3011 号); 贵州大学人才引进项目 (编号: 贵大人基合字 [2014] 13 号)。

作者简介: 汪依妮 (1993—), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要从事草地生态研究。E-mail: 245580678@qq.com。

通信作者: 赵学春, 副教授, 硕士生导师, 主要从事草地生态研究。

E-mail: xczhao@gzu.edu.cn。

1.2 试验设计

选择坡度较小、地形和植被整齐均匀的人工草地地块,划分 3 块面积均为 200 m² 施肥区,按照 6 个氮肥施肥梯度($N_i, i=1,2,3,\dots$)和 6 个磷肥施肥梯度($P_i, i=1,2,3,\dots$)的完全交互组合方式,每个施肥区再划分 36 个 2 m×2 m 的小区,各区的四角用木桩标记,每个小区设 3 个重复,共计 108 个小区。氮肥和磷肥的供施肥料分别选用水溶性较好的尿素(N 含量 46%,颗粒直径 1 mm,市场价格为 1.8 元/kg)、重过磷酸钙(P_2O_5 含量 16%,粉末状,市场价格 0.4 元/kg)。氮肥施肥梯度分别为: $N_1: 0 \text{ kg/hm}^2, N_2: 100 \text{ kg/hm}^2, N_3: 200 \text{ kg/hm}^2, N_4: 300 \text{ kg/hm}^2, N_5: 400 \text{ kg/hm}^2, N_6: 500 \text{ kg/hm}^2$; 磷肥施肥梯度分别为: $P_1: 0 \text{ kg/hm}^2, P_2: 50 \text{ kg/hm}^2, P_3: 100 \text{ kg/hm}^2, P_4: 150 \text{ kg/hm}^2, P_5: 200 \text{ kg/hm}^2, P_6: 250 \text{ kg/hm}^2$, 氮肥、磷肥施肥组合见表 1。

施肥于牧草生长季节初期(2013 年 3 月 20 日)进行,按照表 1 的肥料配比方式将尿素和重过磷酸钙均匀撒施在每个小区的土壤表面,每个施肥水平重复 3 次。同时进行草地群落调查,于每个小区内选取 1 m² 的样方。为避免边缘效应,群落调查样方距离小区边缘 50 cm。计测样方的群落盖度(%)、密度(株/m²)、高度(cm),样方内每个物种的密度(株/m²)、高度(cm)、盖度(%)。分物种剪取地上部分,装袋带回实验室内,于 80 ℃ 条件下烘干至恒质量,称取每个物种的生物量(g/m²)、总生物量(g/m²)。以草地主要优势种处于最佳刈割时期(4 月 30 日,多年生黑麦草、鸭茅为抽穗期,白三叶为现蕾期)进行施肥后的草地群落调查,调查方法和内容同施肥前。

表 1 氮肥磷肥施肥组合小区

氮肥水平	磷肥水平					
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
N_1	N_1P_1	N_1P_2	N_1P_3	N_1P_4	N_1P_5	N_1P_6
N_2	N_2P_1	N_2P_2	N_2P_3	N_2P_4	N_2P_5	N_2P_6
N_3	N_3P_1	N_3P_2	N_3P_3	N_3P_4	N_3P_5	N_3P_6
N_4	N_4P_1	N_4P_2	N_4P_3	N_4P_4	N_4P_5	N_4P_6
N_5	N_5P_1	N_5P_2	N_5P_3	N_5P_4	N_5P_5	N_5P_6
N_6	N_6P_1	N_6P_2	N_6P_3	N_6P_4	N_6P_5	N_6P_6

注: N 表示尿素, P 表示重过磷酸钙。

1.3 数据处理

用 Excel、SPSS 软件进行数据统计、方差分析、多重比较与回归分析。

采用以下公式计算人工牧草群落生物多样性:

(1) Shannon - Wiener 多样性指数: $H = - \sum P_i / \ln P_i$;

(2) Simpson 多样性指数: $D = 1 - \sum P_i^2$ (i 为 1, 2, 3, ..., S);

(3) Pielou 均匀度指数: $J = H / \ln S$;

(4) Sorenson 相似性系数: $C_s = 2j / (a + b)$ 。

式中: S 为物种总数; H 为 Shannon - Wiener 多样性指数; P_i 为抽样个体属于某一物种的概率; D 为 Simpson 指数; J 为 Pielou 均匀度指数; C_s 为 Sorenson 相似性系数; j 为 2 群落或样地共有的种数, a 为施肥前草地的物种数, b 为施肥后草地的物种数。

经济效益分析采用以下公式计算:

(5) 牧草产值 = 草地生物量 × 干草价格;

(6) 牧草成本 = 肥料用量 × 肥料价格;

(7) 牧草净产值 = 各处理产值之和 - 肥料成本;

(8) 效益增加值 = 施肥净产值 - 未施肥净产值。

2 结果与分析

2.1 施肥对人工草地牧草高度、盖度、密度的影响

2.1.1 牧草高度 施肥可以不同程度地影响人工草地的高度、盖度、密度。从图 1 - A 可以看出, 除 N_6P_2 处理外, 施肥处理的牧草高度均明显高于未施肥 N_1P_1 的牧草高度, 牧草高度在 N_1P_6 处理下达到最大值, 为 $(23.46 \pm 1.81) \text{ cm}$, 比不施肥处理增高了 95.5%。单施氮肥 ($N_iP_1, i=1,2,3,\dots$) 条件下, 牧草高度随氮肥施肥量的增加呈现先升高后降低的趋势, 在 N_3P_1 施肥量时达到最大值, 为 $(15.49 \pm 1.37) \text{ cm}$; 当磷肥在 P_2, P_3, P_4 水平时, 牧草高度随氮肥施肥量增加亦呈现先升高后降低的趋势; 当磷肥在 P_5, P_6 水平时, 牧草高度随氮肥施肥量增加呈现逐渐降低的趋势。单施磷肥 ($N_1P_i, i=1,2,3,\dots$) 条件下, 牧草高度随磷肥施肥量的增加呈现逐渐升高的趋势, 在 N_1P_6 施肥处理下达到最大值, 为 $(23.46 \pm 1.81) \text{ cm}$; 当氮肥施肥梯度由 N_2 增加至 N_6 时, 牧草高度随磷肥施肥量的增加升高趋势逐渐变缓。

2.1.2 牧草盖度 从图 1 - B 可以看出, 施肥处理的群落盖度均高于不施肥处理 N_1P_1 , 群落盖度在 N_2P_6 处理下达到最大值 $(95.02 \pm 2.99) \%$, 与不施肥相比, 盖度增加了 18.29%。单施氮肥 ($N_iP_1, i=1,2,3,\dots$) 条件下, 群落盖度随氮肥施肥量的增加呈先增大后减小的趋势, 最大值为 $(90.9 \pm 2.65) \%$; 当磷肥在 P_2, P_3, P_4, P_5, P_6 水平时, 群落盖度随氮肥施肥量增加亦呈现先增大后减小的趋势, 但增大的趋势逐渐变缓, 最大值出现的位置由 P_2, P_3, P_4 水平时的 N_3 位置逐渐前移至 P_5, P_6 水平的 N_2 位置。单施磷肥 ($N_1P_i, i=1,2,3,\dots$) 条件下, 除 N_1P_4 施肥水平外, 群落盖度随磷肥施肥量的增加呈现逐渐增大的趋势, 在 N_1P_6 处理下达到最大值, 为 $(92.67 \pm 4.04) \%$; 当氮肥水平在 N_2 水平时, 群落盖度随磷肥施肥量增加亦呈现逐渐增大的趋势; 当氮肥水平增加至 N_3, N_4, N_5, N_6 时, 群落盖度随磷肥施肥量增加呈现先增大后减小的趋势。

2.1.3 牧草密度 从图 1 - C 可以看出, 施肥处理的群落密度均高于不施肥处理 N_1P_1 , 群落密度在 N_2P_3 处理下达到最大值, 为 $(15.07 \pm 1.55) \text{ 株/m}^2$, 与不施肥处理相比提高了 74.02%。单施氮肥 ($N_iP_1, i=1,2,3,\dots$) 条件下, 群落密度随氮肥施肥量的增加呈现先增大后减小的趋势, 在 N_4P_1 施肥量时达到最大值, 为 $(11.27 \pm 1.78) \text{ 株/m}^2$; 当磷肥水平在 P_2, P_3, P_4, P_5, P_6 水平时, 群落密度随氮肥施肥量增加亦呈现先增大后减小的趋势。在单施磷肥水平上, 群落密度亦呈现先增加后减小的趋势, 在 N_1P_4 施肥量时达到最大值, 为 $(12.78 \pm 1.25) \text{ 株/m}^2$; 当氮肥水平在 N_2, N_3, N_4, N_5, N_6 水平时, 群落密度随磷肥施肥量的增加均呈现先增大后逐渐减小的趋势, 当氮肥施肥梯度由 N_2 增加至 N_6 时, 群落密度随磷肥施肥量的增加而变化的趋势逐渐变缓。

2.2 施肥对人工草地群落多样性的影响

2.2.1 Shannon - Weiner 多样性指数 施肥可以不同程度影

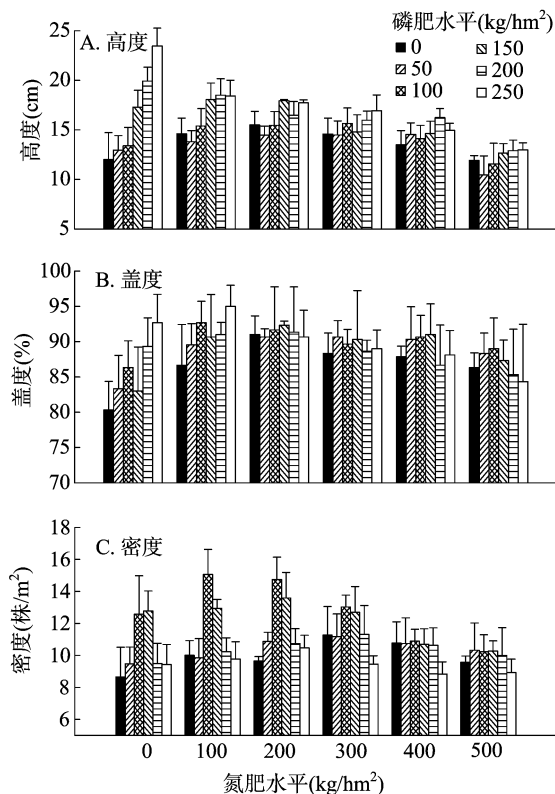


图1 不同施肥处理对牧草高度、盖度、密度的影响

响人工草地的生物多样性。从图 2 - A 可以看出,除 N_4P_6 和 N_6P_1 处理外,施肥处理的 Shannon - Weiner 多样性指数均明显高于不施肥处理 N_1P_1 , Shannon - Weiner 多样性指数在 N_3P_5 处理下达到最大值,为 0.76 ± 0.06 ,比不施肥增高了 38.18%。单施氮肥 ($N_iP_1, i = 1, 2, 3, \dots$) 条件下,Shannon - Weiner 多样性指数随氮肥施肥量增加呈现先增大后减小的趋势,在 N_2P_1 施肥量时达到最大值,为 0.62 ± 0.06 ;当磷肥分别在 P_2, P_3, P_4, P_5, P_6 水平时,Shannon - Weiner 多样性指数随氮肥施肥量增加亦呈现先升高后降低的趋势。在单施磷肥 ($N_1P_i, i = 1, 2, 3, \dots$) 条件下,Shannon - Weiner 多样性指数随磷肥施肥量的增加呈现先增大后减小的趋势,在 N_1P_5 施肥处理下达到最大值,为 0.73 ± 0.07 ;当氮肥在 N_2, N_3, N_4, N_5, N_6 水平时,Shannon - Weiner 多样性指数随磷肥施肥量的增加均呈现先增大后逐渐减小的趋势。

2.2.2 Simpson 多样性指数 Simpson 多样性指数与 Shannon - Weiner 多样性指数相同,从图 2 - B 可以看出,单施氮肥 ($N_iP_1, i = 1, 2, 3, \dots$) 条件下,Simpson 多样性指数呈现先逐渐增大后逐渐减小的趋势,当磷肥分别在 P_2, P_3, P_4, P_5, P_6 水平时,Simpson 多样性指数随氮肥施肥量增加亦呈现先逐渐增大后逐渐减小的趋势。与单施氮肥结果相反,单施磷肥 ($N_1P_i, i = 1, 2, 3, \dots$) 条件下,Simpson 多样性指数随磷肥施肥量的增加呈现先逐渐减小后逐渐增大的趋势;当氮肥在 N_2, N_3, N_4, N_5, N_6 水平时,Simpson 多样性指数随磷肥施肥量的增加均呈现先逐渐减小后逐渐增大的趋势。

2.2.3 Pielou 均匀度指数 从图 2 - C 可以看出,施肥处理的 Pielou 均匀度指数均明显高于不施肥处理 N_1P_1 , Pielou 均匀度指数在 N_5P_5 处理下达到最大值,为 0.96 ± 0.10 ,比不施

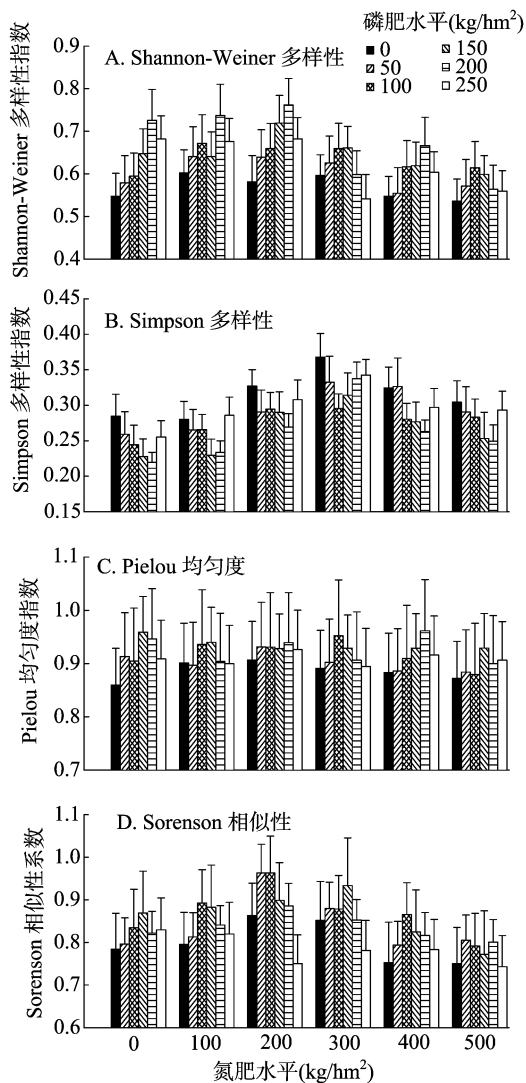


图2 不同施肥处理对植物多样性指数的影响

肥增高了 14.28%。单施氮肥 ($N_iP_1, i = 1, 2, 3, \dots$) 条件下, Pielou 均匀度指数随氮肥施肥量增加呈现先增大后减小的趋势,在 N_3P_1 施肥量时达到最大值,为 0.91 ± 0.07 ;当磷肥水平分别在 P_2, P_3 水平时, Pielou 均匀度指数随氮肥施肥量增加亦呈现先升高后降低的趋势;当磷肥水平在 P_4 水平时, Pielou 均匀度指数随氮肥施肥量增加亦呈现逐渐降低的趋势;当磷肥水平分别在 P_5, P_6 水平时, Pielou 均匀度指数随氮肥施肥量增加亦呈现“W”形变化的趋势。单施磷肥 ($N_1P_i, i = 1, 2, 3, \dots$) 条件下, Pielou 均匀度指数随磷肥施肥量的增加呈现先增大后减小的趋势,在 N_1P_4 施肥处理下达到最大值,为 0.96 ± 0.07 ;当氮肥在 N_2, N_3, N_4, N_5, N_6 水平时, Pielou 均匀度指数随磷肥施肥量的增加均呈现先增大后逐渐减小的趋势。

2.2.4 Sorenson 相似性系数 从图 2 - D 可以看出, Sorenson 相似性系数随施肥量的变化与 Pielou 均匀度指数表现出相同的趋势,在 N_3P_3 处理下施肥前和施肥后的 Sorenson 相似性系数达到最大值,为 0.96 ± 0.09 ,比不施肥处理增高了 23.01%。单施氮肥 ($N_iP_1, i = 1, 2, 3, \dots$) 条件下, Sorenson 相似性系数随氮肥施肥量增加呈现先增大后减小的趋势,在

N_3P_1 施肥量时达到最大值,为 0.86 ± 0.08 ;当磷肥水平分别在 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 水平时,Sorenson 相似性系数随氮肥施肥量增加亦呈现先升高后降低的趋势;当磷肥水平在 P_6 水平时,Sorenson 相似性系数随氮肥施肥量增加呈现先降低再升高后逐渐降低的趋势。在单施磷肥($N_1P_i, i=1,2,3,\cdots$)条件下,Sorenson 相似性系数随磷肥施肥量增加呈现先增大后减小再升高的趋势,在 N_1P_4 施肥处理下达到最大值,为 0.87 ± 0.10 ;当氮肥在 N_2 、 N_3 、 N_4 、 N_5 、 N_6 水平时,施肥前后群落的 Sorenson 相似性系数随磷肥施肥量增加呈现先增大后减小的趋势。

2.3 施肥对人工草地牧草产量的影响

从表 2 可以看出,除 N_1P_6 、 N_6P_1 、 N_6P_2 、 N_6P_5 外理外,施肥处理的牧草产量均有明显的提高,在 N_3P_4 处理下牧草产量达到最大值,为 $(2\ 623.81 \pm 383.31)\text{ kg/hm}^2$,比不施肥处理增

加了 92.53%。单施氮肥($N_iP_1, i=1,2,3,\cdots$)条件下,草地产量随氮肥施肥量的增加呈现先升高后降低的趋势,在 N_4P_1 施肥量时达到最大值,为 $(2\ 036.62 \pm 122.32)\text{ kg/hm}^2$,与未施肥相比牧草产量提高了 49.52%;当磷肥水平分别在 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 水平时,牧草产量随氮肥施肥量增加亦呈现先升高后降低的趋势;当磷肥水平在 P_6 水平时,牧草产量随氮肥施肥量增加呈先增加后降低再增加的趋势,最大值为 $(2\ 089.43 \pm 311.13)\text{ kg/hm}^2$ 。与单施氮肥的情况相同,单施磷肥($N_1P_i, i=1,2,3,\cdots$)条件下,牧草产量随磷肥施肥量的增加呈现先增加后降低的趋势,在 N_1P_3 施肥处理下达到最大值,为 $(1\ 606.84 \pm 86.44)\text{ kg/hm}^2$;当氮肥在 N_2 、 N_3 、 N_4 水平时,牧草产量随磷肥施肥量的增加均呈现先增加后降低的趋势;当氮肥在 N_5 、 N_6 水平时,牧草产量随磷肥施肥量的增加均呈现先增加后降低再增加的趋势。

表 2 不同施肥处理的牧草产量

施肥水平	实际产量(kg/hm ²)					
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
N ₁	1 362.82 ± 361.24	1 548.66 ± 407.93	1 606.84 ± 86.44	1 603.36 ± 267.85	1 469.62 ± 316.73	1 075.05 ± 251.44
N ₂	1 576.43 ± 351.94	1 789.43 ± 144.84	2 001.02 ± 228.45	2 551.64 ± 349.92	2 107.01 ± 298.84	2 089.43 ± 311.13
N ₃	1 976.15 ± 230.83	2 233.05 ± 297.04	2 403.83 ± 225.35	2 623.81 ± 383.31	1 880.04 ± 94.51	1 693.42 ± 73.02
N ₄	2 036.62 ± 122.32	2 218.61 ± 112.43	2 497.27 ± 607.38	2 029.02 ± 252.05	1 841.49 ± 231.66	1 288.84 ± 153.75
N ₅	1 737.28 ± 169.54	1 773.05 ± 289.45	2 118.07 ± 257.32	2 092.24 ± 295.86	1 364.65 ± 165.94	1 540.83 ± 145.83
N ₆	944.82 ± 54.32	1 045.83 ± 104.74	1 392.65 ± 298.45	1 735.46 ± 177.74	1 354.43 ± 122.64	1 560.63 ± 398.65

2.4 施肥对草地经济效益的影响

2.4.1 牧草净产值 从表 3 可以看出,牧草净产值在 N_2P_4 施肥处理下达到最大值,为 $(2\ 311.65 \pm 306.62)\text{ 元/hm}^2$,比不施肥处理增加 948.80 元/hm²;牧草净产值在 N_6P_1 施肥处理下最小,为 $(44.80 \pm 7.67)\text{ 元/hm}^2$ 。单施氮肥($N_iP_1, i=1,2,3,\cdots$)条件下,牧草净产值随氮肥施肥量的增加呈现先升高后降低的趋势,在 N_3P_1 施肥量时达到最大值,为 $(1\ 616.13 \pm 199.23)\text{ 元/hm}^2$,与未施肥相比牧草净产值提高了 18.6%;当

磷肥分别在 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 水平时,牧草净产值随氮肥施肥量增加亦呈现先升高后降低的趋势。与单施氮肥的情况相同,单施磷肥($N_1P_i, i=1,2,3,\cdots$)条件下,牧草净产值随磷肥施肥量的增加呈现先升高后降低的趋势,在 N_1P_3 施肥处理下达到最大值,为 $(1\ 566.85 \pm 56.42)\text{ 元/hm}^2$;当氮肥在 N_2 、 N_3 、 N_4 水平时,牧草净产值随磷肥施肥量的增加均呈现先升高后降低的趋势;当氮肥在 N_5 、 N_6 水平时,牧草净产值随磷肥施肥量的增加均呈现先升高后降低再升高的趋势。

表 3 不同施肥处理的牧草净产值

施肥水平	净产值(元/hm ²)					
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
N ₁	1 362.85 ± 361.23	1 528.63 ± 367.95	1 566.8 ± 56.42	1 543.33 ± 237.82	1 389.64 ± 236.83	975.05 ± 181.44
N ₂	1 396.45 ± 271.66	1 589.40 ± 106.6	1 781.01 ± 153.90	2 311.65 ± 306.62	1 847.03 ± 239.23	1 809.44 ± 277.45
N ₃	1 616.13 ± 199.23	1 853.04 ± 239.85	2 003.85 ± 163.53	2 203.83 ± 323.67	1 440.08 ± 34.99	1 233.49 ± 23.95
N ₄	1 496.4 ± 82.75	1 658.63 ± 1.92	1 917.22 ± 452.63	1 429.04 ± 212.36	1 221.46 ± 170.28	648.88 ± 109.79
N ₅	1 017.23 ± 115.63	1 033.07 ± 123.48	1 358.09 ± 162.63	1 249.07 ± 192.42	564.62 ± 85.77	740.61 ± 82.40
N ₆	44.80 ± 7.67	125.80 ± 9.43	452.03 ± 37.39	775.49 ± 65.90	374.45 ± 15.61	540.80 ± 48.70

2.4.2 牧草效益增加值 从表 4 可以看出,牧草效益增加值随施肥处理的变化与牧草净产值的变化规律一致,不同施肥处理对牧草效益增加值影响较大,牧草效益增加值在 N_2P_4 施肥处理下达到最大,为 948.84 元/hm²;牧草效益增加值在 N_6P_1 施肥处理下最小,为 -1 318.03 元/hm²。单施氮肥($N_iP_1, i=1,2,3,\cdots$)条件下,牧草效益增加值随氮肥施肥量的增加呈现先逐渐升高后逐渐降低的趋势,在 N_3P_1 施肥量时达到最大值,为 253.26 元/hm²;当施肥量增加到 N_5P_1 时,牧草效益增加值变为负值;当磷肥水平分别在 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 水平时,随氮肥施肥量增加牧草效益增加值呈现先逐渐提高后逐渐降低的趋势;当施肥量增加到 N_5P_2 、 N_5P_3 、 N_5P_4 、 N_4P_5 、

N_3P_3 时,牧草效益增加值在 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 施肥水平变为负值。与单施氮肥的情况相同,单施磷肥($N_1P_i, i=1,2,3,\cdots$)条件下,随磷肥施肥量的增加牧草效益增加值呈现先增加后降低的趋势,在 N_1P_3 施肥处理下达到最大值,为 204.01 元/hm²,最小值出现在 N_1P_6 施肥处理条件下,为 -387.85 元/hm²;当氮肥水平在 N_2 、 N_3 、 N_4 水平时,随磷肥施肥量的增加牧草效益增加值均呈现先增大后逐渐减小的趋势,当施肥量增加到 N_3P_6 、 N_4P_5 时,牧草效益增加值在 P_3 、 P_4 施肥水平变为负值;当氮肥水平在 N_5 、 N_6 水平时,随磷肥施肥量的增加牧草效益增加值均呈现先增大后减小再增大的趋势,其值均为负值。

表 4 不同施肥处理的牧草效益增加值

施肥水平	效益增加值(元/hm ²)					
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
N ₁	0.00 ± 0.00	165.80 ± 12.40	204.01 ± 23.65	180.52 ± 19.23	26.83 ± 3.45	-387.85 ± 29.24
N ₂	33.64 ± 2.77	226.65 ± 23.27	418.25 ± 37.94	948.84 ± 84.26	484.24 ± 52.11	446.64 ± 42.95
N ₃	253.26 ± 23.66	490.28 ± 39.74	641.05 ± 54.23	841.23 ± 24.15	77.25 ± 6.74	-129.43 ± 11.43
N ₄	133.84 ± 12.98	295.85 ± 26.44	554.45 ± 50.87	66.24 ± 6.94	-141.43 ± 13.73	-714.01 ± 69.90
N ₅	-345.67 ± 42.16	-329.88 ± 29.64	-4.85 ± 0.97	-113.84 ± 10.23	-798.24 ± 58.79	-622.20 ± 49.60
N ₆	-1 318.03 ± 121.42	-1 237.08 ± 98.64	-910.87 ± 70.21	-587.45 ± 49.85	-988.43 ± 39.61	-822.32 ± 60.21

根据牧草产量和氮肥、磷肥施用量,以二次多项式模拟牧草产量与氮肥、磷肥施用量间的关系,得出氮肥和磷肥的二元肥效方程: $Y = 867.68 + 7.67N + 0.07N^2 + 78.39P - 3.23P^2 + 0.15NP$ 。式中: Y 表示草地产量(kg/hm²); N 表示氮肥(kg/hm²); P 表示磷肥(kg/hm²)。

根据上述模型可计算出任一肥料组合的理论牧草产量。计算得出单位面积最高牧草产量为 2 651.30 kg/hm²,按照当时干草的市场价格 1.00 元/kg,氮肥 1.80 元/kg,磷肥 0.40 元/kg,利润率 375.50%,此时的施肥量为:氮肥 180.50 kg/hm²、磷肥 45.50 kg/hm²。

3 讨论与结论

3.1 施肥对人工草地群落特征的影响

人工草地的建植和管理方式极大地改变了草地生态系统的生物和非生物因子,改变了草地生态系统的能量和物质流通模式,施肥是最直接有效的人工草地管理方式之一^[14]。贵州省人工草地栽培牧草以豆科牧草和禾本科牧草为优势种。施肥方式以单施为主,其中豆科牧草草地施肥方式以施磷肥为主,禾本科牧草草地施肥方式以施氮肥为主^[8]。研究表明,施肥对人工草地的群落结构和多样性均有明显影响。沈景林等的施肥试验表明,施肥可以增加草地草群的高度、密度,改善草群结构,使草群中杂类草比率下降,禾草和豆科牧草的比率提高^[15];周青平等研究结果,施氮肥对高寒草地群落的影响得出施肥后的盖度比未施肥增加 10.60% ~ 174.00%,高度增加 15.40% ~ 83.10%,密度增加 1.70% ~ 235.00%^[16];韩潼等研究发现,在施肥当年,施肥处理就使植被盖度大于不施肥处理^[17];高超等施肥试验表明,施肥可显著增加羊草种群的高度、密度、盖度^[18]。本研究结果表明,施肥的牧草高度、密度、盖度均高于不施肥处理,尤其在 N₁P₆ 处理下的牧草高度比不施肥处理增加了 32.20%。仅 N₆P₁ 处理的牧草高度低于未施肥,其原因可能是过多的氮肥抑制了牧草的生长。

适度施肥不仅能改变草地群落结构和特征,同时影响群落的生物多样性^[19]。生物多样性对养分增加的反应比较复杂,众多研究认为,施肥会导致群落植物多样性下降^[20],但也有研究表明,施肥对植物多样性无显著影响。Goldberg 等进行的为期 1 年施肥试验表明,生物多样性对施肥的反应均未出现明显变化^[21]。邱波等研究了施肥对高寒草甸物种多样性的影响后发现:物种丰富度随着施肥先增加后降低,Shannon - Weiner 多样性指数、均匀度指数均随施肥增加而下降^[22]。也有学者认为,施肥可以增加植物群落的物种丰富度以及多样性^[23-24]。郑华平等在对高寒沙化草地进行施肥研

究时发现,施肥使重度退化的沙地群落生物多样性增加^[25]。本研究表明,随施肥量的增加,草地群落多样性均有一定程度的增加,其中 Shannon - Weiner 多样性指数和 Simpson 多样性指数随施氮肥量的增加先增大后减小,随施磷肥量的增加先减小后增大;Pielou 均匀度指数和 Sorenson 相似性系数先增加后降低。造成 2 种不同结果的原因可能是施肥群落的退化演替阶段不同^[26]。施肥改善了土壤的基质条件,因而有助于植物多样性的增加和恢复。

3.2 施肥对人工草地产量和经济效益的影响

大量研究表明,施氮、磷可显著增加草地生产性能^[27]。氮肥对促进作物的生长发育、增产和增收效果最明显,施氮肥不仅可以促进禾本科植物分蘖,而且能增加地上部与地下的干物质量^[28]。在一定施肥范围内,增施氮肥与作物的品质和产量呈正相关,当超过施氮临界值时,产量开始下降,增施氮肥与作物产量呈负相关^[29]。磷是豆科植物最重要的营养元素之一^[30],缺磷是导致草地退化的主要养分限制因素,在一定的施磷肥范围内,生长速率逐渐加快,但当施磷肥超过一定范围时,继续增施磷肥植物产量的增加反而减小^[31]。同时,在适宜范围内,氮、磷肥表现出协同促进作用,而高于这个范围时会表现出拮抗作用^[32],氮、磷肥互作能够促进牧草生长发育协调进行,产量与品质同步增长^[33]。纪亚君采用氮肥单因子试验表明,氮肥对高寒草甸有增产效应,最佳施氮量为 150.00 kg/hm²,2 年累积可增加地上总生物量 2 883.00 kg/hm²,而当施肥量持续增加,草地的总生物量将出现下降^[34]。马玉寿等在达日县高寒草甸的小蒿草草甸的研究表明,随着施氮肥量的增加,禾本科牧草占整个草群生物量的比例明显上升,当施肥量为 150.00 kg/hm² 时,优良牧草生物量也提高了 106%^[35];德科加等在干草原类草场获得最佳产草量及经济效益的施肥量为 450.00 kg/hm²^[36];邱波等研究了不同施肥梯度对甘南退化高寒草甸生产力和物种多样性的影响发现,施肥量对生产力的影响存在一个阈值(300.00 kg/hm²),超过这个值,施肥的作用就不显著了^[22]。本研究中,通过模型得出最高牧草产量为 2 651.30 kg/hm²,此时的施肥量为氮肥 180.50 kg/hm²、磷肥 45.50 kg/hm²,施肥量大于马玉寿、纪亚君等得出的最高产量时的施肥量,低于德科加、邱波等得出的最高产量时的施肥量。在实际生产中,施肥量多少取决于所追求的目标。以经济效益为目标,就要求适宜的施肥量。以产量为目标,就要投入较高的施肥量^[37]。从经济效益来看,本研究得出最佳施肥组合为施氮肥 100.00 kg/hm²、磷肥 50.00 kg/hm²,此时的净产值为 2 311.60 元/hm²。

3.3 结论

氮肥和磷肥处理可以显著提高人工草地的高度、盖度和密度,植物高度随氮肥和磷肥施肥量的增加呈逐渐升高的趋势,群落盖度和密度呈现先增大后减小的趋势。

草地群落多样性随施肥量的增加均有一定程度的增加,其中 Shannon - Weiner 多样性指数和 Simpson 多样性指数随氮肥量的增加先增大后减小,随施磷肥量的增加先减小后增大;Pielou 均匀度指数和 Sorenson 相似性系数随氮肥和磷肥施肥量的增加呈先增加后降低的趋势。

牧草产量随氮肥和磷肥施肥量的增加呈现先逐渐升高后逐渐降低的趋势,最大值为 $2\ 623.81\ \text{kg}/\text{hm}^2$;牧草净产值和效益增加值在 N_2P_4 施肥处理下达到最大,牧草净产值为 $2\ 311.65\ \text{元}/\text{hm}^2$,效益增加值为 $948.84\ \text{元}/\text{hm}^2$ 。

氮肥、磷肥施肥量与牧草产量的二元肥效方程为: $Y = 867.68 + 7.67N + 0.07N^2 + 78.39P - 3.23P^2 + 0.15NP$,得出最大牧草产量为 $2\ 651.30\ \text{kg}/\text{hm}^2$,此时的施肥组合为:氮肥 $180.50\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、磷肥 $45.50\ \text{kg}/\text{hm}^2$;最佳效益施肥组合为施氮肥 $100.00\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 、磷肥 $50.00\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。

参考文献:

- [1]唐成斌,范林祥. 贵州南部人工草场氮、磷、钾、石灰配合施用效应分析[J]. 牧草与饲料,1991(1):37-40.
- [2]符佩斌,干友民,张洪轩,等. 施肥对高寒草甸产草量和品质的影响[J]. 草业科学,2015,32(7):1137-1142.
- [3]Wang C, Long R, Wang Q, et al. Fertilization and litter effects on the functional group biomass, species diversity of plants, microbial biomass, and enzyme activity of two alpine meadow communities[J]. Plant & Soil, 2010, 331(1/2):377-389.
- [4]Lemanski K, Scheu S. The influence of fertilizer addition, cutting frequency and herbicide application on soil organisms in grassland[J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(2):197-205.
- [5]Hrevušová Z, Hejman M, Pavlů V V, et al. Long-term dynamics of biomass production, soil chemical properties and plant species composition of alluvial grassland after the cessation of fertilizer application in the Czech Republic[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 130(3/4):123-130.
- [6]Bhattacharya T, Banerjee D K, Gopal B. Heavy metal uptake by *Scirpus littoralis* Schrad. from fly ash dosed and metal spiked soils[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2006, 121(1/2/3):363-380.
- [7]卡着才让,德科加,徐成体. 不同施肥时间及施氮水平对高寒草甸生物量和土壤养分的影响[J]. 草地学报,2015,23(4):726-732.
- [8]王元素,罗京焰,李莉. 贵州草地施肥对策[J]. 贵州畜牧兽医,2014,38(5):63-64.
- [9]吴有松. 贵州喀斯特山区草地生态系统健康评价体系研究[C]//2015 中国草原论坛论文集,2015.
- [10]李楠,宋建国,刘伟,等. 草原施肥对牧草产量和质量的作用及其经济效益分析[J]. 黑龙江农业科学,2001(2):16-18.
- [11]Štýbnarová M, Mičková P, Fiala K, et al. Effect of organic fertilizers on botanical composition of grassland, herbage yield and quality[J]. Agriculture, 2014, 60(3):87-97.
- [12]宗宁,石培礼,牛犇,等. 氮磷配施对藏北退化高寒草甸群落结构和生产力的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(12):

3458-3468.

- [13]杨月娟,周华坤,叶鑫,等. 青藏高原高寒草甸植物群落结构和功能对氮、磷、钾添加的短期响应[J]. 西北植物学报,2014,34(11):2317-2323.
- [14]申小云,蒋会梅,苑荣,等. 草地施肥对牧草和放牧贵州半细毛羊的影响[J]. 草业学报,2012,21(3):275-280.
- [15]沈景林,谭刚,乔海龙,等. 草地改良对高寒退化草地植被影响的研究[J]. 中国草地,2000(5):49-54.
- [16]周青平,金继运,德科加,等. 不同施氮水平对高寒草地牧草增产效益的研究[J]. 土壤肥料,2005(3):29-31.
- [17]韩潼,牛得草,张永超,等. 施肥对玛曲县高寒草甸植物多样性及生产力的影响[J]. 草业科学,2011,28(6):926-930.
- [18]高超,陈积山,邱桂俐,等. 施肥对退化草地羊草种群特征和生物量的影响[J]. 黑龙江农业科学,2016(1):135-137.
- [19]沈振西,陈佐忠,周兴民,等. 高施氮量对高寒矮嵩草甸主要类群和多样性及质量的影响[J]. 草地学报,2002,10(1):7-17.
- [20]Gough L, Osenberg C W, Gross K L, et al. Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities[J]. Oikos, 2000, 89(3):428-439.
- [21]Goldberg D E, Miller T E. Effects of different resource additions of species diversity in an annual plant community[J]. Ecology, 1990, 71(1):213-225.
- [22]邱波,罗燕江. 不同施肥梯度对甘南退化高寒草甸生产力和物种多样性的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2004,40(3):56-59.
- [23]罗燕江. 退化和恢复中的植物群落[D]. 兰州:兰州大学,2006.
- [24]王鹤龄,牛俊义,郑华平,等. 玛曲高寒沙化草地生态位特征及其施肥改良研究[J]. 草业学报,2008,17(6):18-24.
- [25]郑华平,陈子萱,王生荣,等. 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响[J]. 草业学报,2007,16(5):34-39.
- [26]李新荣,张景光,刘立超,等. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究[J]. 植物生态学报,2000,24(3):257-261.
- [27]姚骅,陆建华,蔡立群,等. 玛曲退化草地主要植被特征对不同施肥处理的响应[J]. 甘肃农业大学学报,2009,44(1):127-131.
- [28]翟丙年,李生秀. 氮素对冬小麦生长发育及产量的亏缺和补偿效应[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(3):308-313.
- [29]彭永欣,郭文善,居春霞,等. 氮肥对小麦籽粒营养品质的调节效应[J]. 江苏农业科学,1987(2):9-11.
- [30]唐伟,王永雄. 豆科植物低磷胁迫的适应机制[J]. 草业科学,2014,31(8):1538-1548.
- [31]姜宗庆,封超年,黄联联,等. 施磷量对不同专用小麦籽粒蛋白质及其组分含量的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2006,27(2):26-30.
- [32]尹鹏达,赵丽娜,朱文旭,等. 氮磷钾配施对填充型烤烟还原糖含量的影响[J]. 华北农学报,2011,26(增刊1):80-84.
- [33]赵秀兰,李文雄. 氮磷水平与气象条件对春小麦籽粒蛋白质含量形成动态的影响[J]. 生态学报,2005,25(8):1914-1920.
- [34]纪亚君. 青海高寒草甸施氮肥增产效应浅析[J]. 草业科学,2006,23(3):26-29.
- [35]马玉寿,郎百宁,李青云,等. 施氮量与施氮时间对小嵩草草甸草地的影响[J]. 草业科学,2003,20(3):47-50.
- [36]德科加,徐成体,周青平. 饱和 D 最优设计在草地施肥研究中的应用[J]. 青海畜牧兽医杂志,2000,30(4):11-12.
- [37]李志坚,祝廷成,秦明. 不同施肥水平与组合对饲用黑麦经济效益的影响及施肥决策[J]. 草业学报,2009,18(3):148-153.