

DOI: 10.11686/cyxb2019504

http://cyxb.magtech.com.cn

吴勇, 刘晓静, 蔺芳, 等. 河西荒漠灌区紫花苜蓿施肥效应及其基于数据包络分析法的经济效益研究. 草业学报, 2020, 29(9): 94-105.

Wu Y, Liu X J, Lin F, et al. A data envelopment analysis study of alfalfa fertilization responses and economic return in the desert irrigation area of Hexi. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(9): 94-105.

河西荒漠灌区紫花苜蓿施肥效应及其基于数据包络分析法的经济效益研究

吴勇, 刘晓静*, 蔺芳, 童长春

(甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为科学准确地评判河西走廊苜蓿主产区紫花苜蓿饲草生产中施肥措施对其产品质量及生产收益的影响, 本研究以“甘农3号”紫花苜蓿为材料, 通过2016、2017年2年田间试验, 以该区域紫花苜蓿饲草生产的平衡施肥推荐方案(N 103.5 kg·hm⁻²、P₂O₅ 105 kg·hm⁻²、K₂O 90 kg·hm⁻²)为对照, 探讨了不施肥及3种不完全施肥(缺氮偏施、缺磷偏施、缺钾偏施)处理下紫花苜蓿的生产性能, 并采用数据包络分析法(DEA)对其经济效益进行分析。结果表明: 与不施肥相比, 施肥措施各处理均显著提高紫花苜蓿产量、蛋白总量, 降低其酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维, 提高了相对饲用价值, 从而改善了紫花苜蓿品质, 并有效增加了经济效益; 与氮、磷、钾平衡施肥相比, 各偏肥处理的紫花苜蓿产量和品质均显著低于平衡施肥, 尤以缺磷偏施的降幅最大, 2016、2017年2年的产量和蛋白总量降幅分别达到25.9%、25.7%和33.4%、33.1%。因此, 磷是河西荒漠灌区紫花苜蓿饲草生产的养分限制因子, 氮、磷、钾对该地区紫花苜蓿生产性能影响顺序为: 磷>氮>钾。运用数据包络分析法(DEA)分析出河西荒漠灌区紫花苜蓿的施肥效应为氮、磷、钾平衡施肥的经济效益最优, 为DEA有效; 不完全施肥的3个评价单元及不施肥评价单元为DEA无效, 其中, 不施肥经济效益最低, 3个不完全施肥评价单元中的缺磷偏肥的紫花苜蓿经济效益比缺氮偏肥和缺钾偏肥更低; 另外还以DEA模型推算出不同施肥措施下紫花苜蓿饲草生产经济效益改进的具体方案, 其中, 不施肥的紫花苜蓿饲草生产需调整的幅度最大, 调整额度达10678.88 CNY·hm⁻², 各施肥措施需调整的幅度排序为: 不施肥>缺磷偏施>缺氮偏施>缺钾偏施。

关键词:河西荒漠灌区; 紫花苜蓿; 施肥效应; 数据包络分析; 经济效益

A data envelopment analysis study of alfalfa fertilization responses and economic return in the desert irrigation area of Hexi

WU Yong, LIU Xiao-jing*, LIN Fang, TONG Chang-chun

College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Pratacultural Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-US Center for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China

Abstract: This study quantitatively assessed the effects of various fertilization regimes on the herbage quality and yield of ‘Gannong No. 3’ alfalfa in the main production areas of the Hexi Corridor. In a field experiment conducted in 2016 and 2017, a balanced fertilization regime (N 103.5 kg·ha⁻¹, P₂O₅ 105 kg·ha⁻¹, K₂O 90 kg·ha⁻¹) recommended for alfalfa forage production this area was used as a control and compared with nil fer-

收稿日期: 2019-11-20; 改回日期: 2020-03-03

基金项目: 甘肃省重大科技专项: 草类植物种质创新与品种选育(课题3)(19ZD2NA002-3), 甘肃农业大学科技创新基金(GSAU-XKJS-2018-008)和甘肃省草原技术推广总站项目(XMXZGSNDXY 201802)资助。

作者简介: 吴勇(1994-), 男, 甘肃张掖人, 在读硕士。E-mail: 1196440850@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liuxj@gsau.edu.cn

tilization, or with a suboptimal level of one of the three elements, N, P or K, and economic benefit was analyzed by data envelopment analysis (DEA). It was found that compared with no fertilization, all fertilizer treatments significantly increased alfalfa yield and total protein content, reduced the acid and neutral detergent fiber levels, improved relative feeding value, and increased the economic benefit. Compared with balanced fertilization, yield and quality of alfalfa herbage of treatments receiving the suboptimal fertilizer regimes were significantly lower than those of the balanced fertilization treatment, especially in the case of suboptimal P application. In 2016 and 2017, the total yield decreased by 25.9% and 25.7%, respectively, and the total protein concentration by 33.4%, 33.1%, respectively, relative to balanced fertilization, on the suboptimal P treatment. These results demonstrate that phosphorus is the nutrient limiting factor for alfalfa forage production in the desert irrigation area of Hexi, and that the importance-ranking of the three tested fertilizer elements is $P > N > K$. Analysis of the results using DEA showed that balanced fertilization gave the highest economic return (10679 CNY · ha⁻¹), while the nil fertilization treatment gave the lowest, and the treatments with suboptimal N, P or K were intermediate and ranked: Partial phosphorus deficiency < partial nitrogen deficiency < partial potassium deficiency.

Key words: Hexi desert irrigation area; alfalfa; fertilization effect; data envelopment analysis; economic benefit

施肥是作物获得高产的主要措施之一^[1-3],根据李比希“养分归还学说”^[4],及时有效的矿质元素补充是提高土壤养分含量和作物获得高产的必要条件^[5-6],补充土壤矿质元素、改善土壤养分状况最有效的措施就是施肥^[7]。近年来,大量的研究^[8-9]均已明确,施肥对于提高作物产量尤其例如小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)等禾谷类作物具有巨大的贡献,大豆(*Glycine max*)等豆科作物虽能与根瘤菌结合进行生物固氮,但是其生物固氮量仍无法满足豆科作物正常生长所需氮量^[10],因此施肥是使豆科作物获得高产的必要条件^[11]。紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是一种多年生豆科牧草,由于其独特的氮利用方式,使其体内蛋白含量很高,是一种优质的植物性蛋白饲料。当前,紫花苜蓿在解决我国高蛋白饲草料供应不足问题中发挥着不可替代的作用,特别是在我国奶业对蛋白类饲草料需求日益增加的形势之下^[12],而目前我国紫花苜蓿生产管理水平和苜蓿生产效率相对较低,还不能满足对优质蛋白牧草的需求,因此提高紫花苜蓿饲草高效优质生产是现阶段我国草牧业发展的主要任务。河西走廊是我国西北地区紫花苜蓿优势主产区之一,也是我国草食畜牧业主产区,国家“粮改饲”政策的推动下使得该地区紫花苜蓿有了更大的发展空间。目前该地区许多用于种植紫花苜蓿的土地为农业生产边缘化土地或为粮改饲时低产地,而种植紫花苜蓿以营养体收获为生产目标,每年多茬刈割会带走大量的土壤养分,造成土壤养分的不断流失和匮乏,此外,由于管理不足,氮、磷、钾施用不平衡,进而存在土壤营养元素丰缺不平衡等问题,无法满足苜蓿高产所需,导致紫花苜蓿生产力不断下降^[13]。综上,土壤养分条件已成为限制该地区紫花苜蓿产业发展的主要因素,因此,科学合理的施肥措施不仅可以提高紫花苜蓿产量及品质,还可以有效提高紫花苜蓿的经济效益^[14],是河西荒漠灌区紫花苜蓿高效生产的必要保障^[15]。

数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法是一种使用数学规划模型,以相对效率概念为基础,根据多指标投入和多指标产出,对同类型的部门或单位进行相对有效性或效益评价的经济效益评价方法。因该方法可靠性高、分析全面、客观,在诸多领域得到广泛的应用^[16-18]。目前在农业领域的应用日渐普遍^[19],并取得很好的效果:贾筱文等^[20]运用基于非参数包络分析法的 Malmquist 生产率指数,研究了我国苹果主产区苹果生产效率影响因素;杨肖等^[21]、胡贺年等^[22]在采用数据包络分析法分别对张掖市制种玉米产业中农户生产效率差异进行了评价测算;还在此基础上,杨肖等^[21]针对冗余投入要素改进模拟后,提出了主要针对贡献率高的生产要素优化的建议。数据包络分析作为一种在经济领域适用的科学方法,应用于草牧业生产实践具有重要的现实意义。因此,为了更加科学、准确的说明施肥对紫花苜蓿生产性能及经济效益的影响,本研究拟通过开展紫花苜蓿施肥效果研究,并运用数据包络法对不同施肥措施下紫花苜蓿经济效益进行对比研究,探究不同施肥措施下紫花苜蓿的产量、品质及经济效益的差异,以期为河西地区紫花苜蓿高效优质生产的养管理及草牧业生产实践中经济效

益的科学评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试品种

“甘农3号”(M. sativa cv. Gannong No. 3)由甘肃农业大学草业学院提供。供试肥料:氮肥为国产尿素(含N \geq 46%);磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ \geq 12%);钾肥为硫酸钾(含K₂O \geq 52%)。

1.2 试验地基本概况

试验区位于永昌县新城子镇,东经101°56',北纬38°16',海拔1900 m左右,属于温带大陆干旱性气候区,具有日照充足,降水量少,且蒸发量大,昼夜温差大等特点。年日照时数为2884 h。年平均降水量为185.1 mm,且年内分布不均,主要集中于6—9月,年蒸发量为2000.6 mm,年平均气温4.8℃, \geq 10℃年积温2011℃,无霜期134 d,空气干燥度大,土壤类型为灌漠土。土壤具体理化性质如表1。

表1 土壤基础理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	有机质 Soil organic matter (mg·kg ⁻¹)	pH
0.88	0.89	15.2	40.8	30	91.4	1.08	8.5

1.3 试验设计

本试验采用大田试验,设5个施肥处理:氮磷钾全施、不施氮处理、不施磷处理、不施钾处理和不施肥处理,分别记为:NPK、N₀PK、NP₀K、NPK₀和N₀P₀K₀,其中,NPK为本课题组前期研究中根据当地土壤养分条件推荐的该地区紫花苜蓿饲草生产的平衡施肥方案(N 103.5 kg·hm⁻²、P₂O₅ 105 kg·hm⁻²、K₂O 90 kg·hm⁻²);N₀PK氮肥施量为0,磷、钾施量采用平衡施肥方案的磷钾施量;NP₀K磷肥施量为0,氮、钾施量采用平衡施肥方案的氮钾施量;NPK₀钾肥施量为0,氮、磷施量采用平衡施肥方案的氮磷施量;N₀P₀K₀为氮、磷、钾肥均不施(具体施肥方案见表2)。每处理重复3次,共计15个小区,试验小区完全随机排列,小区面积:8 m×8 m=64 m²,种植总面积960 m²。2015年8月播种,播量15 kg·km⁻²,条播,行距20 cm。磷钾肥于返青前一次性施入,氮肥平均分成3次施入,分别为返青期及前两次刈割后,施肥后充分灌溉。于第2(2016年)和3年(2017年)进行刈割,每年刈割3茬,初花期(10%开花)刈割。各小区除施肥不一样外,其余田间管理均相同。

表2 各施肥处理施肥方案

Table 2 Fertilization schemes for each fertilization treatment

处理 Treatment	施肥量 Fertilizing amount (kg·hm ⁻²)			小区施肥量 Fertilizing of plot (g·plot ⁻¹)		
	磷肥 P ₂ O ₅	钾肥 K ₂ O	氮肥 N	过磷酸钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	硫酸钾 K ₂ SO ₄	尿素 CO(NH ₂) ₂
N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0	0	0	0
NP ₀ K	0	90	103.5	0	1107.7	1440
NPK ₀	105	0	103.5	5600	0	1440
N ₀ PK	105	90	0	5600	1107.7	0
NPK	105	90	103.5	5600	1107.7	1440

1.4 测定指标及方法

1.4.1 草产量 整个试验小区全部刈割,留茬5 cm,在田间称其鲜重。每个小区随机称取100 g左右的小样

本,放在阴凉处风干处理,计算其初水量,再折合小区产量,产量取平均值后换算成 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.4.2 株高 采用定株测量法,测量其自然高度,然后求其均值。

1.4.3 分枝数 参照王彦华等^[23]的方法,每小区随机选择 10 株,在初花期刈割前测定 1 级和 2 级分枝数。

1.4.4 群体叶面积指数 用叶面积仪(CI-202 型,美国 CID 公司)测量单株叶面积,计算群体叶面积指数。计算公式如下:群体叶面积指数=单株叶面积×植株密度。

1.4.5 营养指标 酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)及中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)采用范氏洗涤法测定;粗蛋白含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消煮法,半微量凯氏定氮法测定^[24];蛋白总量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)=刈割干草产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)×粗蛋白(crude protein, CP)含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)/1000;相对饲用价值^[25](relative feed value, RFV)=DMI(%BW)×DDM(%DM)/1.29, DMI(dry matter intake)与 DDM(digestible dry matter)分别为:干物质采食量(DMI, %BW)=120/NDF(%DM);可消化的干物质(DDM, %DM)=88.9-0.779 ADF(%DM)。

1.4.6 数据包络分析方法(DEA) 1)评价单元及指标选择:数据包络分析模型是通过各评价单元之间产出/投入比来反映评价单元的经济效益,本研究各施肥处理土壤原始肥力、田间管理条件等视为同等水平。因此研究对象为不同施肥措施单位面积紫花苜蓿投入与产出量,故以 5 种施肥措施为数据包络分析中的评价单元,以生产资料成本、人工成本和单价作为投入指标,以产值和经济效益为产出指标,其中,生产资料成本=肥料成本+种子成本+地租+水电费;人工成本=田间日常管理+刈割+调制干草;产值=干草产量×牧草单价,牧草单价依据当时市场价格确定;经济效益=产值-生产资料成本-人工成本。

2)模型的选择:数据包络分析的基本模型包括 C^2R 和 C^2GS ,本研究选用 C^2R 模型^[25],主要因为 C^2GS 模型只能评价技术有效性,而 C^2R 模型是同时针对规模有效性与技术有效性而言的“总体”有效性;

$$\begin{aligned} \min \theta - \epsilon \sum (s^- + s^+) \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s^-_i = \theta x_{ik} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s^+_r = y_{rk} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad \lambda \geq 0; s^- \geq 0; s^+ \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, m; r=1, 2, \dots, q; j=1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

式中:s. t. 表示公式受条件约束; ϵ 为一个常量,表示非阿基米德无穷小, x_{ij} 为第 j 个决策单元对第 i 种输入的投入量, $x_{ij} > 0$; x_{ik} 为第 k 个决策单元对第 i 种输入的投入量, $x_{ik} > 0$; y_{rk} 为第 k 个决策单元对第 r 种输出的产出量, $y_{rk} > 0$; y_{rj} 为第 j 个决策单元对第 r 种输出的产出量, $y_{rj} > 0$; λ 表示投入和产出的权系数矩阵; s^+ , s^- 分别表示投入和产出的松弛变量和剩余变量。

本研究以 5 种不同施肥措施为评价单元,将表 6 中评价指标导入 MaxDEA Basic 8.0.1 软件得出评价单元模型函数的最优解 θ (效率值)、松弛变量(s^+)、剩余变量(s^-)和 λ (评价单元的权重系数)并以此来判定评价单元的技术有效性、规模有效性和规模收益情况。其中技术有效性是反映生产效率水平达到最优时投入要素的浪费情况,规模有效性是指在最优生产效率水平下所能获得的最大产出情况,规模收益情况主要用来描述生产规模的变化与所引起的产量变化之间的关系,大体分为递增、不变、递减 3 种状态。

技术有效性和规模有效性的判定标准 依据所求的 C^2R 模型最优解 θ (效率值)、松弛变量(s^+)和剩余变量(s^-)的值来判定经济活动的技术和规模有效性:若 $\theta^* = 1$,且 $s^+ = 0, s^- = 0$,则评价单元 j_0 为数据包络分析有效,其经济活动同时为技术有效和规模有效;若 $\theta^* = 1$,但 s^+, s^- 二者中至少有一个大于 0,则评价单元 j_0 为数据包络分析弱有效,需要进行松弛改进才能使其经济活动技术和规模有效性同时有效;若 $\theta^* < 1$,则评价单元 j_0 为数据包络分析无效,需要同时进行比例改进和松弛改进才能使其经济活动的技术和规模有效性同时有效。

规模收益情况的判定标准 依据 C^2R 模型中 λ_j (第 j 个决策单元的权重系数)来判定决策单元的规模收益情况:如果存在 $\lambda_j (j=1, 2, 3, \dots, n)$ 使得 $\sum \lambda_j = 1$,则决策单元规模收益不变,表示继续增加投入,其经济效益不变;

若使得 $\sum \lambda_j < 1$, 则决策单元规模收益递增, 表示继续增加投入, 则其经济效益增加; 若使得 $\sum \lambda_j > 1$, 则决策单元规模收益递减, 表示继续增加投入, 经济效益递减。其中, $\sum \lambda_j$ 为参考最优评价单元的权重系数之和。

调整方法: 决策单元为数据包络分析无效时, 目标值 = 原始值 + 比例改进值 + 松弛改进值, 其中目标值表示在最优生产效率下投入指标最优值, 比例改进值表示各项投入(或产出)等比例改进的数量; 松弛改进值表示投入不变情况下产出的提升空间。

1.5 数据统计与分析

本研究采用 Excel 2010 软件进行数据整理, 应用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析, 应用 MaxDEA Basic 8.0.1 软件进行经济效益的数据包络分析。

2 结果与分析

2.1 施肥对紫花苜蓿产量的影响

2016、2017 年各处理下紫花苜蓿总产量均显著低于对照(NPK)($P < 0.05$), 其中 2 年均均为不施肥($N_0P_0K_0$)处理总产量最低, 分别为 13289.81 和 16014.75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 其次是 NP_0K 处理, 与 NPK_0 、 N_0PK 处理之间差异显著($P < 0.05$)(表 3)。

表 3 施肥对紫花苜蓿产量的影响

Table 3 Effect of fertilization on alfalfa yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	2016				2017			
	第 1 茬 First cutting	第 2 茬 Second cutting	第 3 茬 Third cutting	总产量 Total yield	第 1 茬 First cutting	第 2 茬 Second cutting	第 3 茬 Third cutting	总产量 Total yield
$N_0P_0K_0$	7501.47e	3781.78e	2006.55e	13289.81e	8686.07e	4403.01d	2925.67d	16014.75e
NP_0K	7958.50d	4517.00d	2403.05d	14878.55d	9533.38d	4863.43c	3213.54c	17610.35d
NPK_0	9714.75b	6466.65b	2986.03b	19167.43b	11536.93b	6724.42a	3777.04a	22038.39b
NPK	10110.46a	6757.18a	3223.92a	20091.56a	12889.45a	6957.79a	3868.35a	23715.59a
N_0PK	8967.99c	5321.19c	2704.30c	16993.48c	10182.93c	5466.21b	3536.82b	19185.96c

注: 同列不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著, 下同。

Note: Different letters in same column mean significant at 5% level, the same below.

2.2 施肥对紫花苜蓿株高、分枝数和群体叶面积指数的影响

紫花苜蓿 2 年各茬株高、枝条数和叶面积指数均表现为 NPK 处理最高。 $N_0P_0K_0$ 处理最低, 且 $N_0P_0K_0$ 处理株高和分枝数与其他处理相比均存在差异显著($P < 0.05$), 各处理年间各指标均表现出相同的趋势(表 4)。

2.3 施肥对紫花苜蓿粗蛋白含量及蛋白总量的影响

相对 $N_0P_0K_0$ 处理, 4 种施肥处理紫花苜蓿的粗蛋白含量均显著提高($P < 0.05$), 其中, NPK 处理提高幅度最大(图 1)。 $N_0P_0K_0$ 、 NPK_0 、 N_0PK 、 NP_0K 4 个处理的紫花苜蓿蛋白总量均显著低于 NPK($P < 0.05$), 其中 $N_0P_0K_0$ 处理紫花苜蓿蛋白总量最低, 且各处理之间差异显著($P < 0.05$)(图 2)。从总体来看, 苜蓿蛋白总量 2 年均表现为 NPK 处理最高, 且各处理蛋白总量依次为: $NPK > NPK_0 > N_0PK > NP_0K > N_0P_0K_0$ 。

2.4 施肥对紫花苜蓿酸性洗涤纤维(ADF)、中性洗涤纤维(NDF)和相对饲用价值(RFV)的影响

紫花苜蓿 ADF 和 NDF 含量表现为 $N_0P_0K_0$ 处理最高, 且显著高于其他处理($P < 0.05$)(表 5)。 NPK 处理的 ADF 和 NDF 含量最低, 与 N_0PK 、 NP_0K 处理差异显著($P < 0.05$)。紫花苜蓿 RFV 表现为 $N_0P_0K_0$ 处理最低, NPK 处理最高, 且两者差异显著($P < 0.05$)。 NPK_0 处理 RFV 仅次于 NPK 处理, 显著高于 N_0PK 和 NP_0K 处理($P < 0.05$)。以上各指标 2 年均表现出相同的趋势。

表 4 施肥对紫花苜蓿株高、分枝数和叶面积指数的影响

Table 4 Effect of fertilization on plant height, branch number and leaf area index of alfalfa

年份 Year	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)			分枝数 Number of branches (No.)			群体叶面积指数 Leaf area index		
		第 1 茬	第 2 茬	第 3 茬	第 1 茬	第 2 茬	第 3 茬	第 1 茬	第 2 茬	第 3 茬
		First cutting	Second cutting	Third cutting	First cutting	Second cutting	Third cutting	First cutting	Second cutting	Third cutting
2016	N ₀ P ₀ K ₀	74.55c	77.55d	63.00d	11.00c	13.00d	11.67d	3.01c	1.87b	2.31d
	NP ₀ K	83.55b	82.44c	69.44c	15.00b	15.00c	14.33c	3.62b	2.59b	2.95c
	NPK ₀	89.11ab	86.11ab	74.88b	18.67a	19.33ab	18.00ab	4.08ab	2.71a	3.41b
	NPK	91.28a	88.61a	80.05a	19.33a	22.00a	20.33a	4.23a	3.20a	3.92a
	N ₀ PK	86.11ab	83.33bc	69.55c	17.00ab	18.33b	16.33bc	3.96ab	2.68a	3.21bc
2017	N ₀ P ₀ K ₀	78.89c	78.55d	63.00c	15.33c	13.00c	13.33c	3.71c	2.76b	2.17c
	NP ₀ K	86.55b	85.44c	71.44b	17.00b	17.00b	16.33b	4.22bc	3.18ab	2.56bc
	NPK ₀	92.11ab	89.11ab	77.55ab	19.67ab	19.33b	19.00ab	4.68ab	3.71ab	2.91ab
	NPK	92.78a	91.11a	81.22a	21.33a	23.00a	21.33a	4.83a	4.22a	3.16ab
	N ₀ PK	89.11ab	86.33bc	72.55b	18.00b	18.33b	17.33b	4.56ab	3.21ab	2.88bc

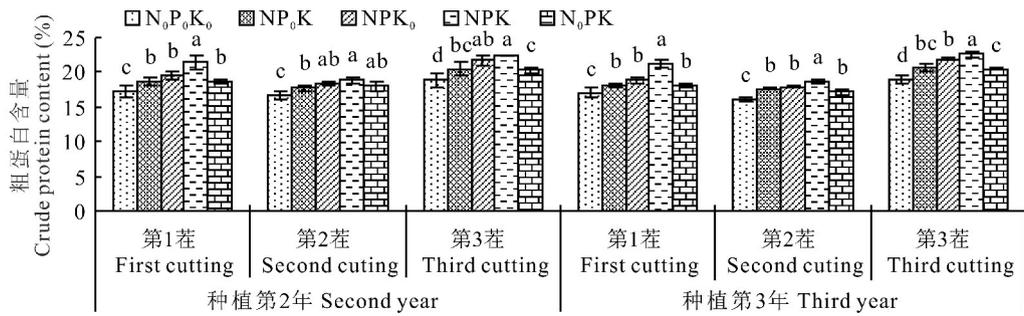


图 1 施肥对苜蓿粗蛋白含量的影响

Fig. 1 Effect of fertilization on the CP content of alfalfa

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters mean significant differences at the 0.05 level. The same below.

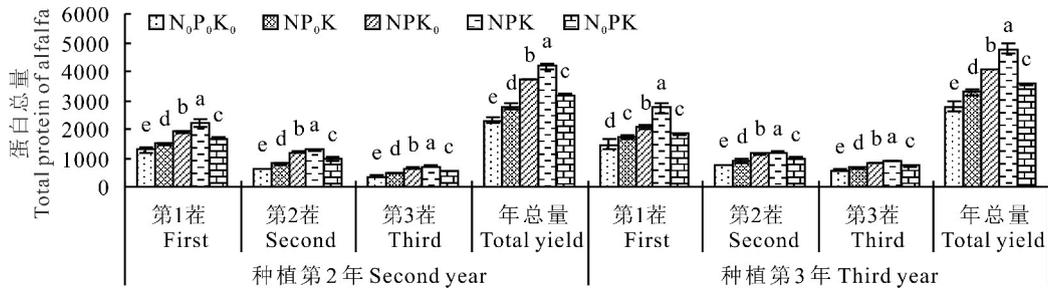


图 2 施肥对苜蓿蛋白总量的影响

Fig. 2 Effect of fertilization on total protein of alfalfa

2.5 紫花苜蓿经济效益评价

将紫花苜蓿各施肥处理 C²R 模型的投入产出指标(表 6) 导入 MaxDEA Basic 8.0.1 软件, 得到其参数求解结果(表 7)。

不同施肥处理的紫花苜蓿经济效益各不相同, 其中 NPK 处理的紫花苜蓿 $\theta = 1$, $\sum \lambda_j = 1$, 且 $s^+ = 0, s^- = 0$, 均为 0, 为 DEA 有效, 表明在该处理下紫花苜蓿目前的投入指标之间的综合效益达到了最优, 同时规模效益也最佳(表 7)。NPK₀、N₀KP、NP₀K 及 N₀P₀K₀ 等 4 个评价单元的 $\theta < 1$, 为非 DEA 有效, 表明上述处理紫花苜蓿投

入配置没有达到最优,规模效益也没有达到最佳,可以通过增加投入或者调整投入配置来提高技术效益和改善规模效益。没有 $\sum \lambda_j > 1$ 的情况,说明对于 DEA 有效的处理而言,不存在投入冗余的情况。对于非 DEA 有效的 NPK_0 、 NP_0K 、 N_0PK 及 $N_0P_0K_0$ 4 个处理, $\sum \lambda_j < 1$,说明这些处理处于规模效益递增阶段,即可以通过增加投入使规模收益也相应地增加。且 $\sum \lambda_j$ 值越小,增加投入使规模收益递增的潜力越大。 $N_0P_0K_0$ 处理的 $\sum \lambda_j$ 值最小,仅为 0.53,说明增加投入而使其规模效益增加的潜力最大,其次依次为 NP_0K 、 N_0PK 、 NPK_0 接近于 1 为 0.88,但该处理也可通过增加投入而使其规模效益增大。

表 5 施肥对紫花苜蓿酸性洗涤纤维、中性洗涤纤维和相对饲用价值的影响

Table 5 Effects of fertilization on acid detergent fiber, neutral detergent fiber and relative feed value of alfalfa

年份 Year	处理 Treatment	第 1 茬 First cutting			第 2 茬 Second cutting			第 3 茬 Third cutting		
		酸性洗涤纤维 ADF (%)	中性洗涤纤维 NDF (%)	相对饲用 价值 RFV	酸性洗涤纤维 ADF (%)	中性洗涤纤维 NDF (%)	相对饲用 价值 RFV	酸性洗涤纤维 ADF (%)	中性洗涤纤维 NDF (%)	相对饲用 价值 RFV
2016	$N_0P_0K_0$	42.89a	48.83a	105.73d	43.31a	50.93a	100.83d	42.57a	52.64a	98.50d
	NP_0K	35.67b	42.36b	134.60c	36.19b	45.74b	123.93c	37.23b	46.50b	123.77bc
	NPK_0	32.02c	38.47c	154.63b	31.92c	41.67c	142.97b	34.35c	44.00c	131.37b
	NPK	30.71c	35.76c	169.07a	30.61c	38.37c	157.87a	29.77d	39.73d	153.97a
	N_0PK	36.45b	42.15b	133.73c	35.95b	46.96b	120.73c	37.92b	47.70b	115.93c
2017	$N_0P_0K_0$	42.56a	52.83a	98.16d	42.98a	51.93a	99.27d	41.57a	51.64a	101.81d
	NP_0K	35.87b	46.36b	122.31c	35.48b	46.74b	121.92c	34.23c	46.83b	123.80c
	NPK_0	32.53c	42.47c	139.22b	31.40c	42.67c	140.48b	31.35c	43.00c	139.49b
	NPK	29.71d	39.76c	153.84a	29.71c	39.37c	155.37a	28.17d	38.73d	155.76a
	N_0PK	36.25b	46.15b	122.27c	36.75b	47.96b	116.90c	34.92b	46.70b	122.90c

表 6 紫花苜蓿经济效益投入产出指标

Table 6 Economic benefit input-output index of alfalfa

处理 Treatment	投入指标 Input index							产出指标 Output index		
	生产资料成本 Production cost (CNY · hm ⁻²)				人工成本 Labor cost (CNY · hm ⁻²)			干草价格 Hay price (CNY · t ⁻¹)	产值 Output value (CNY · hm ⁻²)	经济效益 Economy benefit (CNY · hm ⁻²)
	籽种 Seed	地租 Land rent	水电费 Water and electricity	肥料成本 Fertilize cost	田间管理 Field management	刈割 Cutting	调制干草 Hay- making			
$N_0P_0K_0$	550	15000	1200	0	3800	2600	2000	根据当时市场价格	51282.99	25582.99
NP_0K	550	15000	1200	1938	3000	2800	2000	确定 Determined	61728.90	35240.90
NPK_0	550	15000	1200	2300	2600	3000	2000	according to the	84471.92	57821.92
NPK	550	15000	1200	3338	2600	3600	2000	market price at	96375.74	68087.74
N_0PK	550	15000	1200	2438	3000	2800	2000	that time	68740.93	41752.93

注:肥料成本=氮肥成本+磷肥成本+钾肥成本;肥料单价分别为尿素:2 CNY · kg⁻¹,过磷酸钙:0.8 CNY · kg⁻¹,硫酸钾:3.0 CNY · kg⁻¹;人工成本=施肥用工成本+养护管理+刈割成本;经济效益=苜蓿产值-肥料成本-人工成本。

Note: Fertilizer cost=nitrogen fertilizer cost+phosphate fertilizer cost+potash fertilizer cost; Fertilizer unit price is urea: 2 CNY · kg⁻¹, superphosphate: 0.8 CNY · kg⁻¹, potassium sulfate: 3.0 CNY · kg⁻¹; Labor cost=fertilization labor cost+maintenance management+cutting cost; Economic benefit=alfalfa output value-fertilizer cost-labor cost.

2.6 紫花苜蓿经济效益调整方案

对于 DEA 有效的 NPK 处理来说,其所有调整值均为 0,即其投入产出达到最优状态(表 8),而对于非 DEA

有效的 NPK_0 、 NP_0K 、 NP_0K 及 $N_0P_0K_0$ 4 个处理,根据调整方案:目标值 = 原始值 + 比例改进值 + 松弛改进值,使对偶目标函数 $\theta = 1$,松弛变量和剩余变量同时为 0,成为 DEA 有效,其中,投入改进值用负数表示,产出的改进值用正数表示。 $N_0P_0K_0$ 处理的生产资料成本,人工成本、单价等评价单元改进调整幅度均为最大,其中生产资料成本比例改进值为 $5545.84 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次依次为 NP_0K 、 N_0PK , NPK_0 为投入指标的改动幅度最小,并且各投入指标生产资料成本的调整幅度在各处理中均为最大(表 8)。

表 7 基于投入产出的 C^2R 模型的求解结果

Table 7 Solution results of C^2R model based on input-output

处理 Treatment	θ	$\sum \lambda_j$	s^-	s^-	s^-	s^+	s^+
$N_0P_0K_0$	0.67	0.53	517.03	1255.79	0	0	10099.52
NP_0K	0.74	0.64	993.25	532.62	0	0	8369.46
NPK_0	0.95	0.88	408.39	0	10.38	0	1855.98
NPK	1.00	1.00	0	0	0	0	0
N_0PK	0.83	0.71	1519.01	593.13	0	0	6811.31

注: θ 为目标函数; $\sum \lambda_j$ 表示参考最优评价单元的权重系数之和; s^+ 为松弛变量; s^- 为剩余变量。

Note: θ is the objective function; $\sum \lambda_j$ represents the sum of the weight coefficients of the reference optimal evaluation unit; s^+ is the relaxation variable; s^- is the residual variable.

表 8 基于投入产出的 DEA 模型调整建议

Table 8 Suggestions for adjustment of DEA model based on input and output

处理 Treatment	生产资料成本 Production cost ($\text{CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$)			人工成本 Labor cost ($\text{CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$)			干草价格 Hay price ($\text{CNY} \cdot \text{t}^{-1}$)		
	比例改进值 Proportionate movement	松弛改进值 Slack movement	目标值 Projection	比例改进值 Proportionate movement	松弛改进值 Slack movement	目标值 Projection	比例改进值 Proportionate movement	松弛改进值 Slack movement	目标值 Projection
$N_0P_0K_0$	5545.84	517.03	10689.13	2780.86	1255.80	4363.34	579.35	0	1170.65
NP_0K	4828.33	993.25	12866.41	2015.25	532.63	5252.12	490.89	0	1409.11
NPK_0	1034.76	408.40	17606.84	412.82	0	7187.18	111.35	10.38	1928.27
NPK	0	0	20088.00	0	0	8200.00	0	0	2200.00
N_0PK	3341.02	1519.02	14327.96	1358.14	593.13	5848.72	330.83	0	1569.17

3 讨论

土壤养分条件是作物生产的重要限制因子之一,施肥是改善土壤养分条件的有效措施,因此在作物生产中通过施肥可达到作物增产的目标^[27]。对于紫花苜蓿等豆科作物来说,虽然可以进行生物固氮,但若在生产过程中获得高产,氮肥施用则十分必要,这在本课题组前期研究中已得到证实^[28]。本研究试验区域中,与平衡施肥($N 103.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $P_2O_5 105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $K_2O 90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)相比,不施肥处理下紫花苜蓿的干草产量在种植第 2 和 3 年分别降低 33.9% 和 39.6%,与产量密切相关的株高、分枝数和叶面积指数也具有相同趋势。这是因为河西地区大多数种植苜蓿的土壤养分含量相对较低,无法满足紫花苜蓿高产养分需求,而平衡施肥可全面增加土壤养分,提高根系性能^[29],增强根系吸收养分的能力^[30],加快紫花苜蓿的再生速度^[31],进而提高紫花苜蓿的株高及分枝数,使紫花苜蓿获得高产^[32]。另外,本研究结果显示,无施肥措施时($N_0P_0K_0$)紫花苜蓿各年份的蛋白总量和相对饲用价值均最低,但酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量高于 NPK 处理,因此,施肥可提高紫花苜蓿的粗蛋白含量,降低酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量,有效提高相对饲用价值等营养品质。

本研究中,紫花苜蓿不施氮(N_0PK)、不施磷(NP_0K)和不施钾(NPK_0)3 个处理均表现为产量、蛋白总量和相

对饲用价值显著低于平衡施肥(NPK)处理,尤以不施磷处理的差异最大,2016、2017年干草产量降幅分别达到25.9%和25.7%,蛋白总量降幅分别达到33.4%和33.1%;其次是不施氮处理,干草产量和蛋白总量分别降低了15.4%、19.1%和24%、25.6%;不施钾处理的产量、蛋白总量的降低幅度最小,分别降低了4.6%、7.0%和10.6%、14.7%。说明在本试验中限制紫花苜蓿饲草生产的最小养分因子为磷素,这是因为作为豆科牧草的紫花苜蓿可通过生物固氮为紫花苜蓿生长发育提供部分氮素,因此,在河西地区土壤养分含量相对较低的紫花苜蓿种植区,相对农业生产中需求量较大的氮素来说,磷素则成了限制紫花苜蓿饲草生产的最小养分因子,这很好地解释了紫花苜蓿生产实践中一个普遍现象,即相比氮肥,紫花苜蓿施磷的增产效果更为显著。可见,3种营养元素对紫花苜蓿产量和品质影响顺序为:磷>氮>钾。从本研究看,各偏肥处理下紫花苜蓿无论是产量还是品质均显著低于平衡施肥,已有研究证实,氮磷钾配施可显著提高养分利用效率^[33],王寅等^[34]、王乐政等^[35]对作物氮磷钾养分需求与利用效率的研究中发现,相比氮磷钾完全施肥,减施氮、磷和钾均造成玉米、红小豆(*Vigna angularis*)产量不同程度的下降。由此可见,在紫花苜蓿饲草生产过程中其产量规律符合“最小养分律”,当氮、磷、钾任何一种养分含量相对缺乏时都会影响其产量,只有营养元素合理配施才能保证紫花苜蓿高效优质生产。

除了以紫花苜蓿的产量及品质来反映施肥效应之外,经济效益更能直观地反映紫花苜蓿饲草生产中的施肥效应。目前在农业领域用于评价生产效率等经济效益的首选方法是数据包络分析法(DEA),该方法主要通过决策单元(评价的项目或指标)的投入与产出数据,计算出总体效率最优的前沿面并利用每个决策单元与最优前沿面的距离来评价其效率是否处在最优状态。该分析方法的优点为无须对数据进行无量纲化处理及权重假设,可有效地避免模型设定时的偏误以及对残差分布进行解释等问题^[21],具有很强的客观性和实用性,现已在生态、能源、医疗和农业等众多领域效益评价分析中得到有效的运用^[36-39]。目前国内运用数据包络分析方法对农业效率的评价大致集中在以下3个方面:基于数据包络分析法和其他方法相结合从静态和动态角度分析区域农业生产效益^[40];基于数据包络分析方法的测算结果结合计量模型对某些要素投入和效率改进做出评估^[41];以及从最为微观的角度出发,分析具体生产单元的农业生态效益^[21]。数据包络分析方法应用于草牧业生产实践,不仅可从企业角度分析紫花苜蓿饲草生产中的经济效益,还可对紫花苜蓿饲草产业的具体生产过程进行针对性指导。在本研究中,氮磷钾合理配施下紫花苜蓿经济效益为DEA有效,表明在该处理下紫花苜蓿目前的投入指标之间的综合效益达到了最优,同时规模效益也最佳;不施氮、不施磷、不施钾以及完全不施肥4个评价单元为DEA无效,这说明上述处理紫花苜蓿投入配置没有达到最优水平,规模效益也没有达到最佳,因此,在实际生产中需通过增加投入或者调整投入配置来提高技术效益和改善规模效益。其具体的改进方案如下:完全不施肥的调整幅度最大,达到 $10678.88 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中,生产资料成本改进值最大,达到 $6062.87 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。可以看出,相比氮磷钾合理配施,完全不施肥的紫花苜蓿经济效益最低,生产收益最少。这主要是因为在本研究中生产资料成本是由肥料成本、地租、水电费及种子构成,除肥料成本以外处理间其他成本相同。虽然氮磷钾合理配施增加了肥料成本,但是肥料效应所带来的产值增加远大于肥料成本的增加量,而紫花苜蓿若不施肥则生产能力下降,且抵抗外界不利条件的能力下降,田间管理成本反而增加,所以经济效益才会更低,可见合理的氮磷钾配施可以通过提质增效以确保经济效益最大化。另外,不完全施肥各处理的调整幅度依次为不施磷($4828.3 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$)>不施氮($3341.02 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$)>不施钾($1034.7 \text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$),因此缺磷偏肥的紫花苜蓿经济效益相对缺氮偏肥和缺钾偏肥更低,说明磷素对紫花苜蓿经济效益影响大于氮素和钾素,这跟紫花苜蓿产量和品质对施肥响应的趋势一致,由此可见,从经济效益角度也印证了施肥对河西荒漠灌区紫花苜蓿饲草生产的重要性。

4 结论

与不施肥相比,施肥措施各处理均显著提高紫花苜蓿产量、蛋白总量,降低紫花苜蓿酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维,提高相对饲用价值,从而改善紫花苜蓿品质,并有效增加经济效益。

与氮磷钾平衡施肥相比,各偏肥处理的紫花苜蓿产量和品质均显著低于平衡施肥,磷是河西荒漠灌区紫花苜蓿饲草生产的养分限制因子,氮、磷、钾对该地区紫花苜蓿生产性能的影响顺序为:磷>氮>钾。

运用数据包络分析法(DEA)分析出河西荒漠灌区紫花苜蓿的施肥效应为氮磷钾平衡施肥的经济效益最优,

不施肥经济效益最低,3 个不完全施肥评价单元中的缺磷偏肥的紫花苜蓿经济效益比缺氮偏肥和缺钾偏肥更低;另依据 DEA 模型推算出的紫花苜蓿饲草生产经济效益改进的方案可知,不施肥的紫花苜蓿饲草生产需调整的幅度最大,各施肥措施需调整的幅度排序为:不施肥>缺磷偏施>缺氮偏施>缺钾偏施。

参考文献 References:

- [1] Shi J B, Lei Z C. Effects of fertilization on yield and fertilization use efficiency of winter wheat in arid zone in Loess Plateau of Eastern Gansu Province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(2): 147–151, 186.
史聚宝, 雷宗昌. 陇东旱塬区小麦配方施肥效应研究. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(2): 147–151, 186.
- [2] Chen M, Ma T T, Ding Y P, *et al.* Effects of formula fertilizer application on nutrient uptake and grain yield of rice. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(1): 237–246.
陈敏, 马婷婷, 丁艳萍, 等. 配方施肥对水稻养分吸收动态及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 237–246.
- [3] Huang Y, Duo T Q, Yu Y, *et al.* Effect of fertilizer on the yield and forage quality of *Glycine max*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(4): 211–217.
黄岩, 多田琦, 遇瑶, 等. 施肥对提高秣食豆产量和饲用品质的影响. *草业学报*, 2017, 26(4): 211–217.
- [4] Lu J L. *Plant nutriology*. Beijing: China Agriculture Press, 2003.
陆景陵. *植物营养学*. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [5] Yang H S, Zhang Y Q, Xu S J, *et al.* Characteristics of dry matter and nutrient accumulation and translocation of super-high-yield spring maize. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(2): 315–323.
杨恒山, 张玉芹, 徐寿军, 等. 超高产春玉米干物质及养分积累与转运特征. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 315–323.
- [6] Zhang J J, Fan T L, Zhao G, *et al.* Effects of tillage system and long term fertilizer application on winter wheat yields. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(7): 175–186.
张建军, 樊廷录, 赵刚, 等. 耕作方式与长期定位施肥对雨养农田冬小麦产量的调控效应. *草业学报*, 2018, 27(7): 175–186.
- [7] Gong W, Yan X Y, Wang J Y. Effect of long-term fertilization on soil fertility. *Soils*, 2011, 43(3): 336–342.
龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响. *土壤*, 2011, 43(3): 336–342.
- [8] Wang J B, Xie J H, Li L L, *et al.* Effects of nitrogen management on photosynthetic characteristics and yield of maize in arid areas of central Gansu, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(1): 60–69.
王进斌, 谢军红, 李玲玲, 等. 氮肥运筹对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响. *草业学报*, 2019, 28(1): 60–69.
- [9] Zhang L J, Lu Q L, Bai B, *et al.* Effect of different combinations of fertilizer and plastic film mulch on grain quality and yield of winter wheat in dryland areas of the Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(4): 70–80.
张礼军, 鲁清林, 白斌, 等. 施肥和地膜覆盖对黄土高原旱地冬小麦籽粒品质和产量的影响. *草业学报*, 2019, 28(4): 70–80.
- [10] Dong S K, Gong Z P, Zu W. Effects of nitrogen nutrition levels on N-accumulation and yields of soybean. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(1): 65–70.
董守坤, 龚振平, 祖伟. 氮素营养水平对大豆氮素积累及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 65–70.
- [11] Boroomandan P, Khoramivafa M, Haghi Y, *et al.* The effects of nitrogen starter fertilizer and plant density on yield, yield components and oil and protein content of soybean (*Glycine max* L. Merr). *Pakistan Journal of Bbiological Sciences*, 2009, 12(4): 378–382.
- [12] Sun Q Z, Yu Z, Ma C H, *et al.* Achievements of the alfalfa industry in last decade and priorities in next decade in China. *Pratacultural Science*, 2013, 30(3): 471–477.
孙启忠, 玉柱, 马春晖, 等. 我国苜蓿产业过去 10 年发展成就与未来 10 年发展重点. *草业科学*, 2013, 30(3): 471–477.
- [13] Russelle M P, Sheaffer C C. Use of the diagnosis and recommendation integrated system with alfalfa 1. *Agronomy Journal*, 1986, 78(3): 557–560.
- [14] Yu T F, Liu X J, Wu Y, *et al.* Fertilization effect of alfalfa high yield field and its recommended fertilizer application in northwest drought irrigated area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(8): 15–27.
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. *草业学报*, 2019, 28(8): 15–27.
- [15] Fan F, Zhang N, Zhang Q G, *et al.* Effects of fertilizer application on the yield of fresh forage and nutrient content of Aohan alfalfa. *Chinese Journal of Grassland*, 2007, 29(5): 36–42.
范富, 张宁, 张庆国, 等. 施肥对敖汉苜蓿鲜草产量及营养成分的影响. *中国草地学报*, 2007, 29(5): 36–42.
- [16] Zhang P P, Wang F, Wang L Q, *et al.* Spatio-temporal change of agricultural production efficiency in the Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(2): 218–225.

- 张平平, 王飞, 王蕾钦, 等. 黄土高原县域农业生产效率时空变化分析. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 218—225.
- [17] Zhao S X, Liu X L. Spatial interpolation method of soil temperature of Ketu desert on east of Qinghai Lake. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(5): 170—174, 192.
赵淑霞, 刘学录. 基于 DEA 模型的耕地经济效益分析——以甘肃省庄浪县为例. 干旱地区农业研究, 2012, 30(5): 170—174, 192.
- [18] Deng H B, Lu L. The urban tourism efficiencies of cities in Anhui Province based on DEA model. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 313—323.
邓洪波, 陆林. 基于 DEA 模型的安徽省城市旅游效率研究. 自然资源学报, 2014, 29(2): 313—323.
- [19] Shao H L, Zong Y X, Zhao B H. Evaluation and analysis on wheat fertility technical efficiency in Hebei Province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(8): 528—531.
邵红岭, 宗义湘, 赵邦宏. 河北省小麦丰产技术效率评价与分析. 中国农学通报, 2006, 22(8): 528—531.
- [20] Jia X W, Yao S B. On apples' productive efficiency and influencing factors in major production areas of China. *Journal of Jiangxi Agricultural University*, 2011, 10(1): 79—82, 88.
贾筱文, 姚顺波. 我国苹果主产区效率特征及其影响因素分析. 江西农业大学学报(社会科学版), 2011, 10(1): 79—82, 88.
- [21] Yang X, Zhong F L, Guo A J. Evaluation and improvement of oasis farmer households' production efficiency: A case of seed corn in Zhangye City. *Arid Land Geography*, 2017, 40(4): 913—919.
杨肖, 钟方雷, 郭爱君. 绿洲农户生产效率差异评价及改进策略——以张掖市制种玉米为例. 干旱区地理, 2017, 40(4): 913—919.
- [22] Hu H N, Dou X C. Studies on economic benefits evaluation of seed industry based on DEA model——A case study of Zhangye corn seed industry. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2015, 17(6): 150—157.
胡贺年, 窦学诚. 基于 DEA 方法的种业经济效益评价研究——以张掖市玉米种业为例. 中国农业科技导报, 2015, 17(6): 150—157.
- [23] Wang Y H, Li D F, Qi S L, *et al.* Effects of seeding rate and variety on branch number and plant height of alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 183—190.
王彦华, 李德锋, 齐胜利, 等. 播种量和品种对紫花苜蓿分枝数和株高的影响. 草业学报, 2017, 26(3): 183—190.
- [24] Zou Q. *Experimental tutorial of plant physiology*. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [25] Yu T F, Liu X J, Hao F, *et al.* Effects of NO_3^- -N/ NH_4^+ -N ratio on the nutritional quality and feeding values of alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(12): 102—110.
于铁峰, 刘晓静, 郝凤, 等. NO_3^- -N/ NH_4^+ -N 配比对紫花苜蓿营养品质及饲用价值的影响研究. 草业学报, 2016, 25(12): 102—110.
- [26] Wei Q S, Yue M. Introduction to DEA and C^2R model——Data envelopment analysis (1). *Systems Engineering-Theory & Practice*, 1989, (1): 58—69.
魏权龄, 岳明. DEA 概论与 C^2R 模型——数据包络分析(一). 系统工程理论与实践, 1989, (1): 58—69.
- [27] Xiao J B, Liu Z, Cui L H, *et al.* Effects of nitrogen application on tillering and yield of japonica rice under cold water stress at tillering stage. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016, (6): 81—85, 92.
肖继兵, 刘志, 崔丽华, 等. 辽西土壤养分供应能力与高粱施肥推荐. 中国土壤与肥料, 2016, (6): 81—85, 92.
- [28] Liu X J, Liu Y N, Kuai J L, *et al.* Effects of different N levels on productivity and quality of alfalfa varieties. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(4): 702—707.
刘晓静, 刘艳楠, 蒯佳林, 等. 供氮水平对不同紫花苜蓿产量及品质的影响. 草地学报, 2013, 21(4): 702—707.
- [29] Feng Y G, Chen J J, Sun X L, *et al.* Effects of organic fertilizer manure on growth and morphology of roots of pepino. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(1): 188—195.
冯云格, 陈菁菁, 孙小妹, 等. 施肥对日光温室西瓜茄根系生长及形态的影响. 核农学报, 2018, 32(1): 188—195.
- [30] Yang H B, Li J Q, Wang J J, *et al.* Effects of fertilizer and rhizobium inoculation on alfalfa growth on mine tailings and the physicochemical properties of iron tailings. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(2): 68—76.
杨何宝, 李继泉, 王俊娟, 等. 施肥和苜蓿接种根瘤菌对苜蓿生长及铁尾矿砂基质理化性质的影响. 草业学报, 2016, 25(2): 68—76.
- [31] Yu T F, Liu X J, Hao F. Effect of phosphate fertilizer application on alfalfa yield, nutritive value and N and P use efficiency. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(3): 154—163.
于铁峰, 刘晓静, 郝凤. 施用磷肥对紫花苜蓿营养价值和氮磷利用效率的影响. 草业学报, 2018, 27(3): 154—163.
- [32] Meng K, Li X Y, Ji X T, *et al.* Effect of nitrogen phosphorus potassium fertilizer on yield of Caoyuan No. 3 alfalfa. *Chinese*

- Journal of Grassland, 2019, 41(3): 107—114.
- 孟凯, 李星月, 冀晓婷, 等. 氮、磷、钾配施对草原 3 号苜蓿干草产量的影响. 中国草地学报, 2019, 41(3): 107—114.
- [33] Shi J, Li W Q, Hou L L, *et al.* Effects of N, P, K combined application on the yield, nutrition absorption and utilization characteristics of *Allium fistulosum*. Plant Physiology Journal, 2015, 51(6): 847—852.
- 石健, 李炜蕾, 侯丽丽, 等. 氮磷钾配施对大葱产量及养分吸收利用特性的影响. 植物生理学报, 2015, 51(6): 847—852.
- [34] Wang Y, Gao Q, Feng G Z, *et al.* N, P and K requirement and fertilizer use efficiencies of spring maize in Jilin Province. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(2): 306—315.
- 王寅, 高强, 冯国忠, 等. 吉林春玉米氮磷钾养分需求与利用效率研究. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 306—315.
- [35] Wang L Z, Hua F J, Cao P P, *et al.* Effect of nitrogen, phosphorus and potassium combined application on dry matter accumulation, yield and economic benefits of adzuki bean. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(10): 2058—2067.
- 王乐政, 华方静, 曹鹏鹏, 等. 氮磷钾配施对红小豆干物质积累、产量和效益的影响. 核农学报, 2019, 33(10): 2058—2067.
- [36] Guan W, Xu S T. Spatial patterns and coupling relations between energy efficiency and industrial structure in Liaoning Province. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(4): 520—530.
- 关伟, 许淑婷. 辽宁省能源效率与产业结构的空间特征及耦合关系. 地理学报, 2014, 69(4): 520—530.
- [37] Ren Y F, Fang C L, Lin X Q. Evaluation of eco-efficiency of four major urban agglomerations in eastern coastal area of China. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(11): 2047—2063.
- 任宇飞, 方创琳, 蔺雪芹. 中国东部沿海地区四大城市群生态效率评价. 地理学报, 2017, 72(11): 2047—2063.
- [38] Mansour S F, Eldeeb S M. Technical and economic efficiency of sugar beet production in Sahl El Tina: Using data envelopment analysis (DEA). Arab Universities Journal of Agricultural Sciences, 2014, 22(1): 94—105.
- [39] Li Y, Fan W W. Effectiveness evaluation and control measures of the development of the agricultural recycle economy in Hunan Province. Economic Geography, 2017, 37(4): 182—189.
- 李杨, 樊雯雯. 湖南省农业循环经济发展有效性评价与调控措施. 经济地理, 2017, 37(4): 182—189.
- [40] Hou L, Feng J H. Analysis of Chinese agricultural production efficiency based on super-efficiency DEA and Malmquist index. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(2): 316—324.
- 侯琳, 冯继红. 基于超效率 DEA 和 Malmquist 指数的中国农业生产效率分析. 河南农业大学学报, 2019, 53(2): 316—324.
- [41] Zhang Z H, Lei L. The evaluation of Shaanxi agricultural production efficiency and the analysis of influence factors-based on the DEA-Tobit two-stage. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5): 39—42.
- 张召华, 雷玲. 陕西农业生产效率评价以及影响因素分析—基于 DEA-Tobit 两步法. 农机化研究, 2011, 33(5): 39—42.