

# 灌溉条件下燕麦氮、磷、钾配方施肥效应分析及与产量回归模型的建立

张平珍 张克厚 陈莺 陈靖萍 罗健科 王泽宇

(白银市农业科学研究所, 730900, 甘肃白银)

**摘要** 为探讨灌溉条件下燕麦品种银燕6号氮(N)、磷(P)、钾(K)配方施肥的肥料效应,采用“3414”试验方案,研究N、P、K不同施用配比对燕麦产量和农艺性状的影响,建立了施肥与产量的回归模型,为构建灌溉条件下燕麦施肥指标体系提供科学依据。结果表明,处理 $N_2P_2K_2$ 籽粒产量( $5100.0\text{kg}/\text{hm}^2$ )、肥料贡献率(34.8%)、产值( $20\,400.0\text{元}/\text{hm}^2$ )在14个处理中均最高;增产效应为 $N>P>K$ ,并且N、P、K肥间存在明显的交互作用;N、P、K单种肥料施用量与籽粒产量呈抛物线关系,根据拟合函数得出,N、P、K最大施用量分别为229.8、80.5、 $26.4\text{kg}/\text{hm}^2$ ;根据N、 $P_2O_5$ 和 $K_2O$ 施用量对籽粒产量的影响,建立了三因素的施肥数学模型,进一步得出,燕麦产量 $\geq 4950.0\text{kg}/\text{hm}^2$ 时,氮(N):磷( $P_2O_5$ ):钾( $K_2O$ )施肥比例为1.54:1:0.23,N、 $P_2O_5$ 、 $K_2O$ 施用量范围分别是148.8~198.3、 $>112.5$ 和14.3~ $37.2\text{kg}/\text{hm}^2$ 。该结论对灌溉条件下燕麦生产具有实际指导意义。

**关键词** 燕麦;“3414”肥料设计;籽粒产量;灌溉;施肥

燕麦(*Avena L.*)属禾本科禾本亚科燕麦属,是一种粮、经、饲、药多用作物,在全世界五大洲42个国家均有栽培,在世界八大粮食作物中,燕麦总产量居第5位<sup>[1]</sup>。燕麦营养价值高、全面且平衡,具有降血脂和降血糖的功效,已经成为人们生活中不可或缺的营养保健粮食<sup>[2]</sup>。

近年来,随着燕麦保健功能不断地被认可,燕麦产品快速发展,对燕麦的需求也不断增加。甘肃燕麦种植区受自然条件特别是干旱的制约,燕麦生产一直是广种薄收、粗放管理的生产方式,难以形成规模化、标准化、产业化生产,种植效益不高,影响了燕麦生产的发展。因此,必须调整育种目标和方向,制定新的多样化育种方案,开展以高产、超高产品种选育选用为中心栽培技术研究<sup>[3-5]</sup>。近几年白银市农业科学研究所探索在灌溉条件下发展燕麦生产,为解决这些问题提供了重要创新途径,并取得了较好的技术成果<sup>[6-7]</sup>。燕麦是传统的旱地作物,对雨养干旱地区燕麦配方施肥技术已有广泛报道,而对灌溉条件下燕麦肥料施用技术研究很少;灌溉地区燕麦与干旱地区燕麦对肥料的需求不同,在灌溉条件下,施肥不足,达不到高产目的;施肥过量,则导致营养生长过旺,容易造成燕麦倒

伏而减产,并且增加成本,降低收益,增加环境风险<sup>[8-9]</sup>。为了探讨在灌溉条件下燕麦的氮(N)、磷(P)、钾(K)施肥效应,2018年进行了灌溉条件下燕麦氮、磷、钾“3414”平衡施肥试验<sup>[10-11]</sup>,并运用不同模型进行数据分析,研究氮、磷、钾不同施用配比对燕麦产量和农艺性状的影响,初步获得灌溉条件下氮、磷、钾施肥比例和施肥量范围等基本参数,为构建燕麦大面积施肥指标体系和科学施肥提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间与试验地概况

试验于2018年在甘肃省白银市农业科学研究所试验场(靖远县)( $103^{\circ}3'\sim 105^{\circ}34'E$ ,  $35^{\circ}33'\sim 37^{\circ}38'N$ )进行。试验场位于甘肃中部、黄河上游,地处黄土高原与腾格里沙漠过度地带,属温带干旱、半干旱大陆性气候。海拔1570m,年均气温 $8.5^{\circ}\text{C}$ ,无霜期 $>170\text{d}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效活动积温 $3100^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量224mm,蒸发量1600mm。土壤为沙壤土,有机质 $18.8\text{g}/\text{kg}$ ,碱解氮 $65\text{mg}/\text{kg}$ ,速效磷 $44.21\text{mg}/\text{kg}$ ,速效钾 $78\text{mg}/\text{kg}$ 。试验地属于引黄灌区,自然生态条件及土壤、农业生产条件在

作者简介:张平珍,主要从事燕麦育种研究工作, E-mail: zpzbaixin@163.com

张克厚为通信作者,主要从事燕麦育种研究工作, E-mail: keh009@sina.com

基金项目:甘肃省特色作物产业体系“荞燕麦岗位/燕麦品种技术研发”(GARS-TSZ-2);甘肃省科技重大专项计划“甘肃省小杂粮新品种选育与示范”燕麦课题(18ZD2NA008);甘肃省现代农业科技支撑体系区域创新中心重点科技项目“特色小杂粮品种及配套绿色增效技术集成示范”

收稿日期:2020-09-26;修回日期:2021-08-18;网络出版日期:2021-08-31

甘肃省中部引黄灌区有较好的代表性。

1.2 试验材料

试验燕麦品种为银燕 6 号，由白银市农业科学研究所提供。试验氮肥为尿素（N 46%），磷肥为普通过磷酸钙（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%），钾肥为硫酸钾（K<sub>2</sub>O 50%）。

1.3 试验设计

采用“3414”最优设计方案<sup>[12]</sup>，设氮、磷、钾

3 个因素（N、P、K）、4 个施肥量水平（0、1、2、3）。其中，0 水平指不施肥，2 水平为当地最佳施肥量，3 水平为过量施肥水平，共 14 个处理，每个处理 3 次重复，随机区组排列。共 14 个小区，小区面积为 18m<sup>2</sup>（6m×3m），行距 20cm，小区间留 50cm 走道，小区间打地埂，防止串水串肥，试验地四周设 2m 保护行。处理方案详见表 1。

表 1 “3414”试验方案、施肥量和肥料成本  
Table 1 The “3414” experimental scheme, fertilizer quantity and fertilizer cost

处理 Treatment	纯养分用量 Pure nutrient dosage (kg/hm <sup>2</sup> )			肥料施用量 Fertilizer quantity(kg/hm <sup>2</sup> )			肥料成本（元/hm <sup>2</sup> ） Fertilizer cost (yuan/hm <sup>2</sup> )
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	尿素 Urea	普通过磷酸钙 Ordinary superphosphate	硫酸钾 Potassium carbonate	
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	0	0	0	0	0	0	0
N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	0	75.0	30	0	625.0	142.8	405.0
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	67.5	75.0	30	146.7	625.0	142.8	567.0
N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	135.0	0	30	293.5	0	142.8	429.0
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	135.0	37.5	30	293.5	312.5	142.8	579.0
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	135.0	75.0	30	293.5	625.0	142.8	729.0
N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	135.0	112.5	30	293.5	937.5	142.8	879.0
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	135.0	75.0	0	293.5	625.0	0	624.0
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	135.0	75.0	15	293.5	625.0	71.4	676.5
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	135.0	75.0	45	293.5	625.0	214.3	781.5
N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	202.5	75.0	30	440.2	625.0	142.8	891.0
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	67.5	37.5	30	146.7	312.5	142.8	417.0
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	67.5	75.0	15	146.7	625.0	71.4	514.5
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	135.0	37.5	15	293.5	312.5	71.4	526.5

纯 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 的价格分别为 2.4、4.0、3.5 元/kg  
The prices of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O are 2.4, 4.0 and 3.5 yuan/kg, respectively

采用人工开沟播种，播种量 494 万粒/hm<sup>2</sup>，各小区均不施有机肥，肥料按试验方案分小区称量，并作基肥一次性施入，不施追肥，生育期浇水 2 次（每次约 2250m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>），分别在燕麦拔节期和灌浆期中耕除草 2 次，喷药 1 次防治蚜虫。收获时分小区单收单打计产，其他管理同当地大田生产。增产量（kg/hm<sup>2</sup>）=施肥区籽粒产量-缺素区籽粒产量；增收（元/hm<sup>2</sup>）=施肥区产值-施肥区肥料成本-缺素区产值；肥料贡献率（%）=（施肥区籽粒产量-缺素区籽粒产量）/施肥区籽粒产量×100。

1.4 数据统计

采用 Excel 2007 对原始数据进行初步处理，建立肥料效益的回归方程，并制图。用软件 SAE V6.0.0 进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮、磷、钾配比的施肥效应

燕麦籽粒产量分析结果（表 2）表明，施肥处理除缺氮处理（N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>）与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 籽粒产量差异不

显著外，其他处理均与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 处理差异显著；N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理籽粒产量（5100.0kg/hm<sup>2</sup>）最高，除 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理外，与其他处理差异显著。各施肥处理的产量均高于未施肥处理 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>。不同施肥处理的增产效果存在一定的差异，其中 N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理增产量最小，较未施肥处理 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 增产 135.0kg/hm<sup>2</sup>；与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 相比，N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理增产量最大，增产 1774.5kg/hm<sup>2</sup>；其次为处理 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>（N<sub>3</sub> 水平），增产 1585.7kg/hm<sup>2</sup>，而 N<sub>2</sub>P<sub>3</sub>K<sub>2</sub>（P<sub>3</sub> 水平）增产 1402.4kg/hm<sup>2</sup>，N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>3</sub>（K<sub>3</sub> 水平）增产 1291.2kg/hm<sup>2</sup>，说明燕麦对氮素反应敏感，增施氮肥可以显著增产，氮肥对灌溉地区燕麦籽粒产量的提高具有至关重要的作用。缺氮处理（N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>）、缺磷处理（N<sub>2</sub>P<sub>0</sub>K<sub>2</sub>）和缺钾处理（N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub>）较最高产量处理 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 分别减产 32.1%、13.8%和 13.2%，说明氮肥是灌溉地区燕麦籽粒产量的主要限制因子，其次是磷肥和钾肥。

施肥是农业生产中的重要环节，是作物产量提高的重要因素。施肥量的确定不仅要考虑产量，而且要综合考虑经济效益。由表 2 可知，与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 相

表 2 不同氮、磷、钾配施处理对产量、经济效应和肥料贡献率的影响  
Table 2 Effects of combined fertilizers application on the yield, economic benefits and fertilizer contribution rate

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (kg/hm <sup>2</sup> )	产值 (元/hm <sup>2</sup> ) Output value (yuan/hm <sup>2</sup> )	增产 Increased yield (kg/hm <sup>2</sup> )	增收 (元/hm <sup>2</sup> ) Increased profit (yuan/hm <sup>2</sup> )	肥料贡献率 Fertilizer contribution rate (%)
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	3 325.5i	13 302.0	—	—	—
N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	3 460.5hi	13 842.0	135.0	135.0	3.9
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	3 683.4h	14 733.6	357.9	864.6	9.7
N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	4 394.4def	17 577.6	1 068.9	3 846.6	24.3
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	4 505.6cde	18 022.4	1 180.1	4 141.2	26.2
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	5 100.0a	20 400.0	1 774.5	6 369.0	34.8
N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	4 727.9bc	18 911.6	1 402.4	4 730.6	29.7
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	4 427.9def	17 711.6	1 102.4	3 785.6	24.9
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	4 688.9bc	18 755.6	1 363.4	4 777.1	29.1
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	4 616.7cd	18 466.8	1 291.2	4 383.3	28.0
N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	4 911.2ab	19 644.8	1 585.7	5 451.8	32.3
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	4 244.4f	16 977.6	918.9	3 258.6	21.6
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	3 983.4g	15 933.6	657.9	2 117.1	16.5
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	4 316.7ef	17 266.8	991.2	3 438.3	23.0

燕麦籽粒价格以 4.0 元/kg 计算。同列不同字母表示差异达 0.05 显著水平，下同  
The price of oat grain is 4.0 yuan/kg. Different letters within a column indicate significant difference at the 0.05 level, the same below

比，不同的氮、磷、钾配比施用均可提高产值，增加收入，其中处理 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 的产值（20 400.0 元/hm<sup>2</sup>）最高，是处理 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 的 1.53 倍；其次为 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理（19 644.8 元/hm<sup>2</sup>）。而 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理的肥料成本却高于 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理（表 1），说明施肥不合理，不仅浪费肥料，也增加生产成本，经济效益反而下降。此外，缺氮处理（N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>）增收仅为 135.0 元/hm<sup>2</sup>，表明在灌溉条件下只施钾肥和磷肥对燕麦产值增加无明显效果。

施肥处理的肥料贡献率在 3.9%~34.8%，其中处理 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 的肥料贡献率最高，达 34.8%，说明合理施肥可有效提高肥料的利用率。

2.2 单种氮、磷、钾肥的增产效应分析

根据 N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 和 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 的试验结果，对氮肥单种肥料施用量同燕麦籽粒产量比较分析，做散点图，拟合一元二次曲线（图 1a）。氮肥施用量（x）与籽粒产量（y）的拟合函数为  $y=-0.0382x^2+17.554x+3049.8$ （ $R^2=0.8779$ ），由于一元二次方程二次项系数为负，一次项为正，说明函数有极大值，即燕麦籽粒产量随氮肥施用量的增加呈先增加后减少的趋势。根据拟合函数可得出最大施氮量为 229.8kg/hm<sup>2</sup>，此时最大理论产量为 5066.4kg/hm<sup>2</sup>。从拟合函数最大施氮量看，氮肥理论施用量还可以增加，但籽粒产量增加很少，成本却增大，说明继续增加施氮量对燕麦产值增加没有明显效果。

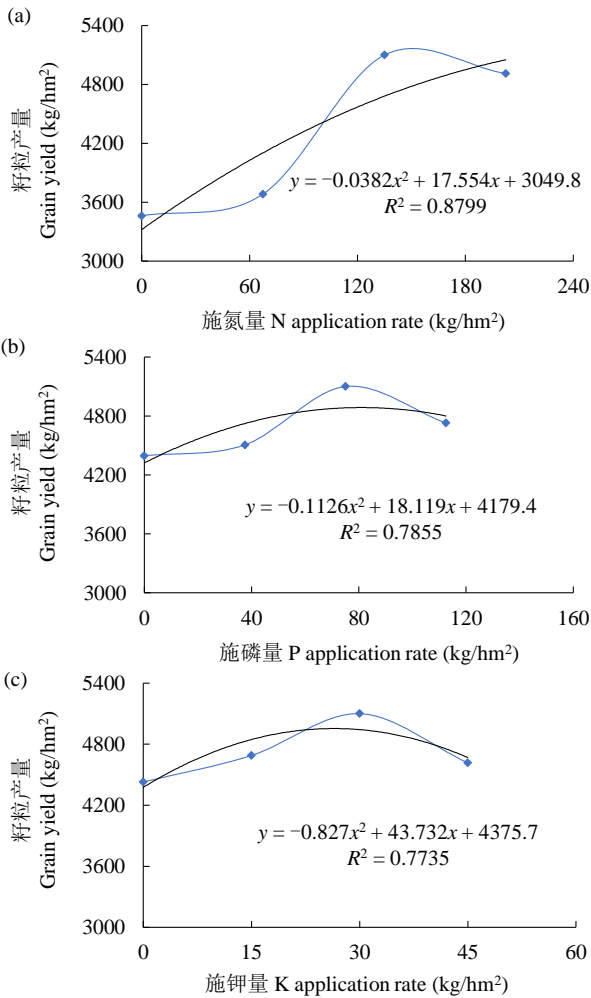


图 1 氮、磷、钾施用量与籽粒产量的拟合曲线  
Fig.1 The fitted curve for grain yield and N, P, and K application rates

根据  $N_2P_0K_2$ 、 $N_2P_1K_2$ 、 $N_2P_2K_2$  和  $N_2P_3K_2$  的试验结果,对磷肥单种肥料施用量同燕麦籽粒产量比较分析,做散点图,拟合一元二次曲线(图 1b)。磷肥施用量( $x$ )与籽粒产量( $y$ )的拟合函数为  $y=-0.1126x^2+18.119x+4179.4$  ( $R^2=0.7855$ ),根据拟合函数得出最大施磷量为  $80.5\text{kg}/\text{hm}^2$ ,此时最大理论产量为  $4908.3\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

根据  $N_2P_2K_0$ 、 $N_2P_2K_1$ 、 $N_2P_2K_2$  和  $N_2P_2K_3$  的试验结果,对钾肥单种肥料施用量同燕麦籽粒产量比较分析,做散点图,拟合一元二次曲线(图 1c)。钾肥施用量( $x$ )与籽粒产量( $y$ )的拟合函数为  $y=-0.827x^2+43.732x+4375.7$  ( $R^2=0.7735$ ),根据拟合函数得出最大施钾量为  $26.4\text{kg}/\text{hm}^2$ ,此时最大理论产量为  $4953.8\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

### 2.3 氮、磷、钾肥的互作效应分析

氮、磷、钾肥施用量的交互作用分析结果(图 2a)表明,在  $K_2$  水平时,当氮肥施用量从  $N_1$  增加到  $N_2$ ,  $P_1$  和  $P_2$  水平分别增产  $261.2$  和  $1416.6\text{kg}/\text{hm}^2$ ,增产率分别为  $6.2\%$  和  $38.5\%$ 。说明随着氮肥施用量的增加,磷肥用量也要达到一定的量,才能使氮肥更好地发挥肥效。在  $P_2$  水平时,当氮肥施用量从  $N_1$  增加到  $N_2$  时,  $K_1$  和  $K_2$  水平分别增产  $705.5$  和  $1416.6\text{kg}/\text{hm}^2$ ,说明一定用量的钾肥对氮肥也具有很好的增效作用。

在  $K_2$  水平下,当磷肥施用量从  $P_1$  增加到  $P_2$  时,  $N_1$  水平减产  $561\text{kg}/\text{hm}^2$ ,而  $N_2$  水平增产  $594.4\text{kg}/\text{hm}^2$ ,说明氮肥施用量达不到一定量,增施磷肥没有增产效果(图 2b)。在  $N_2$  水平时,当磷肥施用量从  $P_1$  增加到  $P_2$  时,  $K_1$  和  $K_2$  水平分别增产  $372.2$  和  $594.4\text{kg}/\text{hm}^2$ ,说明随着施磷水平的提高,  $K_1$  和  $K_2$  水平的增产量比较接近,钾肥施用量的增加并不会明显影响磷肥肥效。中氮( $N_2$ )比中钾( $K_2$ )处理更有利于磷肥肥效的发挥。

在  $P_2$  水平下,当钾肥施用量从  $K_1$  增加到  $K_2$  时,  $N_1$  水平减产  $300\text{kg}/\text{hm}^2$ ,而  $N_2$  水平增产  $411.1\text{kg}/\text{hm}^2$ ,说明氮肥施用量的提高有利于钾肥肥效更好地发挥(图 2c)。在  $N_2$  水平时,当钾肥施用量从  $K_1$  增加到  $K_2$  时,  $P_1$  和  $P_2$  水平分别增产  $188.9$  和  $411.1\text{kg}/\text{hm}^2$ ,说明随着施钾水平的提高,  $P_1$  和  $P_2$  水平的增产量接近,磷肥施用量的增加并不会明显提升钾肥肥效。

### 2.4 各因素与产量回归模型的建立及检验

以产量( $Y$ )为目标函数,根据纯 N ( $X_1$ )、 $P_2O_5$

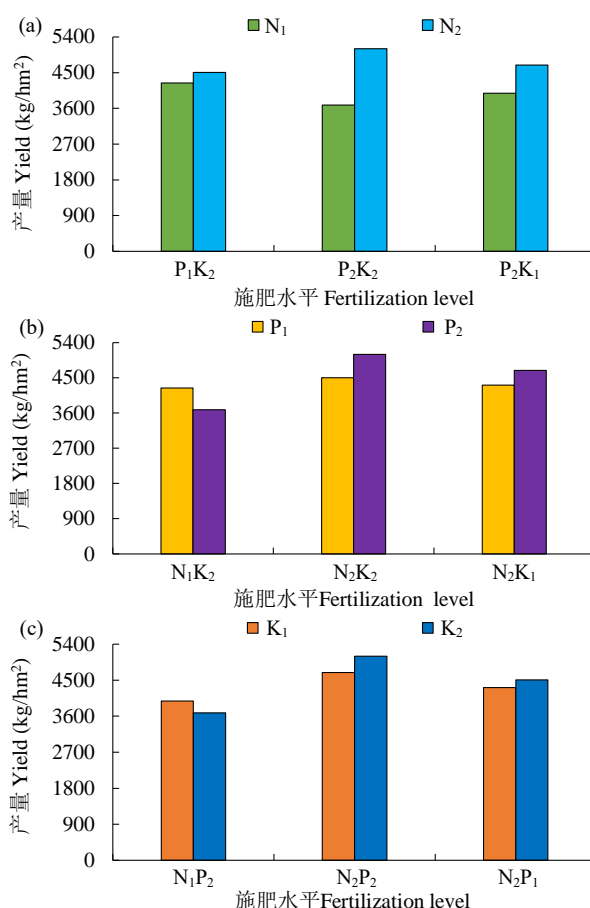


图 2 氮、磷、钾肥施肥水平的互作效应  
Fig.2 Interactions of N, P and K application level

( $X_2$ )、 $K_2O$  ( $X_3$ ) 施用量对产量的影响建立三因素的施肥数学模型,  $Y=221.3524+20.4121X_1-8.5801X_2+38.5977X_3-6.2532X_1^2-1.3124X_2^2-3.8204X_3^2+20.3884X_1X_2-1.8628X_1X_3-9.9189X_2X_3$  ( $R=0.9443^{**}$ ,  $F=11.5307^{**}$ )。经显著性检验表明,回归方程有效,各小区产量理论值和实测值接近,可作进一步分析。

### 2.5 氮、磷、钾配方施肥比例和施肥范围

“3414”优化设计因素组合共 64 个 N、P、K 肥料施用量组合,对燕麦产量影响较大。最高函数产量为  $5583.8\text{kg}/\text{hm}^2$ , N、P、K 编码值分别为 3、3、0。显然,最高函数产量编码值不符合生物学意义,是一个数学理论值。而田间小区实测值最高的  $N_2P_2K_2$  处理折合产量为  $5100.0\text{kg}/\text{hm}^2$ ,其编码组合 N、P、K 编码值均为 2。为了进一步寻找最佳施肥量,结合函数方程与各小区实际产量,进一步进行组合寻优,得到当地 7 个燕麦产量  $\geq 4950.0\text{kg}/\text{hm}^2$  的组合(表 3)。

对燕麦产量在  $4950\text{kg}/\text{hm}^2$  以上的 7 个组合各肥料因素编码进行频次分析,结果(表 4)表明,

表 3 目标产量≥4950.0kg/hm<sup>2</sup>的编码组合结果排序  
Table 3 Sorting of coding combination results  
with objective yield ≥4950.0kg/hm<sup>2</sup>

序号 Number	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )
1	3	3	0	5 583.8
2	3	3	1	5 575.3
3	3	3	2	5 452.2
4	3	3	3	5 214.4
5	2	3	2	5 050.9
6	2	3	1	4 997.3
7	2	3	3	4 989.9

表 4 燕麦目标产量 4950.0kg/hm<sup>2</sup> 以上的各肥料因素编码统计  
Table 4 Coding statistics of fertilizer factors with oat target yield above 4950.0kg/hm<sup>2</sup>

因素 Factor	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>	
	次数 Times	频率 Frequency (%)	次数 Times	频率 Frequency (%)	次数 Times	频率 Frequency (%)
0	0	0	0	0	1	14.3
1	0	0	0	0	2	28.6
2	3	42.9	0	0	2	28.6
3	4	57.1	7	100	2	28.6
次数合计 Total times	7		7		7	
平均编码值 Average coding value	2.5714		3		1.7143	
标准误差 Standard error	0.1870		0		0.3894	
编码范围 Coding range	2.204<Y<2.938		Y<3		0.951<Y<2.477	

K<sub>2</sub>O 用量范围分别是 148.8~198.3、>112.5 和 14.3~37.2kg/hm<sup>2</sup>。

“最佳施肥量”是一个相对数值，受土壤肥力、作物品种、目标产量、栽培管理和试验误差诸多因素影响，例如土壤肥力低则施肥量就应增大，土壤肥力高则施肥量就应减少。同时，“最佳施肥量”还要综合考虑氮、磷、钾肥的价格和增产效果，在生产实践上要根据实际情况对施肥量进行调整。

2.6 不同肥料配施对燕麦经济性状及群体结构的影响

由表 5 可知，不同肥料配施对该地区燕麦生育期、株高、主穗长、小穗数、穗粒数、成穗数和倒伏率的影响都存在差异，除 N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>1</sub>P<sub>1</sub>K<sub>2</sub> 和 N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>K<sub>1</sub> 外，其他处理的生育期与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 差异显著；所有施肥处理的株高与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 均差异显著；施肥处理中只有 N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 的主穗长与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 差异不显著；N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>3</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>0</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>3</sub> 和 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 的小穗数与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 差异显著；N<sub>0</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>1</sub>K<sub>1</sub> 和 N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 的穗粒数与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 差异不显著；所有施肥处理的千粒重与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 差异不显著，说明施肥处理并不会显著增加燕麦籽粒的饱满度。

处理 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 的生育期最长，株高最高，成穗数最多，但倒伏率最高，而籽粒产量最高的 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理与 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理的株高和倒伏率有显著差异，生

N（X<sub>1</sub>）、P（X<sub>2</sub>）、K（X<sub>3</sub>）的各平均编码值分别为 2.5714、3 和 1.7143，解析编码后，转换为纯 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 平均施用量，分别为 173.6、112.5、25.7kg/hm<sup>2</sup>，折合尿素、普通过磷酸钙和硫酸钾分别为 377.3、937.5 和 122.4kg/hm<sup>2</sup>，此时的燕麦产量为 5219.1kg/hm<sup>2</sup>，N：P：K=1.54：1：0.23。需要强调的是，这个比例并不代表燕麦对氮、磷、钾的全部需求比例，而是在当地土壤基础养分含量下的配方施肥比例。燕麦产量≥4950.0kg/hm<sup>2</sup> 的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、

育期和成穗数差异不显著；处理 N<sub>2</sub>P<sub>3</sub>K<sub>2</sub> 的主穗最长，穗粒数最多，而籽粒产量最高的 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理与 N<sub>2</sub>P<sub>3</sub>K<sub>2</sub> 处理的主穗长、穗粒数差异不显著；N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>3</sub> 处理小穗数最多，而 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理与 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>3</sub> 处理的小穗数差异不显著。总之籽粒产量最高的 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理生育期正常，千粒重中等，主穗长、小穗数、穗粒数和成穗数均偏高，抗倒性强。

3 讨论

3.1 灌溉地区燕麦不同肥料配施对化肥肥效的影响

施肥是补充土壤营养、维持土壤持续生产力和维持稳定增产的有效措施。由于营养元素对作物产量的影响，不仅具有主效应，交互作用效应也对产量有一定的影响，是当前土壤科学与植物营养研究的热点<sup>[13]</sup>。朱桂玉等<sup>[14]</sup>研究发现，氮、磷、钾肥施用量均为中等水平时，水稻产量和经济效益最佳，同时氮、磷、钾肥间存在明显的交互作用，三者配合施用有助于各自肥效的发挥。本研究中，处理 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 籽粒产量最高，为 5100.0kg/hm<sup>2</sup>，且除与 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理籽粒产量差异不显著外，与其他处理差异均显著，并且处理 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 的肥料贡献率最高，达到 34.8%；各施肥处理的籽粒产量均高于未施肥处理 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub>，且不同施肥处理的增产效果存在一定差异，增产量最大的处理为 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub>，比 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 增产

表 5 不同处理的经济性状及差异性分析  
Table 5 Economic characters and difference analysis of different treatments

处理 Treatment	生育期 Growth period (d)	株高 Plant height (cm)	主穗长 Main panicle length (cm)	小穗数 Spikelet number	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain wight (g)	成穗数 Panicle number ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ )	倒伏率 Lodging rate (%)
N <sub>0</sub> P <sub>0</sub> K <sub>0</sub>	85d	94.0f	15.5e	28.4d	35.6d	25.3a	411.5g	0e
N <sub>0</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	86cd	98.2e	16.0e	31.9abcd	35.8d	25.5a	417.5g	0e
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	86cd	110.2d	17.3cd	31.2abcd	36.1cd	25.2a	445.5ef	0e
N <sub>2</sub> P <sub>0</sub> K <sub>2</sub>	89bc	115.8c	18.0bc	29.0d	38.2abc	24.7a	515.5cd	0e
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	90ab	118.3bc	18.2abc	31.6bcd	38.6ab	24.2a	546.5bc	0e
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	90ab	119.0bc	18.5ab	33.2ab	39.0ab	24.8a	586.0ab	0e
N <sub>2</sub> P <sub>3</sub> K <sub>2</sub>	90ab	120.5ab	19.2a	33.8a	39.7a	24.2a	550.5bc	0e
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>0</sub>	90ab	118.8bc	18.0bc	32.0abc	39.2ab	23.0a	554.5abc	25.2b
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	90ab	118.6bc	18.3abc	33.5ab	38.2abc	23.7a	575.8ab	10.9c
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub> K <sub>3</sub>	91ab	118.5bc	18.0bc	34.1a	38.3abc	24.0a	566.3ab	0e
N <sub>3</sub> P <sub>2</sub> K <sub>2</sub>	93a	122.6a	17.5cd	32.9abc	39.1ab	23.5a	602.5a	30.5a
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub> K <sub>2</sub>	86cd	108.5d	17.8bc	30.0cd	37.7bc	25.4a	495.5cd	0e
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub> K <sub>1</sub>	86cd	110.3d	18.1abc	31.3abcd	38.0bc	25.0a	467.0ef	4.3de
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub> K <sub>1</sub>	91ab	118.8bc	18.3abc	29.7cd	37.2bcd	25.5a	514.5cde	6.6d

1774.5kg/hm<sup>2</sup>；氮、磷、钾缺素处理较最高产量 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理分别减产 32.1%、13.8%、13.2%，即氮肥是限制灌溉条件下燕麦产量的主要因子，其次是磷肥和钾肥。单种肥料施用量与籽粒产量呈抛物线关系，一定范围内籽粒产量随施肥量的增加而提高，但超过此范围反而降低，这种现象符合报酬递减规律。对肥料的交互作用分析发现，随着氮肥用量的增加，磷肥用量也要达到一定量才能使氮肥肥效更好地发挥，一定用量的钾肥对氮肥也具有很好的增效作用；氮肥施用量的提高也有利于钾肥肥效更好地发挥，磷肥施用量的增加并不会明显影响钾肥肥效；氮肥施用量的提高有利于磷肥肥效更好地发挥，钾肥施用量增加并不会明显影响磷肥肥效，高氮比高钾处理更有利于磷肥肥效的发挥。

3.2 不同肥料配施对灌溉地区燕麦产量及其构成因素的影响

灌溉地区与干旱雨养地区燕麦生产对品种的特性、播种密度、水肥管理不同<sup>[15]</sup>，灌溉地区燕麦籽粒产量制约因素较多，既要考虑品种的抗倒性和播种密度，也要考虑水量和施肥量。水肥合适，能够发挥燕麦最大生产潜能；水肥过量，则导致营养生长过旺，易造成燕麦严重倒伏，减产明显，并且施肥量过高时，成本增加，收益降低，环境风险增加；因此，确定合理施肥量是增产、增收和肥料高效利用的关键<sup>[16]</sup>。本研究通过建立对氮、磷、钾单种肥料施肥量同燕麦籽粒产量比较分析，做散点图，拟合一元二次曲线，利用一元二次肥效方程估测得最大施氮量为 229.8kg/hm<sup>2</sup>、最大施磷量为

80.5kg/hm<sup>2</sup>、最大施钾量为 26.4kg/hm<sup>2</sup> 时，最大理论产量分别为 5066.4、4908.3 和 4953.8kg/hm<sup>2</sup>。通过“3414”优化设计试验统计分析建立施肥量与籽粒产量的数学模型，进一步解析得出氮（N）：磷（P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>）：钾（K<sub>2</sub>O）=1.54：1：0.23；燕麦产量≥4950.0kg/hm<sup>2</sup> 的 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 K<sub>2</sub>O 用量范围分别是 148.8~198.3、>112.5 和 14.3~37.2kg/hm<sup>2</sup>。

德科加等<sup>[17]</sup>研究表明，施氮量与产量构成之间呈显著的二次回归关系，各产量构成变化随施氮量的增加出现了“低—高一低”的变化趋势，说明氮肥对产量构成的贡献存在临界值，这个临界值可能由植物的生理特性决定。灌溉地区燕麦品种对农艺性状的要求与旱地燕麦显著不同<sup>[15]</sup>。燕麦要实现高产，防止倒伏是前提，在这个前提下讨论农艺性状对产量的影响才有意义。在燕麦生产中，应通过品种选择、播种量控制等措施将主攻成穗数放在优先地位，即成穗数高、群体结构好。适宜的株高、生育期和千粒重是实现高产的重要保证；对穗粒数应有一定控制<sup>[5]</sup>。该研究中不同肥料配施对燕麦生育期、株高、主穗长、小穗数、穗粒数、成穗数和倒伏率的影响都存在差异，所有施肥处理的千粒重与 N<sub>0</sub>P<sub>0</sub>K<sub>0</sub> 差异不显著；N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理的株高与其他所有处理的株高存在显著差异，并且 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理的倒伏率最高，表明氮肥施用过量造成植株徒长，茎秆细弱，抗倒性明显减弱，但 N<sub>3</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理的成穗数高，这就说明主效应氮肥施用量是关键，达到成穗数高，并且株高适宜；籽粒产量最高的 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>K<sub>2</sub> 处理生育期正常，千粒重中等，主穗长、小穗数、穗粒

数和成穗数均偏高，抗倒性强。因此，只有合理的氮、磷、钾用量配比才有利于提高燕麦的农艺性状。

#### 4 结论

燕麦对氮素反应敏感，增施氮肥可以显著增产，氮、磷、钾配施能更好地发挥肥效，结合籽粒产量和经济效益，建议灌溉地区燕麦产量 $\geq 4950.0\text{kg}/\text{hm}^2$ 的 $\text{N}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 和 $\text{K}_2\text{O}$ 用量范围分别为 $148.8\sim 198.3\text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $>112.5\text{kg}/\text{hm}^2$ 和 $14.3\sim 37.2\text{kg}/\text{hm}^2$ ；在当地土壤基础养分含量下的配方施肥比例 $\text{N}:\text{P}:\text{K}=1.54:1:0.23$ 。

#### 参考文献

- [1] 李峰, 娜日娜, 生国利, 等. 燕麦增产丰收的措施. 中国农业信息, 2012(8): 23-24.
- [2] 黄相国, 葛菊梅. 燕麦 (*Avena sativa* L.) 的营养成分与保健价值探讨. 麦类作物学报, 2004, 24(4): 147-149.
- [3] 魏玉琴, 姜振宏. 甘肃省燕麦产业现状及发展途径. 甘肃农业, 2009(7): 59-60.
- [4] 杨晓虹, 杨才. 我国燕麦的产业化发展. 农产品加工创新版, 2012(7): 20-21.
- [5] 杨才, 周海涛, 张新军, 等. 对我国燕麦产业“一链三环九点”的发展战略解读. 作物杂志, 2014(2): 1-4.
- [6] 张克厚, 张平珍, 陈莺, 等. 水地燕麦银燕 6 号播种量与产量及主要农艺性状相关性研究. 甘肃农业科技, 2019(2): 36-39.
- [7] 张克厚, 陈莺, 张平珍, 等. 灌溉条件下燕麦不同品种的产量差异及与农艺性状的关系. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 166-170.
- [8] 龚建军. 播种量和氮肥水平对燕麦倒伏和产量的影响. 兰州: 甘肃农业大学, 2007.
- [9] 高祥照, 马文奇, 杜森, 等. 我国施肥量中存在问题的分析. 土壤通报, 2001, 32(6): 258-261.
- [10] 孙义祥, 郭跃升, 于舜章, 等. 应用“3414”试验建立冬小麦测土配方施肥指标体系. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 197-203.
- [11] 马祥, 贾志锋, 刘文辉, 等. 青海地区燕麦“3414”施肥效果及推荐施肥量. 草业科学, 2017, 34(9): 1906-1914.
- [12] 吴志勇, 闫静, 施维新, 等. “3414”肥料效应试验的设计与统计分析. 新疆农业科学, 2008, 45(1): 135-141.
- [13] 李生秀. 植物营养与肥料学科的现状与展望. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 193-205.
- [14] 朱桂玉, 区惠平, 何佳, 等. 免耕水稻在“3414”实验方案中氮磷钾配施的肥料效应研究. 中国土壤与肥料, 2011(5): 48-52.
- [15] 杨才. 燕麦论. 北京: 农业出版社, 2005: 124-127.
- [16] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 1-4.
- [17] 德科加, 周青平, 刘文辉, 等. 施氮量对青藏高原燕麦产量和品质的影响. 中国草地学报, 2007, 29(5): 43-48.

## The Effects Analysis of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Fertilization on Oat and Establishment of Yield Regression Model under Irrigation Condition

Zhang Pingzhen, Zhang Kehou, Chen Ying, Chen Jingping, Luo Jianke, Wang Zeyu

(Baiyin Agricultural Science Research Institute, Baiyin 730900, Gansu, China)

**Abstract** This study aimed to investigate the formula fertilization effects of oat (*Avena sativa*) on nitrogen, phosphorus, potassium under the irrigation condition. We applied the “3414” test scheme to observe oat (Yinyan 6) yield and agronomic characters under the influence of different allocations of N, P, and K. To provide a scientific basis for the establishment of oat fertilization index system under irrigation condition, a regression model between fertilization and yield was established. The results showed that grain yield ( $5100.0\text{kg}/\text{ha}$ ), fertilizer contribution rate (34.8%), and output value ( $20\,400.0\text{ yuan}/\text{ha}$ ) of  $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$  treatment were the highest among the 14 treatments. The yield increase effect of N, P, and K was  $\text{N}>\text{P}>\text{K}$  and there were obvious interactions among N, P, and K. The relationships between single fertilizer N, P, and K and grain yield were parabolic. According to the fitting function, the maximum N, P, and K application rates were 229.8, 80.5, and  $26.4\text{kg}/\text{ha}$ , respectively. According to the effects of pure N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{K}_2\text{O}$  application rates on grain yield, a three-factor fertilization mathematical model was established. Further analytical analysis showed that oat grain yield was  $\geq 4950.0\text{kg}/\text{ha}$  when the ratio of  $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}$  fertilization was  $1.54:1:0.23$  and the fertilization range was  $148.8\sim 198.3\text{kg}/\text{ha}$  for N,  $>112.5\text{kg}/\text{ha}$  for  $\text{P}_2\text{O}_5$ , and  $14.3\sim 37.2\text{kg}/\text{ha}$  for  $\text{K}_2\text{O}$ . The conclusion of this study had practical guiding significance for *Avena sativa* production under irrigation condition.

**Key words** *Avena sativa*; “3414”fertilizer scheme; Grain yield; Irrigation; Fertilization