

黄土丘陵区旱地肥料效应 与合理施肥

赵更生 兰晓泉 郑剑英
徐福利 段建南

提 要

综合安塞、定西、米脂、河曲4个试区,多年多项目的田间研究结果,分析了不同肥料的增产效益及肥料利用率,计算了不同类型区主要作物的最高施肥量和最佳施肥量及不同R值下的经济合理施肥量。根据雨量和土壤肥力的差异,将黄土丘陵区分为三大片,提出了不同地区的建议施肥量及施用技术。

黄土丘陵区占黄土高原面积的60%左右,幅员辽阔。干旱、水土流失、土壤瘠薄,使产量低而不稳。本区化肥施用起步较晚,旱地施肥的研究较少。五十年代彭琳等曾在绥德坡耕地上进行过化肥试验,氮肥增产显著。六十年代陕西省水保所在绥米地区基本农田上做过氮肥经济用肥的研究,但亩施氮素化肥仅几公斤,不能适应目前生产的需要。七十年代李鼎新对杏子河流域川水地磷肥的施用进行过较系统的研究,但对旱地施肥研究较少。近年来化肥施用量逐步增多,增产效益十分显著,一些地方化肥投入已占农业投入的一半以上,施用化肥已成为粮食增产的一项重要措施。如何针对黄土丘陵区气候、土壤特点,经济合理地施用化肥及有机肥,是当地生产中一个突出问题。本文综合黄土丘陵区安塞、定西、米脂、河曲4个试区的有关试验研究,对这一问题作一综合分析,供各地参考应用。

一、试区土壤养分状况与试验研究方法

(一) 土壤养分状况。各试区试验地土壤养分含量如表1。

从表1可以看出,地处陇中半干旱地区的定西试区,以黑垆土、灰钙土为主,有部分黄绵土,土壤养分含量较高,坡度较缓,为中度侵蚀区。该试区大致可代表六盘山以西,甘肃清水、秦安、武山、漳县一线以北,榆中、渭源以东地区。本区土壤全氮含量在川台地、梯田和近村缓坡地为0.1%左右,其余坡地平均含量也达0.08%,远高于其它试区。碱解氮和磷素状况亦优于其它试区。安塞试区属极强度侵蚀区,土壤以黄绵土为主,肥力低下。该试区可以代表山西保德、陕西佳县、绥德、子长一线以南地区。土壤全氮含量在川台地和塬地为0.06%左右,坡地为0.036—0.039%,碱解氮和速效磷含量很低。米脂、河曲两个试区可代表上述界线以北的砂黄土地带,为剧烈侵蚀区,土壤以黄绵土、绵砂土为主,质地粗,保肥力差,土壤养分含量极低,全氮含量0.025—0.035%,碱解氮和速效磷含量亦低于安塞试区。

表1 试区土壤养分含量

试 区	土 地 类 型	有 机 质 (%)	全 氮 (%)	全 磷 (%)	碱 解 氮 (ppm)	速 效 磷 (ppm)	速 效 氮 (ppm)
定 西	川 台 地	1.15	0.096	0.070	68.7		7.3
	老梯田、二阴缓坡	1.12	0.099	0.061	69.9		6.1
	梁峁顶、陡坡	0.80	0.080	0.059	84.8		6.0
安 塞	川 地	0.76	0.058	0.060	40.9	19.0	4.1
	塌 地	0.90	0.060			12.2	6.9
	梯 田	0.39	0.036		31.4	13.4	5.5
	坡 地	0.49	0.039	0.054	31.7	15.2	1.7
米 脂	川 水 地	0.42	0.030		31.2		3.1
	梯 田	0.25	0.025		23.2		4.5
河 曲	梯 田	0.40	0.035	0.051	13.2		2.8

我们将不施肥地块的生物产量所累积的养分,作为该季土壤供肥能力的综合指标。根据试验测定,对春小麦而言,定西试区高肥力的川台地每亩可供氮3.98kg,约占20cm土层全氮含量的2.76%;中肥力的老梯田和二阴缓坡地,每亩供氮2.25kg约占全氮含量的1.72%;低肥力的坡耕地每亩供氮1.57kg,约占全氮含量的1.21%。土壤供磷能力以 P_2O_5 计,每亩高肥力地1.01kg、中肥力地0.66kg、低肥力地0.4kg。对谷子而言,低肥力地供氮1.23kg,约占全氮含量的1.03%,供 P_2O_5 0.45kg。安塞试区肥力较高的川地和塌地,每亩对谷子供氮2.42—4.55kg,平均3.14kg,约占全氮含量的3.57%;低肥力的坡地和地形部位较高的梯田,每亩供氮1.29—1.47kg,平均1.34kg,约占全氮含量的2.41%,每亩供 P_2O_5 能力:川地为0.87—1.44kg,平均为1.09kg,塌地0.68kg、梯田1.02kg、坡地0.21kg;每亩坡地对荞麦供氮0.38kg,供 P_2O_5 0.11kg。从以上的结果可以看出,定西试区土壤养分含量较高,但由于海拔高、气温低,土壤养分转化速度慢,土壤供肥能力并不高。其它试区土壤养分非常贫乏,产量不高,要获得高产,必须增加对土地的投入,以补充养分的亏缺并培肥土壤,提高土地生产能力。

(二) 田间试验方法

1. 不同肥料的增产效益试验。安塞试区小区面积:梯田、川地为1/20亩,坡地为1/30亩,塌地1/40亩,三次重复,随机排列。其余试区大致相同。

2. 高产施肥的数学模型试验。定西、米脂两试区采用二元二次饱和D-最优设计,对氮磷两因素进行了多点无重复试验,并进行了方差分析;安塞试区采用正交旋转组合设计,对有机肥、氮、磷三因素进行了研究,通过了方差分析;河曲试区采用三元二次饱和D-最优设计,对有机肥、氮、磷三因素进行研究。安塞试区采用二元二次饱和D-最优设计对氮磷两因素进行研究,试验均为二次重复,取其平均值进行计算,所得数学模型,用相关系数法进行检验。

二、研究结果与讨论

(一)肥料效应。黄土丘陵区土壤一般钾素含量丰富，目前在低产水平下，尚不致有缺钾问题。安塞试区和延安地区的试验结果，在粮食作物上钾肥增产不显著，甚至不显效果，故在此只讨论氮磷肥的效应。丘陵区土地类型多样，各种类型土地由于地形部位、水热条件等不同，养分含量有很大差异，故肥料效果亦极不相同。部分试区对不同土地类型、不同作物的氮磷及有机肥肥效做了大量的试验研究，获得了丰富的资料。

1. 单纯施用无机肥料的化肥效应。安塞试区的试验结果如表2。磷肥单纯施除坡地荞麦有良好肥效外，其余土地类型及作物效果均不佳，盈利很少。氮肥单施的肥效，视土壤速效磷含量而差异很大，坡地速效磷极缺，每kg氮仅增产谷子3.3kg，荞麦减产0.57kg。梯田和塌地速效磷含量较高，每kg氮增产谷子在梯田为26.36kg，塌地12.96kg。亩盈利和投资效益，前者为62.31元和9.57元/元，后者为27.07元和4.16元/元。川地每kg氮增产谷子6.8kg，投资效益1.73元/元。氮磷配合施用增产效果良好，比对照增产52.9—195.76%，比有机肥增产35.81—49.69%，每kg养分增产谷子：梯田20.88kg，坡地、塌地、川地均超过10kg；每亩梯田获利66.52元，投资效益6.74元/元，每亩塌地和川地获利28元以上，每亩坡地获利18.59元，投资效益显著提高。氮磷配合施用坡地荞麦比对照增产419.51%，比单纯施磷增产60.8%，每kg养分增产9.79kg，获利12.25元/亩，投资效益为两种肥料单施效益的4.78倍。

2. 有机无机肥配合施用的化肥效应。有机无机肥配合施用，不但可获得高产，而且可以改善土壤的理化性状，保持和提高土壤肥力。有机肥与氮配合施用，由于有机肥主要提供的是磷素，改善了土壤磷素状况，故在多数情况下，有机肥与氮肥配合，氮肥的效应更好。试验结果，每kg氮增产谷子在坡地12.32kg，川地11.78kg；投资效益坡地为3.21元，为氮肥单施效益的10倍，川地比单施氮提高1倍以上。梯田和塌地由于土壤速效磷含量较高，有机肥与氮肥配合施用比单施有机肥增产50%以上，投资效益下降。有机肥与氮磷配合施用产量最高，较单施有机肥增产50.64—79.65%，亩利润除梯田外也最高，每kg养分增产谷子12.72kg，投资1元获利3元以上。有机肥与氮磷配合施用，坡地荞麦比单纯施有机肥增产211.5%，每kg养分增产荞麦9.1kg，投资效益有所下降。

定西试区试验结果表明，土粪（质量较差的有机肥）与磷配合施用，每kg P_2O_5 增产小麦6.46kg、豌豆7.0kg、胡麻1.06kg、洋芋26.7kg；土粪与氮配合施用，每kg氮增产小麦8.14kg、豌豆3.6kg、胡麻4.09kg、洋芋35.8kg；土粪与氮磷配合施用，每kg养分增产小麦7.99kg、豌豆5.35kg、胡麻2.93kg、洋芋4.32kg。这也是有机肥与氮磷配合施用产量最高的方法，配合施用的结果优于单施。

3. 氮磷肥的肥料利用率。肥料利用率用差减法进行计算。安塞试区结果(表3)表明，单施的氮肥利用率，坡地最低仅10.75%，梯田最高为40.67%，平均为30.59%；磷肥单施的肥料利用率，梯田最低为1.7%，川地最高为11.19%，平均为5.52%；氮磷配合施用，显著提高了氮磷肥的利用率，氮肥利用率为29.98—46.37%，平均37.47%，磷肥利用率为15.97—31.23%，平均22.46%；有机肥与氮配合施用，氮肥利用率为32.23

表2 不同肥料的增产效益和经济效益

地及作 理类型	处 理	产 量 (kg/亩)	比 CK 增 产 (%)	比 CK 增 产 (%)	每 增 kg 产 养 分	增 折 价 (元 粮 食)	化 肥 (元 投 资)	利 润 (元/亩)	投 获 利 (元)	备 注
川 地 谷 子	CK	153.3								每kg氮以1.18元, P_2O_5 以1.52元, 每kg养麦0.40元, 谷子0.473元计。M为有机肥, 用厩肥。
	P	174.4	13.8		8.8	9.98	3.54	6.44	1.82	
	N	192.0	25.2		6.8	18.31	6.70	11.61	1.73	
	NP	234.4	52.9		10.2	38.36	10.24	28.12	2.75	
	M	172.6	12.6							
	NN	239.5		38.8	11.8	31.64	6.70	24.94	3.72	
	NPM	260.0		50.6	12.2	41.34	10.24	31.19	3.05	
塬 地 谷 子	CK	95.0								
	P	96.0	1.0		0.45	0.47	3.03	-2.56	-0.84	
	N	166.0	74.7		12.9	33.58	6.51	27.07	4.16	
	NP	176.0	85.3		10.5	38.31	9.54	28.77	3.02	
	M	124	30.5							
	MN	188		51.6	11.6	30.27	6.51	23.76	3.65	
	MNP	209.3		68.8	11.3	40.35	9.54	30.81	3.23	
梯 田 谷 子	CK	82.5								
	P	93.5	13.3		4.97	5.20	3.36	1.84	0.55	
	N	228.0	176.4		26.4	68.82	6.51	62.31	9.57	
	NP	244.0	195.8		20.9	76.39	9.87	66.52	6.74	
	M	163.0	97.6							
	MN	245.0		50.3	14.9	38.79	6.51	32.88	4.96	
	MNP	268.5		64.7	13.6	49.90	9.87	40.03	4.06	
坡 地 谷 子	CK	70.0								
	P	78.1	11.6		5.16	3.83	2.38	1.45	0.61	
	N	81.4	16.3		3.30	5.39	4.10	1.29	0.31	
	NP	123.0	75.7		10.6	25.07	6.48	18.59	2.87	
	M	86.0	22.9							
	MN	122.5		42.4	12.3	17.26	4.10	13.16	3.21	
	MNP	154.5		79.6	13.6	32.40	6.48	25.92	4.00	
坡 地 养 麦	CK	12.3								
	P	40.7	230.9		10.4	11.36	3.25	8.11	2.50	
	N	9.6	-21.9		-0.57	-1.08	3.80	-4.88	-1.28	
	NP	63.9	419.5		9.8	20.64	7.05	13.59	1.83	
	M	22.6	83.7							
	MN	36.8		61.06	4.3	5.68	3.80	1.88	0.49	
	MNP	70.4		211.5	9.1	19.12	7.05	12.07	1.71	

—42.47%，平均35.26%；有机肥与氮磷配合施用，氮肥利用率为最高，达34.54—48.47%，平均为39.55%，磷肥的利用率，梯田最低，为-2.9%，坡地最高为34.43%，平均13.49%。就是说，亩施1000kg有机肥，可基本满足梯田谷子对磷肥的需要。

米脂试区的的结果见表4。从表4可以看出，玉米的氮肥利用率，氮肥单施时为

表 3 不同土地类型谷子的肥料利用率 (%) (安塞)

处 理	坡 地		梯 田		塌 地		川 地		备 注
	N	P	N	P	N	P	N	P	
P		4.37		1.7		4.84		11.19	• 由于未设 MP 处理, 故 N 肥利用率仅以 MNP 减去 M 进行计算。
N	10.75		40.69		37.77		33.15		
NP	29.98	19.84	46.37	31.23	40.72	15.97	32.82	22.32	
MN	32.44		33.89		32.23		42.47		
MNP	48.47	34.43	34.54	-2.9	36.90	12.92	38.30	9.53	

28.1—58.5%，氮磷配合施用时可则为33.8—77.3%，且低肥力地的利用率高于高肥力地块。谷子、洋芋的氮磷肥利用率都特别低，氮磷配合施用和单施的肥料利用率没有什么差别，这可能与施肥数量及时间过分集中，以后又遇干旱，以致肥料未充分发挥效益有关，有待进一步研究。

表 4 不同作物的肥料利用率 (%) (米脂)

处 理		玉 米			谷 子			洋 芋		备 注
		<200	200—400	>400	<100	100—200	<200	<800	>800	
单施氮	N	58.5	37.2	28.1	11.5	9.8	7.5	16.9	12.1	肥力水平用地力基础产量 (kg/亩) 表示, 下同
氮 磷	N	77.3	44.3	33.8	9.1	9.6		16.6	13.5	
配 合	P ₂ O ₅	14.1	12.9	6.9	5.9	4.1		4.2	9.8	

(二) 施肥数学模型与增产效应.各试区试验所取得的数学模型见表 5—表 6。用这些模型可以计算出不同氮磷用量下的产量(三元二次方程有机肥 x_1 取 0 水平, 即变为二

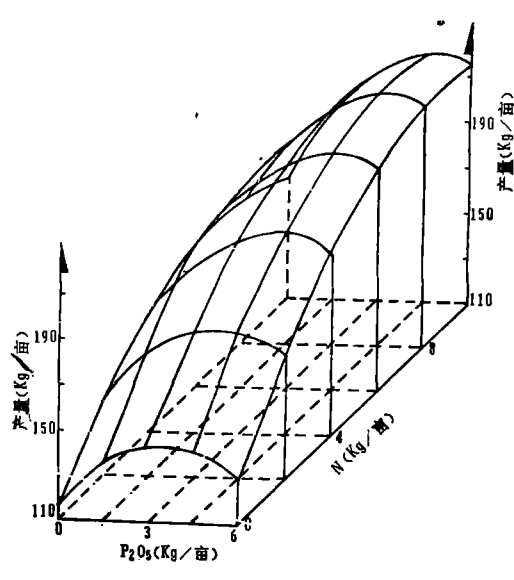


图1 安塞川地谷子氮磷效应曲面图

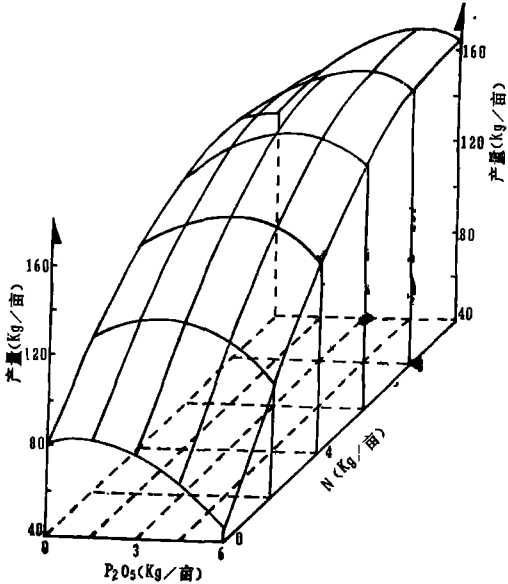


图2 安塞梯田谷子氮磷效应曲面图

表 5 不同作物的二元二次数学模型

试 区	作 物	土地类型	肥力水平 (kg/亩)	有机肥 用 量 (kg/亩)	肥 效 反 应 方 程 ($y = \text{产量}$ $x_2 = N$ $x_3 = P_2O_5$)
安 塞	玉 米	川 地	>400	1000	$y = 544 + 11.859x_2 + 5.076x_3 + 0.197x_2x_3$ $- 0.866x_2^2 - 0.373x_3^2$
	荞 麦	梯 田	>200	500	$y = 24 + 18.826x_2 + 6.137x_3 + 0.3077x_2x_3$ $- 1.864x_2^2 - 1.063x_3^2$
		坡 地	<200	0	$y = 10.7 + 11.301x_2 + 28.262x_3 + 0.191x_2x_3$ $- 1.931x_2^2 - 4.251x_3^2$
定 西	春小麦	川台地	高 肥 力	1500	$y = 152.56 + 21.93x_2 + 8.76x_3 - 0.25x_2x_3$ $- 1.83x_2^2 - 0.84x_3^2$
		梯 田	中 肥	1500	$y = 111.22 + 14.66x_2 + 9.29x_3 + 0.15x_2x_3$ $- 1.33x_2^2 - 0.62x_3^2$
		坡 地	低 肥	1500	$y = 73.67 + 10.76x_2 + 12.02x_3 + 0.52x_2x_3$ $- 0.74x_2^2 - 1.1x_3^2$
	豌豆			1500	$y = 138.16 + 5.69x_2 + 14.67x_3 - 0.16x_2x_3$ $- 0.61x_2^2 - 1.16x_3^2$
	胡 麻			1500	$y = 76.68 + 11.50x_2 + 6.52x_3 - 0.1x_2x_3$ $- 0.91x_2^2 - 0.73x_3^2$
	洋 芋			1500	$y = 1156.9 + 90.05x_2 + 44.85x_3 + 1.56x_2x_3$ $- 4.85x_2^2 - 3.60x_3^2$
米 脂	玉 米	川 地	<200	0	$y = 148.5 + 49.423x_2 + 20.91x_3 + 0.679x_2x_3$ $- 2.425x_2^2 - 1.116x_3^2$
			200—400	0	$y = 280.1 + 28.366x_2 + 23.784x_3 + 0.241x_2x_3$ $- 1.527x_2^2 - 0.942x_3^2$
			>400	0	$y = 450.5 + 20.701x_2 + 9.255x_3 + 0.281x_2x_3$ $- 1.019x_2^2 - 0.481x_3^2$
	谷 子	梯 田	<100	0	$y = 78.3 + 5.294x_2 + 7.781x_3 - 0.035x_2x_3$ $- 0.148x_2^2 - 0.207x_3^2$
			100—200	0	$y = 162.0 + 5.379x_2 + 4.338x_3 - 0.041x_2x_3$ $- 0.106x_2^2 - 0.212x_3^2$
			>200	0	$y = 248.4 + 3.16x_2 + 2.459x_3 - 0.017x_2x_3$ $- 0.056x_2^2 - 0.106x_3^2$
	洋 芋	梯 田	>800	0	$y = 1024 + 39.287x_2 + 79.947x_3 + 0.299x_2x_3$ $- 1.116x_2^2 - 3.345x_3^2$

元二次方程)。根据计算结果绘制成氮磷效应曲面图 1—图 4。从曲面图上可以清楚地看出,每一个产量都是氮磷共同作用的结果。将图 1 和图 2 进行比较,可以看出氮肥的效果梯田大于川地;磷肥的效果川地大于梯田。图 3 和图 4 相比,定西春小麦氮肥和磷肥的增产效果都是坡地大于川地。氮磷效应曲面图虽可立体的反映出氮磷的综合效应,但不够直观。为了更清楚地说明问题,我们将其绘制成不同磷量下的氮肥效应曲线图 5—图 14 和不同氮量下的磷效应曲线图 15—图 24。

从图 5—图 14 可以看出,随着氮肥用量的增加,产量也随着增加;氮肥用量到某一限量后,产量反而下降。就是说,氮肥用量有一最高限度,其拐点随磷肥用量的增加而向右偏移;磷肥也是如此。

表 6

谷子、糜子的三元二次数学模型

试区及作物	土地类型	试验方法	肥料用量(kg/亩)				肥 效 反 应 方 程 (x_1 = 有机肥, x_2 = N, x_3 = P_2O_5)
			上 限			下 限	
			x_1	x_2	x_3		
安塞谷子	川地	二次正交旋转组合设计	2000	10	6	0	$y = 204.75 + 21.47x_1 + 20x_2 + 9.755x_3$ $- 6.24x_1x_2 - 2.175x_1x_3 + 3.325x_2x_3$ $- 3.16x_1^2 - 9.56x_2^2 - 7.43x_3^2$
	梯田	同上	2000	10	6	0	$y = 152.72 + 18.0307x_1 + 25.55173x_2 + 0.4707x_3$ $+ 6.1333x_1x_2 - 10.3333x_1x_3 + 5.8667x_2x_3$ $+ 2.98x_1^2 - 11.3393x_2^2 - 5.6353x_3^2$
河曲糜子	梯田	二次饱和D-最优设计	4000	12	10	0	$y = 210.5 + 191x_1 + 31.1x_2 + 15.1x_3 + 12.3x_1x_2$ $- 11.0x_1x_3 + 6.0x_2x_3 + 25.9x_1^2 - 71.9x_2^2 - 15.0x_3^2$

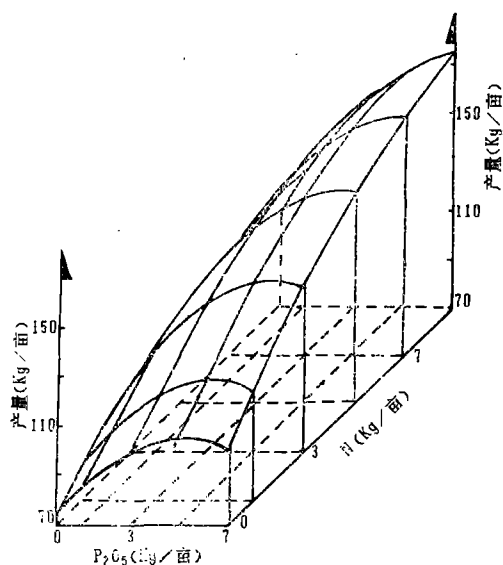
注： x_1, x_2, x_3 均为规范化变量。

图 3 定西川地小麦氮磷效应曲面图

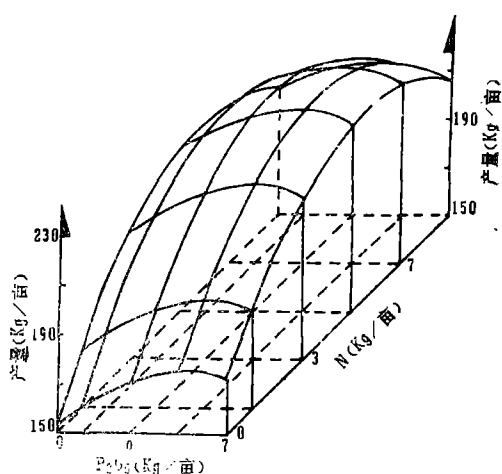


图 4 定西坡地小麦氮磷效应曲面图

从效应曲线还可以看出,曲线斜率最大的部分,即肥料效益最佳段位。定西试区春小麦川地每亩施N为3 kg,坡地为5 kg以下,洋芋为6 kg、豌豆2 kg、胡麻3 kg以下;安塞梯田和川地每亩谷子氮均在5 kg以下;米脂试区每亩梯田洋芋氮7.5 kg、高肥川地玉米在7 kg以下;河曲试区每亩梯田糜子在5 kg以下。

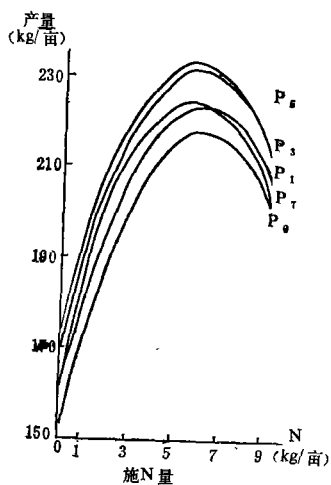


图5 定西川地小麦

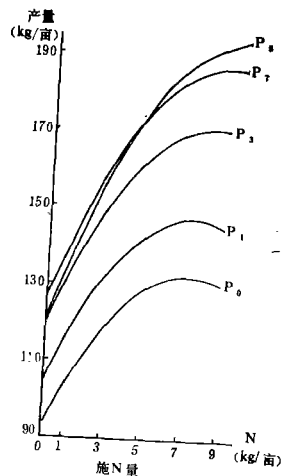


图6 定西坡地小麦

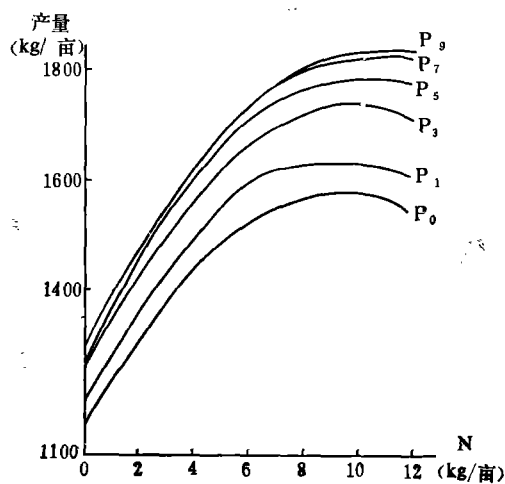


图7 定西洋芋

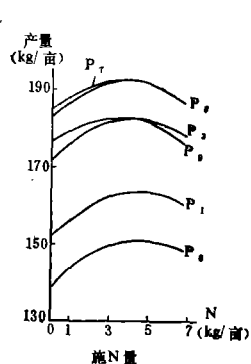


图8 定西豌豆

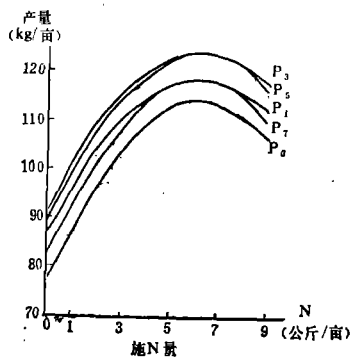


图9 定西胡麻

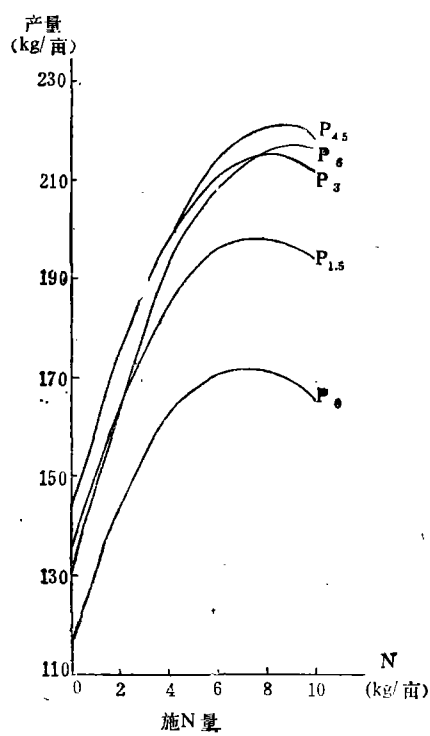


图10 安塞川地谷子

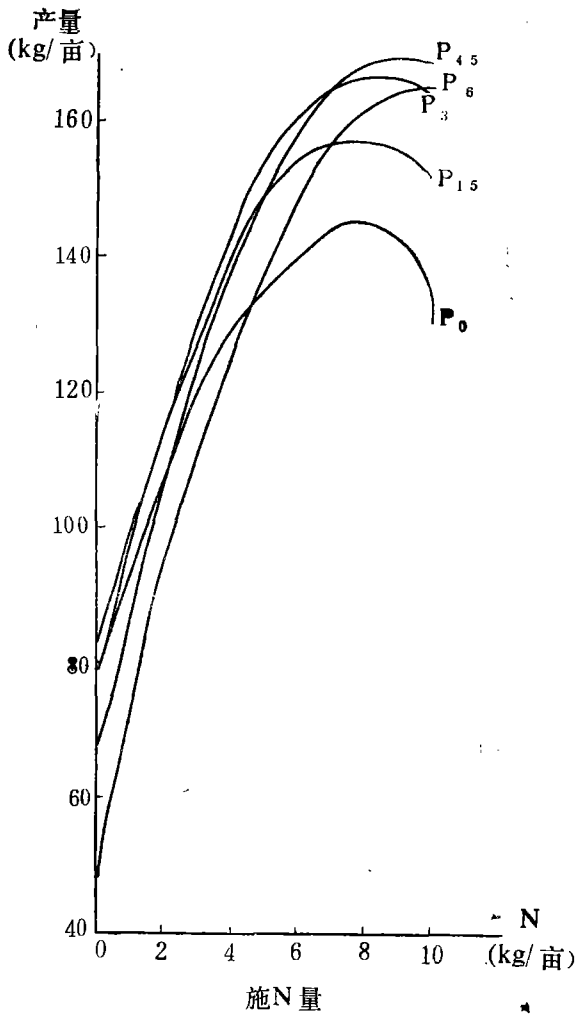


图11 安塞梯田谷子

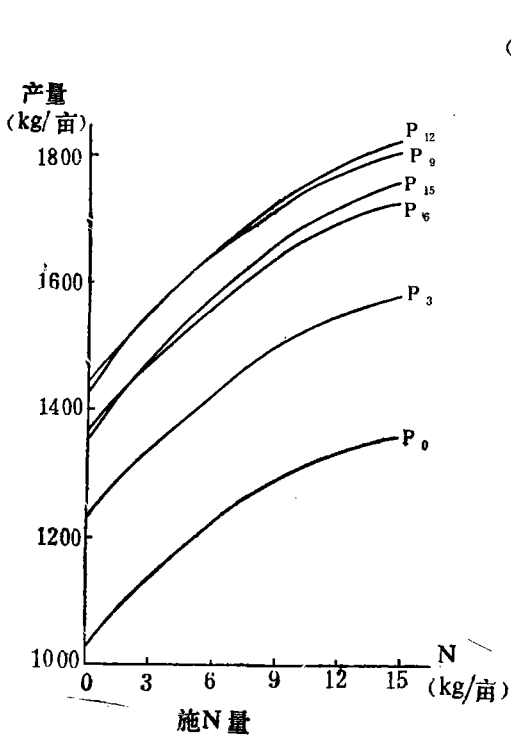


图12 米脂洋芋

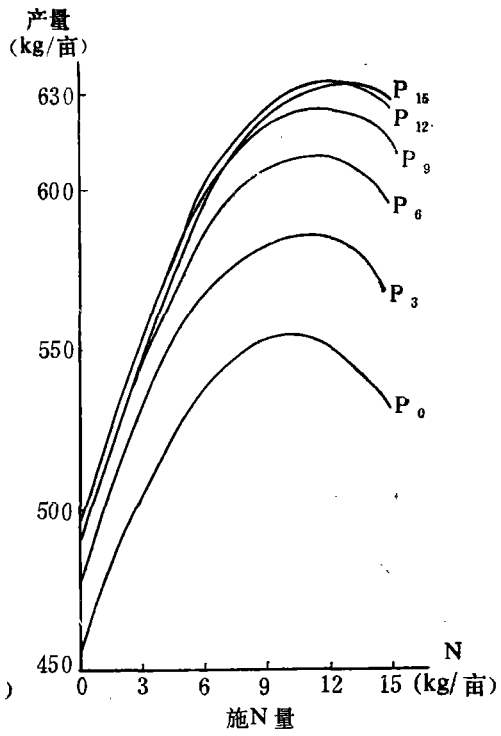


图13 米脂川地玉米

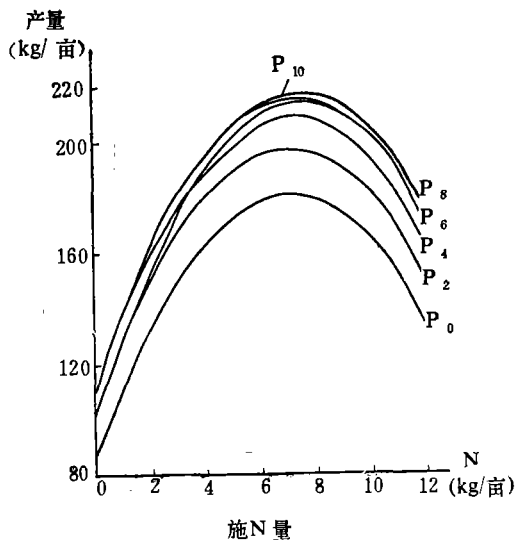


图14 河曲梯田糜子

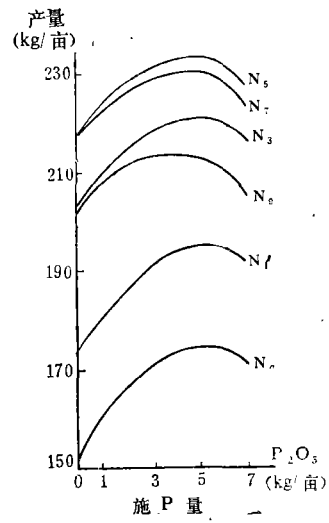


图15 定西川地小麦

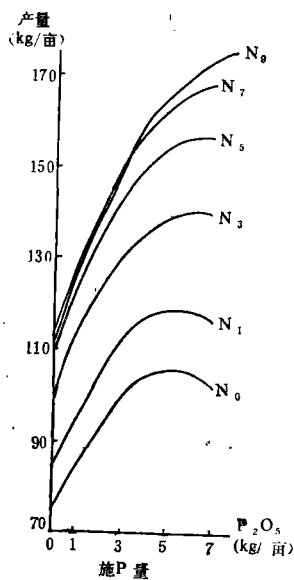


图16 定西坡地小麦

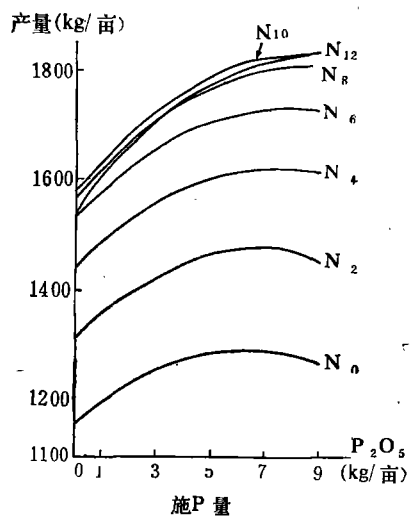


图17 定西洋芋

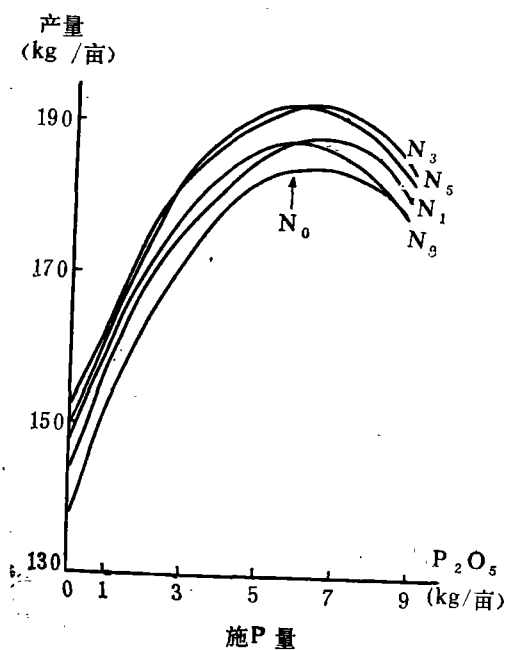


图18 定西豌豆

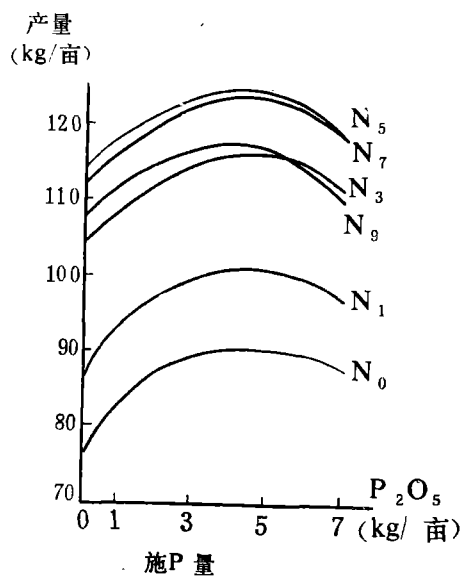


图19 定西胡麻

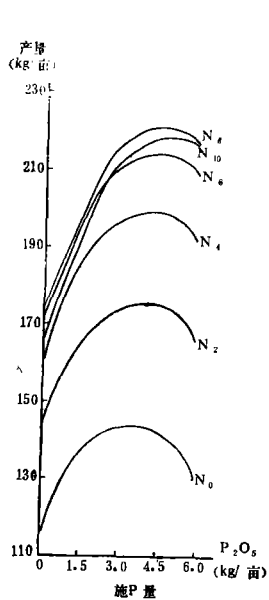


图20 安塞川地谷子

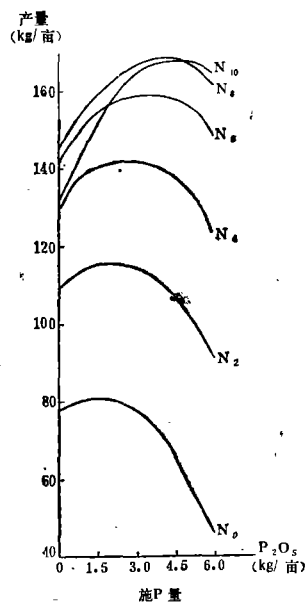


图21 安塞梯田谷子

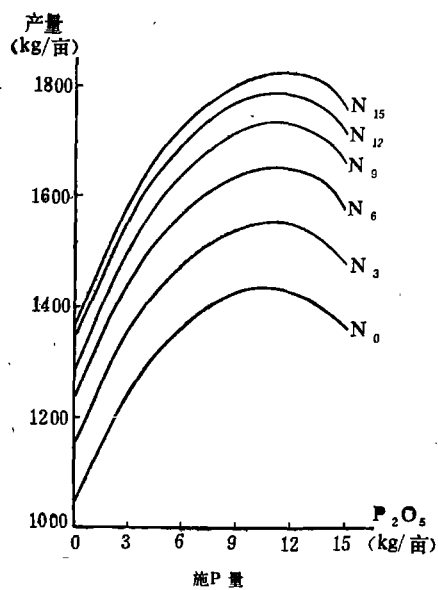


图22 米脂梯田洋芋

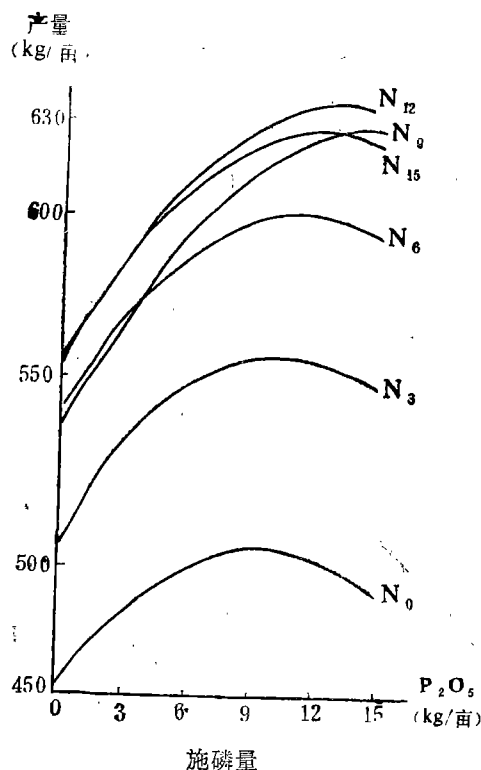


图23 米脂川地玉米

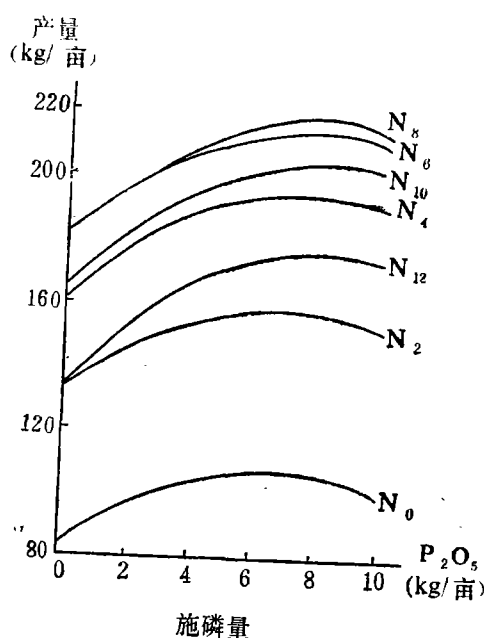


图24 河曲梯田糜子

从图15—图24可以看出，磷肥曲线斜率最大部分，定西试区春小麦川台地，每亩 P_2O_5 为 2 kg，坡地 3 kg 以下，洋芋 4 kg，豌豆 3.5 kg，胡麻 2 kg 以下；安塞试区每亩谷子 P_2O_5 ：川地 2.5 kg、梯田 1.5 kg 以下；米脂试区每亩梯田洋芋 P_2O_5 为 7.5 kg，高肥川地玉米 4.5 kg 以下；河曲试区每亩梯田糜子 P_2O_5 为 3 kg 以下。这一结果对生产实践有现实意义。它告诉我们，在肥料不足的情况下，各地试用氮磷肥可控制在上述数量以下，这样能够充分发挥有限化肥的增产作用。

(三) 肥料施用量

1. 最高施肥量和最佳施肥量。三元二次方程将有机肥 (x_1) 固定，用降维法将其转换为二元二次方程。二元二次方程可用下列通式表示：

$$y = b_0 + b_1x_2 + b_2x_2^2 + b_3x_3 + b_4x_3^2 + b_5x_2x_3$$

对方程求一阶偏导数并令其等于 0，即边际产量等于 0，这时作物产量达最高点，此时的施肥量即为最高施肥量。

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = b_1 + 2b_2x_2 + b_5x_3 = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_3} = b_3 + 2b_4x_3 + b_5x_2 = 0 \quad (2)$$

解联立方程得最高施肥量计算公式为：

$$x_2 = \frac{b_3b_5 - 2b_1b_4}{4b_2b_4 - b_5^2} ; \quad x_3 = \frac{b_1b_5 - 2b_2b_3}{4b_2b_4 - b_5^2}$$

表7 各试区不同作物的最高施肥量与最佳施肥量

试区	作物	土地类型	肥力水平 (kg/亩)	有机肥 用量 (kg/亩)	最高施肥量 (kg/亩)		最高施肥 时的产量 (kg/亩)	最 佳 施 肥 时				增产产品 折价(元)	获 利 (元/亩)	投资效益 (元/元)
					N	P ₂ O ₅		施肥量(kg/亩)		N:P ₂ O ₅				
								N	P ₂ O ₅					
定	春小 麦	川 台	高 肥	1500	6.2	4.3	233.7	5.69	2.73	1:0.48	231.9	43.77	32.91	3.03
		梯 田	中 肥	1500	6.0	8.2	193.2	5.0	5.9	1:1.18	188.8	42.82	27.95	1.83
		坡 地	低 肥	1500	10.0	7.3	174.7	8.0	6.1	1:0.76	170.0	53.17	34.43	1.84
	豌豆	坡 地	>100	1500	3.9	6.1	193.6	2.0	4.8	1:2.4	189.4	24.90	15.24	1.58
西	胡 麻		<100	1500	6.1	4.0	124.9	5.6	3.2	1:0.57	124.5	47.82	36.35	3.17
	洋芋		>1000	1500	10.76	8.7	1828.0	9.4	6.62	1:0.70	1816.6	79.16	59.01	2.74
安	谷 子	川 地	100—200	1000	8.6	4.35	221.3	7.1	3.72	1:0.52	217.8	48.15	34.12	2.43
	玉 米	梯 田	<100	1000	8.9	4.7	169.3	7.25	2.82	1:0.39	164.5	33.54	20.70	1.61
塞	荞 麦	川 地	>400	1000	7.9	3.7	613.1	5.5	3.0	1:0.56	598	21.11	10.06	0.91
		梯 田	<20	500	5.35	3.33	85.6	4.40	1.75	1:0.4	80.6	22.64	14.79	1.88
		坡 地	<20	0	3.10	3.39	76.1	2.31	2.93	1:1.27	74.1	25.33	18.18	2.53
	玉 米	川 地	<200	0	12.0	13.0	578.8	1.11	11.0	1:0.99	576	167.15	137.33	4.60
米	米		200—400	0	10.5	14.0	593.4	9.2	11.7	1:1.27	587	120.00	91.36	3.19
			<400	0	12.0	13.1	635.0	9.8	8.5	1:0.86	622	67.06	42.58	1.74
		梯 田	<100	0				8.1	10.34	1:1.28	166.9	41.80	16.63	0.66
	谷 子		100—200	0				13.0	1.4	1:0.11	213.8	25.92	17.49	8.45
脂	洋芋		>200	0		14.4		4.6	0	4.6:0	261.8	6.34	0.91	0.17
		梯 田	>800	0		10.5		14.4	9.3	1:0.64	1810	94.30	63.17	2.03
		梯 田	<100	2000	7.4	7.8	218.4	6.7	5.1	1:0.76	213.6	61.65	45.99	2.90

根据试验结果，将获得的各试区不同作物的最高施肥量列于表 7，超出此量时产量反而下降。将表 7 结果按地区将各种作物进行平均后则可以看出，氮的每亩最高用量，定西为 7.04kg，安塞为 6.96kg，二者差异不大；河曲每亩施用有机肥 2000kg，氮的最高用量仍达 7.4kg。磷肥每亩最高施用量以 P_2O_5 计，定西为 6.39kg，安塞为 5.63kg，河曲糜子为 7.8kg。米脂试区最高施肥量远高于其它试区，每亩玉米氮磷最高施用量分别为 11.5kg、13.3kg，谷子、洋芋氮超过 15kg，已超出试验处理范围， P_2O_5 为 8—14.4kg。除土壤养分含量极低外，试验中没有施用有机肥是一个重要原因。

同一地区不同作物之间最高施肥量差异也很大。定西试区氮每亩最高施用量，洋芋和坡地春小麦 10kg 以上，胡麻和川台地、梯田的春小麦 6—6.2kg、豌豆 3.1kg，为最低；安塞试区川地和梯田的谷子、玉米每亩为 8—9kg，而荞麦只有 3—5kg。 P_2O_5 每亩最高施用量：定西试区洋芋 8.7kg，为最高，胡麻和川地春小麦为 4kg，坡地春小麦 8kg，豌豆 6kg；安塞试区玉米最高为 8.7kg，谷子 4.7kg，荞麦最低，为 3.5kg 左右。

最佳施肥量，亦即最大经济效益施肥量，当边际产量 $\frac{\partial y}{\partial x_2} = \frac{pc_2}{py}$ 和 $\frac{\partial y}{\partial x_3} = \frac{pc_3}{py}$ 时，边际利润等于 0，每亩的经济效益最高，计算公式如下：

$$N \text{ 最佳施用量 } px_2 = \frac{b_5(b_3 - \frac{pc_3}{py}) - 2b_4(b_1 - \frac{pc_2}{py})}{4b_2b_4 - b_5^2}$$

$$P_2O_5 \text{ 最佳施用量 } px_3 = \frac{b_5(b_1 - \frac{pc_2}{py}) - 2b_2(b_3 - \frac{pc_3}{py})}{4b_2b_4 - b_5^2}$$

Pc_2 为 N 价格（元/kg，三因素方程转换的二元二次方程，则为元/kg×级差），

Pc_3 为 P_2O_5 价格（元/kg，三因素方程转换的二元二次方程，则为元/kg×级差），

Py 为产品价格（元/kg）。

各试区采用的肥料价格差异很大，产品价格亦不尽相同，为便于比较，统一采用单位为元/kg：

N：1.18、 P_2O_5 ：1.52、小麦：0.552、豌豆：0.486、胡麻：1.16、洋芋：0.12、谷子：0.473、糜子：0.50、玉米：0.391、荞麦：0.40。

各试区的试验结果进行计算，得最佳施肥量见表 7。将各种作物进行平均，其每亩最佳施肥量：N 在定西为 5.81kg、在安塞为 5.34kg、在米脂 11kg、在河曲糜子 6.7kg； P_2O_5 在定西为 4.88kg、安塞 2.87kg、河曲糜子 5.1kg、米脂为 7.87kg。可以看出，米脂用量最高，定西和安塞氮的用量差异不大，磷的用量定西大于安塞。就同一地区不同作物来看，最佳施肥量定西试区以洋芋最大，每亩 N 为 9.4kg、 P_2O_5 6.6kg，即 N： P_2O_5 = 1：0.7；春小麦 N 5—8kg，平均 6.23kg，每亩 P_2O_5 2.73—6.1kg，平均 4.91kg，N： P_2O_5 = 1：0.48—1.18；豌豆 N 2kg、 P_2O_5 4.8kg，N： P_2O_5 = 1：2.4。安塞试区谷子 N 7.1—7.25kg、 P_2O_5 3.72—2.82kg，N： P_2O_5 = 1：0.52—0.39，坡地荞麦 N 2.31kg、 P_2O_5 2.93kg，N： P_2O_5 = 1：1.24。从获利和投资效益看，以中低产田的玉

米获利最多, 亩获利91—137元, 投资1元获利3.19—4.60元; 其次为洋芋, 亩获利59—63元, 投资1元获利2.03—2.74元; 糜子、胡麻、小麦亩获利均在30元以上, 投资效益2.2元/元以上。

2. 最佳施肥量与有机肥量的关系。根据安塞、河曲两试区, 有机肥、氮、磷三因素研究所得方程计算结果如表8。

表8 不同有机肥用量下的最佳施肥量

试 区	土地类型	作 物	有机肥(kg/亩)	最 佳 施 肥 量 (kg/亩)		产 量 (kg/亩)
				N	P ₂ O ₅	
安	川 地	谷 子	0	9.0	4.46	192
			500	8.28	4.10	207.3
			1000	7.1	3.72	217.8
			1500	6.2	3.38	226.5
			2000	5.28	3.10	233.0
塞	梯 田	谷 子	0	7.13	5.85	155.7
			500	7.13	3.61	157.5
			1000	7.25	2.82	164.5
			1500	7.33	1.46	189.4
			2000	7.42	0.12	201.0
河 曲	梯 田	糜 子	0	6.32	7.45	229.7
			1000	6.5	5.98	212.6
			2000	6.71	5.1	213.5
			3000	6.92	4.42	228.6
			4000	7.14	3.34	257.7

从表8可以看出, 川地谷子随着有机肥用量的增加, 氮磷的最佳用量均在减少; 大体上亩施有机肥增加1000kg, N减少1.9kg, P₂O₅减少0.7kg。在梯田上对糜谷而言, N最佳用量随有机肥用量的增加而略有增加, 主要是P₂O₅最佳用量下降, 每增加1000kg有机肥, P₂O₅下降在安塞为2.85kg、河曲为1.05kg。这一结果在生产实践中有应用价值, 可根据有机肥的用量来调节N、P₂O₅的用量。

3. 不同R值下的经济合理施肥量。在最佳施肥量时, 边际产值等于边际成本, 此时边际利润等于0。虽然单位面积施肥利润最大, 但是单位量肥料的经济效益明显下降。故在农业生产实践中, 为了保证肥料投资获得稳定且较高的利润, 避免自然灾害带来的风险, 常采用大于0的边际利润率值(R)。不同R值下的经济合理施肥量计算公式如下:

$$x_2(N) = \frac{b_5[b_3 - (R+1)\frac{pc_3}{py}] - 2b_4[b_1 - (R+1)\frac{pc_2}{py}]}{4b_2b_4 - b_5^2}$$

不同R值下的经济合理施肥量

表 9

试区	作物	土地类型	肥力水平 (kg/亩)	R=0.5				R=0.7				R=1.0			
				N (kg/亩)	P ₂ O ₅ (kg/亩)	产量 (kg/亩)	利润 (元/亩)	N (kg/亩)	P ₂ O ₅ (kg/亩)	产量 (kg/亩)	利润 (元/亩)	N (kg/亩)	P ₂ O ₅ (kg/亩)	产量 (kg/亩)	利润 (元/亩)
定西	春小麦	川台		5.43	1.95	228.9	32.75	5.32	1.64	22.74	32.52	5.17	1.17	224.8	31.98
		梯田		4.57	4.71	183.7	27.47	4.39	4.25	181.0	26.89	4.10	3.55	176.3	25.7
		坡地		6.94	5.72	166.1	34.12	6.53	5.56	164.1	33.74	5.91	5.33	160.6	32.89
西	洋芋	坡	>1000	8.70	5.74	1794.5	57.52	8.44	5.39	1783.7	57.06	8.00	4.86	1764.0	56.02
			<100	5.32	2.72	123	43.30	5.22	2.54	122.4	42.99	5.07	2.26	121.5	42.55
			>100	1.13	4.69	183.7	14.56	0.76	3.80	180.7	13.98	0.21	3.36	175.4	13.72
安	豌豆	地	100—200	6.48	3.34	214.2	33.72	6.20	3.16	212.2	33.38	5.77	2.90	208.7	32.63
			<100	6.40	2.07	159.0	20.24	6.06	1.77	156.0	19.67	5.56	1.33	153.7	18.43
			>400	4.25	0.11	579.4	13.84								
嘉	玉米	川地	<20	3.92	0.77	74.2	14.28	3.28	0.39	70.5	13.77				
		梯田	<20	1.92	3.15	73.3	17.98	1.76	3.05	72.3	17.93	1.59	2.92	70.5	17.71
		坡地	<200	10.65	9.89	589.6	136.9	10.50	9.59	586.3	136.39	10.20	9.00	560.4	135.34
米	荞麦	川	200—400	8.64	10.63	579.7	90.79	8.40	10.19	575.8	90.22	8.00	9.53	568.8	88.96
			>400	8.78	6.12	697.4	41.69	8.35	5.19	599.6	40.56	7.72	3.29	586.0	38.11
			<100	4.36	10.66	156.4	15.59	2.87	10.79	151.0	14.60				
脂	谷子	梯田	100—200	7.09	1.97	202.0	7.56								
			>800	12.11	9.22	1779.7	62.38	11.18	9.18	1764.0	61.65	9.79	9.13	1737.8	60.23
			<100	6.33	3.77	207.3	44.7	6.18	3.24	204.1	44.08	5.95	2.44	198.6	42.82

$$x_3(P_2O_5) = \frac{b_5[b_1 - (R + 1) \cdot \frac{pc_2}{py}] - 2b_2[b_3 - (R + 1) \cdot \frac{pc_3}{py}]}{4b_2b_4 - b_5^2}$$

计算结果如表9。此表可作为各地区根据自己具体情况，确定经济合理施肥时的参考。

(四) 肥料施用方法。根据定西试区进行的肥料秋施试验结果，在氮磷配合施用情况下，前一年秋季施肥比当年春季施肥增产胡麻30.5%、谷子56.1%、小麦10.6%，每kg有效养分多增产胡麻1.16kg、谷子1.19kg、小麦1.18kg，增产效果显著。不同肥料秋施与春施的效果有所不同：土粪、氮磷单独施用，秋施与春施无明显差异；氮磷配合秋施春小麦增产16.9%。根据植株分析结果，用差减法计算，春小麦对氮肥的利用率：秋施为46.3%，春施为27%；磷肥利用率：秋施为16%，春施为10.3%。应用 ^{15}N ($^{15}NH_4HCO_3$) 示踪试验结果，春施深4cm、8cm、12cm， ^{15}N 的利用率依次为47.4%、53.2%、53.9%，而秋施的依次为35.4%、58.4%、56.3%，秋施8—12cm， ^{15}N 利用率略高于春施。这就是说，秋施应当适当深施，才能起到应有的作用；最好用耢播施肥，施肥方向应和播种方向成一定夹角，以利于养分吸收。氮磷配合秋季深施，除可以减少氮的挥发损失，有利于根系向下延伸，利用下层土壤水分，起到以肥调水的作用外，很重要的一点是春季不翻地，可直接播种，有利于土壤保墒与作物出苗。这一研究结果，可以在土壤保肥能力较强、作物生长期短和春旱严重的地方推广。

黄土丘陵区春季降雨量很少，小麦不易及时追肥，化肥一次深施对小麦可起到良好作用。秋田生长期是雨热同步，及时追肥应无问题。氮肥是播前一次深施好，还是用作追肥好，不能一概而论。在土壤质地粗、保肥能力很低的砂黄土地带，氮肥应以追肥为主。磷肥移动性很小，作物苗期对磷很敏感，故条施于播种沟效果最好。

三、结论与建议

(一) 必须坚持有机肥和无机肥配合使用。各地的试验结果已表明，单施有机肥产量上不去。定西试区试验结果统计，每1000kg有机肥增产粮食8.1kg，亩产只有132.5kg，增产11.8%；安塞试区每1000kg有机肥一般增产谷子19.3—32kg，最高亩产只有172.6kg；河曲试区亩施4000kg有机肥，糜子亩产只有127.1kg。有机肥与氮磷肥配合施用产量最高，增产幅度最大，肥料利用率高；有机肥与氮肥配合施用亦可得到良好的效果。在当前提倡适当增施化肥的同时，防止只重视化肥而忽视有机肥的倾向。做好有机肥的积攒和堆沤工作，开辟有机肥源，实现有机肥和无机肥配合施用。

(二) 建议施肥量。黄土丘陵区属半干旱地区，加之水土流失严重，受干旱的威胁很大。而化肥的肥效和当年的降水量密切相关，但目前年度降水量无法预知。为了保证肥料投资有较大的增产几率和较稳定的利润，应根据年平均降水量，采用不同R值下的经济合理施肥量。我们建议，年降水量500mm左右，受干旱的影响较小的地区，在基本农田上可取 $R = 0 - 0.5$ 、坡地可取 $R = 0.7 - 1$ 作为建议施肥量。延安地区和山西西部地区，建议施肥量（每亩）：玉米、谷子为 $N 5.5 - 6.5kg$ 、 $P_2O_5 2 - 3.5kg$ ，梯田荞麦 $N 4kg$ 、 $P_2O_5 1 - 1.5kg$ ，坡地荞麦 $N 1.5 - 1.8kg$ 、 $P_2O_5 3kg$ 左右，坡地谷子 $N 3 -$

3.5kg、 P_2O_5 为1.5—2 kg。对年降水量在400—450mm的地区，基本农田上，可取 $R=1$ 或略大于1作为建议施肥量。以定西试区为代表的地区，建议每亩施肥量：春小麦 $N 4-5$ kg、 $P_2O_5 1.5-3$ kg，豌豆 $N 1-1.5$ kg、 $P_2O_5 3-3.5$ kg，洋芋 $N 6-8$ kg、 $P_2O_5 3-4$ kg，胡麻 $N 4-5$ kg、 $P_2O_5 2-2.5$ kg，谷子 $N 3.5-5$ kg、 $P_2O_5 2-3$ kg。以米脂、河曲为代表的沙黄土地区，建议每亩施肥量：玉米 $N 7-9$ kg、 P_2O_5 一般 $8-9$ kg，高肥地为 $3-5$ kg，洋芋 N ， P_2O_5 各 $8-9$ kg，糜子 $N 6$ kg、 $P_2O_5 2.5-3$ kg。以上数量在使用时，还应根据有机肥用量多少，具体地块的土壤肥力，前茬等情况予以增减。总的来说，雨量少而土壤肥力较高的地区应少施，雨量多而土壤肥力低的地区可适当多施。

（三）在化肥施用上应首先保证基本农田，特别是中、低产田的需要。中、低产田增产潜力大，化肥效果好，投资效益高。

（作者工作单位：赵更生、郑剑英—西北水土保持研究所；兰晓泉—甘肃省农业科学院；徐福利—陕西省农业科学院；段建南—山西大学。参加工作的还有：甘肃省农业科学院李大祥、王生禄；陕西省农业科学院张金水；西北水土保持研究所吴瑞浚；山西大学李栓怀、王改兰等同志。）

参 考 文 献

- [1] 李鼎新：“延安杏子河流域土壤磷素状况及磷肥增产效果”，《土壤肥料》，1976年第6期，40—42页。
- [2] 刘杏兰等：“陕西省黄绵土养分丰缺指标研究”，《陕西农业科学》，1988年第4期，168—170页。
- [3] 金维续等：“有机肥料与化学氮肥配合施用研究总结（1975—1982）”，《中国土壤的合理利用与培肥》，1983年中册73—80页。
- [4] 陈伦寿等：《农田施肥原理与实践》，农业出版社，1984年。

Study on Fertilizer Efficiency and Its Rational Application in Dryland in Loess Hilly Region

Zhao Gengsheng Lan Xiaoquan Zheng Jianying

Xu Fuli Duan Jiannan

Abstract

Both N and P are lack in the soil in loess hilly region, in which there was a lower and unstable yield. To realize the producing all one's own grain and developing agriculture, forestry and stock raising overall, it is necessary to increase material put into the farmland. According to the research results of four experimental areas, the highest yield, a higher fertilizer utilized rate, a better economic efficiency and investing benefit were obtained by matching of N/P with organic manure applied and the result of doing N with manure take second place.

The result of experiments points out that the amount of N/P applied decided by different R value that have been counted with the mathamatic models gained by the compute. It was advanced that the suggested application amount corresponding $R = 0-0.5$ and $R = 0.7-1$ could be adopted separately in basic farmland and hillside fields in the area with 500mm rain per year and corresponding $R = 0.7-1$ or over 1 a litter could be accepted in basic fareland in the area with 400-450mm rainfall per year. On the base of the above soil fertility and rainfall, loess hilly region was divided into three areas and particular suggestion about amount of fertilizer applied were given respectively.