

# 陕西关中灌区冬小麦施肥指标研究\*

刘 芬<sup>1</sup> 同延安<sup>1†</sup> 王小英<sup>1</sup> 赵佐平<sup>1,2</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 陕西理工学院化工学院, 陕西汉中 723001)

**摘 要** 为建立关中灌区冬小麦施肥指标体系,对关中灌区 2008 年 95 个冬小麦“3414”大田试验数据进行整理、分析,以相对产量 70%、80%、90% 和 95% 划分土壤养分丰缺指标,并利用一元二次模型对各试验点施肥量与产量关系进行模拟,确定各试验点最佳经济产量施肥量,最终建立了关中灌区冬小麦基于土壤碱解氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)测定值的氮、磷、钾推荐施肥模型,确定了不同肥力水平下的推荐施肥量:当碱解氮含量处于极低( $< 50 \text{ mg kg}^{-1}$ )、低( $50 \sim 80 \text{ mg kg}^{-1}$ )、中( $80 \sim 120 \text{ mg kg}^{-1}$ )和高等级( $> 120 \text{ mg kg}^{-1}$ )时,氮肥(N)施用量分别为  $190 \sim 230 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $150 \sim 190 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $110 \sim 150 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $0 \sim 110 \text{ kg hm}^{-2}$ ;有效磷含量处于极低( $< 10 \text{ mg kg}^{-1}$ )、低( $10 \sim 20 \text{ mg kg}^{-1}$ )、中( $20 \sim 35 \text{ mg kg}^{-1}$ )和高等级( $> 35 \text{ mg kg}^{-1}$ )时,磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$ )施用量分别为  $130 \sim 160 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $110 \sim 130 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $90 \sim 110 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $0 \sim 90 \text{ kg hm}^{-2}$ ;速效钾含量处于低( $< 90 \text{ mg kg}^{-1}$ )、中( $90 \sim 150 \text{ mg kg}^{-1}$ )、高( $150 \sim 190 \text{ mg kg}^{-1}$ )和极高等级( $> 190 \text{ mg kg}^{-1}$ )时,钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ )施用量分别为  $120 \sim 150 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $90 \sim 120 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $70 \sim 90 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $0 \sim 70 \text{ kg hm}^{-2}$ 。示范试验证明推荐施肥处理较农民习惯施肥处理平均增产  $789 \text{ kg hm}^{-2}$ ,增收  $1\,227 \text{ 元 hm}^{-2}$ ,肥料贡献率提高 8.2 个百分点,每 kg 氮磷钾肥小麦增产量提高 1.7 kg。

**关键词** 关中灌区;冬小麦;丰缺指标;施肥指标

**中图分类号** S147.21 **文献标识码** A

关中号称“八百里秦川”,农业历史悠久,是闻名全国的粮棉油高产区。全区土地面积约占陕西省的 19.5%,而粮食产量占全省总产量的 52.9%,并集中了全省 60.2% 的人口,是全省的精华之地。20 世纪 80 年代全国第二次土壤普查期间,陕西省土壤肥料工作者在全国土壤养分分级标准的基础上,根据陕西省关中灌区土壤养分含量状况建立了针对本研究区域的土壤养分丰缺指标<sup>[1]</sup>和推荐施肥指标<sup>[2]</sup>。经过近 30 年的化肥使用和土壤培肥,土壤肥力发生了巨大变化<sup>[3-5]</sup>,冬小麦品种、产量水平和栽培方式等也发生了很大变化,且施肥目标也已从过去的单一追求高产向高产、优质、高效和环保等多目标过渡,原有的指标体系已不能满足区域内农业发展要求,迫切需要建立一套符合本区域农业现状的施肥指标体系以指导作物合理施肥。

以测土配方施肥项目为依托,2008 年陕西关中灌区共完成冬小麦“3414”试验 95 个,本文以该区

域冬小麦试验结果为基础,对冬小麦施肥指标体系进行研究,旨在摸清该区域冬小麦氮、磷、钾施肥效果、建立冬小麦土壤养分丰缺指标和推荐施肥模型、确定不同肥力水平下的推荐施肥量,为提高该区域农田综合生产能力与肥料利用效率提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验采用“3414”设计方案,即:氮、磷、钾 3 因素,每因素 4 水平,共 14 个处理。4 个水平的含义:0 水平指不施肥,2 水平指当地推荐施肥量,1 水平 = 2 水平  $\times 0.5$  (施肥不足水平),3 水平 = 2 水平  $\times 1.5$  (过量施肥水平)。14 个处理分别为:(1)  $\text{N}_0\text{P}_0\text{K}_0$ 、(2)  $\text{N}_0\text{P}_2\text{K}_2$ 、(3)  $\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_2$ 、(4)  $\text{N}_2\text{P}_0\text{K}_2$ 、(5)  $\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_2$ 、(6)  $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2$ 、(7)  $\text{N}_2\text{P}_3\text{K}_2$ 、(8)  $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_0$ 、(9)  $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_1$ 、(10)  $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_3$ 、(11)  $\text{N}_3\text{P}_2\text{K}_2$ 、(12)  $\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_2$ 、(13)  $\text{N}_1\text{P}_2\text{K}_1$ 、

\* 国际植物营养研究所(IPNI)项目和西北农林科技大学创新团队项目资助

† 通讯作者:同延安(1956—),男,陕西华县人,教授,博士生导师,主要从事植物营养、施肥与环境研究。Tel:029-87081213, E-mail:tongyanan@nwsuaf.edu.cn

作者简介:刘 芬(1985—),女,山东德州人,博士研究生,主要从事植物营养与施肥研究。E-mail:liufen@nwsuaf.edu.cn

收稿日期:2012-04-06;收到修改稿日期:2012-08-07

(14)  $N_2P_1K_1$ 。

2008 年关中灌区共设置冬小麦“3414”试验 95 个,涉及 12 个测土配方施肥项目县(区),包括户县、周至县、秦都区、渭城区、武功县、乾县、三原县、临渭区、潼关县、陈仓区、凤翔县和扶风县。因各试验点土壤肥力水平不同,各试验点所采用的具体氮磷钾肥推荐施用量存在差异,2 水平平均施肥量为  $N\ 200\ kg\ hm^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 115\ kg\ hm^{-2}$  和  $K_2O\ 78\ kg\ hm^{-2}$ 。选择当地高中低不同肥力水平的地块作为试验田。

## 1.2 试验方法

试验采用多点无重复设置,小区面积  $20\sim 25\ m^2$ ,同一试验小区面积相同。小麦供试品种为小偃 22 和西农 979 等当地主栽品种,试验时间为 2008 年 10 月至 2009 年 6 月。供试肥料为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含  $P_2O_5$  12%)和氯化钾(含  $K_2O$  60%)。磷、钾肥作为基肥一次性施入;氮肥总量的 30%~60% 作为基肥,其余部分在拔节期追施,具体的基追肥比例根据当地土壤肥力状况确定。试验区周围设 1 m 宽以上的保护行,其他的栽培管理措施与大田生产一致。收获时去除边行,按小区单收单打,并计产。

## 1.3 土样采集和测定

每个田间试验实施前,按规范取一混合基础土样。采用常规方法<sup>[6]</sup>测定土壤主要理化性状,其中 pH 为电位法,有机质为油浴加热-重铬酸钾容量法,碱解氮为碱解扩散法,有效磷为  $0.5\ mol\ L^{-1}$  碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法,速效钾为  $1\ mol\ L^{-1}$  乙酸铵提取-火焰光度法。供试土壤 pH 为  $8.0\pm 0.3$ ,有机质含量  $14.8\pm 2.9\ g\ kg^{-1}$ ,碱解氮  $68.3\pm 19.9\ mg\ kg^{-1}$ ,有效磷  $25.9\pm 11.4\ mg\ kg^{-1}$ ,速效钾  $152.1\pm 35.4\ mg\ kg^{-1}$ 。

## 1.4 数据整理与分析

各指标计算方法:

增产率(%) = (全肥区经济产量 - 缺素区经济

产量)/缺素区经济产量  $\times 100$ ;

农学效率( $kg\ kg^{-1}$ ) = (全肥区经济产量 - 缺素区经济产量)/(全肥区施肥量 - 缺素区施肥量);

土壤贡献率(%) = 无肥区经济产量/全肥区经济产量  $\times 100$ ;

肥料贡献率(%) = (全肥区经济产量 - 无肥区经济产量)/全肥区经济产量  $\times 100$ ;

缺素区相对产量(%) = 缺素区产量/全肥区产量  $\times 100$

采用 Excel 软件进行数据统计与分析。

## 2 结果

### 2.1 关中灌区冬小麦肥料效应分析

关中灌区冬小麦 95 个试验空白区( $N_0P_0K_0$ )、缺氮区( $N_0P_2K_2$ )、缺磷区( $N_2P_0K_2$ )、缺钾区( $N_2P_2K_0$ )和全肥区( $N_2P_2K_2$ )平均产量分别为  $4\ 307\pm 1\ 121\ kg\ hm^{-2}$ 、 $5\ 016\pm 1\ 091\ kg\ hm^{-2}$ 、 $5\ 603\pm 1\ 101\ kg\ hm^{-2}$ 、 $6\ 093\pm 1\ 131\ kg\ hm^{-2}$  和  $6\ 702\pm 1\ 296\ kg\ hm^{-2}$ 。

从表 1 可看出,氮、磷、钾肥平均增产率分别为 33.1%、20.0% 和 11.5%,增产效果是氮肥 > 磷肥 > 钾肥,变异系数分别为 54.1%、62.2% 和 84.1%,说明各试验点施肥效果差异较大,尤其是钾肥;氮、磷、钾肥农学效率分别为  $8.4\ kg\ kg^{-1}$ 、 $9.5\ kg\ kg^{-1}$  和  $8.3\ kg\ kg^{-1}$ ,与 20 世纪 80 年代初<sup>[7]</sup>相比,氮肥养分效率有所下降,磷肥有所上升,且磷肥已超过氮肥,表现为磷肥 > 氮肥 > 钾肥。当前关中灌区土壤平均贡献率为 64.1%,肥料贡献率为 35.9%。据史进元等<sup>[7]</sup>统计,1953—1964 年陕西省肥料贡献率为 67.7%,1973—1978 年为 55.5%,综合本研究结果可见,施肥对作物产量的贡献率在逐年下降,而基础地力贡献率逐年提高。

表 1 关中灌区冬小麦肥料增产率和利用效率

Table 1 Yield increase and fertilizer use efficiency of winter wheat in Guanzhong irrigation area

增产率 Yield increase(%)			农学效率 Agronomic efficiency( $kg\ kg^{-1}$ )			土壤贡献率 Contribution	肥料贡献率 Contribution
N	$P_2O_5$	$K_2O$	N	$P_2O_5$	$K_2O$	rate of soil(%)	rate of fertilizer(%)
$33.1\pm 17.9$	$20.0\pm 12.4$	$11.5\pm 9.7$	$8.4\pm 4.4$	$9.5\pm 6.5$	$8.3\pm 6.4$	$64.1\pm 12.2$	$35.9\pm 12.2$

注:平均值  $\pm$  标准差 Note: Means  $\pm$  SD

## 2.2 推荐施肥指标体系的建立

2.2.1 土壤养分丰缺指标的制定 以各试验点土壤速效养分测定值为横坐标,缺素区相对产量值为纵坐标,绘制散点图,采用对数模型拟合曲线<sup>[8-9]</sup>

(图 1),得出回归方程。需要指出的是,由于田间试验受众多不可控因素的影响,少量结果会出现明显的偏差,但从散点图可以看出,只要剔除部分与整体趋势有明显偏离的试验点(在土壤速效养分含量

较低时,相对产量极高或土壤速效养分含量很高时,相对产量却极低),剩余试验点整体分布趋势可满足对数模型所描述的动态特征。

以相对产量 70%、80%、90% 和 95% 为划分标准 (<70% 为极低,70%~80% 为低,80%~90% 为中等,90%~95% 为高,>95% 为极高),根据回归方程得出对应的土壤速效养分值,即土壤速效养分的丰缺临界指标值。本研究土壤碱解氮、有效磷和速效钾的丰缺指标临界值从小到大依次为:48、77、123 和 155  $\text{mg kg}^{-1}$ ; 9、17、36 和 51  $\text{mg kg}^{-1}$ ;53、88、147 和 190  $\text{mg kg}^{-1}$ 。

本研究所有试验点土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 28.8~127.0  $\text{mg kg}^{-1}$ 、4.4~46.9  $\text{mg kg}^{-1}$  和 78.0~221.0  $\text{mg kg}^{-1}$ ,因此,缺氮区和缺磷区相对产

量 95% 所对应的碱解氮含量 (155  $\text{mg kg}^{-1}$ ) 和有效磷含量 (51  $\text{mg kg}^{-1}$ ) 以及缺钾区相对产量 70% 所对应的速效钾含量 (53  $\text{mg kg}^{-1}$ ) 均为模型外推值,没有实际意义。因此,将土壤有效养分的 5 级指标简化为 4 级 (碱解氮和有效磷含量去除极高等级,速效钾含量去除极低等级),同时,考虑到实际应用的方便性,将指标进一步简化,即土壤碱解氮含量 <50  $\text{mg kg}^{-1}$  为极低,50~80  $\text{mg kg}^{-1}$  为低,80~120  $\text{mg kg}^{-1}$  为中等,>120  $\text{mg kg}^{-1}$  为高;有效磷含量 <10  $\text{mg kg}^{-1}$  为极低,10~20  $\text{mg kg}^{-1}$  为低,20~35  $\text{mg kg}^{-1}$  为中等,>35  $\text{mg kg}^{-1}$  为高;速效钾含量 <90  $\text{mg kg}^{-1}$  为低,90~150  $\text{mg kg}^{-1}$  为中等,150~190  $\text{mg kg}^{-1}$  为高,>190  $\text{mg kg}^{-1}$  为极高。

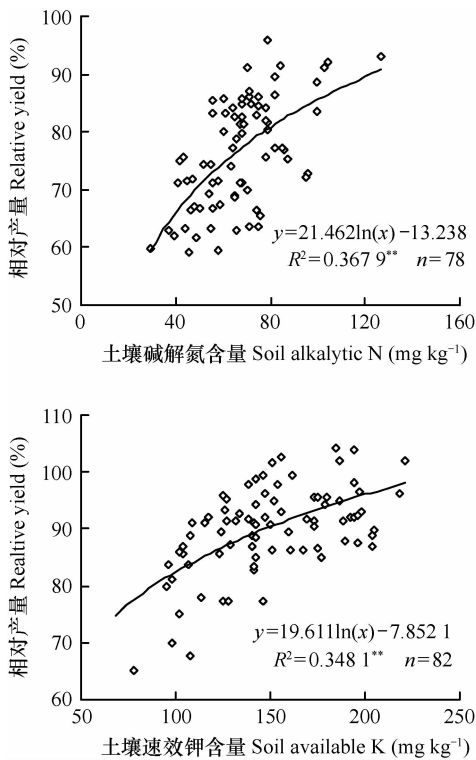


图 1 冬小麦土壤速效养分含量与缺素区相对产量的关系

Fig. 1 Relationship between content of soil available nutrients and relative yield of winter wheat

**2.2.2 氮磷钾推荐施肥量的确定** 采用一元二次模型对各试验点施肥量与产量结果进行拟合,并根据边际收益等于边际成本,计算氮、磷、钾肥最佳经济产量施用量,从而进一步建立冬小麦最佳施氮量与土壤碱解氮测定值、最佳施磷量与土壤有效磷测定值、最佳施钾量与土壤速效钾测定值的函数关系式,即氮、磷、钾施肥模型(图 2)。分别选用处理 2、3、6、11 模拟氮肥推荐用量,处理 4、5、6、7 模拟磷肥推荐用量,处理 6、8、9、10 模拟钾肥推荐用量。氮

肥(N)、磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$ )、钾肥( $\text{K}_2\text{O}$ )和小麦分别以每 kg 4 元、4.5 元、5 元和 1.8 元的平均市场价计算。

由图 2 可以看出,剔除部分试验异常点(在土壤速效养分含量较低时,最佳施肥量为零或极低以及土壤速效养分含量很高时仍然计算出一个较高的施肥量)后,最佳施肥量和土壤养分测定值均呈现极显著对数负相关。回归关系式的建立,使得本来只有相对意义的土壤养分值转变成直接用于确定经济合理施肥量的参数。本研究氮磷钾回归方

程标准误分布在 24.1 ~ 30.6 kg hm<sup>-2</sup> 之间,平均为 26.8 kg hm<sup>-2</sup>,表明每 hm<sup>2</sup> 氮磷钾肥推荐用量平均误差在 ±26.8 kg hm<sup>-2</sup> 之间。

将土壤养分丰缺指标代入函数式,求出各级丰缺指标下的经济合理施肥量。土壤碱解氮含量为 50、80 和 120 mg kg<sup>-1</sup> 时,最佳施氮量分别为 192、150

和 113 kg hm<sup>-2</sup>;有效磷含量为 10、20 和 35 mg kg<sup>-1</sup> 时,最佳施磷量分别为 130、106 和 86 kg hm<sup>-2</sup>;速效钾含量为 90、150 和 190 mg kg<sup>-1</sup> 时,最佳施钾量分别为 119、85 和 69 kg hm<sup>-2</sup>。考虑到实际操作的方便性,对推荐施肥量的值域划分进行了适当的调整,见表 2。

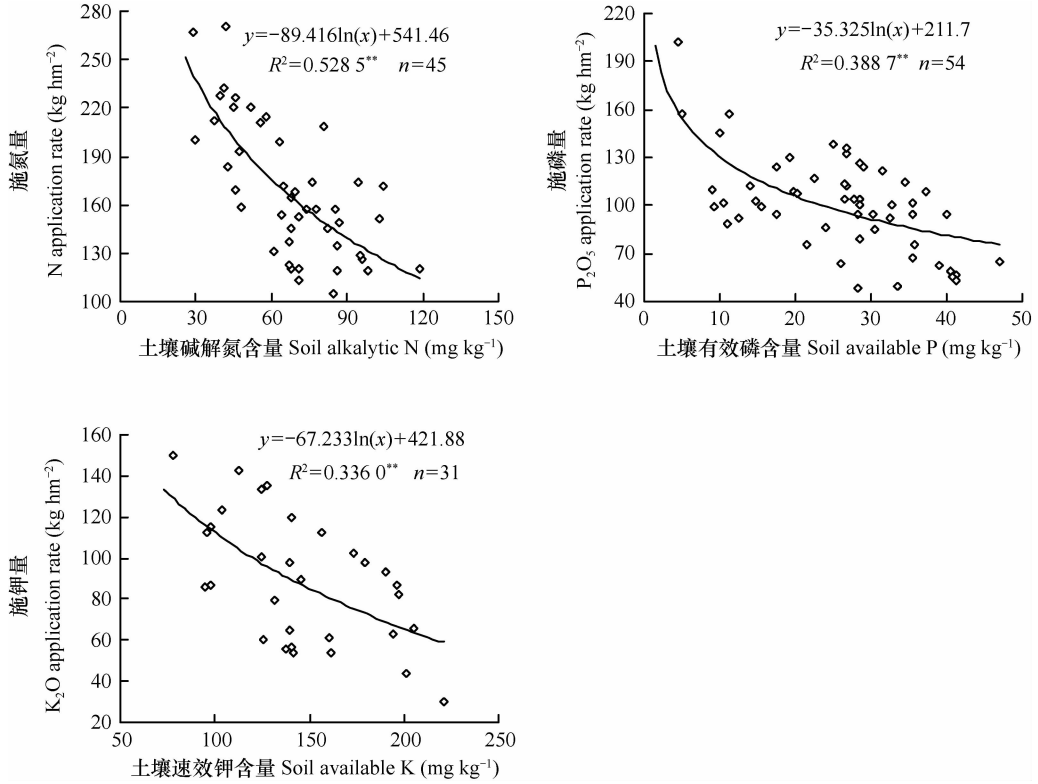


图 2 土壤速效养分含量与最佳施肥量的相关关系

Fig. 2 Relationship between content of soil available nutrients and optimal fertilizer application rate for winter wheat

表 2 关中灌区冬小麦不同养分水平下的推荐施肥量

Table 2 Fertilizer recommendation for winter wheat in fields different in level of soil nutrients in Guanzhong irrigation area

养分 Nutrients	丰缺程度 Grade	相对产量 Relative yield (%)	养分丰缺指标 Nutrient abundance index (mg kg <sup>-1</sup> )	推荐施肥量 Recommended fertilization rate (kg hm <sup>-2</sup> )
碱解氮 Alkalytic N	高 High	>90	>120	0 ~ 110
	中等 Medium	80 ~ 90	80 ~ 120	110 ~ 150
	低 Low	70 ~ 80	50 ~ 80	150 ~ 190
	极低 Very low	<70	<50	190 ~ 230
有效磷 Available P	高 High	>90	>35	0 ~ 90
	中等 Medium	80 ~ 90	20 ~ 35	90 ~ 110
	低 Low	70 ~ 80	10 ~ 20	110 ~ 130
	极低 Very low	<70	<10	130 ~ 160
速效钾 Available K	极高 Very high	>95	>190	0 ~ 70
	高 High	90 ~ 95	150 ~ 190	70 ~ 90
	中等 Medium	80 ~ 90	90 ~ 150	90 ~ 120
	低 Low	<80	<90	120 ~ 150

### 2.3 推荐施肥效果验证

根据上述制定的推荐施肥指标和“大配方,小调整”的推广应用原则,2008—2009年在本研究区域的17个县(市、区)共设置了185个示范试验,来验证关中灌区冬小麦推荐施肥效果。试验包括不施肥、农民习惯施肥和推荐施肥3个处理,其中习惯施肥区平均施肥量为 $N\ 220\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 126\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 和 $K_2O\ 6\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ ,推荐施肥区为 $N\ 195\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 、 $P_2O_5\ 117\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 和 $K_2O\ 73\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ ,除施肥量不同外,各处理其他管理措施均一致。结果表明,关中灌区冬小麦推荐施肥处理较农民习惯施肥处理平均增产 $789\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ ,变幅为 $23\sim 2\ 532\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ ,41.6%的试验点集中于 $600\sim 900\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ (图3a);平均增

收 $1\ 227\ \text{元}\ \text{hm}^{-2}$ ,变幅为 $-271\sim 4\ 708\ \text{元}\ \text{hm}^{-2}$ ,31.9%的试验点集中于 $1\ 000\sim 1\ 500\ \text{元}\ \text{hm}^{-2}$ (图3b),有3个试验点出现增产不增收现象。农民习惯施肥处理和推荐施肥处理肥料贡献率分别为28.1%(0.2%~67.2%)和36.3%(7.1%~73.6%),氮磷钾肥农学效率分别为 $5.0\ \text{kg}\ \text{kg}^{-1}$ ( $0.1\sim 12.7\ \text{kg}\ \text{kg}^{-1}$ )和 $6.7\ \text{kg}\ \text{kg}^{-1}$ ( $1.1\sim 13.2\ \text{kg}\ \text{kg}^{-1}$ ),推荐施肥处理较农民习惯施肥处理肥料贡献率提高8.2个百分点,每 $\text{kg}$ 氮磷钾肥小麦增产量提高 $1.7\ \text{kg}$ ,具体频率分布状况见图4。综上可以说明,推荐施肥较农民常规施肥具有显著的增产增收效果,是实现作物高产高效的有效途径。

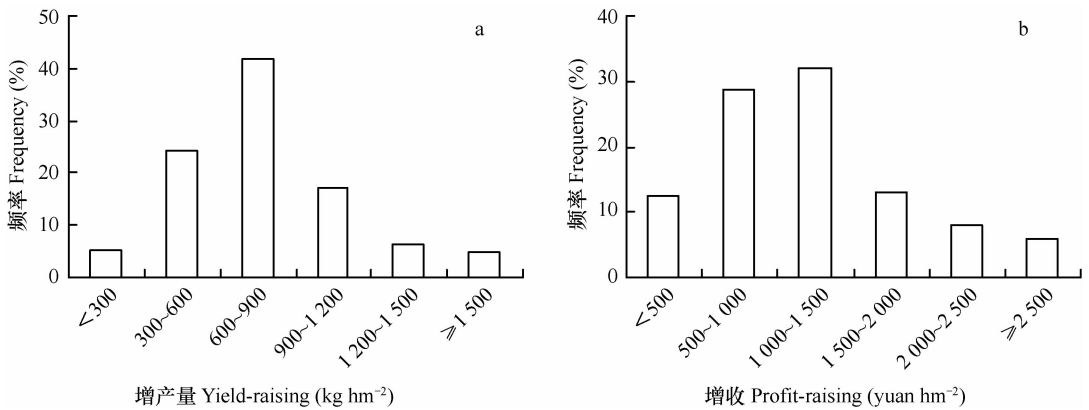


图3 关中灌区冬小麦推荐施肥处理较农民习惯施肥处理增产和增收频率分布图

Fig. 3 Frequency distributions of yield-and profit-raising of recommended fertilization over farmer's practice in winter wheat

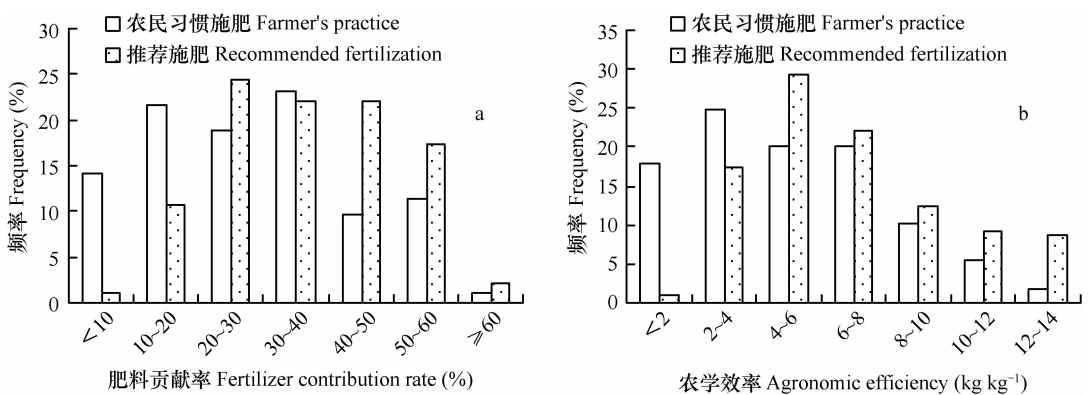


图4 关中灌区冬小麦农民习惯施肥处理和推荐施肥处理肥料贡献率和农学效率频率分布图

Fig. 4 Frequency distributions of fertilizer contribution rates and agronomic efficiencies of farmer's practice and recommended fertilization in winter wheat

## 3 讨论

### 3.1 土壤养分丰缺指标

建立合理的土壤养分丰缺指标是有效利用土

壤养分测试值进行推荐施肥的基础,缺素区相对产量是制定土壤养分丰缺指标的重要参数<sup>[10]</sup>。国内外科研工作者曾采用不同相对产量值对土壤养分进行分级,多以4~5级标准为主,Cope<sup>[11]</sup>和Fageira<sup>[12]</sup>等分别用相对产量值50%、75%、100%和

70%、95%、100%为标准将土壤速效养分划分为极低、低、中等和高4个级别,陈新平等<sup>[9,13]</sup>建议我国农田土壤大量元素养分划分级别可以采用<50%为极低,50%~75%为低,75%~95%为中,>95%为高;黄德明<sup>[14]</sup>和林守宗<sup>[15]</sup>等分别以相对产量75%、85%、95%、100%和50%、70%、90%、95%为标准,将土壤速效养分划分为5个级别。土壤养分丰缺状况是针对某个地区而言的,是一相对概念,应根据研究区域的土壤养分供应能力选择合适的相对产量值进行划分。

戢林等<sup>[16]</sup>针对研究区域实际状况,对相对产量较为集中的75%~100%这一区域进行了细分,最终以相对产量75%、80%、85%、90%和95%作为划分标准,而部分研究者认为,由于作物生长受诸多因素的影响而产生的年度间产量变化幅度,足以掩盖被划分过细的肥力级差,肥力等级划分为3级或4级就已足够<sup>[17-19]</sup>。

本研究所有试验点缺氮区、缺磷区和缺钾区相对产量分别为59.1%~95.8%,55.0%~105.3%和65.2%~104.2%,平均值分别为76.6%、84.2%和89.9%,分别有71.8%、95.0%和97.6%的试验点相对产量大于70%,综合考虑土壤氮磷钾养分状况及付莹莹等<sup>[20]</sup>研究结果,采用相对产量70%、80%、90%和95%作为本研究区域冬小麦土壤养分丰缺指标划分依据。但由于本研究所有试验点土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为28.8~127.0 mg kg<sup>-1</sup>,4.4~46.9 mg kg<sup>-1</sup>和78.0~221.0 mg kg<sup>-1</sup>,而根据土壤速效养分含量与缺素区相对产量之间的回归方程计算得到的缺氮区和缺磷区相对产量95%所对应的碱解氮含量(155 mg kg<sup>-1</sup>)和有效磷含量(51 mg kg<sup>-1</sup>)以及缺钾区相对产量70%所对应的速效钾含量(53 mg kg<sup>-1</sup>)均为模型外推值,最终将土壤有效养分的5级指标简化为4级,即碱解氮和有效磷含量去除极高等级,速效钾含量去除极低等级。

20世纪70年代后期,关中灌区亩产(1亩=667 m<sup>2</sup>)150~300 kg的川地,土壤速效氮和有效磷含量丰缺临界值分别为50 mg kg<sup>-1</sup>和8.7 mg kg<sup>-1</sup><sup>[1]</sup>。80年代,陕西省在全省范围内,共布置了两千多个田间肥料试验,进行施肥推荐分区的研究,指出当时条件下关中灌区土壤碱解氮、有效磷含量丰缺临界值分别为69~87 mg kg<sup>-1</sup>和19~22 mg kg<sup>-1</sup><sup>[2]</sup>。由此可见,当前土壤速效养分丰缺临界值明显提高,这符合该研究区域土壤肥力变化趋势,据2005—2009年测土配方施肥项目数据统计,当前关中灌区

土壤碱解氮、有效磷含量分别为68.4 mg kg<sup>-1</sup>和26.4 mg kg<sup>-1</sup>,与80年代全国第二次土壤普查时相比,增幅分别为27.4%和252.0%。

### 3.2 推荐施肥量

肥料效应函数是确定最佳施肥量的主要方法<sup>[21]</sup>,而肥料效应模型的选择尤为重要。王圣瑞等<sup>[22]</sup>认为,一元施肥模型不仅拟合率高,且与三元二次肥料效应回归方程相比,推荐施肥量更符合实际。李文彪等<sup>[23]</sup>采用一元二次肥料效应函数,建立了内蒙古河套灌区春小麦推荐施肥指标体系。

本研究分别采用三元二次、线性加平台和一元二次模型对施肥量与产量关系进行模拟,计算最佳肥料用量,并对结果进行合理性检验,前两者成功率较低,仅一元二次方程成功率较高,故最终采用一元二次函数作为确定最佳施肥量的肥料效应模型。根据汇总统计,氮、磷、钾肥一元二次模型的拟合率分别为69%、62%和36%,与他人研究相比<sup>[16]</sup>,拟合率偏低,尤其是钾肥。杨俐苹等<sup>[24]</sup>以内蒙古海拉尔地区油菜“3414”试验为例,对测土配方施肥指标体系建立中“3414”试验成功率普遍很低的原因进行了深入分析并指出,除了农技人员农业科研管理水平差异较大,2水平设定不合理以及田间试验一些未知的非研究性因子干扰外,“3414”试验肥料用量水平数相对较少(只有4个水平)也是一个重要原因。因此,各地方在“3414”试验方案实施前,应该在首先了解当地土壤养分限制因素的前提下进行肥料用量试验,而不是简单地一个地区采用一个试验方案,从而提高试验的成功率。

20世纪80年代,在不考虑土壤肥力的前提下,关中灌区冬小麦推荐施肥量(最佳经济施肥量)为氮肥(N)141 kg hm<sup>-2</sup>、磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)133 kg hm<sup>-2</sup><sup>[2]</sup>。80年代钾肥肥效试验证明,在关中灌区施用钾肥无显著增产效果,因此当时推荐施肥研究中未考虑钾素。本研究在建立推荐施肥指标时,充分考虑了土壤肥力因素和钾肥肥效。当前中等肥力土壤的平均推荐施肥量为N 130 kg hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 kg hm<sup>-2</sup>,与80年代相比,本研究建立的推荐施肥指标呈现出减氮磷、增钾的特点,这与长期以来区域内肥料投入特点和土壤养分状况有关。王圣瑞<sup>[25]</sup>对1986—2000年关中灌区麦田养分平衡的研究指出,15年内土壤氮、磷一直处于盈余状态,年盈余量平均为46 kg hm<sup>-2</sup>和58 kg hm<sup>-2</sup>。陕西省虽为富钾土壤,但农民长期以来基本上不施用钾肥<sup>[26]</sup>,每年作物带走大量钾素,土壤钾库长期处在被耗用状态,导致

部分地区钾素严重亏损,长期以往必然会影响作物生长,因此可以通过施用有机肥或秸秆还田等的形式补充土壤钾素。

## 4 结 论

关中灌区冬小麦施用氮、磷、钾肥平均增产 33.1%、20.0% 和 11.5%,肥料农学效率分别为  $8.4 \text{ kg kg}^{-1}$ 、 $9.5 \text{ kg kg}^{-1}$  和  $8.3 \text{ kg kg}^{-1}$ 。以相对产量 70%、80%、90% 和 95% 为标准划分土壤养分丰缺指标,并利用一元二次模型对各试验点施肥量与产量关系进行模拟,确定各试验点最佳经济产量施肥量,最终建立了关中灌区冬小麦基于土壤碱解氮、有效磷和速效钾测定值的氮、磷、钾推荐施肥模型,确定了不同肥力水平下的推荐施肥量。与原有指标相比,当前土壤速效养分丰缺临界值明显提高,推荐施肥指标呈现出减氮磷、增钾的特点。示范试验证明推荐施肥较农民常规施肥具有显著的增产增收效果。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 陕西省农业勘察设计院. 陕西农业土壤. 西安: 陕西科学技术出版社, 1982: 198—199. Agriculture Survey and Design Institute of Shaanxi. Shaanxi agricultural soil (In Chinese). Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1982: 198—199
- [ 2 ] 陕西省第二次土壤普查办公室. 陕西土壤. 北京: 科学出版社, 1992: 458—474. Soil Census Office of Shaanxi. Shaanxi soil (In Chinese). Beijing: Science Press, 1992: 458—474
- [ 3 ] 任意, 张淑香, 穆兰, 等. 我国不同地区土壤养分的差异及变化趋势. 中国土壤与肥料, 2009(6): 13—17. Ren Y, Zhang S X, Mu L, et al. Change and difference of soil nutrients for various regions in China (In Chinese). Soils and Fertilizers Sciences in China, 2009(6): 13—17
- [ 4 ] 摄晓燕. 黄土区主要农业土壤肥力演变研究. 杨凌: 西北农林科技大学资源环境学院, 2010. She X Y. Study on soil fertility evolution of main agricultural loess regions (In Chinese). Yangling: College of Resource and Environmental Science, Northwest A & F University, 2010
- [ 5 ] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 水田土壤肥力现状及变化规律分析——以湖北省为例. 土壤学报, 2012, 49(2): 319—330. Wang W N, Lu J W, Lu M X, et al. Status quo and variation of soil fertility in paddy field—A case study of Hubei Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2): 319—330
- [ 6 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [ 7 ] 史进元, 彭琳. 陕西省肥料发展前景展望. 陕西农业科学, 1985(3): 4—6. Shi J Y, Peng L. The prospect of fertilizer development of Shaanxi (In Chinese). Shaanxi Journal of Agricultural Science, 1985(3): 4—6
- [ 8 ] 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. Sun Y X, Guo Y S, Yu S Z, et al. Establishing phosphorus and potassium fertilization recommendation index based on the “3414” field experiments (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1): 197—203
- [ 9 ] 陈新平, 张福锁. 通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系. 中国农技推广, 2006, 22(4): 36—39. Chen X P, Zhang F S. Establishing fertilization recommendation index based on the “3414” field experiments (In Chinese). China Agricultural Technology Extension, 2006, 22(4): 36—39
- [ 10 ] Fageria N K, Baligar V C, Jones C A. Growth and mineral nutrition of field crops. New York: Marcel Dekker, Inc., 1997: 83—134
- [ 11 ] Cope J T, Evans C E. Soil testing. Adv SoilSci, 1985, 1: 201—228
- [ 12 ] Fageria N K, Santos A B, Baligar V C. Phosphorus soil test calibration for lowland rice on an inceptisol. Agron J, 1997, 89(5): 737—742
- [ 13 ] 张福锁. 测土配方施肥技术要览. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 93—110. Zhang F S. Main points on soil testing and fertilizer recommendation technology (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2006: 93—110
- [ 14 ] 黄德明, 徐建铭, 武书敏, 等. 北京郊区小麦测土施肥技术研究——土壤养分丰缺指标法在测土施肥中的应用. 华北农学通报, 1986, 1(1): 41—47. Huang D M, Xu J M, Wu S M, et al. Studies of soil tests and fertilizer recommendation for wheat in Beijing area (In Chinese). Acta Agriculturae Borealisinica, 1986, 1(1): 41—47
- [ 15 ] 林守宗, 赵树慧, 阎华. 潮土土壤养分丰缺指标与施肥的研究. 山东农业科学, 1987(5): 25—27. Lin S Z, Zhao S H, Yan H. Studied on the soil fertility index and fertilizer recommendation on Fluvo-aquic soil (In Chinese). Shandong Agricultural Science, 1987(5): 25—27
- [ 16 ] 戢林, 张锡洲, 李廷轩. 基于“3414”试验的川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系构建. 中国农业科学, 2011, 44(1): 84—92. Ji L, Zhang X Z, Li T X. Establishing fertilization recommendation index of paddy soil based on the “3414” field experiments in the middle of Sichuan Hilly Regions (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(1): 84—92
- [ 17 ] 金耀青, 张中原. 配方施肥方法及其应用. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993: 1—60. Jin Y Q, Zhang Z Y. The method of formula fertilization and its application (In Chinese). Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1993: 1—60
- [ 18 ] 李娟, 章明清, 孔庆波, 等. 福建早稻测土配方施肥指标体系研究. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 938—946. Li J, Zhang M Q, Kong Q B, et al. Soil testing and formula fertilization index for early rice in Fujian Province (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 938—946
- [ 19 ] 章明清, 李娟, 孔庆波, 等. 福建甘薯氮磷钾施肥指标体系研究//中国植物营养与肥料学会 2010 年学术年会论文集. 北京: 中国农业出版社, 2010: 180—189. Zhang M Q, Li J, Kong Q B, et al. Sweet potato fertilization index for nitrogen,

- phosphorus and potassium in Fujian (In Chinese)//Symposium of Chinese society of plant nutrition and fertilizer science in 2010. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 180—189
- [20] 付莹莹, 同延安, 李文祥, 等. 陕西关中灌区冬小麦土壤养分丰缺指标体系的建立. 麦类作物学报, 2009, 29(5): 897—900. Fu Y Y, Tong Y A, Li W X, et al. Establishment of soil nutrient index system for winter wheat in Guanzhong irrigation areas of Shaanxi Province (In Chinese). Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(5): 897—900
- [21] 王兴仁, 陈新平, 张福锁, 等. 施肥模型在我国推荐施肥中的应用. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 67—74. Wang X R, Chen X P, Zhang F S, et al. Application of fertilization model for fertilizer recommendation in China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(1): 67—74
- [22] 王圣瑞, 陈新平, 高祥照, 等. “3414”肥料试验模型拟合的探讨. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 409—413. Wang S R, Chen X P, Gao X Z, et al. Study on simulation of “3414” fertilizer experiments (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(4): 409—413
- [23] 李文彪, 郑海春, 郜翻身, 等. 内蒙古河套灌区春小麦推荐施肥指标体系研究. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1327—1334. Li W B, Zheng H C, Gao F S, et al. Study on index of fertilizer recommendation for spring wheat in Hetao irrigated area (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(6): 1327—1334
- [24] 杨俐苹, 白由路, 王贺, 等. 测土配方施肥指标体系建立中“3414”试验方案应用探讨——以内蒙古海拉尔地区油菜“3414”试验为例. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 1018—1023. Yang L P, Bai Y L, Wang H, et al. Application of “3414” field trial design for establishing soil testing and fertilizer recommendation index (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 1018—1023
- [25] 王圣瑞. 陕西省和北京市主要作物施肥状况与评价. 北京: 中国农业大学资源与环境学院, 2002. Wang S R. Current status and evaluation of crop fertilization in Shaanxi Province and Beijing City (In Chinese). Beijing: College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, 2002
- [26] 同延安, Ove Emteryd, 张树兰, 等. 陕西省氮肥过量施用现状评价. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1239—1244. Tong Y A, Emteryd O, Zhang S L, et al. Evaluation of over-application of nitrogen fertilizer in China's Shaanxi Province (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(8): 1239—1244

## INDICES FOR FERTILIZATION OF WINTER WHEAT IN GUANZHONG IRRIGATION AREA OF SHAANXI

Liu Fen<sup>1</sup> Tong Yan'an<sup>1†</sup> Wang Xiaoying<sup>1</sup> Zhao Zuoping<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> College of Resource and Environmental Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(<sup>2</sup> College of Chemistry, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China)

**Abstract** To build up a fertilization index system for winter wheat in Guanzhong irrigation area of Shaanxi, the data of 95 “3414” field experiments on winter wheat carried out in 2008 were analyzed; relative yields of the fields, i. e. 70%, 80%, 90% and 95%, were set as indices for grading abundance of soil nutrients; relationship between fertilization rate and yield of each field experiment site was simulated with a linear quadratic model; and an optimal economical fertilization rate was determined for each experiment site. In the end, a model for recommendation of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O application rates for winter wheat in this area was established based on the measurements of alkalytic N (AN), available P (AP) and available K (AK) in the soils and fertilization rates were recommended for fields different in soil fertility level. In wheat fields with the content of AN being very low (< 50 mg kg<sup>-1</sup>), low (50 ~ 80 mg kg<sup>-1</sup>), medium (80 ~ 120 mg kg<sup>-1</sup>) or high (> 120 mg kg<sup>-1</sup>), the application rate of N 190 ~ 230, 150 ~ 190, 110 ~ 150 and 0 ~ 110 kg hm<sup>-2</sup> was recommended, respectively; in fields with the content of AP being < 10, 10 ~ 20, 20 ~ 35 and > 35 mg kg<sup>-1</sup>, the application rate of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 130 ~ 160, 110 ~ 130, 90 ~ 110 and 0 ~ 90 kg hm<sup>-2</sup> was, respectively; and in fields with the content of AK being < 90, 90 ~ 150, 150 ~ 190 and > 190 mg kg<sup>-1</sup>, the application rate of K<sub>2</sub>O 120 ~ 150, 90 ~ 120, 70 ~ 90 and 0 ~ 70 kg hm<sup>-2</sup> was, respectively. Demonstration trials showed that compared with farmer's practice, recommended fertilization increased the yield and profit of winter wheat on average by 789 kg hm<sup>-2</sup> and 1 227 yuan hm<sup>-2</sup>, and fertilizer contribution rate and agronomy efficiency by 8.2% and 1.7 kg kg<sup>-1</sup>, respectively.

**Key words** Guanzhong irrigation area; Winter wheat; Abundance index; Fertilization index