



# 陕西省小农户作物生产的减肥潜力及经济效益评价

米晓田<sup>1</sup>, 石磊<sup>2</sup>, 何刚<sup>1✉</sup>, 王朝辉<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup> 西北农林科技大学资源环境学院/农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup> 陕西省耕地质量与农业环境保护工作站, 西安 710003

**摘要:**【目的】小农户在农业生产中投入的生产资料普遍过高, 随种植业结构演变, 肥料投入也势必会发生变化。明确小农户经营模式下粮食、油料和经济作物的施肥现状和经济效益, 能为小农户作物生产的养分管理、肥料减施和经济效益提高提供参考。【方法】2018 年对陕西省的主要农作物生产情况进行问卷调查, 以粮食(小麦、玉米、水稻、谷子、马铃薯)、油料(油菜、大豆)、经济(苹果、西红柿、烤烟)作物为研究对象, 共获得 1 709 份调研问卷。基于此调研结果, 以产量水平为分类依据, 分析小农户的施肥现状、减肥潜力和经济效益。【结果】小麦、玉米、水稻、谷子和马铃薯的平均产量分别为 4.6、7.3、8.3、3.7 和 19.8 t·hm<sup>-2</sup>, 氮肥用量分别为 177、247、186、255 和 209 kg N·hm<sup>-2</sup>, 磷肥用量分别为 102、103、88、142 和 125 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>, 钾肥用量分别为 37、47、64、53 和 110 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>。油菜和大豆的平均产量分别为 2.4 和 2.7 t·hm<sup>-2</sup>, 氮肥用量分别为 156 和 99 kg N·hm<sup>-2</sup>, 磷肥用量分别为 80 和 63 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>, 钾肥用量分别为 56 和 26 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>。苹果、西红柿和烤烟的平均产量分别为 23.8、93.5 和 2.7 t·hm<sup>-2</sup>, 氮肥用量分别为 731、471 和 108 kg N·hm<sup>-2</sup>, 磷肥用量分别为 482、387 和 118 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>, 钾肥用量分别为 535、447 和 132 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>。对大多数作物, 氮磷钾普遍过量施用、钾肥施用过量与不足并存。粮食作物氮磷钾减肥潜力分别为 28%—60%、52%—66%和 11%—51%。油料作物油菜可减少氮磷钾肥料用量 33%、37%和 46%, 然而大豆需增加磷钾肥用量 11%、28%。苹果和西红柿等高产经济作物的氮磷钾减肥潜力分别为 41%—67%、65%—70%和 49%—64%。烤烟生产需减少磷肥 53%, 然而中、高产农户氮肥施用不足, 分别需增施 22%、11%。复合肥和单质肥是作物氮素的主要来源, 复合肥是作物磷钾的主要来源。氮以基肥为主、追施为辅, 磷钾肥几乎全部作为基肥一次施用, 鲜有追施。粮食、油料和经济作物的平均净经济效益分别 0.44 × 10<sup>4</sup>—1.63 × 10<sup>4</sup>、0.75 × 10<sup>4</sup>—0.84 × 10<sup>4</sup>和 4.19 × 10<sup>4</sup>—15.05 × 10<sup>4</sup>元/hm<sup>2</sup>, 肥料占总投入比例分别为 31%—52%、57%—59%和 48%—65%。苹果、西红柿等高产经济作物的净经济效益远高于粮食和油料作物, 成为小农户经营者的首选。然而, 在经济作物生产中过量的肥料施用产生了巨大的环境风险。【结论】低中产组小农户是化肥减量和收益提升的主要对象, 苹果、西红柿等经济作物的净经济效益高, 但单位面积施肥量大、减肥潜力大。值得注意的是, 农作物生产中也存在施肥不足的现象, 例如大豆和烤烟。由此可见, 小农户作物生产的肥料管理变异大, 提高小农户的肥料管理水平有利于增加作物产量和经济效益、助力农业可持续发展。

**关键词:** 农户行为; 作物类型; 养分管理; 产量; 经济效益; 陕西省

## Fertilizer Reduction Potential and Economic Benefits of Crop Production for Smallholder Farmers in Shaanxi Province

MI XiaoTian<sup>1</sup>, SHI Lei<sup>2</sup>, HE Gang<sup>1✉</sup>, WANG ZhaoHui<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup>College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University/Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, Shaanxi; <sup>2</sup>Department of Agriculture and Rural Affairs of Shaanxi Province/Cultivated Land Quality and Agricultural Environmental Protection Station in Shaanxi Province, Xi'an 710003

收稿日期: 2020-11-23; 接受日期: 2021-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(31902120)、国家重点研发计划(2018YFD0200408)、青海省重大科技专项(2019-NK-A11-02)、西北农林科技大学科研启动项目(2452018110)

联系方式: 米晓田, E-mail: mixiaotian1203@163.com. 通信作者何刚, E-mail: hegang029@nwfau.edu.cn. 通信作者王朝辉, E-mail: w-zhaohui@263.net

**Abstract: 【Objective】** The material input of agriculture production is generally high for smallholder farmers, and the application rate of chemical fertilizers will change with the evolution of crop structure. Understanding the situation of nutrient input and economic benefits of smallholder to cereal crop, oil crop and cash crop could help guide scientific fertilization and improve economic benefits.

**【Method】** In 2018, a questionnaire survey was conducted on the production of major crops in Shaanxi Province. The cereal crop (wheat, maize, rice, millet, and potato), oil crop (canola and soybean), and cash crop (apple, tomato, and flue-cured tobacco) were considered as targeted crops, and a total of 1 709 questionnaires were obtained. Further, the fertilization status of smallholder, the potential of fertilizer reduction, and economic benefits according to yield level of different crops were evaluated. **【Result】** For the production of wheat, maize, rice, millet, and potato, the mean yield was 4.6, 7.3, 8.3, 3.7, and 19.8 t·hm<sup>-2</sup>, respectively; the mean nitrogen (N) fertilizer rate was 177, 247, 186, 255, and 209 kg N·hm<sup>-2</sup>, respectively; the mean phosphate (P) fertilizer rate was 102, 103, 88, 142, and 125 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>; mean potassium (K) fertilizer rate was 37, 47, 64, 53, and 110 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>, respectively. For canola and soybean production, the mean yield was 2.4 and 2.7 t·hm<sup>-2</sup>, N fertilizer rate was 156 and 99 kg N·hm<sup>-2</sup>, P fertilizer rate was 80 and 63 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>, K fertilizer rate was 56 and 26 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>, respectively. For the production of apple, tomato, and tobacco, the mean yield was 23.8, 93.5, and 2.7 t·hm<sup>-2</sup>, respectively; N fertilizer rate was 731, 471, and 118 kg N·hm<sup>-2</sup>, P fertilizer rate was 482, 387, and 118 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>, K fertilizer rate was 535, 447, and 132 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>, respectively. N and P fertilizers were usually over-applied, while both over-application and under-application of K fertilizer coexisted. The potential of N, P, K fertilizer reduction ranges from 28% to 60%, 52% to 66%, and 11% to 51% for cereal crop, 33%, 37% and 46% for canola, respectively. However, the application rate of P and K fertilizer needed to increase by 11% and 28% for soybean production, respectively. The potential of N, P, and K fertilizer reduction ranged from 41% to 67%, 65% to 70%, and 49% to 64% for apple and tomato production, respectively. For tobacco production, the application rate of P fertilizer could decrease by 53%, while the application rate of N fertilizer needed to increase by 22% and 11% for farmers with medium and high-yielding, respectively. The source of N was mainly compound fertilizers and urea, and the sources of P and K were mainly compound fertilizers. For the way of chemical fertilizer application, most of N fertilizer was applied as basal fertilizer, and a small part was supplemented by topdressing, while almost all P and K fertilizers were applied as basal fertilizer. For cereal crop, oil crop, and cash crop, the cost of fertilizer application accounted for 31%-52%, 57%-59% and 48%-65% of total input, respectively, and the net economic benefit ranged from 0.44×10<sup>4</sup> to 1.63×10<sup>4</sup>, 0.75×10<sup>4</sup> to 0.84×10<sup>4</sup>, and 4.19×10<sup>4</sup> to 15.05×10<sup>4</sup> yuan/hm<sup>2</sup>, respectively. Because the net economic benefit of high-yielding in cash crop, e.g., apple and tomato, was higher than that of cereal crop and oil crop, smallholder farmers were more inclined to grow them. However, the substantial application of chemical fertilizer in cash crop production brought great environmental risks. **【Conclusion】** The main target of fertilizer reduction and benefit improvement was smallholder with low and middle-yielding level. Compared with cereal crop and oil crop, the economic benefit of cash crop, especially for apple and tomato, was higher, while their potential of fertilizer reduction was also higher due to substantial application of chemical fertilizer. Notably, the result of the study also demonstrated that there was also insufficient application of fertilizer in crop production, e.g., soybean and tobacco. In conclusion, the fertilizer management of smallholder varied greatly. Improving the level of fertilizer management for smallholder was conducive to increasing both yield and economic benefits, and thus contributing to sustainable crop production.

**Key words:** household behavior; crop classification; nutrients management; yield; economic benefit; Shaanxi Province

## 0 引言

**【研究意义】** 化肥在增加作物产量、保障粮食安全中起着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。施肥不足、难以满足作物需求, 施肥过量会引起一系列环境问题并造成经济损失<sup>[2]</sup>。1978—2018 年期间, 粮食、油料和经济作物的种植面积增加了 1.6×10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>, 然而化肥用量增加了 5 136 万 t<sup>[3]</sup>, 施肥不合理现象普遍存在。小农户是农业生产最基本的活动单元, 是养分管理的决策者。调研小农户施肥现状是理解小农户生产行为的基础, 是提高肥料利用效率、保护生态环境、增加经济收益

的关键环节之一。**【前人研究进展】** 1978—2018 年期间, 我国农作物化肥施用折纯量从 884 万 t 增加至 6 020 万 t<sup>[3]</sup>。随着化肥用量增加, 主要农作物的化肥用量已超过经济意义上的最优施用量, 出现了报酬递减现象<sup>[4-5]</sup>。我国是典型的小农户主导型农业生产经营模式, 长期以来小农户依赖经验施肥, 肥料用量及其养分配比不合理, 造成肥料利用效率降低, 不仅浪费资源, 也导致了土壤酸化、大气氮沉降、水质下降等环境问题<sup>[2,6]</sup>。国家测土配方施肥项目在 2005—2009 年期间的施肥调查表明, 陕西省各区域主要农作物生产氮、磷均处于盈余状态, 但钾素处于亏缺状态, 其

中苹果园的氮、磷盈余量最高,分别达  $477 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $285 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ [7]。2006—2011 年陕西省小麦、玉米和苹果生产的调查数据表明,氮肥过量施用比例分别达 68%、63%和 72%,磷肥过量施用比例分别达 41%、31%和 50%,全省 60%农户的钾肥施用不足[8]。另外,有机肥(如畜禽粪便和植物材料)用量普遍较低,在河南、山东和山西仅 25%的小农户施用有机肥,在江苏和安徽施用有机肥的小农户仅 3%和 6%[9]。因此,提高农户的经营管理水平,依据作物养分需求特点,合理施用氮磷钾肥是作物增产、肥料增效的关键途径之一。农作物生产的成本收益直接关乎农户生计、关系当地农业经济发展。相对于粮食和油料作物,经济作物属于高投入高产类型。以苹果为例,2018 年苹果生产的肥料费用达  $0.99 \times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ ,占总成本的 44%,净经济效益为  $7.4 \times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ ,而小麦、玉米和水稻生产的肥料费用分别为  $0.26 \times 10^4$ 、 $0.23 \times 10^4$  和  $0.30 \times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ ,分别占总成本的 39%、39%和 42%,占苹果肥料费用的 26%、23%和 30%,净经济效益分别为  $0.54 \times 10^4$ 、 $0.67 \times 10^4$  和  $1.18 \times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ [10]。2003 年的调研结果表明,果蔬类单位面积肥料投入量是传统小麦-玉米生产体系的 1.4—5.8 倍,而土壤中氮素盈余是小麦-玉米生产体系的 4.3—9.2 倍[11]。可见,经济作物具有更高的经济价值,农民的化肥投入量、减肥潜力更高。因此,了解农作物化肥施用现状,制定易实现、易被农户接受的减肥方案,有利于提高作物产量、增加经济收益、改善农业生产造成的环境污染,实现农业可持续发展。【本研究切入点】目前关于小农户化肥施用现状的研究对象多为特定区域的特定作物,而较少对省域尺度的粮食、油料和经济作物展开系统调研。近年来,随着种植业结构调整,油料和经济作物的种植面积快速增长。同粮食作物相比,经济作物的单位面积施肥量更大。因此,系统调研粮食作物、油料作物和经济作物的化肥施用现状对评估不同类型作物减肥潜力有重要意义。【拟解决的关键问题】本研究基于 2018 年在陕西省组织的实地调研,通过对现阶段小农户各类农作物生产的产量与施肥状况、减肥潜力经济效益评估,以期客观认识小农户农作物施肥现状,明确小农户养分管理存在的问题和减肥潜力,为该区域农作物科学施肥、农业可持续生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 调研区概况

陕西省地处我国西北内陆腹地,位于东经  $105^{\circ}29'$

— $111^{\circ}15'$ ,北纬  $31^{\circ}42'$ — $39^{\circ}15'$ 之间,南北长 880 km、东西宽 160—490 km,全省总面积  $2.06 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,耕地面积  $4.01 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。整体属大陆季风性气候,自北向南渐次过渡为温带、暖温带和亚热带 3 个气候带及半干旱、半湿润和湿润 3 个水分区。年平均气温  $8—16^{\circ}\text{C}$ ,自北向南渐高;年平均降水量 325—1 274 mm,自北向南渐多;无霜期 140—316 d,自北向南渐长。

### 1.2 调研方法及内容

调研时间为 2018 年 10—12 月,调研地点为陕西省各县(市、区),调研对象为种植面积  $666.7 \text{ hm}^2$  以上的作物,每县每种作物调查 10 个以上典型农户,一户一表,调研内容为 2018 年所收获作物的产量及肥料类型、肥料用量、施肥时期等。本研究选取的农作物(样本数)如下。粮食作物:小麦(312)、玉米(514)、水稻(150)、谷子(51)、马铃薯(239);油料作物:大豆(42)、油菜(172);经济作物:苹果(163)、西红柿(26)、烤烟(30)。

### 1.3 产量分级标准

调研农户小麦的产量介于  $1.8—7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,90%的农户产量集中在  $2.7—6.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。以产量的第 5%分位数( $2.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )和 95%分位数( $6.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )为最低和最高限求极差( $3.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),然后以等产量间距( $1.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )分成低产、中产和高产 3 个范围。小麦产量水平从低到高依次为  $<4.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (低产), $4.0—5.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (中产), $>5.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (高产)。类似方法划分其他作物产量水平,其等级范围见表 3。

### 1.4 合理施肥标准及农户施肥等级评价方法

确定合理施肥量是获得较高产量、维持土壤肥力和降低施肥引起环境污染的关键。因而,在维持农田土壤养分平衡和肥力水平提升的基础上,考虑作物产量对养分的需求确定不同产量等级的合理施肥量[12]。

合理施肥量( $R_{ec}$ )=产量×养分需求量×调整系数式中,产量为调研的小农户作物产量,养分需求量指作物 100 kg 产量养分需求量,各作物的养分需求量见表 1。调整系数指根据研究区域土壤养分供应能力和农田养分平衡确定的调整施肥数量高低的参数。对于粮食作物、油菜、西红柿和烤烟,考虑当地作物生产中普遍存在氮素投入过量,土壤氮素残留过多,易受降水影响向深层淋溶损失,施用氮肥时只需补足作物带走的氮素数量即可,故施氮调整系数设定为 1[12]。对于大豆,考虑大豆根瘤固氮作用,施氮量仅为需氮量的 0.5 倍,故施氮调整系数设定为 0.5[13]。由于旱地农田土壤速效磷易被固定,因此施用磷肥量设为作

物地上部吸磷量的 1.5 倍，故粮食、油料作物、西红柿和烤烟施磷系数设定为 1.5<sup>[12]</sup>。西北地区农田速效钾含量可高达 160 mg·kg<sup>-1</sup>，只需补足作物带走的钾素即可。由于粮食、油料作物生产中秸秆通常被还田，施钾量仅为作物需钾量的 0.3 倍，故施钾调整系数设定为 0.3<sup>[14]</sup>。而马铃薯秸秆中钾累积量低于其他粮食作物，施钾量仅为作物需钾量的 0.6 倍，故施钾调整系数设定为 0.6<sup>[15]</sup>。对于西红柿、烤烟，仅补充作物所带走养分即可，故施钾调整系数设定为 1。不同于大多数作物，苹果为多年生作物，维持果树生长是必要的，因此不能仅考虑养分携出。结合苹果推荐施肥方法<sup>[16-18]</sup>，本研究将苹果氮、磷、钾的调

整系数分别设定为 2、3、2。

减肥潜力 (%) = 
$$\frac{\text{农户施肥量} - \text{合理施肥量}}{\text{农户施肥量}}$$

1.5 经济效益的估算

投入（元/hm<sup>2</sup>）= 种子费+农药费+排灌费+机械费+肥料费+雇佣成本；

产出（元/hm<sup>2</sup>）= 销售价格（元/kg）×产量（kg·hm<sup>-2</sup>）；

经济效益（元/hm<sup>2</sup>）= 产出—投入。

式中，投入肥料按种类分为单质肥、复合肥和有机肥，单质肥中纯氮磷钾肥单价分别为 3.8、4.5、5.8 元/kg，复合肥单价为 3.0 元/kg，商品有机肥为 1.36 元/kg，农家肥为 0.3 元/kg<sup>[10]</sup>；式中其余指标见表 2。

表 1 作物 100 kg 经济产量需肥量  
Table 1 Nutrients requirement of 100 kg economic yield

作物分类 Crop classification	作物类型 Crop type	100 kg 经济产量养分需求量 Nutrients requirement of 100 kg economic yield (kg)		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
粮食作物 Cereal crop	小麦 Wheat <sup>[12]</sup>	2.8	0.7	2.4
	玉米 Maize <sup>[19-21]</sup>	1.74	0.32	1.53
	水稻 Rice <sup>[22]</sup>	1.71	0.34	1.84
	谷子 Millet <sup>[23]</sup>	2.72	0.96	2.32
	马铃薯 Potato <sup>[23]</sup>	0.5	0.2	1.0
油料作物 Oil crop	油菜 Canola <sup>[15, 23]</sup>	4.3	2.5	4.2
	大豆 Soybean <sup>[23]</sup>	7.2	1.7	4.0
经济作物 Cash crop	苹果 Apple <sup>[16, 23]</sup>	0.5	0.2	0.4
	西红柿 Tomato <sup>[24-25]</sup>	0.32	0.10	0.25
	烤烟 Flue-cured tobacco <sup>[26]</sup>	3.5	1.4	4.8

表 2 作物生产成本及 2018 年销售价格<sup>[10]</sup>  
Table 2 Crop cost and current sale price in 2018

作物分类 Crop classification	作物类型 Crop type	种子 Seed (yuan/hm <sup>2</sup> )	农药 Pesticide (yuan/hm <sup>2</sup> )	机械作业 Mechanical work (yuan/hm <sup>2</sup> )	排灌 Irrigation (yuan/hm <sup>2</sup> )	雇佣成本 Employ cost (yuan/hm <sup>2</sup> )	售价 Price (yuan/kg)
粮食作物 Cereal crop	小麦 Wheat	978	302	2302	556	—	2.30
	玉米 Maize	910	200	1667	724	—	1.82
	水稻 Rice	897	209	1662	558	—	2.57
	谷子 Millet	951	804	2863	310	—	2.59
	马铃薯 Potato	2790	164	1688	0	—	0.88
油料作物 Oil crop	油菜 Canola	636	201	667	246	—	5.16
	大豆 Soybean	516	76	1098	73	—	4.30
经济作物 Cash crop	苹果 Apple	0	2653	1429	698	8985	5.79
	西红柿 Tomato	3991	3408	1241	1326	5970	2.58
	烤烟 Flue-cured tobacco	810	432	786	106	7200	24.50

## 1.6 数据处理与统计分析

数据采用 Microsoft Excel 2016 进行汇总、计算、整理; 采用 IBM SPSS Statistics 20.0 进行单因素统计分析。

## 2 结果

### 2.1 作物产量与施肥现状

表 3 列出陕西省小农户生产产量水平及施肥情况。陕西省小农户生产的小麦、玉米、水稻、谷子和马铃薯平均产量分别为 4.6、7.3、8.3、3.7、19.8 t·hm<sup>-2</sup>, 高、中、低产组间差异显著。小麦氮磷钾肥施用比例分别为 1 (177 kg N·hm<sup>-2</sup>) : 0.58 (102 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>) : 0.21 (37 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>)。中、高产组的氮肥用量无显著差异, 比低产组分别增加 20%和 27%, 高、中、低产组间的磷钾肥用量无显著差异。玉米氮磷钾肥施用比例分别为 1 (247 kg N·hm<sup>-2</sup>) : 0.42 (103 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>) : 0.19 (47 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>), 高产组的磷、钾肥用量比中产组分别增加 23%和 49%, 比低产组分别增加 55%和 52%, 高、中、低产组间氮肥用量无显著差异。水稻氮磷钾肥施用比例分别为 1 (186 kg N·hm<sup>-2</sup>) : 0.47 (88 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>) : 0.34 (64 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>), 中、高产组氮肥用量无显著差异, 比低产组分别减少 18%和 17%, 中、高产组磷肥用量无显著差异, 高、中、低产组间钾肥用量无显著差异。谷子氮磷钾施用比例分别为 1 (255 kg N·hm<sup>-2</sup>) : 0.56 (142 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>) : 0.21 (53 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>), 中、高产组氮肥用量无显著差异, 比低产组分别减少 29%和 24%, 中、高产组钾肥用量无显著差异, 比低产组分别减少 63%和 35%, 高、中、低产组间磷肥用量无显著差异。马铃薯氮磷钾肥施用比例分别为 1 (209 kg N·hm<sup>-2</sup>) : 0.60 (125 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>) : 0.53 (110 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>), 高、中、低产组间氮磷钾肥用量无显著差异。由此可见, 粮食作物氮磷钾施用比例为 1 : 0.42—0.58 : 0.19—0.53, 其中小麦中、高产组的氮肥投入较高, 玉米高产组的磷肥投入较高, 水稻、谷子和马铃薯高产组未增加化肥投入。

油菜和大豆的平均产量分别为 2.4 和 2.7 t·hm<sup>-2</sup>, 高、中、低产组间差异显著。油菜的氮磷钾肥施用比例分别为 1 (156 kg N·hm<sup>-2</sup>) : 0.51 (80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>) : 0.36 (56 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>), 高产组的氮肥用量比中、低产组分别增加 24%和 26%, 中、高产组钾肥用量无显著差异, 比低产组分别增加 73%和 82%, 高、中、低产组间磷肥用量无显著差异。大豆的氮磷钾肥施用比例分别为 1 (99 kg N·hm<sup>-2</sup>) : 0.63 (63 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>) : 0.26

(26 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>), 高产组钾肥用量比低、中产组分别增加 83%和 193%, 高、中、低产组间氮磷钾肥用量无显著差异。由此可见, 油料作物氮磷钾肥施用比例为 1 : 0.51—0.63 : 0.26—0.36, 高产组增加了钾肥投入、未增加磷肥用量, 仅油菜的高产组增加了氮肥用量。

经济作物苹果、西红柿、烤烟的平均产量分别为 23.8、93.5、2.7 t·hm<sup>-2</sup>, 高、中、低产组间差异显著。苹果的氮磷钾肥施用比例分别为 1 (731 kg N·hm<sup>-2</sup>) : 0.66 (482 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>) : 0.73 (535 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>), 高产组的氮磷钾肥用量比中产组分别增加 22%、32%、30%, 比低产组分别增加 51%、54%、60%。西红柿的氮磷钾肥施用比例分别为 1 (471 kg N·hm<sup>-2</sup>) : 0.82 (387 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>) : 0.95 (447 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>), 高产组的氮磷钾肥用量比中产组分别增加 161%、252%、150%, 比低产组分别增加 85%、133%、131%。烤烟的氮磷钾肥施用比例分别为 1 (108 kg N·hm<sup>-2</sup>) : 1.09 (118 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>) : 1.22 (132 kg K<sub>2</sub>O·hm<sup>-2</sup>), 高产组的氮磷钾肥用量比中产组分别增加 36%、35%、36%, 比低产组分别增加 27%、39%、128%。由此可见, 经济作物氮磷钾肥施用比例为 1 : 0.66—1.09 : 0.73—1.22, 且高产组均增加了肥料投入。相对于粮食、油料作物而言, 经济作物施肥量较高。

粮食作物施用氮肥以单质肥和复合肥为主, 磷肥以复合肥为主, 钾肥以复合肥和有机肥为主 (表 4)。对于小麦、玉米、水稻、谷子和马铃薯, 单质肥和复合肥分别占氮肥总投入的 92%、90%、87%、78%和 62%; 复合肥分别占磷肥总投入的 67%、64%、57%、43%和 54%, 复合肥和有机肥占钾肥总投入的 92%、98%、95%、100%和 94%。粮食作物的施肥方式表现为, 氮肥以基施为主, 小麦、玉米、水稻、谷子和马铃薯施用氮肥的基追比为 1 : 0.1、1 : 0.7、1 : 0.4、1 : 0.6 和 1 : 0.1, 磷钾肥多为一次性基施。

油菜施用氮肥以单质肥和复合肥为主, 占氮肥总投入的 89%, 磷钾肥以复合肥为主, 分别占磷肥和钾肥总投入的 67%和 70%。大豆施用氮肥以单质肥和有机肥为主, 占氮肥总投入的 95%, 磷钾肥以有机肥为主, 分别占磷肥和钾肥总投入的 43%和 96%。总的来看, 油料作物的施肥方式表现为, 氮肥以基施为主, 油菜、大豆施用氮肥的基追比分别为 1 : 0.5、1 : 0.2; 磷钾肥多为一次性基施。

表 3 作物产量及施肥量

Table 3 Productivity of crops and the application rate of fertilizer

作物分类	作物类型	产量水平	等级范围	样本数	产量	施氮量	施磷量	施钾量
Crop classification	Crop type	Yield level	Yield range (t·hm <sup>-2</sup> )	Sample amount	Yield (t·hm <sup>-2</sup> )	N rate (kg N·hm <sup>-2</sup> )	P rate (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ·hm <sup>-2</sup> )	K rate (kg K <sub>2</sub> O·hm <sup>-2</sup> )
粮食作物 Cereal crop	小麦 Wheat	低产 Low	<4.0	100	3.2 c	152 b	112 a	35 a
		中产 Mid	4.0—5.2	103	4.5 b	183 a	95 a	35 a
		高产 High	>5.2	109	5.8 a	193 a	99 a	42 a
	玉米 Maize	低产 Low	<6.8	224	5.3 c	237 a	85 c	42 b
		中产 Mid	6.8—9.0	178	7.8 b	257 a	107 b	43 b
		高产 High	>9.0	112	10.7a	251 a	132 a	64 a
	水稻 Rice	低产 Low	<7.4	24	6.4 c	218 a	63 b	59 a
		中产 Mid	7.4—8.8	55	7.9 b	178 b	102 a	55 a
		高产 High	>8.8	71	9.3 a	182 b	86 ab	73 a
	谷子 Millet	低产 Low	<2.7	10	0.8 c	326 a	105 a	92 a
		中产 Mid	2.7—4.6	26	3.6 b	233 b	141 a	34 b
		高产 High	>4.6	15	5.8 a	247 b	164 a	60 ab
油料作物 Oil crop	马铃薯 Potato	低产 Low	<15.8	80	11.9 c	214 a	139 a	89 a
		中产 Mid	15.8—24.0	119	20.7 b	216 a	128 a	121 a
		高产 High	>24.0	50	30.1 a	186 a	96 a	117 a
	油菜 Canola	低产 Low	<2.1	31	1.7 c	139 b	65 a	34 b
		中产 Mid	2.1—2.6	66	2.3 b	141 b	85 a	59 a
		高产 High	>2.6	75	2.8 a	175 a	83 a	62 a
	大豆 Soybean	低产 Low	<2.6	24	1.7 c	81 a	71 a	24 b
		中产 Mid	2.6—3.9	10	3.0 b	135 a	42 a	15 b
		高产 High	>3.9	8	5.6 a	89 a	66 a	44 a
经济作物 Cash crop	苹果 Apple	低产 Low	<19.7	70	11.5 c	614 b	412 b	445 b
		中产 Mid	19.7—34.8	61	27.0 b	761 ab	481 b	545 ab
		高产 High	>34.8	32	44.4 a	930 a	636 a	711 a
	西红柿 Tomato	低产 Low	<86.0	17	59.8 c	438 b	339 b	377 b
		中产 Mid	86.0—118.0	5	80.4 b	311 b	225 b	348 b
		高产 High	>118.0	4	117.8 a	812 a	791 a	870 a
	烤烟 Flue-cured tobacco	低产 Low	<2.8	21	2.2 c	101 b	110 b	101 c
		中产 Mid	2.8—3.6	4	3.3 b	94 b	113 b	169 b
		高产 High	>3.6	5	4.1 a	128 a	153 a	230 a

表中产量、施氮磷钾量为平均值，同栏目的同列数据后不同字母表示不同作物不同产量水平间差异达 5% 的显著水平。N 指氮肥，P 指磷肥，K 指钾肥。下同

Data of yield, NPK rates are average. In same column of a region, different lowercase letters indicate significant differences between means of different yield levels at  $P<5\%$ . N: Nitrogen fertilizer; P: Phosphorus fertilizer; K: Potassium fertilizer. The same as below

苹果、西红柿、烤烟施用氮磷钾肥以复合肥为主，分别占氮肥总投入的 72%、48%和 92%，占磷肥总投入的 40%、51%和 97%，占钾肥总投入的 77%、69%和 98%。苹果施用氮肥基追比为 1：0.5，磷钾肥多为

一次性基施；西红柿施用氮、磷和钾肥基追比分别为 1：0.4、1：0.3 和 1：0.9；烤烟施用氮磷钾肥均为一次性基施。总的来看，复合肥和单质肥是作物氮素的主要来源，复合肥是作物磷钾的主要来源；氮肥以基

表 4 肥料种类、用量及其基追比

Table 4 The sources, types, application rates and ratio of fertilizer

作物分类 Crop classification	作物类型 Crop type	肥料种类 Fertilizer types	氮肥 N fertilizer (kg N·hm <sup>-2</sup> )		磷肥 P fertilizer (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ·hm <sup>-2</sup> )		钾肥 K fertilizer (kg K <sub>2</sub> O·hm <sup>-2</sup> )	
			基肥	追肥	基肥	追肥	基肥	追肥
			Basal fertilizer	Topdressing	Basal fertilizer	Topdressing	Basal fertilizer	Topdressing
粮食作物 Cereal crop	小麦 Wheat	单质肥 ECF	66	20	22	0	3	0
		复合肥 CF	76	0	69	0	25	0
		有机肥 OM	15	0	11	0	10	0
		总和 ALL	157	20	102	0	38	0
	玉米 Maize	单质肥 ECF	51	99	18	1	1	0
		复合肥 CF	68	4	62	4	23	2
		有机肥 OM	23	1	18	1	18	1
		总和 ALL	142	104	97	6	44	3
	水稻 Rice	单质肥 ECF	55	50	21	0	3	0
		复合肥 CF	54	3	48	2	43	1
		有机肥 OM	25	0	17	0	16	0
		总和 ALL	134	52	86	2	63	1
	谷子 Millet	单质肥 ECF	73	94	34	0	0	0
		复合肥 CF	31	0	60	0	13	0
		有机肥 OM	57	0	47	0	39	0
		总和 ALL	161	94	141	0	53	0
	马铃薯 Potato	单质肥 ECF	47	18	19	0	6	0
		复合肥 CF	70	3	63	3	53	3
		有机肥 OM	54	0	37	0	43	0
		总和 ALL	171	21	119	3	102	3
油料作物 Oil crop	油菜 Canola	单质肥 ECF	38	46	18	0	4	0
		复合肥 CF	53	2	51	1	37	1
		有机肥 OM	15	2	8	1	12	1
		总和 ALL	106	50	77	2	53	2
	大豆 Soybean	单质肥 ECF	40	13	23	1	0	0
		复合肥 CF	5	0	12	0	1	0
		有机肥 OM	41	0	27	0	25	0
		总和 ALL	86	13	62	1	26	0
经济作物 Cash crop	苹果 Apple	单质肥 ECF	75	80	14	2	14	29
		复合肥 CF	359	166	19	1	5	138
		有机肥 OM	49	2	12	0	0	0
		总和 ALL	483	248	45	3	19	167
	西红柿 Tomato	单质肥 ECF	13	32	2	7	9	6
		复合肥 CF	159	83	159	56	161	176
		有机肥 OM	184	31	149	39	91	45
		总和 ALL	356	146	310	102	261	227
	烤烟 Flue-cured tobacco	单质肥 ECF	0	0	0	0	0	0
		复合肥 CF	96	0	114	0	130	0
		有机肥 OM	8	0	4	0	2	0
		总和 ALL	104	0	118	0	132	0

ECF: Elemental chemical fertilizer; CF: Compound fertilizer; OM: Organic manure. 表 6 同 The same as Fig.6

施为主, 少部分单质氮肥通过追肥的形式施入, 磷钾肥施用多以一次性基施为主。

## 2.2 作物的减肥潜力

比较农户实际施肥量与合理施肥量发现, 减少肥料投入的潜力因作物种类和产量水平而异(表5)。对于小麦, 氮、磷和钾肥用量可分别减少 28% ( $49 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、53% ( $54 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和 11% ( $4 \text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。其中, 减肥主要对象在低、中产农户。低产农户的氮、磷和钾肥减幅分别为 41%、70%和 34%, 中产农户的减幅分别为 31%、49%和 6%。对于玉米, 氮、磷和钾肥用量可分别减少 49% ( $120 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、66% ( $68 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和 28% ( $7 \text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。减肥主要对象为低产水平农户, 氮、磷和钾肥减幅分别为 61%、69%和 43%。对于水稻, 氮、磷和钾肥用量可分别减少 23% ( $43 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、51% ( $45 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和 28% ( $18 \text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。减肥对象主要为低产农户, 氮、磷和钾肥减幅分别为 50%、48%和 39%。对于谷子, 氮、磷和钾肥用量可分别减少 60% ( $144 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、62% ( $87 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和 51% ( $27 \text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。减肥对象主要为低产水平农户, 氮、磷和钾肥减幅分别为 93%、89%和 94%。对于马铃薯, 氮、磷肥用量可分别减少 48% ( $110 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和 52% ( $66 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ )。减肥主要对象为低、中产农户, 低产农户氮、磷肥减幅分别为 72%和 74%, 中产农户氮、磷肥减幅分别为 52%和 52%。而高产农户钾肥施用不足, 需增加 55% ( $64 \text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。由此可见, 粮食作物减肥的主要对象为低产农户, 氮、磷肥减施潜力较大, 而马铃薯高产农户钾肥施用不足。

对于油料作物油菜, 氮、磷和钾肥可分别减少 33% ( $52 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、37% ( $20 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和 26% ( $46 \text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。其中, 减肥对象主要为低、中产农户。氮、磷和钾肥在低产农户的减幅分别为 47%、45%和 37%, 在中产农户的减幅分别为 30%、44%和 51%。对于大豆, 磷钾肥用量不足, 应分别增施 11% ( $7 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和 28% ( $7 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ )。其中, 氮、磷和钾肥在低产农户施用严重不足, 增幅分别为 128%、119%和 55%, 磷、钾肥在中产农户施用也不足, 增幅分别为 83%和 143%。由此可见, 油菜生产的主要减肥对象为低中产农户, 而大豆生产的中高产农户施肥不足。

对于经济作物苹果, 氮、磷和钾肥用量可分别减少 67% ( $493 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、70% ( $339 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ )

和 64% ( $345 \text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。对于西红柿, 氮、磷和钾肥用量可分别减少 41% ( $180 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、65% ( $222 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 和 49% ( $196 \text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。对于烤烟, 氮、磷肥用量可分别减少 11% ( $11 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、53% ( $62 \text{ kg K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。氮肥减施主要发生在低产农户, 而中、高产农户的氮肥施用不足, 过量施用磷肥发生在所有农户, 钾肥施用基本合理。由此可见, 经济作物苹果、西红柿各产量水平减肥潜力均较大, 而烤烟的氮肥用量较低, 需要补充。相对于粮食和油料作物, 苹果、西红柿等高产经济作物的减肥潜力更大。

## 2.3 作物的经济效益

作物生产的经济效益因作物种类和产量水平而异(表6)。粮食作物生产的总投入为  $0.51\times 10^4$ — $0.97\times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ , 其中肥料投入占总投入的 31%—52%, 总产出为  $1.07\times 10^4$ — $2.15\times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ 。净经济效益为  $0.44\times 10^4$ — $1.63\times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ , 以马铃薯为最佳, 以玉米为最差。与低产组相比, 小麦、玉米、水稻和马铃薯高产组的总投入分别增加了 6%、16%、5%和 3%, 总产出分别增加 81%、101%、45%和 596%, 净经济效益分别增加 332%、207%、62%和 1382%。谷子高产组投入减少了 19%, 总产出增加了 154%, 净经济效益增加 248%, 生产水平差异很大, 大多数农户管理谷子的水平欠佳。

油菜和大豆生产总投入分别为  $0.41\times 10^4$  和  $0.43\times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ , 肥料投入分别占总投入的 57%和 59%。总产出分别为  $1.24\times 10^4$  和  $1.18\times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ , 净经济效益分别为  $0.84\times 10^4$  和  $0.75\times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ 。与低产组相比, 大豆和油菜高产组的总投入分别增加了 110%和 22%, 总产出分别增加 236%和 66%, 净经济效益分别增加 378%和 94%。

苹果、西红柿和烤烟生产中, 总投入分别为  $2.67\times 10^4$ 、 $5.56\times 10^4$  和  $2.32\times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ , 肥料投入分别占总投入的 48%、65%和 57%。总产出分别为  $13.76\times 10^4$ 、 $20.61\times 10^4$  和  $5.92\times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ 。净经济效益分别为  $11.09\times 10^4$ 、 $15.05\times 10^4$  和  $4.19\times 10^4$  元/ $\text{hm}^2$ 。与低产组相比, 苹果、烤烟高产组的总投入分别增加了 11%和 53%, 总产出分别增加 287%和 66%, 净经济效益分别增加 375%和 72%。西红柿高产组总投入减少了 62%, 总产出增加了 97%, 净经济效益增加了 323%。可见, 随着产量水平的增加, 总投入有增有减, 但经济效益增长量远高于总投入增长量。且经济作物经济效益、肥料投入量均远高于粮食和油料作物。

表 5 作物的减肥潜力

Table 5 The potential of fertilizer reduction for crop production

作物分类 Crop classification	作物类型 Crop type	产量水平 Yield level	产量 Yield (t·hm <sup>-2</sup> )	氮肥 N fertilizer			磷肥 P fertilizer			钾肥 K fertilizer		
				FP (kg N·hm <sup>-2</sup> )	R <sub>ec</sub>	%	FP (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ·hm <sup>-2</sup> )	R <sub>ec</sub>	%	FP (kg K <sub>2</sub> O·hm <sup>-2</sup> )	R <sub>ec</sub>	%
粮食作物 Cereal crop	小麦 Wheat	低产 <sup>a</sup> Low	3.2	152	90	41	112	34	70	35	23	34
		适中 Mid	4.5	183	127	31	95	48	49	35	33	6
		高产 <sup>a</sup> High	5.8	193	164	15	99	61	38	42	42	0
	玉米 Maize	低产 <sup>a</sup> Low	5.3	237	93	61	85	26	69	42	24	43
		适中 Mid	7.8	257	134	48	107	37	65	43	35	19
		高产 <sup>a</sup> High	10.7	251	186	26	132	51	61	64	49	23
	水稻 Rice	低产 <sup>a</sup> Low	6.4	218	110	50	63	33	48	59	36	39
		适中 Mid	7.9	178	135	24	102	40	61	55	43	22
		高产 <sup>a</sup> High	9.3	242	160	12	131	48	44	73	52	29
	谷子 Millet	低产 <sup>a</sup> Low	0.8	326	23	93	105	12	89	92	6	94
		适中 Mid	3.6	233	99	58	141	52	63	34	25	26
		高产 <sup>a</sup> High	5.8	247	158	36	164	84	49	60	40	33
	马铃薯 Potato	低产 <sup>a</sup> Low	11.9	214	59	66	139	36	68	89	71	19
		适中 Mid	20.7	216	104	50	128	62	54	121	124	-14
		高产 <sup>a</sup> High	30.1	186	151	18	96	90	17	117	181	-47
油料作物 Oil crop	大豆 Soybean	低产 <sup>a</sup> Low	1.7	81	60	25	71	43	40	24	20	18
		适中 Mid	3.0	152	108	29	42	77	-83	15	36	-143
		高产 <sup>a</sup> High	5.6	89	203	-128	66	143	-119	44	68	-55
	油菜 Canola	低产 <sup>a</sup> Low	1.7	139	73	47	65	43	45	34	22	37
		适中 Mid	2.3	141	98	30	85	57	44	59	29	51
经济作物 Cash crop	苹果 Apple	低产 <sup>a</sup> Low	11.5	614	115	81	412	69	83	445	92	79
		适中 Mid	27.0	761	270	64	481	162	66	545	216	60
		高产 <sup>a</sup> High	44.4	930	444	52	636	267	58	711	356	50
	西红柿 Tomato	低产 <sup>a</sup> Low	59.8	236	191	19	182	90	51	226	150	34
		适中 Mid	80.5	562	257	54	434	121	72	453	201	56
		高产 <sup>a</sup> High	117.8	485	377	22	406	177	56	571	294	48
	烤烟 Flue-cured tobacco	低产 <sup>a</sup> Low	2.2	101	77	24	110	46	58	101	106	-5
		适中 Mid	3.3	94	115	-22	113	69	39	169	157	7
		高产 <sup>a</sup> High	4.1	128	142	-11	153	85	44	230	194	5

FP 指农户施肥量; R<sub>ec</sub> 指合理施肥量; %指减少施肥量潜力

FP: Fertilizer rate used by farmer practice; Rec: Recommended fertilizer rate; %: Potential of reduce fertilizer rate

3 讨论

3.1 农户产量与施肥

本研究调研的 1 709 份数据显示(表 3), 陕西省农作物小麦、玉米、水稻、谷子、马铃薯、油菜、大

豆、苹果、西红柿和烤烟平均产量分别为 4.6、7.3、8.3、3.7、19.8、2.4、2.7、23.8、93.5 和 2.7 t·hm<sup>-2</sup>。总的来看, 与过去在陕西省的调研结果相比, 作物产量普遍有所提升<sup>[27]</sup>。具体表现为, 小麦产量高于 2009—2013 年在陕西关中平原(3.5 t·hm<sup>-2</sup>)的研究结

表 6 作物的经济效益  
Table 6 Economic benefits of crops

作物分类 Crop classification	作物类型 Crop type	产量等级 Yield level	总产出 Output ( $\times 10^4$ yuan/hm <sup>2</sup> )	投入 Input (yuan/hm <sup>2</sup> )			总投入 Total ( $\times 10^4$ yuan/hm <sup>2</sup> )	肥料占总投入 Fertilizer / total (%)	经济效益 Benefit ( $\times 10^4$ yuan/hm <sup>2</sup> )
				单质肥 ECF	复合肥 CF	有机肥 OM			
粮食作物 Cereal crop	小麦 Wheat	低产 <sup>a</sup> Low	0.76	338	1134	231	0.58	29	0.18 c
		适中 Mid	1.07	546	1096	85	0.59	29	0.48 b
		高产 <sup>a</sup> High	1.37	434	1543	51	0.62	33	0.77 a
	玉米 Maize	低产 <sup>a</sup> Low	0.97	664	888	327	0.54	35	0.43 c
		适中 Mid	1.40	807	1016	212	0.55	37	0.85 b
		高产 <sup>a</sup> High	1.95	426	2107	216	0.63	44	1.32 a
	水稻 Rice	低产 <sup>a</sup> Low	1.66	616	416	583	0.50	32	1.16 c
		适中 Mid	2.03	545	1038	217	0.52	35	1.51 b
		高产 <sup>a</sup> High	2.40	446	1281	135	0.52	36	1.88 a
	谷子 Millet	低产 <sup>a</sup> Low	0.32	801	1350	4500	1.16	57	-0.84 c
		适中 Mid	1.38	815	362	2973	0.91	45	0.47 b
		高产 <sup>a</sup> High	2.20	732	405	3336	0.95	47	1.26 a
	马铃薯 Potato	低产 <sup>a</sup> Low	1.04	266	760	3609	0.93	50	0.11 c
		适中 Mid	1.82	390	1835	3259	1.01	54	0.81 b
		高产 <sup>a</sup> High	2.64	497	1661	2755	0.96	51	1.68 a
油料作物 Oil crop	大豆 Soybean	低产 <sup>a</sup> Low	0.72	241	155	1669	0.38	54	0.34 c
		适中 Mid	1.29	603	0	1530	0.39	55	0.90 b
		高产 <sup>a</sup> High	2.42	1782	0	4500	0.80	78	1.62 a
	油菜 Canola	低产 <sup>a</sup> Low	0.88	379	742	575	0.34	49	0.54 c
		适中 Mid	1.18	400	1055	1075	0.43	59	0.75 b
经济作物 Cash crop	苹果 Apple	低产 <sup>a</sup> Low	6.65	623	7482	3277	2.51	45	4.14 c
		适中 Mid	15.65	805	8350	2039	2.50	45	13.15 b
		高产 <sup>a</sup> High	25.71	1782	9096	2342	2.70	49	23.01 a
	西红柿 Tomato	低产 <sup>a</sup> Low	15.46	286	67685	4220	9.18	79	6.28 c
		适中 Mid	20.79	408	5143	10350	3.55	45	17.24 b
		高产 <sup>a</sup> High	30.43	272	14304	4397	3.85	49	26.57 a
	烤烟 Flue-cured tobacco	低产 <sup>a</sup> Low	4.18	0	11250	268	2.16	53	3.96 c
		适中 Mid	5.59	0	14063	0	2.41	58	6.35 b
		高产 <sup>a</sup> High	6.93	0	19125	0	2.92	66	7.72 b

果<sup>[28]</sup>，玉米产量高于 2013—2016 年在陕西渭北旱塬（6.0 t·hm<sup>-2</sup>）的调研结果<sup>[29]</sup>，水稻、油菜产量高于 2005—2009 年在陕西省的调研结果（7.8、2.3 t·hm<sup>-2</sup>）<sup>[30]</sup>；大豆产量高于 2010—2011 年在陕西省科技示范县的调查结果（2.1 kg·hm<sup>-2</sup>）<sup>[31]</sup>；苹果产量高于 2007—2011 年在陕西省的调研结果（30.1 t·hm<sup>-2</sup>）<sup>[32]</sup>；西红柿产量

高于 2003 年在陕西省的调研结果（64.5 t·hm<sup>-2</sup>）<sup>[33]</sup>。然而，农户间产量差异较大，区域农作物产量仍有较大提升空间。

分析施肥量可知（表 3），粮食和油料作物生产均表现为氮肥用量最高（99—255 kg N·hm<sup>-2</sup>），磷肥次之（63—142 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>），钾肥最少（26—110

kg  $K_2O \cdot hm^{-2}$ )。2006—2009 年在陕西省对水稻、马铃薯和油菜的调研结果表明施肥亦表现为高氮(159—227 kg  $N \cdot hm^{-2}$ )、中磷(62—131 kg  $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ )、低钾(13—54 kg  $K_2O \cdot hm^{-2}$ )<sup>[8,34-35]</sup>。西北地区土壤富钾现象明显,土壤有效钾含量介于 100—170 mg·kg<sup>-1</sup>,基本能满足粮食和油料作物对钾素的需求。此外,较高的价格也是限制小农户在经济效益较低的粮食和油料作物施用钾肥的重要因素之一。苹果、西红柿和烤烟氮肥用量分别为 731、471 和 108 kg  $N \cdot hm^{-2}$ ,磷肥用量分别为 482、387 和 118 kg  $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ ,钾肥用量分别为 535、447 和 132 kg  $K_2O \cdot hm^{-2}$ 。相对于粮食和油料作物而言,经济作物肥料用量较高。就经济作物之间来看,产量水平较高的苹果和西红柿的肥料用量远高于烤烟。2006—2011 年期间在陕西省的调研结果也表明,小麦、玉米、水稻、马铃薯和油菜氮磷钾平均施用量分别为 145—230 kg  $N \cdot hm^{-2}$ 、62—110 kg  $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ 、13—45 kg  $K_2O \cdot hm^{-2}$ ,而苹果氮磷钾施用量分别为 558 kg  $N \cdot hm^{-2}$ 、358 kg  $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ 、208 kg  $K_2O \cdot hm^{-2}$ <sup>[8]</sup>,与本研究结果类似。通常来讲,经济效益是决定肥料用量最重要的驱动力。相对于粮食和油料作物,经济作物的经济效益更高,更能激发小农户增加肥料投入的积极性。高经济效益、高肥料投入的经济作物必然会带来更大的环境风险。因此,需加强对小农户施肥技术培训,增强小农户的环保意识,特别是经济作物生产者。

分析养分来源和施肥方式可知(表 4),对于粮食作物,34%—65%的氮肥来自单质氮肥,43%—67%的磷肥和 25%—70%的钾肥来自复合肥。对于油料作物的油菜,89%的氮肥来自单质肥和复合肥,67%和 70%磷肥和钾肥来自复合肥。对于经济作物,48%—98%的氮磷钾肥均来自复合肥。这表明农户生产中大多作物重化肥、轻有机肥。小麦、玉米、水稻、谷子、马铃薯、油菜、大豆、苹果、西红柿和烤烟氮肥基追比分别为 1 : 0.1、1 : 0.7、1 : 0.4、1 : 0.6、1 : 0.1、1 : 0.5、1 : 0.2、1 : 0.5、1 : 0.4 和 1 : 0,西红柿磷肥和钾肥基追比分别为 1 : 0.3 和 1 : 0.9,其余作物磷钾肥多为一次性基施。通常认为,小麦氮肥基追比为 1 : 0.5,玉米和水稻为 1 : 1.5,谷子、马铃薯和油菜为 1 : 0.7,大豆 1 : 1 较合理。苹果氮磷钾基追比分别为 1 : 1.5、1 : 0.67、1 : 4,西红柿氮磷钾基追比分别为 1 : 2、1 : 0.25、1 : 0.67,烤烟氮肥基追比 1 : 0.4 较合理<sup>[13,36-37]</sup>。本研究表明生产中基追比不合理现象普遍存在。总体看来,相对于合理推荐基追比,

农户普遍施用基肥比例偏高、追肥偏低,究其关键原因与西北地区降水少、灌溉缺乏、追肥不易有关<sup>[38]</sup>。其中,西红柿钾肥追肥比例较高,主要是因为西红柿需水量大,从而增加了追肥次数,且中后期施钾可以使果实着色均匀,使小农户偏好施用高钾肥料。而钾肥过多追施可能会影响钙镁铁等中微量元素的吸收,影响产量和品质。针对上述问题,为实现养分资源综合管理,提高养分资源利用效率。优化肥料用量和施用方法、应用有机无机肥配施、调整复合肥氮磷钾比例等措施利于改善此类施肥不合理现象。此外,加强科学技术的推广应用,有利于提高农民的种植管理水平,提高农户的农业知识素养以及科技应用,实现农业可持续发展。

### 3.2 作物减肥潜力及经济效益分析

化肥施用对提高农作物产量起到十分重要的作用,过量施用化肥将造成严重的环境污染问题<sup>[39]</sup>。全国农田养分盈余量在 1980—2016 年期间大幅增长,其中 2016 年氮、磷、钾盈余量分别为 129 kg  $N \cdot hm^{-2}$ 、123 kg  $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ 、64 kg  $K_2O \cdot hm^{-2}$ ,比 1980 年增长了 198%、423%、151%,西北地区氮磷养分盈余现象明显<sup>[40]</sup>。因此,评估现阶段的减肥潜力对农作物生产和环境安全有重要意义。本研究表明(表 5)粮食作物氮磷钾减肥潜力分别为 28%—60%(49—154 kg  $N \cdot hm^{-2}$ )、52%—66%(54—87 kg  $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ )、11%—51%(4—51 kg  $K_2O \cdot hm^{-2}$ );油料作物油菜氮磷钾减肥潜力为 33%(52 kg  $N \cdot hm^{-2}$ )、37%(20 kg  $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ )、46%(26 kg  $K_2O \cdot hm^{-2}$ );经济作物苹果和西红柿的氮磷钾减肥潜力分别介于 41%—77%(180—490 kg  $N \cdot hm^{-2}$ )、65%—89%(222—339 kg  $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ )、49%—82%(196—345 kg  $K_2O \cdot hm^{-2}$ )。苹果、西红柿等高产经济作物减肥潜力高于粮食和油料作物。不同产量水平的农户减肥潜力存在显著差异,粮食作物减肥的主要对象为低产农户,氮、磷肥减施潜力较大。油菜生产的主要减肥对象为低中产农户,经济作物苹果、西红柿各产量水平减肥潜力均较大。总的来看,农作物减肥重点在中低产组的农户。受“多投入多产出”的传统观念影响<sup>[39]</sup>,加之化肥补贴和市场竞争导致其价格偏低,是过量施肥的重要原因。另外,大豆、烤烟存在施肥不足的现象。大豆高产农户氮磷钾肥用量分别需增加 128%(114 kg  $N \cdot hm^{-2}$ )、119%(77 kg  $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ )和 55%(24 kg  $K_2O \cdot hm^{-2}$ ),烤烟中、高产农户的氮肥需分别增施 22%(21 kg  $N \cdot hm^{-2}$ )、11%(14 kg  $N \cdot hm^{-2}$ )。小农户生产中未意识到大豆的根瘤固氮作用并不能满

足作物对肥料的需求, 高产田块对于肥料的需求量更高, 忽略了肥料的施用。而烤烟对钾肥需求量较高, 过分强调钾肥提高烤烟品质的作用, 使得农户施肥时忽略了对氮肥的投入。由此可见, 发挥当地农业技术人员的作用, 鼓励农业科研人员到农业生产一线, 促进传统小农户向现代小农户转变, 以提高小农户种植管理水平是必要的。

经济收益关乎农民生活水平的提高, 制约农村经济的发展。本研究表明(表 6)不同作物类型和产量组间经济效益差异显著。粮食、油料和经济作物的平均净经济效益分别为  $0.44 \times 10^4$ — $1.63 \times 10^4$ 、 $0.75 \times 10^4$ — $0.84 \times 10^4$ 、 $0.49 \times 10^4$ — $1.56 \times 10^4$  元/hm<sup>2</sup>, 肥料占总投入比例分别为 31%—52%、57%—59%、73%—82%。经济作物的净经济效益和肥料投入远高于粮食和油料作物。根据 2018 年的统计数据, 三大主粮和大豆、油菜的总成本介于  $1.00 \times 10^4$ — $1.85 \times 10^4$  元/hm<sup>2</sup>, 净经济效益介于  $0.36 \times 10^4$ — $1.18 \times 10^4$  元/hm<sup>2</sup>, 西红柿和苹果总成本介于  $7.36 \times 10^4$ — $13.65 \times 10^4$  元/hm<sup>2</sup>, 净经济效益介于  $5.81 \times 10^4$ — $7.35 \times 10^4$  元/hm<sup>2</sup>[3]。在高成本时代背景下, 高收入和高回报的经济作物成为生产者经营决策的首选[10]。2000—2018 年间, 陕西省三大粮食作物面积减少了  $82 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>, 苹果种植面积增加了  $20 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>[3]。粮食作物应给予适当的补贴, 以提高粮农的生产积极性, 从而为坚守粮食播种面积  $306.7 \times 10^4$  hm<sup>2</sup> 的红线、保障口粮绝对安全提供支持力[41]。另外, 经济作物种植面积增加使得化肥施用量增长而带来严重的环境问题。以山东为例, 由于大面积改种大棚蔬菜, 0—40 cm 土层的氮盈余可达到  $3\ 327$  kg N·hm<sup>-2</sup>, 为传统小麦-玉米轮作体系的 9.5 倍[11]。在生产中, 大部分小农户将农产品产量和经济效益放在首位, 忽略了环境代价。有必要量化分析作物生产的环境代价, 制定相应的奖罚制度, 给予环境友好型农户奖励, 以提高肥料资源利用效率、促进农业可持续发展。

## 4 结论

本研究基于陕西省 2018 年 1 709 份调研数据, 系统分析了粮食、油料和经济作物生产的产量、施肥现状、减肥潜力及经济效益。结果表明农作物产量较之前年份的调研结果有所提升, 但农户间差异仍较大。不同作物间的施肥量、减肥潜力和经济效益差异较大。其中, 苹果、西红柿单位面积施肥量、减肥潜力、经济效益最高, 粮食作物次之, 油料作物最少。大豆、

烤烟存在施肥不足的现象。粮食作物氮、磷和钾减肥潜力分别介于 28%—60%、52%—66%和 115—51%。油料作物油菜氮、磷和钾减肥潜力分别为 33%、37%和 46%, 而大豆的磷、钾肥用量分别需增加 11%、28%。苹果、西红柿等经济作物的氮、磷和钾减肥潜力分别为 41%—67%、65%—70%和 49%—64%, 烤烟的磷肥减施潜力为 53%, 而中、高产农户的氮肥需分别增施 22%、11%。粮食、油料和经济作物平均净经济效益分别为  $0.44 \times 10^4$ — $1.63 \times 10^4$ 、 $0.75 \times 10^4$ — $0.84 \times 10^4$ 、 $4.19 \times 10^4$ — $15.05 \times 10^4$  元/hm<sup>2</sup>, 肥料占总投入比例分别为 31%—52%、57%—59%和 48%—65%。苹果、西红柿等高产经济作物的经济效益远高于粮食和油料作物, 其肥料投入量大、减肥潜力大, 而产量较低的经济作物烟草的氮肥用量较低, 甚至需要补充。

## 参考文献 References

- [1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273. doi:10.11674/zwylf.2013.0201.  
ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259-273. doi:10.11674/zwylf.2013.0201. (in Chinese)
- [2] VITOUSEK P M, NAYLOR R, CREWS T, DAVID M B, DRINKWATER L E, HOLLAND E, JOHNES P J, KATZENBERGER J, MARTINELLI L A, MATSON P A, NZIGUHEBA G, OJIMA D, PALM C A, ROBERTSON G P, SANCHEZ P A, TOWNSEND A R, ZHANG F S. Nutrient imbalances in agricultural development. Science, 2009, 324(5934): 1519-1520. doi:10.1126/science.1170261.
- [3] 陕西省统计局. 陕西统计年鉴. 西安: 中国统计出版社, 2010-2018.  
Shaanxi Provincial Bureau Of Statistics. Shaanxi Statistical Yearbook. Xi'an: China Statistics Press, 2010-2018. (in Chinese)
- [4] 侯萌瑶, 张丽, 王知文, 杨殿林, 王丽丽, 修伟明, 赵建宁. 中国主要农作物化肥用量估算. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 360-367. doi:10.13254/j.jare.2017.0061.  
HOU M Y, ZHANG L, WANG Z W, YANG D L, WANG L L, XIU W M, ZHAO J N. Estimation of fertilizer usage from main crops in China. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(4): 360-367. doi:10.13254/j.jare.2017.0061. (in Chinese)
- [5] 史常亮, 朱俊峰. 我国粮食生产中化肥投入的经济评价和分析. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 57-63. doi:10.13448/j.cnki.jalre.2016.283.  
SHI C L, ZHU J F. Economic evaluation and analysis of chemical fertilizer inputs in Chinese grain production. Journal of Arid Land

- Resources and Environment, 2016, 30(9): 57-63. doi:10.13448/j.cnki.jalre.2016.283. (in Chinese)
- [6] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, SHEN J L, HAN W X, ZHANG W F, CHRISTIE P, GOULDING K W T, VITOUSEK P M, ZHANG F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010. doi:10.1126/science.1182570.
- [7] 刘芬. 陕西省土壤养分与肥料资源利用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- LIU F. Study on soil nutrient and fertilizer resource utilization in Shaanxi Province[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015. (in Chinese)
- [8] 王小英, 陈占飞, 胡凡, 同延安. 陕西省农田化肥投入过量与不足的研究. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(6): 159-165. doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2017.06.24.
- WANG X Y, CHEN Z F, HU F, TONG Y A. Study on the excessive and insufficient of chemical fertilizer inputs on farmland in Shaanxi Province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(6): 159-165. doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2017.06.24. (in Chinese)
- [9] YANG X Y, FANG S B. Practices, perceptions, and implications of fertilizer use in East-Central China. *Ambio*, 2015, 44(7): 647-652. doi:10.1007/s13280-015-0639-7.
- [10] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- NATIONAL BUREAU OF STATISTICS. Compilation of National Agricultural Products Cost-benefit Data. Beijing: China Statistics Press, 2011. (in Chinese)
- [11] JU X T, KOU C L, ZHANG F S, CHRISTIE P. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environmental Pollution*, 2006, 143(1): 117-125. doi:10.1016/j.envpol.2005.11.005.
- [12] 曹寒冰, 王朝辉, 赵护兵, 马小龙, 余旭, 张璐, 蒲岳建, 杨珍珍, 吕辉, 师渊超, 杜明叶. 基于产量的渭北旱地小麦施肥评价及减肥潜力分析. *中国农业科学*, 2017, 50(14): 2758-2768.
- CAO H B, WANG Z H, ZHAO H B, MA X L, SHE X, ZHANG L, PU Y J, YANG Z Z, LÜ H, SHI Y C, DU M Y. Yield based evaluation on fertilizer application and analysis of its reduction potential in Weibei dryland wheat production. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14): 2758-2768. (in Chinese)
- [13] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 28-33.
- ZHANG F S, CHEN X P, CHEN Q. Fertilization Guide On Major Crops of China. Beijing: China Agricultural University Press, 2009: 28-33. (in Chinese)
- [14] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 鲁明星, 杨文兵, 高祥照. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 272-276. doi:10.3969/j.issn.1002-6819.2010.06.047.
- DAI Z G, LU J W, LI X K, LU M X, YANG W B, GAO X Z. Nutrient release characteristic of different crop straws manure. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6): 272-276. doi:10.3969/j.issn.1002-6819.2010.06.047. (in Chinese)
- [15] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 梁国庆, 周卫. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 1-21.
- SONG D L, HOU S P, WANG X B, LIANG G Q, ZHOU W. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1-21. (in Chinese)
- [16] 樊红柱. 苹果树体生长发育、养分吸收利用与累积规律[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- FAN H Z. The growth, nutrients uptake, utilization and accumulation in apple tree[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006. (in Chinese)
- [17] 姜远茂, 葛顺峰, 毛志泉, 陈学森. 我国苹果产业节本增效关键技术 IV: 苹果高效平衡施肥技术. *中国果树*, 2017(4): 1-4, 13. doi:10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2017.04.001.
- JIANG Y M, GE S F, MAO Z Q, CHEN X S. Balanced fertilization technology of apple. *China Fruits*, 2017(4): 1-4, 13. doi:10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2017.04.001. (in Chinese)
- [18] 彭福田, 姜远茂, 顾曼如, 束怀瑞. 落叶果树氮素营养研究进展. *果树学报*, 2003, 20(1): 54-58. doi:10.3969/j.issn.1009-9980.2003.01.013.
- PENG F T, JIANG Y M, GU M R, SHU H R. Advances in research on nitrogen nutrition of deciduous fruit crops. *Journal of Fruit Science*, 2003, 20(1): 54-58. doi:10.3969/j.issn.1009-9980.2003.01.013. (in Chinese)
- [19] WU L Q, CUI Z L, CHEN X P, YUE S C, SUN Y X, ZHAO R F, DENG Y, ZHANG W, CHEN K R. Change in phosphorus requirement with increasing grain yield for Chinese maize production. *Field Crops Research*, 2015, 180: 216-220. doi:10.1016/j.fcr.2015.06.001.
- [20] HOU P, GAO Q, XIE R Z, LI S K, MENG Q F, KIRKBY E A, RÖMHELD V, MÜLLER T, ZHANG F S, CUI Z L, CHEN X P. Grain yields in relation to N requirement: Optimizing nitrogen management for spring maize grown in China. *Field Crops Research*, 2012, 129: 1-6. doi:10.1016/j.fcr.2012.01.006.
- [21] XU X P, HE P, PAMPOLINO M F, CHUAN L M, JOHNSTON A M, QIU S J, ZHAO S C, ZHOU W. Nutrient requirements for maize in China based on QUEFTS analysis. *Field Crops Research*, 2013, 150:

- 115-125. doi:10.1016/j.fcr.2013.06.006.
- [22] XU X P, XIE J G, HOU Y P, HE P, PAMPOLINO M F, ZHAO S C, QIU S J, JOHNSTON A M, ZHOU W. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China. *Field Crops Research*, 2015, 180: 37-45. doi:10.1016/j.fcr.2015.05.008.
- [23] 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: 19-20.
- JIN Y Q, ZHANG Z Y. *Formula Fertilization Method And Its Application*. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1993: 19-20. (in Chinese)
- [24] 黄德明, 白纲义, 樊淑文. 蔬菜配方施肥. 北京: 中国农业出版社, 2001: 82-85.
- HUANG D M, BAI G Y, FAN S W. *Vegetable Formula Fertilization*. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 82-85. (in Chinese)
- [25] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 张怀志, 袁硕. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1480-1493. doi:10.11674/zwyf.17366.
- HUANG S W, TANG J W, LI C H, ZHANG H Z, YUAN S. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2017, 23(6): 1480-1493. doi:10.11674/zwyf.17366. (in Chinese)
- [26] 陈晓辉. 中国种植业结构演变及其资源环境代价研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- CHEN X H. *Resource and environmental costs of cropping structure change in China*[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [27] LI S X, WANG Z H, MALHI S S, LI S Q, GAO Y J, TIAN X H. Chapter 7 nutrient and water management effects on crop production, and nutrient and water use efficiency in dryland areas of China. *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2009: 223-265. doi:10.1016/s0065-2113(09)01007-4.
- [28] 赵护兵, 王朝辉, 高亚军, 张卫峰. 陕西省农户小麦施肥调研评价. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 245-253. doi:10.11674/zwyf.14243.
- ZHAO H B, WANG Z H, GAO Y J, ZHANG W F. Investigation and evaluation of household wheat fertilizer application in Shaanxi Province. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 245-253. doi:10.11674/zwyf.14243. (in Chinese)
- [29] 王浩, 董朝阳, 王淑兰, 张玉娇, 师祖姣, 张元红, 王瑞, 李军. 基于春玉米籽粒产量的渭北旱塬区农户施肥现状评价. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3): 590-598. doi:10.11674/zwyf.18022.
- WANG H, DONG Z Y, WANG S L, ZHANG Y J, SHI Z J, ZHANG Y H, WANGRUI, LI J. Evaluation on fertilization of farmer practice based on grain yield of spring maize in Weibei dryland. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2018, 24(3): 590-598. doi:10.11674/zwyf.18022. (in Chinese)
- [30] 王小英. 陕西省养分资源利用时空变化特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- WANG X Y. *Study on characteristics of the temporal and spatial variation of nutrient resource utilization in Shaanxi Province*[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015. (in Chinese)
- [31] 杨如萍, 宋雯雯, 孙石, 吴存祥, 王化俊, 韩天富. 中国不同地区科技示范县大豆单产及产量相关性状的比较. *大豆科学*, 2012, 31(4): 557-567. doi:10.3969/j.issn.1000-9841.2012.04.010.
- YANG R P, SONG W W, SUN S, WU C X, WANG H J, HAN T F. Comparison of soybean yield and yield-related traits of agri-technology demonstration counties in different regions of China. *Soybean Science*, 2012, 31(4): 557-567. doi:10.3969/j.issn.1000-9841.2012.04.010. (in Chinese)
- [32] 刘芬, 李献军, 王小英, 赵佐平, 同延安. 陕西省主要农作物测土施肥效益分析. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 136-140, 217. doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2016.02.22.
- LIU F, LI X J, WANG X Y, ZHAO Z P, TONG Y N. Benefit analysis of formulated fertilization on main crops in Shaanxi Province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(2): 136-140, 217. doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2016.02.22. (in Chinese)
- [33] 黎青慧. 陕西省黄瓜西红柿施肥调查. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003(S1): 73-78.
- LI Q H. Investigation on fertilization of cucumber and tomato in Shaanxi Province. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2003(S1): 73-78. (in Chinese)
- [34] 王小英, 刘芬, 同延安, 赵佐平. 陕南秦巴山区油菜施肥现状评价. *中国油料作物学报*, 2013, 35(2): 190-195. doi:10.7505/j.issn.1007-9084.2013.02.013.
- WANG X Y, LIU F, TONG Y N, ZHAO Z P. Fertilization evaluation of rapeseed in Qin-Ba Mountain area of southern Shaanxi Province. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2013, 35(2): 190-195. doi:10.7505/j.issn.1007-9084.2013.02.013. (in Chinese)
- [35] 王小英, 刘芬, 同延安, 赵佐平. 陕南秦巴山区水稻施肥现状评价. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3106-3112. doi:10.13287/j.1001-9332.2013.0534.
- WANG X Y, LIU F, TONG Y N, ZHAO Z P. Present situation of rice fertilization in Qin-Ba mountainous area of southern Shaanxi, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(11): 3106-3112. doi:10.13287/j.1001-9332.2013.0534. (in Chinese)

- [36] 李嘉, 吕慎强, 杨泽宇, 李惠通, 王吕, 阳婷, 王筱斐, 王林权. 氮肥运筹对黄土塬区春玉米产量、效益和氮肥利用率的综合效应. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1): 32-41. doi:10.11674/zwylf.19045.
- LI J, LÜ S Q, YANG Z Y, LI H T, WANG L, YANG T, WANG X F, WANG L Q. Comprehensive effects of nitrogen fertilizer management on yield, economic performance and nitrogen use efficiency of spring maize in Loess Plateau, China. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2020, 26(1): 32-41. doi:10.11674/zwylf.19045. (in Chinese)
- [37] 余小芬, 解燕, 杨树明, 邹炳礼, 刘加红, 张瑞勤, 吕亚琼, 蔡永占, 张素华, 邱学礼. 减施氮磷钾肥和氮肥基追比对云南曲靖烤烟产质量及养分利用的影响. 西南农业学报, 2020, 33(4): 848-854. doi:10.16213/j.cnki.scjas.2020.4.025.
- YU X F, XIE Y, YANG S M, ZOU B L, LIU J H, ZHANG R Q, LV Y Q, CAI Y Z, ZHANG S H, QIU X L. Effects of reduced nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer combined with nitrogen dressing ratios on yield, quality and nutrient use efficiency of flue-cured tobacco in Qujing city, Yunnan Province. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(4): 848-854. doi:10.16213/j.cnki.scjas.2020.4.025. (in Chinese)
- [38] 王艺颖, 刘春力. 陕西省主要粮食作物生产成本收益研究? : 以小麦、玉米为例. 中国农业资源与区划, 2016, 37(6): 143-148. doi:10.7621/cjarrp.1005-9121.20160623.
- WANG Y Y, LIU C L. The cost-benefit analysis of the main grain crops in Shaanxi Province. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(6): 143-148. doi:10.7621/cjarrp.1005-9121.20160623. (in Chinese)
- [39] 任世鑫, 李二玲, 邓晴晴, 崔之珍. 中国三大粮食作物化肥施用特征及环境风险评价 长江流域资源与环境, 2019, 28(12): 2936-2947. DOI: CNKI:SUN:CJLY.0.2019-12-014.
- REN S X, LI E L, DENG Q Q, CUI Z Z. Characteristics of fertilizer application and environmental risk assessment of three major grain crops in China. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(12): 2936-2947. DOI: CNKI:SUN:CJLY.0.2019-12-014. (in Chinese)
- [40] 刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- LIU X Y. Study on nutrients balance and requirement in agricultural production in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)
- [41] 王卫东, 曹旭. 陕西省主要粮食作物种植结构时空变化特征分析. 中国农业资源与区划, 2020, 41(9): 155-162. doi:10.7621/cjarrp.1005-9121.20200919.
- WANG W D, CAO X. Temporal and spatial variation characteristics of main grain crop planting structures in Shaanxi Province. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(9): 155-162. doi:10.7621/cjarrp.1005-9121.20200919. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)