



晋南黄土旱塬小麦养分投入与化肥减施经济环境效应评价

马红梅^{1,2}, 曹寒冰^{1,2}, 谢英荷^{1,2✉}, 李廷亮^{1,2}, 刘凯¹, 张奇茹¹, 姜丽伟¹, 曹静¹, 邵靖琳¹, 武文玥¹, 栗文琪¹

¹ 山西农业大学资源环境学院, 山西太谷 030801; ² 山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西太谷 030801

摘要:【目的】明确晋南黄土旱塬冬小麦养分投入现状, 为当地旱作冬小麦稳产增产、减肥增效和控制农田面源污染提供理论依据。【方法】通过连续 9 年对黄土旱塬 984 个小麦种植户进行施肥调查, 采用基于冬小麦产量确定的推荐施肥量, 评价农户施肥, 分析农户施肥的减肥潜力及其经济和环境效益。【结果】调研农户小麦籽粒平均产量 $3\ 711\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中属于低产 ($\leq 3\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和中产 ($3\ 200\text{—}4\ 220\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的农户比例分别占 56.0% 和 18.1%。农户氮肥、磷肥和钾肥的平均用量分别为 $292.3\ \text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $159.8\ \text{kg}\ \text{P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $92.0\ \text{kg}\ \text{K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。随着产量水平提高, 施肥过量(即高投入+很高投入)的农户比例增加, 其中氮肥、磷肥和钾肥施用过量的农户比例分别为 68.7%、65.1% 和 57.9%。在各产量水平投入高和很高的农户减肥潜力较大, 其中高投入的农户氮肥、磷肥和钾肥减施量为 $24.1\ \text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $12.8\ \text{kg}\ \text{P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $6.2\ \text{kg}\ \text{K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$, 减少比例依次为 15.9%、16.7% 和 16.7%; 很高投入的农户氮肥、磷肥和钾肥减施量为 $250.9\ \text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $205.7\ \text{kg}\ \text{P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $124.6\ \text{kg}\ \text{K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$, 减少比例依次为 66.5%、76.7% 和 80.0%。进一步分析表明, 高投入和很高投入的农户化肥减施后经济效益可增加 251 和 3 425 元/ hm^2 , 即分别增加 4.0% 和 55.0%; 高投入的农户氮肥、磷肥和钾肥的农学效率可分别提高 18.8%、23.2% 和 22.1%, 很高投入的可分别提高 192.5%、321.3% 和 388.1%; 高投入的农户氮肥、磷肥和钾肥的偏生产力可分别提高 20.2%、23.7% 和 19.2%, 很高投入的可分别提高 210.4%、317.9% 和 388.1%。同时, 合理降低高投入和很高投入的农户施氮量, N_2O 排放可分别减少 0.3 和 6.3 $\text{kg}\ \text{N}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$, 减少幅度为 11.2% 和 72.5%; NH_3 挥发分别减少 14.1 和 90.7 $\text{kg}\ \text{NH}_3\cdot\text{hm}^{-2}$, 减幅为 20.8% 和 62.8%; NO_3^- -N 淋洗减少 3.1 和 231.1 $\text{kg}\ \text{NO}_3^- \cdot \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$, 减幅为 4.9% 和 79.6%; 整体上, 总氮污染物(包括 N_2O 排放、 NH_3 挥发和 NO_3^- -N 淋洗)可分别减少 17.4 和 328.1 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 减幅 13.1% 和 74.0%, 节约氮肥 12.5 和 130.9 $\text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$, 减少氮肥投入 65.0 和 683.3 元/ hm^2 。【结论】通过基于产量的农户施肥评价、减肥潜力估测、化肥减施后的经济效益和氮化合物污染物的减排效应分析, 明确了高和很高投入的农户氮磷钾减施潜力分别为 $24.1\text{—}250.9\ \text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $12.8\text{—}205.7\ \text{kg}\ \text{P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $6.2\text{—}124.6\ \text{kg}\ \text{K}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$, 且化肥减施后农户的经济收益提高 251—3 425 元/ hm^2 , 氮、磷、钾肥的农学效率分别提高 18.8%—192.5%、23.2%—321.3%、22.1%—388.1%, 同时, 氮、磷、钾偏生产力提高 20.2%—210.4%、23.7%—317.9%、19.2%—388.1%, 还能减少包括 N_2O 排放、 NH_3 挥发、 NO_3^- -N 淋洗等总氮污染物的排放 17.4—328.1 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。该研究全面系统地揭示了当前旱作小麦生产中存在的资源环境问题、面临的挑战与机遇, 为节本、增效的环境友好型施肥提供一定的理论依据。

关键词: 黄土旱塬; 冬小麦; 养分投入; 化肥减施; 经济环境效应

收稿日期: 2020-08-23; 接受日期: 2021-01-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200401)、国家公益性行业(农业)科研专项(201503124)、山西省重点研发计划项目(201803D221005-2)、山西省研究生教育创新项目(2020SY191)

联系方式: 马红梅, E-mail: mahongmei0405@163.com。通信作者谢英荷, E-mail: xieyinghe@163.com

Evaluation on Fertilizer Application and Its Economic-Environmental Benefits Associated with Fertilizer Reduction Potential for Dryland Wheat in Loess Plateau of Southern Shanxi Province

MA HongMei^{1,2}, CAO HanBing^{1,2}, XIE YingHe^{1,2✉}, LI TingLiang^{1,2}, LIU Kai¹, ZHANG QiRu¹, JIANG LiWei¹, CAO Jing¹, SHAO JingLin¹, WU WenYue¹, LI WenQi¹

¹College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi; ²National Experimental Teaching Demonstration Center of Agricultural Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi

Abstract: **【Objective】** The aim of this study was to clarify situation of the farmers' nutrient application, so as to provide a theory base for the realization of stable and high yield, high nutrient use efficiency, and lower environmental pollution in dryland wheat production. **【Method】** A 9-yr survey of 984 farmers was carried out, and a yield based fertilizer recommendation method were used to analyze and evaluate their nutrient applications and the fertilizer reduction potential and economic-environmental benefits in Loess Plateau. **【Result】** The farmers' wheat yield was lower, with the average of 3 711 kg·hm⁻², and they were allocated into three groups as: low ($\leq 3\ 200$ kg·hm⁻²) and moderate (3 200-4 220 kg·hm⁻²), respectively, accounting for 56.0% and 18.1% of the total farmers. Farmers' nitrogen (N), phosphorus (P₂O₅) and potassium (K₂O) application were very high, with the average of 292.3 kg N·hm⁻², 159.8 kg P₂O₅·hm⁻² and 92.0 kg K₂O·hm⁻². And the proportion of the high-application farmers were N 68.7% and P₂O₅ 65.1% and K₂O 57.9%, respectively, which was large in low-yield level. Generally, these high-application farmers were recommended to reduce 24.1 kg N·hm⁻², 12.8 kg P₂O₅·hm⁻², and 6.2 kg K₂O·hm⁻², and the reduction range was N 15.9%, P 16.7% and K 16.7%, respectively, but these very high-application farmers were recommended to reduce 250.9 kg N·hm⁻², 205.7 kg P₂O₅·hm⁻², and 124.6 kg K₂O·hm⁻², and the reduction range was 66.5%, 76.7%, and 80.0%, respectively. Then, their economic effects increased by 251 yuan/hm² and 3 425 yuan/hm², 4.0% and 55.0%, NPK agronomic efficiency increased by N 18.8%, P 23.2%, and K 22.1% for the high farmers, and N 192.5%, P 321.3%, and K 388.1% for the very high farmers. NPK partial productivity increased by N 20.2%, P 23.7%, and K 19.2%, and N 210.4%, P 317.9%, K 388.1%, respectively. According to the estimation, the environmental impact of reducing nitrogen application was that emission of the N-pollutant reduced, such as N₂O emission decreased by 0.3 kg N₂O·hm⁻² and 6.3 kg N₂O·hm⁻², 11.2% and 72.5%, NH₃ volatilization decreased by 14.1 kg NH₃·hm⁻² and 90.7 kg NH₃·hm⁻², 20.8% and 62.8%, and NO₃ leaching decreased by 3.1 kg NO₃·hm⁻² and 231.1 kg NO₃·hm⁻², 4.9% and 79.6%, respectively. Total nitrogen pollutants (including N₂O emission, NH₃ volatilization and NO₃ leaching) reduced 17.4 kg·hm⁻² and 328.1 kg·hm⁻², with 13.1% and 74.0%, respectively. In total, 12.5 kg N·hm⁻² and 130.9 kg N·hm⁻² with 65.0 yuan/hm² and 683.3 yuan/hm² were saved, respectively. **【Conclusion】** In this paper, based on the wheat yield, the farmer's fertilization was evaluated, and the potential of reducing excessive fertilization was estimated, and the economic benefits and the effect of the reducing nitrogen-pollutants emission were analyzed through reducing fertilizer application. It was known that the farmers with high and very-high fertilizer application not only had different potential for reducing fertilizer application, such as 24.1-250.9 kg N·hm⁻², 12.8-205.7 kg P₂O₅·hm⁻², 6.2-124.6 kg K₂O·hm⁻², but also farmers' economic benefits was improved by 251-3 425 yuan/hm², and fertilizer agronomic efficiency was improved by N 18.8%-192.5%, P 23.2%-321.3%, K 22.1%-388.1%, and partial productivity was improved by N 20.2%-210.4%, P 23.7%-317.9%, K 19.2%-388.1%, and the emission of total nitrogen pollutants (including N₂O, NH₃ and NO₃) was reduced by 17.4-328.1 kg·hm⁻². This study comprehensively and systematically revealed the resource and environmental problems, challenges and opportunities in the current dry wheat production, which provided a certain theoretical basis for an environment-friendly fertilization with saving cost and increasing efficiency.

Key words: Loess Plateau; winter wheat; nutrient application; fertilizer reduction; economic-environmental effects

0 引言

【研究意义】晋南黄土旱塬是山西省主要的旱作农业区,该区主要粮食作物为冬小麦,其播种面积约

为 67.9×10^4 hm²^[1]。水资源缺乏和农户过分依赖化肥的高投入导致该区域冬小麦产量和经济效益偏低,同时造成肥料利用率的降低和一系列生态环境风险,如氮素淋洗和温室效应加剧等^[2-5]。因此,明确晋南黄土

旱塬冬小麦养分投入现状,对当地旱作冬小麦减肥增效、节本增收和控制农田面源污染有重要意义。【前人研究进展】自1980年以来,我国化肥施用强度平均每年以4.1%的速度上升,2014年全国化肥平均施用量为337.2 kg·hm⁻²,约为化肥环境安全阈值(289.1 kg·hm⁻²)的1.2倍^[6]。尽管不同省/区和作物之间施肥强度差异较大,全国仍有17个省氮肥施用过量、16个省磷肥施用过量,而且施肥过量导致的一系列环境风险呈现出聚集分布的特点^[6-7]。我国农业生产以小农户分散经营为主,农户落后的施肥观念和技术是当前化肥普遍施用过量的主要原因^[8]。就小麦生产而言,相关调查研究表明全国17个省14 000家农户中约有75%的农户小麦化肥施用过量^[9]。另外,我国不同小麦生产区域均存在化肥施用过量问题,例如江苏北部小麦平均施氮量为323 kg N·hm⁻²,有52%的农户施用过量^[10];陕西渭北小麦平均施氮量为188 kg N·hm⁻²,69.0%的农户施用过量,平均施磷125 kg P₂O₅·hm⁻²,91.4%的农户施用过量^[11];陕西关中小麦平均施氮210 kg N·hm⁻²,55%以上的农户施用过量;平均施磷183 kg P₂O₅·hm⁻²,约60%的农户施用过量^[12];河北曲周小麦氮、磷和钾的平均用量为262 kg N·hm⁻²、188 kg P₂O₅·hm⁻²和52 kg K₂O·hm⁻²,分别有92%、94%和42%的农户施用过量^[13]。过量施肥,尤其是过量施用氮肥,不仅不能继续增加小麦产量,还会降低肥料利用率,增加土壤硝态氮残留和淋洗^[14-17]。【本研究切入点】然而,当前农户施肥的调查研究更多关注小麦养分资源管理现状及其减肥潜力,对化肥减施的经济效益和环境效应评估较少,尤其是农户施肥水平变化对控制农业面源污染(氧化亚氮排放、氨挥发和硝酸盐淋洗等)的贡献更鲜有报道。【拟解决的关键问题】因此,本研究通过连续9年调研山西南部旱塬区农户冬小麦产量、养分投入现状,在明确当地小麦减肥潜力的基础上,进一步评估了化肥减施的经济、环境效应,以期黄土高原旱地小麦科学施肥发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 调研区域概况

调研区主要包括山西省南部的3市7县(洪同、襄汾、万荣、临猗、曲沃、侯马、绛县)。该区域年均气温12.6℃左右,年平均降雨量550 mm左右,受季风影响,降水主要集中在7—9月。冬小麦耕作模式以冬小麦-夏休闲为主,每年9月下旬或10月初开始播种,次年6月上旬收获。

1.2 调研方法与内容

从2009—2017年连续9年在以上7个县进行多点农户麦田养分管理调研。每县选择1—3个乡镇,每个乡镇选择6—25个村,每个村选择5—20个小麦种植户,共调研了121个村的984家农户。以问卷调查的方式记录农户地块信息,小麦产量及其对应的肥料品种、施肥时期、施肥量、施肥方法和其他田间管理措施等。本文针对养分投入情况、化肥减施后的经济效益与环境效益进行分析评价。

1.3 指标计算方法

1.3.1 产量分级 分析调研农户的冬小麦多年平均籽粒产量为3 711 kg·hm⁻²,以3 700 kg·hm⁻²为晋南旱塬冬小麦产量适中指标,上下浮动500 kg·hm⁻²作为中等产量范围,以1 000 kg·hm⁻²变幅定出低产(≤2 200 kg·hm⁻²)、偏低(2 200—3 200 kg·hm⁻²)、中产(3 200—4 200 kg·hm⁻²)、偏高(4 200—5 200 kg·hm⁻²)和高产(>5 200 kg·hm⁻²)5个等级。

1.3.2 推荐施肥量及农户施肥等级

推荐施肥量(recommended fertilizer rate, RF)=各农户产量×养分系数×养分校正系数 (1)
式(1)中,产量指农户调研获得的实际田块产量;养分系数指每形成100 kg冬小麦籽粒产量的养分需求量,即百公斤籽粒养分需求量。本研究中晋南旱塬冬小麦每形成100 kg籽粒产量的氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)的需求量分别为2.8 kg^[18-19]、1.1 kg^[20]和2.7 kg^[21]。养分校正系数是根据当地土壤养分含量及养分丰缺指标确定的,该调研区小麦氮磷钾肥的养分校正系数确定为氮1.2,磷1.5,钾0.3。

养分投入分级的确定:以各农户小麦产量对应的养分推荐施肥量(RF)为 midpoint,以20%为变幅作为养分投入适中水平,即适中(90%—110%RF),在此基础上,从低到高分5个养分投入分级(表1)。

表1 养分投入等级标准
Table 1 Different levels of fertilizer application

养分分级 Different levels of fertilizer application	分级标准 Classification standard
不施肥 No	0
很低 Very low	0-70%RF
低 Low	70%-90%RF
适中 Middle	90%-110%RF
高 High	110%-130%RF
很高 Very high	≥130%RF

与氮类似,随着产量水平的提高,施磷过量的农户比例逐渐降低,而施磷不足的农户比例逐渐增加(图 1-b)。在 $\leq 2\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平下,施磷过量的农户比例高达 81.7%,施磷不足的仅占 15.9%;在 $>5\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平下,施磷过量的农户只有 29.1%,施磷不足的占到 53.2%。整体上看,施磷过量的农户比例为 65.1%,施磷不足的为 24.5%,施磷适中的仅占 10.4%。可见,南旱塬小麦生产中农户施磷普遍过量现象也较普遍。

分析不同产量水平下农户钾肥投入分布发现(图 1-c),在 $\leq 2\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平下施钾过量的农户

占 65.9%,施钾不足的占 26.8%;在 $2\,200\text{—}3\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平下,施钾过量的农户比例最大,为 74.4%,施钾不足的占 24.9%;之后,随着产量水平提高施钾过量的农户比例逐渐降低,在产量水平 $>5\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,施钾过量的农户下降到 19.4%,而施钾不足的农户增加到 75.0%。整体上看,施钾过量的农户占到 57.9%,且集中在 $<4\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平以下;施钾不足的农户占到 38.2%,集中在 $>5\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平;施钾适中的仅占 4.1%,且各产量水平变化不大。可见,施钾过量的农户比例低于施氮、磷过量的农户,而施钾不足农户比例高于施氮、磷不足的农户比例。

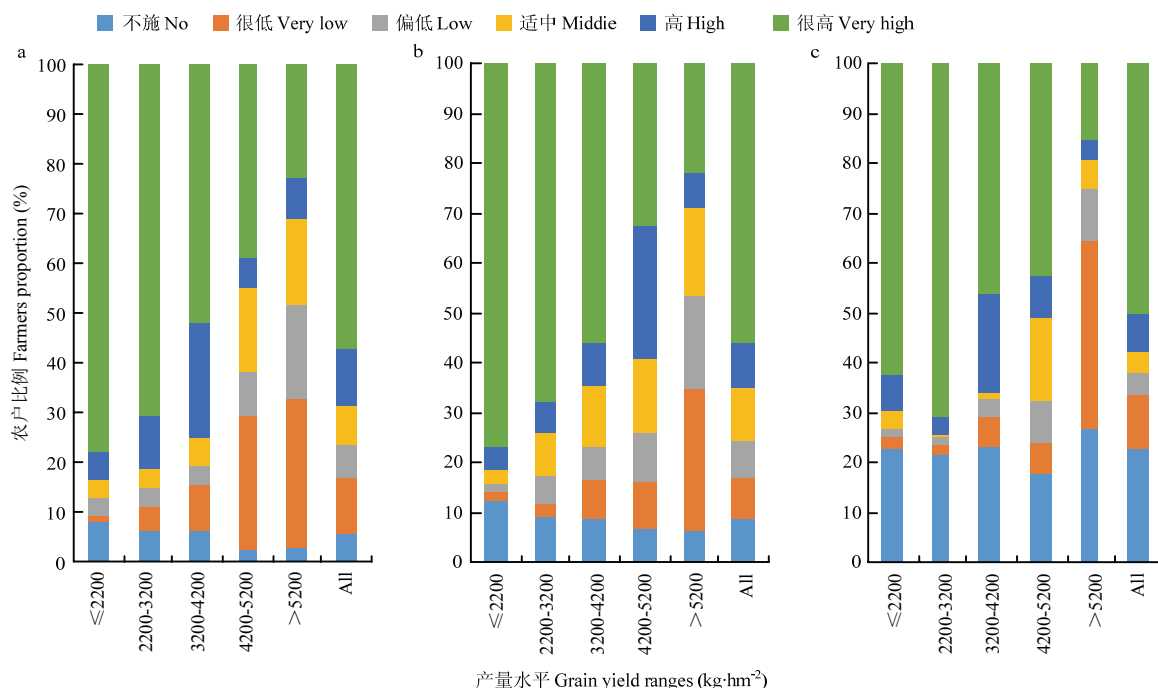


图 1 不同产量水平的农户氮 (a)、磷 (b)、钾 (c) 分级投入分布

Fig. 1 Distributions of farmers who practiced different N (a), P (b) and K (c) inputs in different grain yield groups

2.3 减肥潜力分析

2.3.1 氮肥减施潜力分析 比较农户施氮量和推荐施氮量发现(表 3),整体而言,施氮高的农户推荐施氮量平均为 $127.1\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,较当前平均施氮量 $151.2\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 少施 $24.1\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (减少 15.9%);施氮很高的农户推荐施氮量平均为 $126.5\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,较当前平均施氮量 $377.4\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,可减施 $250.9\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (减少 66.5%)的氮肥。

另外,不同产量水平的减氮潜力存在差异,在 $\leq 3\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的低产水平下,施氮高和很高的农户

减氮幅度平均分别为 17.7%—18.1%和 70.6%—73.8%,减氮量分别为 $13.0\text{—}19.1$ 和 $134.9\text{—}213.3\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,而在 $>4\,200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平下,施氮高和很高的农户减氮幅度平均为 12.9%—15.5%和 62.8%—66.9%,减氮量分别为 $22.4\text{—}39.5$ 和 $311.2\text{—}371.6\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。可见高和很高投入农户在低产区减氮的幅度较大,而在高产区减氮的绝对量较大,均为减氮的重点。

2.3.2 磷肥减施潜力分析 比较农户施磷量和推荐施磷量发现(表 4),整体而言,高磷投入的农户推荐施磷量为 $64.0\text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$,较其当前平均

表 3 氮投入和减氮潜力

Table 3 Nitrogen input and nitrogen reduction potential

氮投入分级 N input level	指标 Index	产量水平 Yield level (kg·hm ⁻²)					
		≤2200	2200-3200	3200-4200	4200-5200	>5200	平均 Mean
适中 Middle	FF (kg N·hm ⁻²)	66.0	85.8	125.8	156.8	248.8	136.6
	RF (kg N·hm ⁻²)	63.8	84.5	125.1	153.9	247.6	135.0
	RN (kg N·hm ⁻²)	-2.2	-1.3	-0.7	-2.9	-1.1	-1.6
	△(%)	3.3	1.5	0.5	1.8	0.5	1.2
高 High	FF (kg N·hm ⁻²)	73.6	105.6	148.1	173.6	254.9	151.2
	RF (kg N·hm ⁻²)	60.6	86.5	121.6	151.2	215.4	127.1
	RN (kg N·hm ⁻²)	13.0	19.1	26.5	22.4	39.5	24.1
	△(%)	17.7	18.1	17.9	12.9	15.5	15.9
很高 Very high	FF (kg N·hm ⁻²)	182.8	302.3	345.3	465.1	591.5	377.4
	RF (kg N·hm ⁻²)	47.9	89.0	121.9	153.9	219.9	126.5
	RN (kg N·hm ⁻²)	134.9	213.3	223.4	311.2	371.6	250.9
	△(%)	73.8	70.6	64.7	66.9	62.8	66.5

FF 指农户养分实际投入量；RF 指养分推荐量；RN 指推荐减肥量=(FF-RF)；△%指减肥幅度：(FF-RF)/FF。下同

FF: Fertilizer rate used by farmers; RF: Recommended rate; RN: FF minus RF; △%: The extent of reduction: (FF minus RF) / FF. The same as below

表 4 磷投入和减磷潜力

Table 4 Phosphorus input and phosphorus reduction potential

磷投入分级 P input level	指标 Index	产量水平 Yield level (kg·hm ⁻²)					
		≤2200	2200-3200	3200-4200	4200-5200	>5200	平均 Mean
适中 Middle	FF (kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²)	32.8	42.7	61.8	73.4	110.1	64.2
	RF (kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²)	33.5	44.6	60.0	74.7	112.9	65.1
	RN (kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²)	-0.8	-1.8	-1.9	-1.2	-2.8	-1.0
	△(%)	-2.3	-4.3	-3.0	-1.7	-2.6	-1.5
高 High	FF (kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²)	36.9	54.5	71.9	89.7	131.3	76.9
	RF (kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²)	29.8	44.7	59.9	75.4	110.3	64.0
	RN (kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²)	7.1	9.9	12.0	14.4	20.9	12.8
	△(%)	19.1	18.1	16.6	16.0	16.0	16.7
很高 Very high	FF (kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²)	98.1	187.2	217.4	432.7	405.7	268.2
	RF (kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²)	23.7	43.3	60.2	75.4	110.0	62.5
	RN (kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²)	74.4	143.9	157.1	357.3	295.7	205.7
	△(%)	75.8	76.9	72.3	82.6	72.9	76.7

施磷量 76.9 kg P₂O₅·hm⁻²，可减少 12.8 kg P₂O₅·hm⁻²（减少 16.7%）的磷投入；施磷很高的农户推荐施量为 62.5 kg P₂O₅·hm⁻²，较其当前平均施磷量 268.2 kg P₂O₅·hm⁻²，可减少 205.7 kg P₂O₅·hm⁻²（减少 76.7%）的磷投入。

另外，不同产量水平的减磷潜力也存在差异，在≤3 200 kg·hm⁻²产量水平下，高和很高投入的农户减磷幅度平均为 18.6%和 76.4%，减磷量分别为 8.5 和 109.2 kg P₂O₅·hm⁻²；在>4 200 kg·hm⁻²的高产

水平下，高和很高投入的农户减磷幅度平均为 16.0%和 77.8%，减磷量分别为 17.7 和 326.5 kg P₂O₅·hm⁻²，尤其是在 4 200—5 200 kg·hm⁻² 产量水平下，很高投入的减磷量和减磷幅度分别达 357.3 kg P₂O₅·hm⁻² 和 82.6%。综上所述，减磷的重点是很高投入的农户。

2.3.3 钾肥减施潜力分析 比较农户施钾量和推荐施钾量发现（表 5），高钾投入的农户推荐施钾量为 31.0 kg K₂O·hm⁻²，较其当前平均施钾量 37.2 kg K₂O·hm⁻²，可减少 6.2 kg K₂O·hm⁻²（减少 16.7%）的钾

肥；施钾很高的农户推荐施量为 31.1 kg K₂O·hm⁻²，较其当前平均施钾量 155.7 37.2 kg K₂O·hm⁻²，可减少 124.6 kg K₂O·hm⁻²（减少 80%）的钾。

按照产量水平和钾肥投入分级看，高投入在每个产量分级下减钾量均小于 10 kg K₂O·hm⁻²，减幅 15.0%—18.2%，差异很小。很高投入的减钾量在产量≤4 200 kg·hm⁻² 水平为 48.9—85.9 kg K₂O·hm⁻²，在>4 200 kg·hm⁻² 产量水平时减钾量约 200 kg K₂O·hm⁻²。

与氮磷相比，钾肥减施的绝对量虽有所降低，但减少幅度均有所提高，仍不容忽视。

表 5 钾投入和减钾潜力
Table 5 Potassium input and potassium reduction potential

钾投入分级 K input level	指标 Index	产量水平 Yield level (kg·hm ⁻²)					
		≤2200	2200-3200	3200-4200	4200-5200	>5200	平均 Mean
适中 Middle	FF (kg K ₂ O·hm ⁻²)	15.1	20.3	33.0	36.3	72.0	35.3
	RF (kg K ₂ O·hm ⁻²)	14.9	21.7	32.2	36.9	73.0	35.7
	RN (kg K ₂ O·hm ⁻²)	0.2	-1.4	0.8	-0.6	-1.0	-0.4
	△(%)	1.6	-7.1	2.4	-1.7	-1.4	-1.1
高 High	FF (kg K ₂ O·hm ⁻²)	15.0	25.5	36.4	45.0	64.3	37.2
	RF (kg K ₂ O·hm ⁻²)	12.6	21.0	29.9	36.8	54.6	31.0
	RN (kg K ₂ O·hm ⁻²)	2.4	4.5	6.4	8.2	9.6	6.2
	△(%)	15.7	17.7	17.7	18.2	15.0	16.7
很高 Very high	FF (kg K ₂ O·hm ⁻²)	60.4	98.9	114.8	245.5	259.0	155.7
	RF (kg K ₂ O·hm ⁻²)	11.4	21.6	28.9	37.3	56.3	31.1
	RN (kg K ₂ O·hm ⁻²)	48.9	77.3	85.9	208.1	202.7	124.6
	△(%)	81.0	78.2	74.8	84.8	78.2	80.0

2.4 肥料利用效率及经济效益分析

2.4.1 化肥减施的经济效益分析 化肥减施的经济效益如表 6 所示。整体上高投入农户纯收入减肥后达 6 482 元/hm²，较减肥前 6 231 元/hm²，增收 251 元/hm²（4.0%）；而很高投入农户纯收入减肥后 6 439 元/hm²，较减肥前 3 014 元/hm²增收 3 425 元/hm²（113.6%）。

产量水平和投入分级不同，高投入农户的纯收入减肥后增加 132—407 元/hm² 和 13.0%—3.1%，且随着产量水平的升高，绝对量呈增加趋势，而增幅呈降低趋势，即，≤2 200 kg·hm⁻² 产量水平的纯收入增幅最大，为 13.0%，>5 200 kg·hm⁻² 的产量水平纯收入绝对量增加最大；很高投入农户的纯收入从产量水平

≤2 200 kg·hm⁻² 到≤5 200 kg·hm⁻² 呈增加趋势，增收 1 488—5 262 元/hm²。在产量水平>5 200 kg·hm⁻² 时，纯收入增加 5 090 元/hm²。综上可知，纯收入增加最大的是高投入农户。

2.4.2 化肥减施的农学效率分析 表 6 表明，减氮后，投入高和很高的氮肥农学效率提高 14.9%—22.4%、168.9%—400.0%，平均提高 18.8%和 192.5%，后者大约是前者的 10 倍。均以≤3 200 kg·hm⁻² 产量水平提高幅度大，即高投入的氮肥农学效率的提高接近于 22%，很高投入的介于 241.5%—400.0%之间。

磷的农学效率，投入高和很高的农户，减磷后提高范围为 20.4%—28.0%和 262.7%—470.3%，平均提高 23.2%和 321.3%。在≤3 200 kg·hm⁻² 和>5 200

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量水平下提高幅度较大, 高投入的提高接近于 25%, 很高投入的提高 325.4%—470.3%, 整体潜力比高投入大 13—18 倍。

减钾后, 高钾投入的农学效率提高幅度 2.2%—24.1%, 平均 22.1%。其中, $\leq 2\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平时, 只提高 2.2%, 在 $2\ 200$ — $5\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量水平之间, 提高幅度为 22.3%—23.8%, 平均 387.1%。相比之下, 很高投入的钾肥农学效率提高幅度较大, 其中在 $\leq 3\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $> 4\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平下提高幅度达 360.3%—560.8%。

综上, 氮磷钾化肥减施后, 氮、磷、钾农学效率提高幅度较大的均是肥料投入很高的农户。

2.4.3 化肥减施的偏生产力分析 减氮后偏生产力变化如表 6 所示。5 个产量水平, 氮高投入的偏生产力平均提高 $5\ \text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (20.2%)。针对不同产量水平分析, 氮的偏生产力提高幅度介于 14.2%—31.3%, 其中 $\leq 2\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平时, 提高 31.3%, $> 4\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平时, 提高 14.2%—15.1%。相比之下, 很高投入的偏生产力平均提高幅度达 $20.2\ \text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (210.4%), 从低产到高产提高 161.4%—282.1%, 特别是 $\leq 3\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平时, 提高幅度更大, 为 238.6%—282.1%。

磷减施的偏生产力变化, 高和很高投入的平均提高 $11.6\ \text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (23.7%) 和 $46.1\ \text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (317.9%)。高投入的在不同产量水平下提高幅度 19.3%—34.1%, 其中, $\leq 3\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平时提高幅度大, 为 26.0%—34.1%, $> 3\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 均接近于 20.0%。而很高投入在不同产量水平下提高幅度 260.7%—471.7%, 其中, 在 $\leq 3\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $3\ 200$ — $4\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平时, 提高幅度均大于 300%。总体上可看出, 很高投入的整体潜力比高投入大。

减钾后, 钾的偏生产力高和很高投入的平均提高 $19.9\ \text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (19.2%) 和 $98.2\ \text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (388.1%)。从低产到高产水平, 高投入的偏生产力提高幅度为 11.1%—23.1%, 其中, $\leq 2\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平时提高幅度最小, 为 11.1%, $> 2\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平时, 大约提高 20.0%。与高投入不同, 很高投入的提高 297.1%—556.9%, 其中, $\leq 2\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $3\ 200$ — $4\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平时, 提高幅度均超过 400%。与氮磷趋势基本一致, 很高投入的偏生产力减钾后变化力度更大。

综上所述, 通过减肥, 肥料利用效率和经济效益等均有不同程度的提高, 特别是高投入农户。

2.5 环境效应分析

本研究采用崔振岭^[23]方法来评价该区域小麦农户减氮前后的环境风险见图 2。由图 2-a 可知, 高和很高投入减氮后, 在 $\leq 2\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平下 N_2O 的排放可减少 0.02 和 $0.27\ \text{kg}\ \text{N}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$, 且产量水平越高减排量越大, 到产量 $> 5\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时可减少 0.13 和 $3.02\ \text{kg}\ \text{N}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。减氮后, 高和很高投入在 5 个产量分级中累计减少排放 $0.30\ \text{kg}\ \text{N}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ (11.2%) 和 $6.28\ \text{kg}\ \text{N}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}$ (72.5%), 且很高投入的减排幅度最大, 是高投入的 6.5 倍。

图 2-b 表明, 与减氮前相比, 减氮后高和很高投入的在 $\leq 2\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平下, $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的淋洗量减少 0.17 和 $7.51\ \text{kg}\ \text{NO}_3^{-}\text{-N}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在 $> 5\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平下减淋洗量提高到 3.22、 $125.33\ \text{kg}\ \text{NO}_3^{-}\text{-N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。且高和很高投入的农户在不同产量水平下淋洗量累计减少 $3.05\ \text{kg}\ \text{NO}_3^{-}\text{-N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (4.9%) 和 $231.13\ \text{kg}\ \text{NO}_3^{-}\text{-N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (79.6%)。且很高投入的减少 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 淋量为高投入的 70 倍。

图 2-c 显示, NH_3 的挥发趋势与 N_2O 的排放和 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的淋洗相同, 在 $\leq 2\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平下, 减氮后比减氮前高和很高投入的挥发量减少 1.25 和 $9.16\ \text{kg}\ \text{NH}_3\cdot\text{hm}^{-2}$, $> 5\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 产量水平挥发量减少 3.72 和 $26.17\ \text{kg}\ \text{NH}_3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。相比之下, 减氮后各产量水平累计少挥发 $14.05\ \text{kg}\ \text{NH}_3\cdot\text{hm}^{-2}$ (20.83%) 和 $90.71\ \text{kg}\ \text{NH}_3\cdot\text{hm}^{-2}$ (62.83%) 的 NH_3 , 二者的排放量相差 6.5 倍。

综合以上 3 种污染物的总损失量见图 2-d, 各产量水平, 高和很高投入的总污染物比减氮前减少排放量(占比) $17.40\ \text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (13.1%) 和 $328.12\ \text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (74.0%)。合计节约氮 $12.45\ \text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (17.5%) 和 $130.89\ \text{kg}\ \text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$ (68.9%), 节省 65.00 和 683.25 元/ hm^2 。因此, 结合图 2-a、图 2-b 和图 2-c 及分析可知, 氮的污染物损失途径最大的是 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的淋洗, 损失量最大的是很高投入农户, 减氮后, 很高投入的农户氮的污染物有显著的减排效应。

3 讨论

3.1 化肥减施对小麦产量的影响

本研究连续 9 年调研结果显示, 晋南旱塬冬小麦年平均产量介于 $2\ 146$ — $4\ 186\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 多年平均为 $3\ 711\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中 56.0% 的农户产量处于低产水平 ($\leq 3\ 200\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。当地产量偏低且年际变幅比较大, 主要原因是受季风性气候影响年际降水量变化大

表 6 化肥减施前后对小麦经济效益及养分利用的影响

Table 6 Effects of before and after fertilizer reduction on wheat yield, economic benefits and nutrient utilization

养分投入分级 Nutrient input level	减肥前后 Before or after fertilization reduced	指标 Index	产量水平 Yield level (kg·hm ⁻²)					
			≤2200	2200-3200	3200-4200	4200-5200	>5200	Mean
适中 Middle	减肥前 Before fertilization reduced	纯收入 Net income (yuan/hm ²)	1793	3581	6381	8291	16292	7268
		农学效率 Agronomic efficiency (kg·kg ⁻¹)	N	7.9	14.3	18.9	20.1	25.5
			P	15.9	28.8	38.4	42.9	57.6
			K	34.5	60.8	72.1	86.9	88.1
		偏生产力 Partial productivity (kg·kg ⁻¹)	N	29.1	30.7	30.0	29.0	31.1
			P	58.6	61.6	61.1	62.0	70.3
			K	127.2	129.9	114.5	125.5	107.5
	减肥后 After fertilization reduced	纯收入 Net income (yuan/hm ²)	1800	3568	6402	8294	16272	7267
		农学效率 Agronomic efficiency (kg·kg ⁻¹)	N	8.2	14.6	19	20.5	25.6
			P	16.6	29.7	38.7	41.7	52.1
			K	33.8	60.4	78.9	85	106.2
高 High	减肥前 Before fertilization reduced	纯收入 Net income (yuan/hm ²)	1015	3346	5815	7995	12982	6231
		农学效率 Agronomic efficiency (kg·kg ⁻¹)	N	3.6	11.6	15.2	18.1	20.5
			P	7.3	22.5	31.3	35.0	39.7
			K	17.9	48.0	61.8	69.7	81.1
		偏生产力 Partial productivity (kg·kg ⁻¹)	N	22.7	24.8	24.6	26.1	25.9
			P	45.2	48.1	50.8	50.6	50.4
			K	111.2	102.9	100.3	100.8	102.9
	减肥后 After fertilization reduced	纯收入 Net income (yuan/hm ²)	1147	3541	6073	8258	13389	6482
		农学效率 Agronomic efficiency (kg·kg ⁻¹)	N	4.4	14.2	18.5	20.8	24.2
			P	9.0	28.8	37.7	42.3	49.3
			K	18.3	58.7	76.7	86.1	100.4
	减肥前 Before fertilization reduced	纯收入 Net income (yuan/hm ²)	-908	1044	3241	3115	8576	3014
		农学效率 Agronomic efficiency (kg·kg ⁻¹)	N	0.1	4.1	6.4	6.9	9.0
			P	0.2	6.7	10.2	7.4	13.1
			K	0.4	12.6	19.3	13.0	20.5
		偏生产力 Partial productivity (kg·kg ⁻¹)	N	7.8	8.8	10.5	9.8	11.4
			P	14.6	14.0	16.8	10.6	16.6
			K	23.4	26.9	31.1	18.8	26
很高 Very high	减肥后 After fertilization reduced	纯收入 Net income (yuan/hm ²)	580	3593	5980	8377	13666	6439
		农学效率 (kg·kg ⁻¹) Agronomic efficiency	N	0.5	14.0	18.2	20.7	24.2
			P	1.0	28.5	37.0	42.2	49.3
			K	2.0	58.0	75.4	85.9	100.4
		29.8 (N)、60.6 (P)、123.5 (K)。下同 The same as below						
		偏生产力 (kg·kg ⁻¹) Partial productivity						

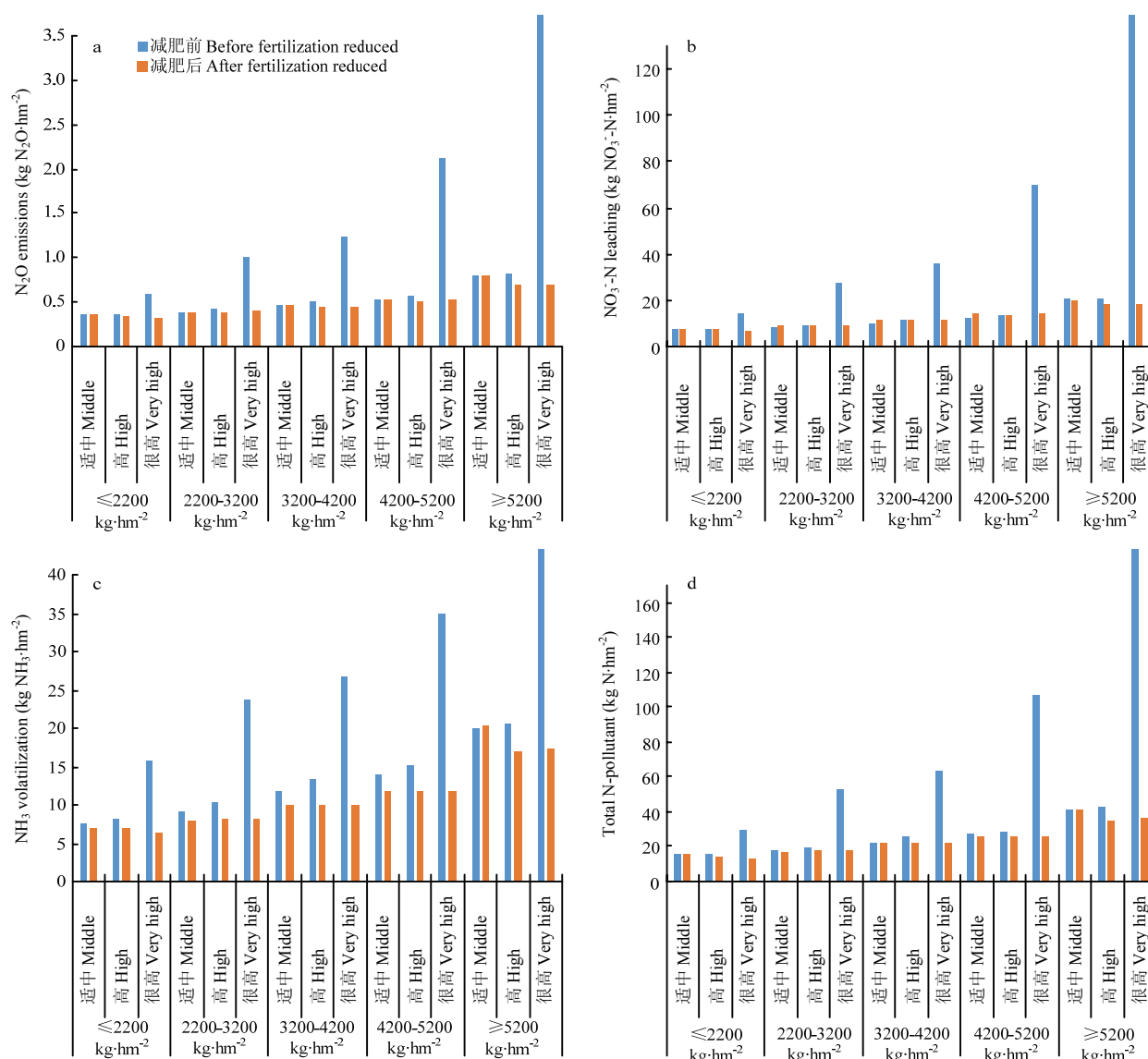


图2 各产量水平氮投入分级下减肥前后 N₂O、NH₃、NO₃ 和 N 总污染物排放

Fig. 2 Loss of N₂O, NH₃, NO₃ and total N-pollutant before and after input reduction at different N input levels and different yield groups

且年内降雨分布不均, 且与冬小麦生长发育需水关键期不匹配。所以, 水分仍是限制旱作小麦稳产增产的首要因子。另外, 土壤有机质低导致土壤氮素供应不足同样限制着当地小麦生产。施肥是实现小麦高产和培肥土壤的关键措施, 但受“施肥越多产量越高”错误观念的影响, 小麦生产中大量施用化肥。本研究中, 冬小麦氮肥、磷肥和钾肥的总用量及各自用量分别达 544.1 kg·hm⁻²、292.3 kg N·hm⁻²、159.8 kg P₂O₅·hm⁻²、92.0 kg K₂O·hm⁻², 不仅高于对应的环境安全阈值 289.1 kg·hm⁻²、144.6 kg N·hm⁻²、72.3 kg P₂O₅·hm⁻²、72.3 kg

K₂O·hm⁻², 也高于我国 2014 年总化肥及氮、磷、钾施用强度 337.2 kg·hm⁻²、174.2 kg N·hm⁻²、87.2 kg P₂O₅·hm⁻²、75.8 kg K₂O·hm⁻²[6]。另外, 与基于农户产量确定的推荐施肥量相比, 当前小麦氮肥、磷肥和钾肥施用过量的农户比例分别高达 68.7%、65.1%和 57.9%, 分别可减少 24.1—250.9 kg N·hm⁻², 12.8—205.7 kg P₂O₅·hm⁻², 6.2—124.6 kg K₂O·hm⁻²的肥料投入。因大量田间试验结果表明, 优化农户习惯施肥在减少当前化肥用量 30%—60%的条件下, 可维持当前小麦产量或促进小麦增产[22, 24-25]。例如, 晋南旱塬小

麦肥效试验表明,采用测土监控施肥可降低农户施肥量,同时小麦产量提高 14.8%—30.9%^[22]。所以,本研究从维持作物稳产增产出发,确定了晋南旱塬小麦推荐施肥量,并进一步提出了当前农户化肥用量减施的潜力,可为当地冬小麦养分管理提供有力支撑。

3.2 化肥减施对养分利用和经济效益的影响

合理施肥能够提高小麦产量和经济效益^[26]。在我国,谷物生产中的氮肥利用率在 20 世纪 80 年代为 30%—35%^[27],本世纪初下降到 20%以下^[28],低于世界平均水平(33%)。不合理施肥,尤其是过量施肥,作物产量和经济效益、养分利用效率必受影响^[20,29]。本研究中养分投入高和很高的农户化肥减施后,高投入农户的经济效益将提高 4%,氮肥、磷肥和钾肥的农学效率分别提高 19.1%、23.1%和 22.1%,肥料偏生产力分别提高 20.2%、23.7%和 19.2%;很高投入农户的经济效益将提高 55%,氮肥、磷肥和钾肥的农学效率分别提高 192.5%、321.3%和 387.1%,肥料偏生产力分别提高 210.4%、317.9%和 388.1%。王雨成等研究发现,将农户施氮量由 315 kg N·hm⁻² 减少到 180 kg N·hm⁻² (减少 42.9%的氮肥投入),小麦产量并没有降低且节约了 742.7 元/hm² 的氮肥投入成本^[30]。李强等优化农户氮肥管理发现,小麦地上部氮吸收量增加 6.4%—36.4%,氮素收获指数提高 5.7%—6.8%^[25]。赵亚南等研究发现,农户氮肥和磷肥减施后氮肥偏生产力和农学效率可分别提高 79.2%和 69.1%,磷肥偏生产力和农学效率可分别提高 91.1%、72.7%^[31]。朱晓霞等研究发现,较农户施肥减氮 65.9 kg N·hm⁻²,氮肥偏生产力提高 34.3%,经济效益增加 1002 元/hm²^[32]。ZHAN 等多点田间试验表明,在钾肥投入由 154 kg K₂O·hm⁻² 减到 102 kg K₂O·hm⁻² 情况下,产量增加 300 kg·hm⁻²,偏生产力由 35.3 kg·kg⁻¹ 提高到 54.9 kg·kg⁻¹,提高了 55.5%,经济效益增加 959.2 元/hm²^[33]。崔振岭等研究发现,玉米、水稻、小麦 3 种作物氮肥减施后,氮肥的偏生产力可提高 31.5%—35.7%,经济效益增加 22.1%—27.2%^[23]。综合以上多点化肥减量试验和本研究提出的化肥减施后的经济效益和肥料利用效率分析结果可见,合理减少肥料的投入,养分利用效率和经济效益均有提高,对于黄土旱塬小麦合理施肥均有一定的指导意义。

3.3 小麦化肥减施对环境效益影响

当前,粮食安全、环境退化和气候变化是人类面临的重大挑战,农业生产是挑战的核心。我国小麦种

植面积大,生产中平均每年施氮 305 kg N·hm⁻²,是世界氮肥用量 74 kg N·hm⁻² 的 4 倍,过量施氮引发的系列环境问题,成为当今研究者普遍关心的问题^[23,33-34]。本研究表明,高和很高投入农户氮肥减量后,N₂O 的排放可分别减少 11.2%和 72.5%;NH₃ 的挥发可分别减低 20.8%和 62.8%;NO₃⁻-N 的淋洗可分别降低 4.9%和 79.6%;总氮污染物减少 17.4 kg·hm⁻² (13.1%)和 328.1 kg·hm⁻² (74.0%),节约氮肥 12.5 kg N·hm⁻² (17.5%)和 130.9 kg N·hm⁻² (68.9%),节约成本 65.0 和 683.3 元/hm²。田间试验表明,在陕西长武旱塬氮肥减施后,当季土壤硝态氮残留减少 59.5%—68.2%,夏闲期土壤硝态氮向 60 cm 以下土层的淋溶量减少 24.3%—42.3%^[25]。晋南旱塬连续 4 年试验表明,在平均减氮 46.25 kg N·hm⁻² 情况下,2 m 土壤土层硝态氮累积量由 277.0 kg NO₃⁻-N·hm⁻² 下降到 170.7 kg NO₃⁻-N·hm⁻²,下降了 106.3 kg NO₃⁻-N·hm⁻²^[22]。同样,施氮 180 kg·hm⁻² 和 315 kg·hm⁻² 相比,作物收获后 0—200 cm 土层硝态氮含量减少了 26.7%—32.2%^[30];施氮 75 kg·hm⁻² 与 300 kg·hm⁻² 相比,土壤硝态氮的平均淋失浓度和年均淋失量分别降低了 32.5%和 30.6%^[35]。另外,正常施氮 160 kg·hm⁻²,作物收获后 0—300 cm 土层硝态氮累积量为 327.9 kg NO₃⁻-N·hm⁻²,过量施氮 320 kg·hm⁻² 硝态氮累积量为 727.7 kg NO₃⁻-N·hm⁻²,相比之下硝态氮累积下降了 399.8 kg NO₃⁻-N·hm⁻²^[36]。更全面的是巨晓棠为期 4 年的田间试验,结果表明小麦生长季氮挥发占施氮量的 19.4%,N₂O 排放量占 0.1%,NO₃⁻-N 淋失占 2.7%,均随施氮量的增加而显著增加^[37]。崔振岭在我国主要粮食生产区应用养分资源管理(ISSM)技术优化农户施肥习惯,并进行 10 年技术推广后发现,活性氮损失减少 22.9%—34.9%,温室气体排放量减少 18.6%—29.1%^[23]。以上研究结果均为本研究提出的化肥减施的环境正效应提供了有力支撑,也进一步证明农户减氮可以降低施肥对环境的影响。

4 结论

对晋南旱塬 984 个农户施肥调研分析发现,当地小麦产量以中低产为主,氮、磷和钾养分投入过量的农户比例为 58%—69%,减肥潜力很大。若实现化肥减施,可不同程度地提高氮磷钾养分的利用效率和经济效益,同时减少 15.1%—285.0%的总氮化合污染物(N₂O 排放、NO₃⁻-N 淋洗和 NH₃ 挥发)的排放量,估测节约纯氮 12.5—130.9 kg N·hm⁻²。

参考文献 References

- [1] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 车升国. 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态. 生态学报, 2009, 29(5): 2551-2559.
GAO H Y, GUO S L, LIU W Z, CHE S G. Soil respiration and carbon fractions in winter wheat cropping system under fertilization practices in arid-highland of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2551-2559. (in Chinese)
- [2] 马文奇, 张福锁, 张卫峰. 关乎我国资源、环境、粮食安全和可持续发展的化肥产业. 资源科学, 2005, 27(3): 33-40.
MA W Q, ZHANG F S, ZHANG W F. Fertilizer production and consumption and the resources, environment, food security and sustainable development in China. Resources Science, 2005, 27(3): 33-40. (in Chinese)
- [3] 杨贵羽, 汪林, 王浩. 基于水土资源状况的中国粮食安全思考. 农业工程学报, 2010, 26(12): 1-5.
YANG G Y, WANG L, WANG H. Thinking of food security in China based on regional water resources and land cultivation. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(12): 1-5. (in Chinese)
- [4] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, VITOUSEK P, ZHAO M, MA W Q, WANG Z L, ZHANG W J, YAN X Y, YANG J C, DENG X P, GAO Q, ZHANG Q, GUO S W, REN J, LI S Q, YE Y L, WANG Z H, HUANG J L, TANG Q Y, SUN Y X, PENG X L, ZHANG J W, HE M R, ZHU Y J, XUE J Q, WANG G L, WU L, AN N, WU L Q, MA L, ZHANG W F, ZHANG F S. Producing more grain with lower environmental costs. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.
- [5] SIMS J T, MA L, OENEMA O, DOU Z X, ZHANG F S. Advances and challenges for nutrient management in China in the 21st Century. Journal of Environment Quality, 2013, 42(4): 947-950.
- [6] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化. 农业工程学报, 2017, 33(6): 214-221.
LIU Q P. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(6): 214-221. (in Chinese)
- [7] 高旺盛, 黄进勇, 吴大付, 李新平. 黄淮海平原典型集约农区地下水硝酸盐污染初探. 生态农业研究, 1999, 7(4): 41-43.
GAO W S, HUANG J Y, WU D F, LI X P. Investigation on nitrate pollution in ground water at intensive agricultural region in Huanghe-huaihe-haihe Plain. Eco-Agriculture Research, 1999, 7(4): 41-43. (in Chinese)
- [8] PAN D, KONG F B, ZHANG N, YING R Y. Knowledge training and the change of fertilizer use intensity: Evidence from wheat farmers in China. Journal of Environmental Management, 2017, 197: (7):130-139.
- [9] 张卫峰, 马文奇, 王雁峰, 张福锁. 中国农户小麦施肥水平和效应的评价. 土壤通报, 2008, 39(5): 1049-1055.
ZHANG W F, MA W Q, WANG Y F, ZHANG F S. Assessment on farmers fertilization behavior for wheat production in China. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 1049-1055. (in Chinese)
- [10] 马立珩. 江苏省水稻、小麦施肥现状的分析与评价[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
MA L H. Analysis and evaluation of the current status of rice and wheat fertilization in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 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.
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 Fertilizers, 2016, 22(1): 245-253. (in Chinese)
- [13] 牛新胜, 张宏彦. 华北平原冬小麦-夏玉米生产肥料管理现状分析. 耕作与栽培, 2010(5): 1-4.
NIU X S, ZHANG H Y. Fertilizer management status analysis on winter wheat and summer maize in North Central China. Tillage and Cultivation, 2010(5): 1-4. (in Chinese)
- [14] 李科江, 李保国, 胡克林, 曹彩云, 郑春莲. 不同水肥管理对冬小麦灌浆影响的模拟研究. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 449-454.
LI K J, LI B G, HU K L, CAO C Y, ZHEND C L. Modeling kernel filling of winter wheat for optimum field management. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(5): 449-454. (in Chinese)
- [15] 曾希柏, 李菊梅. 中国不同地区化肥施用及其对粮食生产的影响. 中国农业科学, 2004, 37(3): 387-392, 469-470.
ZENG X B, LI J M. Fertilizer application and its effect on grain production in different counties of China. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(3): 387-392, 469-470. (in Chinese)
- [16] 王立刚, 李虎, 杨黎, 翟振, 邱建军. 冬小麦/夏玉米轮作系统不

- 同施氮量的长期环境效应及区域氮调控模拟. 中国农业科学, 2013, 46(14): 2932-2941.
- WANG L G, LI H, YANG L, CUI Z, QIU J J. Simulation of long-term and regional environmental effects of different N applications in the winter wheat/summer maize system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(14): 2932-2941. (in Chinese)
- [17] 任思洋, 张青松, 李婷玉, 张福锁. 华北平原五省冬小麦产量和氮素管理的时空变异. 中国农业科学, 2019, 52(24): 4527-4539.
- REN S Y, ZHANG Q S, LI T Y, ZHANG F S. Spatiotemporal variation of winter wheat yield and nitrogen management in five provinces of North China Plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(24): 4527-4539. (in Chinese)
- [18] 曹寒冰. 渭北旱地冬小麦监控施肥技术的优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- CAO H B. Optimization of fertilizer recommendation technology based on soil test for winter wheat on Weibei dryland[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2004. (in Chinese)
- [19] 杜君, 白由路, 杨俐苹, 卢艳丽, 王磊, 王贺, 王志勇. 养分平衡法在冬小麦测土推荐施肥中的应用研究. 中国土壤与肥料, 2012(1): 7-13.
- DU J, BAI Y L, YANG L P, LU Y L, WANG L, WANG H, WANG Z Y. The application of nutritious balance method for soil testing and recommend fertilization on winter wheat. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(1): 7-13. (in Chinese)
- [20] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, CUI Z L, MA W Q, CHEN X P, JIANG R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [21] LI H, HUANG G, MENG Q, MA L, YUAN L, WANG F, ZHANG W, CUI Z, SHEN J, CHEN X, JIANG R, ZHANG F. Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China: A review. *Plant and Soil*, 2011, 349: 157-167.
- [22] 李廷亮, 谢英荷, 高志强, 洪坚平, 孟丽霞, 马红梅, 孟会生, 贾俊香. 黄土高原旱地小麦覆膜增产与氮肥增效分析. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2735-2746.
- LI T L, XIE Y H, GAO Z Q, HONG J P, MENG L X, MA H M, MENG H S, JIA J X. Analysis on yield increasing and nitrogen efficiency enhancing of winter wheat under film mulching cultivation in the Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2735-2746. (in Chinese)
- [23] CUI Z L, ZHANG H Y, CHEN X P, ZHANG C C, MA W Q, HUANG C D, ZHANG W F, MI G H, MIAO Y X, LI X L, GAO Q, YANG J C, WANG Z H, YE Y L, GUO S W, LU J W, HUANG J L, LÜ S H, SUN Y X, LIU Y Y, PENG X L, REN J, LI S Q, DENG X P, SHI X J, ZHANG Q, YANG Z P, TANG L, WEI C Z, JIA L L, ZHANG J W, HE M R, TONG Y A, TANG Q Y, ZHONG X H, LIU Z H, CAO N, KOU C L, YING H Y I. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature*, 2018, 555(7696): 363-378.
- [24] 陈璐, 党廷辉, 戚瑞生. 黄土旱塬冬小麦磷素含量累积动态与磷肥利用效率研究. 水土保持通报, 2011, 31(3): 190-193.
- CHEN L, DANG T, QI R S. Dynamics of phosphorus accumulation and utilization efficiency of winter wheat on dry highlands of Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(3): 190-193. (in Chinese)
- [25] 李强, 王朝辉, 戴健, 李富翠, 李孟华, 赵护兵, 曹群虎. 氮肥调控与地表覆盖对旱地冬小麦氮素吸收及残留淋失的影响. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1380-1389.
- LI Q, WANG Z H, DAI J, LI F C, LI M H, ZHAO H B, CAO Q H. Effects of nitrogen fertilizer regulation and soil surface mulching on nitrogen use by winter wheat and its residue and leaching in dryland soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(7): 1380-1389. (in Chinese)
- [26] 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.
- ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)
- [27] 朱兆良. 我国氮肥的使用现状、问题和对策. 南京: 江苏科学技术出版社, 1998.
- ZHU Z L. The Status, Problems and Counter Measures of Nitrogen Fertilizer Application in China. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1998. (in Chinese)
- [28] CUI Z L, ZHANG F S, CHEN X P, MIAO Y X, LI J L, SHI L W. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil N_{min} test. *Field Crops Research*, 2008, 105: 48-55.
- [29] 谭金芳. 作物施肥原理与技术. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
- TAN J F. Crop Fertilization Theory and Technology. Beijing: China Agricultural University Press, 2011. (in Chinese)
- [30] 王成雨, 石玉华, 井跃博. 持续减量施氮对冬小麦土壤硝态氮含量和氮肥利用效率的影响. 中国农业气象, 2013, 34(6): 642-647.
- WANG C Y, SHI Y H, JING Y B. Effects of decreasing nitrogen inputs on nitrate-nitrogen in soil and nitrogen fertilizer use efficiency. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(6): 642-647. (in Chinese)

- Chinese)
- [31] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 况福虹, 陈轩敬, 张跃强, 石孝均. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 864-873.
- ZHAO Y N, SU M M, LÜ Y, KUANG F H, CHEN X J, ZHANG Y Q, SHI X J. Wheat yield, nutrient use efficiencies and soil nutrient balance under reduced fertilizer rate. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4): 864-873. (in Chinese)
- [32] 朱晓霞, 谭德水, 江丽华, 郑福丽, 林海涛, 刘兆辉. 减量施用控释氮肥对小麦产量效率及土壤硝态氮的影响. 土壤通报, 2013, 44(1): 179-183.
- ZHU X X, TAN D S, JIANG L H, ZHENG F L, LIN H T, LIU Z H. Effect of reducing amount of controlled release N fertilizer on yield of winter wheat, N efficiency and soil $\text{NO}_3\text{-N}$. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(1): 179-183. (in Chinese)
- [33] ZHAN A I, ZOU C Q, YE Y L, LIU Z H, CUI Z L, CHEN X P. Estimating on-farm wheat yield response to potassium and potassium uptake requirement in China. *Field Crops Research*, 2016, 19: 13-19.
- [34] CUI Z L, ZHANG F S, DOU Z X, MIAO Y X, SUN Q P, CHEN X P, LI J L, YE Y L, YANG Z P, ZHANG Q, LIU C S, HUANG S M. Regional evaluation of critical nitrogen concentrations in winter wheat production of the north China plain. *Agronomy Journal*, 2009, 101(1): 159-166.
- [35] 秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 武淑霞, 刘宏斌. 化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1558-1567.
- QIN X C, PAN J T, GUO S F, ZHAI L M, WANG H Y, WU S X, LIU H B. Effects of chemical fertilizer reduction combined with biogas fertilizer on crop yield of wheat-maize rotation and soil nitrogen loss in North China Plain. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1558-1567. (in Chinese)
- [36] 刘金山, 戴健, 刘洋, 郭雄, 王朝辉. 过量施氮对旱地土壤碳、氮及供氮能力的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 112-120.
- LIU J S, DAI J, LIU Y, GUO X, WANG C H. Effects of excessive nitrogen fertilization on soil organic carbon and nitrogen and nitrogen supply capacity in dryland. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(1): 112-120. (in Chinese)
- [37] JU X T, XING G X, CHEN X P, ZHANG S L, ZHANG L J, LIU X J, CUI Z L, YIN B, CHRISTIE P, ZHU Z L, ZHANG F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- (责任编辑 李云霞)