

基于农户施肥和土壤肥力的黑龙江水稻减肥潜力分析

彭显龙¹, 王伟¹, 周娜¹, 刘海洋¹, 李鹏飞¹, 刘智蕾¹, 于彩莲^{1,2}

(¹东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; ²哈尔滨理工大学化学与环境工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要:【目的】黑龙江稻田面积 320 多万公顷, 为全国稻田面积最大的省份, 10 多年来水稻产量一直徘徊在 7 000 kg·hm⁻², 也是我国稻田化肥用量 (纯 N 约 150 kg·hm⁻²) 最低的省份。在化肥零增长的背景条件下, 黑龙江是否存在节肥潜力有待研究。【方法】调查水稻主产区农户施肥情况。2005 年调查区域为五常、方正、木兰、宁安、庆安、铁力、尚志、阿城; 2008 年调查区域为密山、虎林、庆安、五常、宁安、方正、萝北、桦川、富锦和尚志; 2015 年调查区域为五常、方正、宁安、虎林和庆安。每个地点随机选择一个乡, 每个乡随机选择 2 或者 3 个村, 每村调查 10 户, 共 638 户。2009—2010 年, 采集了黑龙江水稻主产区 8 万多个土壤样品, 测定 0—20 cm 土层速效磷、速效钾养分含量。采用理论适宜施氮量法估算黑龙江稻田氮肥用量; 依据作物养分需求量和稻田土壤养分状况, 采用磷钾衡量监控方法, 估算稻田磷、钾肥适宜施用量, 在此基础上分析黑龙江省水稻减肥潜力。

【结果】2005、2008 和 2015 年黑龙江水稻平均产量分别为 6 427、7 593 和 7 142 kg·hm⁻², 3 年平均产量为 7 104 kg·hm⁻²。农户间产量差异较大, 高低相差近 5 000 kg·hm⁻²。稻田 N、P₂O₅ 和 K₂O 用量平均分别为 141.0、56.6 和 51.6 kg·hm⁻², N、P₂O₅ 和 K₂O 用量高低相差均超过 300 kg·hm⁻², 农户间施肥变异较大, 盲目施肥问题突出。稻田土壤速效磷和速效钾的含量分别约为 26 和 138 mg·kg⁻¹。速效磷的变异超过了 40%, 不同区域间土壤肥力差异较大。70% 以上的样品速效磷、速效钾含量处于较高水平。要达到 7 500 kg·hm⁻² 的产量水平, 对应的理论适宜 N 用量为 105 kg·hm⁻², 只有 20% 的农户实现了高产氮素高效, 有 70% 的农户具有节肥潜力, 可以节氮超过 26%。通过节肥, 每千克氮素生产的粮食可由 50 kg 提高到 70 kg。按照目前的产量和土壤养分状况, 稻田 P₂O₅ 和 K₂O 适宜用量分别为 41.6 和 35.9 kg·hm⁻², 可以减量约 30%。调研农户中, 具有节磷和节钾潜力的农户分别约占总体的 71% 和 72%, 处于低产低效的农户均占总体的 30%, 节肥潜力最大。【结论】黑龙江作为全国施肥量最低的省份, 有约 70% 的农户处于高产不高效或者低产低效水平, 过量施肥问题突出, 节肥潜力 20% 以上。

关键词: 寒地; 稻田; 施肥量; 节肥潜力; 产量; 黑龙江

Analysis of Fertilizer Application and Its Reduction Potential in Paddy Fields of Heilongjiang Province

PENG XianLong¹, WANG Wei¹, ZHOU Na¹, LIU HaiYang¹, LI PengFei¹,
LIU ZhiLei¹, YU CaiLian^{1,2}

(¹College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030; ²Institute of Chemical and Environmental Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040)

Abstract: 【Objective】Heilongjiang has a paddy field of more than 3.2 million hectares, it is the largest province in China with rice fields. In the past ten years, rice production in Heilongjiang Province has been hovering at 7 000 kg·hm⁻², while it was the province with the lowest amount of fertilizer in paddy fields in China. Under the background of “fertilizer zero increase”, whether is there potential for fertilizer saving in Heilongjiang Province remains to be studied. 【Method】We investigated paddy field

收稿日期: 2018-12-07; 接受日期: 2019-02-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0200104、2016YFD0300900)、黑龙江省基金重点项目 (ZD2015008)

联系方式: 彭显龙, Tel: 13684620285; E-mail: pxl0508@163.com. 通信作者刘智蕾, E-mail: HLLiuzhilei@163.com; 通信作者于彩莲, E-mail: lgyucailian@163.com

fertilization across different farms in the main rice producing areas in Heilongjiang Province. In 2005, the survey areas were Wuchang, Fangzheng, Mulan, Ning'an, Qing'an, Tieli, Shangzhi and Acheng; in 2008, the survey areas were Mishan, Hulin, Qing'an, Wuchang, Ning'an, Fangzheng, Luobei, Huachuan, Fujin and Shangzhi; the survey areas in 2015 were Wuchang, Fangzheng, Ning'an, Hulin and Qing'an. From each county, a random township was selected, and 2 or 3 villages were randomly selected from each township, then 10 households were surveyed in each village. From 2009 to 2010, more than 80,000 soil samples from the main rice producing areas in Heilongjiang Province were collected, and the phosphorus and potassium nutrient contents in 0-20 cm soil layer were determined. The nitrogen application rate was estimated through theoretical appreciate application rate method. Based on the crop nutrient demand and the soil nutrient status of the paddy field, phosphorus and potassium application rate was evaluated. Fertilizer reduction potential was analyzed in Heilongjiang Province. 【Result】 According to the research data, the average rice yields in 2005, 2008 and 2015 were 6 427, 7 593 and 7 142 kg·hm⁻², respectively, and the average annual output was 7 104 kg·hm⁻². The crop yield differed between farms with a range of nearly 5 000 kg·hm⁻². The average amount of N, P₂O₅ and K₂O in paddy fields were 141.0, 56.6 and 51.6 kg·hm⁻², respectively, and the difference in the amount of NPK fertilizers was more than 300 kg·hm⁻². Therefore, the results showed that fertilization variation among farmers was large, so the problem of blind fertilization was prominent. The content of available phosphorus and available potassium in the paddy soil of Heilongjiang Province were about 26 mg·kg⁻¹ and 138 mg·kg⁻¹, respectively. The variation of available phosphorus in soil exceeded 40%, and soil fertility varied greatly among different regions. High level phosphorus and potassium accounted for above 70% samples. To reach rice production levels of 7 500 kg·hm⁻², the theoretical suitable nitrogen application rate was 105 kg·hm⁻². Only 20% of farmers achieved high yield and high nitrogen efficiency, and 70% of the farmers had fertilizer-saving potential with nitrogen reduction of 26%. Through fertilizer saving, the grain produced per kilogram of nitrogen could be increased from 50 kg to 70 kg. According to the current yield and soil nutrient status, the appropriate amount of phosphate and potassium fertilizer in paddy fields was only 41.6 and 35.9 kg·hm⁻², which could be reduced by about 30%. Among the surveyed households, farmers whose fields had the potential for phosphorus and potassium-saving accounted for 71% and 72% of the total, respectively, among which the low-yield and low-efficiency farmers accounted for 30% of the total farmers, where the fertilizer-saving potential was the largest. 【Conclusion】 Although Heilongjiang was the province with the lowest fertilization rate in China, about 70% of farmers were high-yield but low efficiency, or low-yield and low efficiency, so the problem of excessive fertilization was prominent, and the fertilizer-saving potential was more than 20% in Heilongjiang Province.

Key words: cold area; paddy field; fertilizer application rate; fertilizer reduction potential; yield; Heilongjiang Province

0 引言

【研究意义】中国是世界第二水稻生产国，常年种植面积达 3 000 万公顷左右，约占世界水稻种植面积的 20%^[1]。我国水稻种植区域大，北起黑龙江，南至海南岛均有分布。由于南北方气候和土壤条件的差异，我国水稻生产上肥料用量也具有明显的区域差异。例如，南方一季稻区江苏省是我国稻田氮肥用量最高的省份（纯 N 314 kg·hm⁻²），北方稻区黑龙江则是我国稻田氮肥用量最低的省份（纯 N 约 150 kg·hm⁻²）^[2]。2014 年，我国提出了到 2020 年化肥零增长的目标，减少化肥用量已经成为我国农业生产的主旋律。作为全国施肥量最低的省份，黑龙江水稻施肥是不足还是过量是研究者关心的问题。【前人研究进展】1970—2014 年，中国化肥用量从 3.5×10⁹ kg 增加到 59.9×10⁹ kg，增幅 1 608%，同期粮食产量从 2.4×10¹¹ kg 增加到 6.1×10¹¹ kg，增幅 153%^[3]，化肥增幅远超

过粮食增幅，存在化肥施用过量的现象。陈琦对江苏省 735 户农户进行调研后发现，约有 32% 的农户存在施氮过量的问题^[4]，导致氮肥偏生产力偏低；彭显龙等研究发现，黑龙江近 60% 的稻田氮素用量过高，稻田氮素有 17.2% 的盈余^[5-6]，具有一定的节氮潜力。然而，巨晓棠在分析全国主要作物氮肥施用情况时指出，黑龙江水稻生产中施氮量不足，水稻高产是以消耗地力为代价^[7]。同时，黑龙江稻田磷、钾肥用量是不足还是过量研究结论也不一致，有人认为磷肥用量适当，而钾肥用量过高^[8]，也有人认为当前农户磷肥用量过高，钾肥用量无需调整^[9]。可见，黑龙江稻田氮磷钾肥是过量还是不足仍存在争议。国内外在推荐氮磷钾肥施用方面开展了许多研究，并提出了一些沿用至今的推荐施肥方法，如地力分级法、目标产量法、肥料效应函数法等^[10]。然而，在稻田氮肥推荐中，缺乏能够反映土壤供氮能力的指标。巨晓棠认为，在一定条件下稻田适宜施氮量就等于收获带走的氮^[7]。而对于

磷、钾肥的推荐,国际普遍应用衡量监控方法^[11]。【本研究切入点】目前在黑龙江稻作区缺乏应用上述方法估算稻田适宜施肥量的研究。为此,本文调查分析了黑龙江农户施肥中存在的主要问题,并利用多年试验获得的100 kg 籽粒养分吸收量的数据,结合黑龙江稻田土壤氮、磷、钾营养状况的分析,确定黑龙江稻田氮、磷、钾适宜用量。【拟解决的关键问题】以期明确黑龙江省稻田节肥潜力,为水稻合理施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 地区概况

黑龙江省地处东经 121°11′—135°05′, 北纬 43°26′—53°33′的高纬度寒冷地区, 属大陆性季风气候, 年降雨量 400—650 mm, 水稻生长季日照时数为 1 150—1 350 h, 昼夜温差约为 11 ℃。黑龙江省第一至四积温带的广大稻区, 抽穗后 40 d 内平均气温 19—22 ℃, 此温度有利于优质稻米生产。黑龙江稻区土质肥沃, 水资源丰富, 冬季结冻休耕时间长, 病虫害发生低。

1.2 数据来源

2005、2008、2015 年, 在黑龙江水稻主产区进行了施肥调研。2005 年调查区域为五常、方正、木兰、宁安、庆安、铁力、尚志、阿城; 2008 年调查区域为密山、虎林、庆安、五常、宁安、方正、萝北、桦川、富锦和尚志; 2015 年调查区域为五常、方正、宁安、虎林和庆安。每个调研点随机选择一个乡, 每个乡随机选择 2 或者 3 个村, 每村调查 10 户。2005、2008 和 2015 年调查问卷分别为 240、248 和 150 份。土壤磷和钾养分数据来自黑龙江省测土配方施肥数据, 数据量分别为 88 183 和 88 260。2004—2016 年黑龙江省水稻种植面积、产量数据源于《中国统计年鉴》。

1.3 地力分级标准

土壤有效磷丰缺指标如下^[12], 低: 0—10 mg·kg⁻¹, 中: 10—20 mg·kg⁻¹, 高: 20—35 mg·kg⁻¹, 极高: >35 mg·kg⁻¹; 土壤有效钾的丰缺指标如下^[12], 低: 0—75 mg·kg⁻¹, 中: 75—100 mg·kg⁻¹, 高: 100—150 mg·kg⁻¹, 极高: >150 mg·kg⁻¹。

1.4 施肥量估算

在氮素管理比较合理的情况下, 稻田的气态氮损失量和除肥料以外其他来源的氮量大致相等。因此, 为了减少环境风险并维持土壤肥力, 理论施氮量等于作物收获时带走的养分量, 即理论施氮量=产量/100×100 kg 籽粒氮素养分需求量^[7]。2014—2016 年黑龙江水稻产量平均为 7 017 kg·hm⁻², 本文以产量提高 5%为目标产量 (7 500 kg·hm⁻²), 来计算 N、P₂O₅、K₂O 推荐用量。

磷钾肥根据衡量监控法确定用量^[11], 当土壤肥力中等时, 施肥量等于水稻收获带走养分量, 校正系数为 1.0; 当土壤肥力较高时, 施肥量可以低于养分带走量, 校正系数为 0.5—0.75; 相反则高于带走量 (详见表 1)。根据课题组多年多点试验数据, 黑龙江省 100 kg 水稻籽粒需氮 (N) 平均为 1.4 kg、磷 (P₂O₅) 0.7 kg、钾 (K₂O) 1.6 kg, 本文计算携出量以此为依据。水稻吸收的钾 30%存在于籽粒中, 70%以上存在于茎秆中^[13]。由于北方水稻主产区仍然有约 10%的秸秆被移除, 作为燃料^[14]。因此, 水稻收获时带走的钾约为 40%, 60%以上的钾都归还土壤, 本文以此为依据计算钾携出量。即施钾量=钾携出量=产量/100×100 kg 籽粒养分需钾量×0.4×校正系数。秸秆中的钾离子容易利用, 而氮磷有效性与秸秆腐解有关, 由于北方稻田秸秆腐解较慢, 在计算氮磷用量时秸秆归还的氮磷暂不考虑。

表 1 磷钾合理施肥标准
Table 1 Rational fertilization standards for phosphorus and potassium

土壤养分等级	校正系数	施磷量	施钾量
Soil nutrient level	Correction coefficient	Phosphorus application rate (kg P ₂ O ₅ ·hm ⁻²)	Potassium application rate (kg K ₂ O·hm ⁻²)
低 Low	1.25	产量/100×100kg 籽粒需磷量×1.25	产量/100×100kg 籽粒需钾量×0.4×1.25
		Yield/100×Potassium content of 100 kg grain×1.25	Yield/100×Phosphorus content of 100 kg grain×0.4×1.25
中 Medium	1.00	产量/100×100kg 籽粒需磷量×1	产量/100×100kg 籽粒需钾量×0.4×1
		Yield/100×Potassium content of 100 kg grain×1	Yield/100×Phosphorus content of 100 kg grain×0.4×1
高 High	0.75	产量/100×100kg 籽粒需磷量×0.75	产量/100×100kg 籽粒需钾量×0.4×0.75
		Yield/100×Potassium content of 100 kg grain×0.75	Yield/100×Phosphorus content of 100 kg grain×0.4×0.75
极高 Especially high	0.50	产量/100×100kg 籽粒需磷量×0.5	产量/100×100kg 籽粒需钾量×0.4×0.5
		Yield/100×Potassium content of 100 kg grain×0.5	Yield/100×Phosphorus content of 100 kg grain×0.4×0.5

1.5 高产高效定义

计算适宜施肥量时,以 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为目标产量,当农户产量高于此产量定义为高产,反之为低产;此产量水平下对应的适宜 N、 P_2O_5 和 K_2O 用量分别为 105 、 41.6 和 $35.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (磷钾肥推荐用量是根据各级养分所占比例计算加权平均数得出),与之相对应的肥料偏生产力 (PFP) 分别为 71 、 180 和 $209\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。农户施肥的 PFP 高于上述对应值为养分高效,反之为养分低效。农户产量和氮效率分别高于 $7\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $71\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,为高产氮高效区,都低于此值为低产氮低效区,产量高而效率低的为高产氮低效区,其他为低产氮高效区。磷钾同样也划分 4 个区域。

1.6 数据处理与分析

全省施磷、钾量 (万 t) = \sum [土壤各肥力水平所占比例 \times 全省水稻种植总面积 (万 hm^2) \times 各肥力水平

推荐施磷、钾量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) / 1000]。

采用 Microsoft Excel 2010 及 Origin 2019 软件进行数据分析、图表处理。

2 结果

2.1 黑龙江水稻生产现状

2004—2016 年,黑龙江水稻种植面积呈增加趋势 (图 1-a),由 159 万公顷 (2004) 增长到 320 万公顷 (2016) 左右。截止到 2016 年,黑龙江省水稻种植面积占全国水稻总面积的 10.61%,位列全国水稻种植省份第一,但水稻单产一直徘徊在 $7\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右。由课题组调研数据可知 (图 1-b),2005、2008 和 2015 年,黑龙江水稻平均产量分别为 $6\,427$ 、 $7\,593$ 和 $7\,142\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,3 年平均产量为 $7\,104\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与统计数据相近。黑龙江省农户间产量差异较大,高低相差近 $5\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

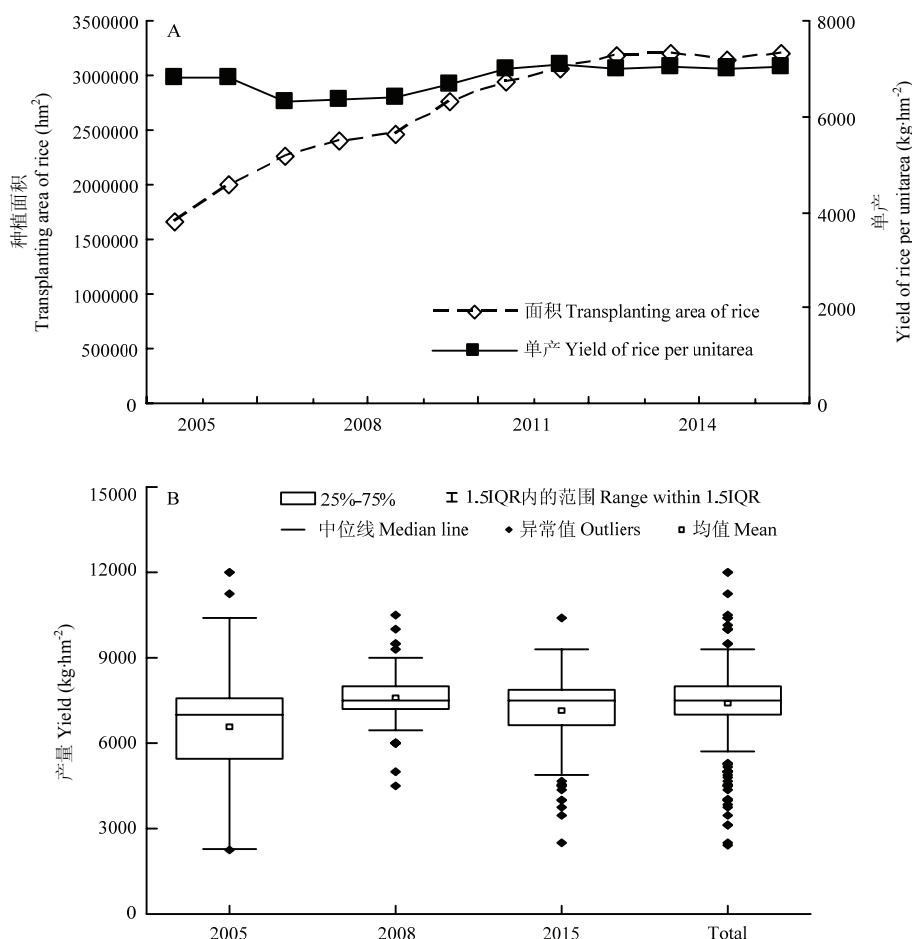


图 1 2004—2016 年黑龙江水稻种植面积及单产 (a) 和农户调研水稻产量 (b)

Fig. 1 Rice transplanting area, yield in Heilongjiang Province from 2004 to 2016 (a) and survey of farmers rice yield (b)

2.2 黑龙江稻田土壤的肥力状况

据黑龙江省多年的土壤养分数据（表 2），黑龙江省稻田土壤速效磷和速效钾的含量平均约为 26 和 138 mg·kg⁻¹。土壤速效磷的变异系数超过了 40%，土壤肥力差异较大。70%以上的样品土壤速效磷、速效钾含量处于较高水平，含量丰富。

2.3 黑龙江水稻施肥现状

农户调查数据显示（图 2），年际间肥料平均用量稍有差异，氮磷的年际间变异较小，钾肥用量差异稍大。2008 年平均 K₂O 用量为 60.5 kg·hm⁻²，显著高

于其他两年。黑龙江省稻田纯 N 用量平均约为 141 kg·hm⁻²，但是高低相差约 300 kg·hm⁻²，农户施氮变异较大。对应的 P₂O₅ 和 K₂O 用量分别为 56.6 和 51.6 kg·hm⁻²，变异也较大，农户盲目施肥问题突出。

2.4 黑龙江稻田节肥潜力分析

按目标产量 7 500 kg·hm⁻² 计算，纯 N 用量只要 105 kg·hm⁻² 就能满足水稻生长需要，与全省平均氮肥用量相比，可节约 26% 的氮肥，可将氮肥偏生产力由 53 kg·kg⁻¹ 提高至 71 kg·kg⁻¹（表 3）。所有调研农户中，只有约 20% 的农户实现了高产高效（图 3-a），约有

表 2 黑龙江稻田土壤磷钾养分
Table 2 Soil available P and K of Paddy Rice in Heilongjiang

养分 Nutrient	最大值 Max	最小值 Min.	平均值±标准差 Average ± Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation (%)	各级养分占比 Nutrient ratio at all levels (%)				样本数 n
					低 Low	中 Medium	高 High	极高 Especially high	
速效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	75.30	5.00	26.00±10.46	40.22	3.87	26.85	52.50	17.35	88183
速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)	433.00	56.00	138.14±50.94	7.57	4.89	22.28	41.19	33.09	86260

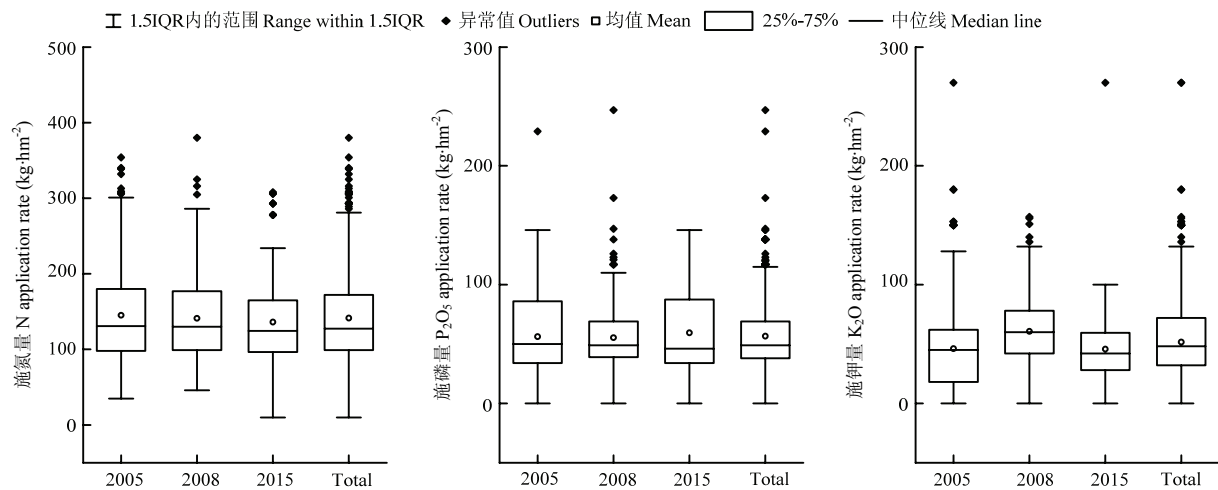


图 2 黑龙江省农户施用氮磷钾量
Fig. 2 Application of N, P₂O₅ and K₂O from farmers of Heilongjiang Province

表 3 水稻减肥潜力及化肥偏生产力
Table 3 Fertilizer reduction potential and fertilizer partial productivity of rice

养分类别 Nutrient category	施肥量 Fertilization amount (kg·hm ⁻²)		偏生产力 PFP (kg·kg ⁻¹)		节肥潜力 Saving fertilizer potential (%)
	习惯施肥 Conventional fertilization	优化施肥 Optimized fertilization	习惯施肥 Conventional fertilization	优化施肥 Optimized fertilization	
N	141	105	53	71	26
P ₂ O ₅	56.6	41.6	133	180	27
K ₂ O	51.6	35.9	145	209	30

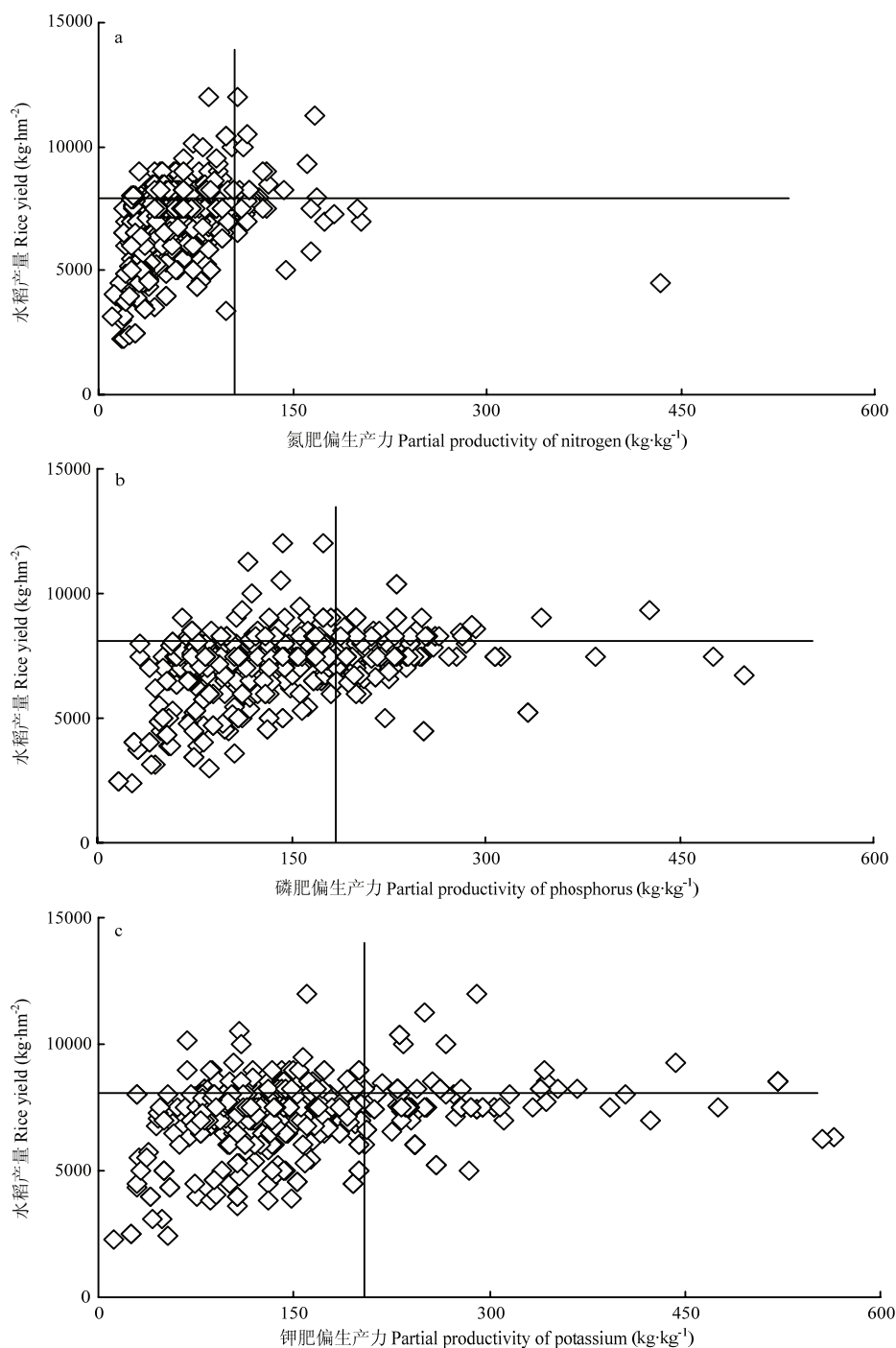


图 3 农户氮 (a) 磷 (b) 钾 (c) 肥偏生产力与水稻产量关系

Fig. 3 Relationship between partial productivity of nitrogen (a), phosphorus (b) and potassium (c) fertilizer and rice yield of farmers

70%的农户氮效率较低, 其中处于低产低效水平的农户约占总体的 30%, 节肥潜力最大。

按照磷钾衡量监控方法估算的 P_2O_5 和 K_2O 用量分别为 41.6 和 35.9 $kg \cdot hm^{-2}$, 约有 30% 的节肥潜力(表 3)。所有调研农户中, 8.8% 的农户不施磷肥, 13.8%

的农户不施钾肥。在所有农户中, 具有节磷和节钾潜力的农户约占总体的 68% 和 72% (图 3-b、3-c), 其中低产低效的农户约占总体的 30%。约有 13%—14% 的农户处于低产高效区(图 3-b), 具有较大的增产潜力。

3 讨论

氮是作物产量的主要限制因子, 施氮是提高水稻产量最重要的措施。我国水稻生产中氮肥用量高和施用时期不合适的问题比较突出, 产生了较大的环境问题^[15]。本文研究发现, 黑龙江稻区仅有约 20% 的农户施肥比较合理, 实现了高产氮高效。大部分农户施氮不合理。因此, 如何准确确定氮肥的适宜用量, 成为研究者关注的科学问题。巨晓棠总结了国内外确定适宜施氮量的方法, 认为理论适宜施氮量是水稻 100 kg 籽粒吸氮量和目标产量的积, 前提是应维持除肥料外的氮素的输入与氮素损失基本平衡^[7]。已有研究发现, 黑龙江稻田氮素损失量与除肥料外其他来源的氮量大致相等^[16]。因此, 用该方法确定理论适宜施氮量是合理的。巨晓棠在计算黑龙江水稻理论施 N 量时采用了 100 kg 籽粒需氮量为 2.4 kg 这一全国平均参数。通过计算, 黑龙江纯 N 用量约为 180 kg·hm⁻²^[7]。但是, 本课题组近 20 年的试验证实, 寒地水稻籽粒的含氮量只有 1% 左右, 而茎秆的含氮量约为 0.55%, 均显著低于全国平均水平。因此, 100 kg 籽粒需氮量只有 1.4 kg 左右。本文中用这一参数重新计算的理论纯 N 用量为 105 kg·hm⁻², 这一用量与武良等研究结论相似^[17]。与当前全省平均施 N 量相比, 氮肥平均用量可节约 26% (表 3)。已有研究证实, 应用此施肥量不仅可以满足水稻生长需求, 还可以获得高产, 并使氮肥利用率提高到 50% 左右^[16,18]。

土壤磷素含量变化反映了磷肥施入和带走的平衡状况, 当施磷量高于水稻收获带走磷量则土壤磷积累。2005—2006 年调查发现, 黑龙江稻田速效磷平均为 24.5 mg·kg⁻¹^[12]。与上述数据相比, 当前黑龙江稻田速效磷含量有增加趋势 (表 2), 这从侧面说明黑龙江稻田施磷量仍然高于水稻收获带走的磷, 磷肥施用量过高。本文中磷肥平均用量与刘海涛等的研究结果相近^[19]。但是, 磷肥用量显著低于吴良泉等的研究结果^[8]。磷肥用量不但与土壤养分含量有关, 还受目标产量的影响, 目标产量越高磷肥用量越大。本文中水稻目标产量是 7 500 kg·hm⁻², 而吴良泉等的目标产量约为 9 000 kg·hm⁻²。这是两者磷肥用量差异较大的原因。根据目前土壤磷素状况和水稻产量水平, 黑龙江稻田磷肥过量的农户占 70% 以上, 这些农户的磷肥生产效率较低, 是减肥的主体。同时也有约 8% 的农户磷肥用量不足, 需要适当增施磷肥 (图 3-b), 只有不到 20% 的农户磷肥施用量适宜, 达到了磷肥的高产

高效。本文提出的减肥幅度是基于土壤磷素状况而言, 在未来的 3—5 年内可以应用这一策略, 此后则需要依据土壤养分状况和水稻产量目标重新评估稻田施磷。

土壤钾素含量高低也决定于土壤钾素输入输出平衡状况, 当输出的钾量高于施入的钾时, 土壤速效钾含量就会降低。由于作物秸秆中钾的含量较高, 在计算钾素输入输出平衡时必须要考虑秸秆归还的钾。20 世纪 80 年代缺乏燃料, 农户将秸秆从田间移出, 多数做为柴薪使用, 稻田中无秸秆残留。在未考虑秸秆钾素归还时, 多数研究认为黑龙江钾素投入不足^[20-25]。与 20 世纪 80 年代相比, 如今作物产量增加一倍, 秸秆还田后移出钾量减少, 如再按上述方法估算钾携出量就不符合实际情况。在考虑秸秆钾素投入的情况下, 本文试验结果显示黑龙江稻田具有一定的节钾潜力 (表 3)。不同年度土壤速效钾含量变化显示, 2005 年寒地稻田土壤速效钾平均含量为 127 mg·kg⁻¹^[12]。目前, 黑龙江稻田土壤速效钾平均含量为 138 mg·kg⁻¹。土壤速效钾含量提高表明, 钾归还数量大于作物收获带走的量, 这也证实了钾肥施入过量。秸秆还田条件下, 钾肥较常规施肥减量 30% 对水稻产量无显著影响, 钾肥偏生产力可提高约 35%^[26]。可见, 黑龙江稻田具有减钾潜力。

4 结论

目前, 黑龙江稻田土壤速效磷和速效钾的平均含量约为 26 mg·kg⁻¹ 和 138 mg·kg⁻¹, 70% 以上的样品土壤速效磷、速效钾处于较高水平, 含量丰富。黑龙江稻田 N、P₂O₅ 和 K₂O 习惯用量分别为 141、56.6 和 51.6 kg·hm⁻², 农户施肥差异大, 盲目施肥问题突出。达到 7 500 kg·hm⁻² 的产量, N、P₂O₅ 和 K₂O 的用量只需要 105、41.6 和 35.9 kg·hm⁻², 氮、磷和钾肥用量可减少 26%—30%。黑龙江只有约 20% 农户达到了高产高效, 70% 的农户处于低效水平。作为全国水稻施肥量最低的省份, 黑龙江具有较大的节肥潜力。

References

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2016. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>.
- [2] 申建波. 水稻养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2017: 8, 308.
- SHEN J B. *Theory and Practice of Integrated Management of Rice Nutrient Resources*. Beijing: China Agricultural University Press,

- 2017: 8, 308. (in Chinese)
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- NBS. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistical Publishing House, 2016. (in Chinese)
- [4] 陈琦. 农户水稻施肥现状调查与分析—以江西省、江苏省为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- CHEN Q. Investigation and analysis of famers' fertilization status on rice-taking Jiangxi Province and Jiangsu Province as examples[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [5] 彭显龙, 刘元英, 罗盛国, 范立春, 盛大海. 寒地稻田施氮状况与氮素调控对水稻投入和产出的影响. 东北农业大学学报, 2007(4): 467-472.
- PENG X L, LIU Y Y, LUO S G, FAN L C, SHENG D H. Nitrogen application situation and effects of nitrogen management on cost and output of paddy field in cold area of northeast China. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007(4): 467-472. (in Chinese)
- [6] 郭明亮. 中国水稻氮过量对农药用量的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- GUO M L. The impact of excessive nitrogen fertilizer on pesticide usage on rice in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [7] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证—兼论确定作物氮肥推荐量的方法. 土壤学报, 2015, 52(2): 249-261.
- JU X T. Improvement and validation of theoretical N rate (TNR)-Discussing the methods for N fertilizer recommendation. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2): 249-261. (in Chinese)
- [8] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 陈新平, 张福锁. 中国水稻区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究. 中国农业大学学报, 2016, 21(9): 1-13.
- WU L Q, WU L, CUI Z L, CHEN X P, ZHANG F S. Studies on recommended nitrogen, phosphorus and potassium application rates and special fertilizer formulae for different rice production regions in China. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(9): 1-13. (in Chinese)
- [9] 刘炜, 谷思玉, 白雅梅, 赵京考. 施肥量与灌溉量对黑龙江省黑土区水稻产量的影响. 东北农业大学学报, 2012, 43(4): 49-54.
- LIU W, GU S Y, BAI Y M, ZHAO J K. Effect of fertilizer levels and irrigate on yield of rice in black soil area. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, 43(4): 49-54. (in Chinese)
- [10] 何萍, 金继运, Mirasol F. Pampolino, Adrian M. Johnston. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 499-505.
- HE P, JIN J Y, PAMPOLINO M F, JOHNSTON A M. Approach and decision support system based on crop yield response and agronomic efficiency. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 499-505. (in Chinese)
- [11] 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: 3-4.
- ZHANG F S, CHEN X P, CHEN Q. *China's Main Crop Fertilization Guidelines*. Beijing: China Agricultural University Press, 2009: 3-4. (in Chinese)
- [12] 赵晓宇, 罗盛国, 刘元英, 彭显龙. 寒地稻田土壤养分状况. 东北农业大学学报, 2009, 40(2): 34-37.
- ZHAO X Y, LUO S G, LIU Y Y, PENG X L. Nutrient status of paddy field in cold area of northeast China. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2009, 40(2): 34-37. (in Chinese)
- [13] 田卡, 钟旭华, 黄农荣, 潘俊峰. 还田稻草的钾素利用及其增产效应研究. 中国稻米, 2014, 20(3): 54-57.
- TIAN K, ZHONG X H, HUANG N R, PAN J F. Utilization of potassium in returned straw and its effect on grain yield in rice. *China Rice*, 2014, 20(3): 54-57. (in Chinese)
- [14] 高利伟, 马林, 张卫峰, 王方浩, 马文奇, 张福锁. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173-179.
- GAO L W, MA L, ZHANG W F, WANG F H, MA W Q, ZHANG F S. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(7): 173-179. (in Chinese)
- [15] 尹娟, 费良军, 田军仓, 王艳芳, 韩丙芳, 张学科, 勉韶平. 水稻田中氮肥损失研究进展. 农业工程学报, 2005(6): 189-191.
- YIN J, FEI L J, TIAN J C, WANG Y F, HAN B F, ZHANG X K, MIAN S P. Research advance of nitrogen fertilizer losses from paddy field. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005(6): 189-191. (in Chinese)
- [16] PENG X L, YANG Y M, YU C L, CHEN L N, ZHANG M C, LIU Z L, LUO S G, LIU Y Y. Crop management for increasing rice yield and nitrogen use efficiency in Northeast China. *Agronomy Journal*, 2015, 107(5): 1682-1690.
- [17] 武良. 基于总量控制的中国农业氮肥需求及温室气体减排潜力研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- WU L. Nitrogen fertilizer demand and greenhouse gas mitigation potential under nitrogen limiting conditions for Chinese agriculture production[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [18] PENG X L, LIU Y Y, LUO S G, FAN L C, SONG T X, GUO Y W. Effects of site-specific nitrogen management on yield and dry matter accumulation of rice from cold areas of northeastern China. *Journal of*

- Integrative Agriculture*, 2007, 6(6): 715-723.
- [19] 刘海涛, 童良军, 赵立琴, 王玉良. 寒地水稻磷素适宜施用量的研究. 黑龙江八一农垦大学学报, 2011, 23(4): 15-19.
- LIU H T, TONG L J, ZHAO L Q, WANG Y L. The study on reasonable dosage of phosphate fertilization in paddy in cold areas. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2011, 23(4): 15-19. (in Chinese)
- [20] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 高中超. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征. 农业工程学报, 2015, 31(16): 178-185.
- HAO X Y, ZHOU B K, MA X Z, GAO Z C. Characteristics of crop yield and nutrient balanced in black soil under long-term different fertilization measures. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 178-185. (in Chinese)
- [21] 周米平, 刘金华, 杨靖民, 于小斌. 吉林省不同区域黑土供钾能力研究. 吉林农业大学学报, 2008, 30(5): 712-715, 752.
- ZHOU M P, LIU J H, YANG J M, YU X B. Study on the capability of releasing potassium in several phaeozem in Jilin Province. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008, 30(5): 712-715, 752. (in Chinese)
- [22] 彭显龙, 刘元英, 罗盛国, 李广宇, 盛大海. 寒地稻田钾素状况与平衡. 东北农业大学学报, 2008, 39(1): 46-49.
- PENG X L, LIU Y Y, LUO S G, LI G Y, SHENG D H. Potassium state and balance of paddy field in cold area of Northeast China. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2008, 39(1): 46-49. (in Chinese)
- [23] 彭显龙, 袁英才, 刘元英, 罗盛国. 实地养分管理对寒地水稻磷钾吸收的影响. 东北农业大学学报, 2011, 42(7): 39-45.
- PENG X L, YUAN Y C, LIU Y Y, LUO S G. Effect of site-specific nutrient management on P and K uptake of rice in cold region of northeastern China. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2011, 42(7): 39-45. (in Chinese)
- [24] 王英. 黑龙江省农田养分循环与平衡状况的初步探讨. 土壤通报, 2002(4): 268-271.
- WANG Y. Preliminary study on nutrient's cycle and balance in farmland soil of Heilongjiang Province. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002(4): 268-271. (in Chinese)
- [25] 王建国, 王德禄, 王守宇, 何喜云, 王忠伟. 黑龙江农田养分平衡和养分水平的动态变化. 农业系统科学与综合研究, 2000, 16(2): 124-127.
- WANG J G, WANG D L, WANG S Y, HE X Y, WANG Z W. Dynamic variation of the farmland nutrient's balance and its content in Heilongjiang Province. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2000, 16(2): 124-127. (in Chinese)
- [26] 金梦灿, 张舒予, 郇红建, 高时凤, 王宜坤. 麦秆还田下钾肥减量对水稻产量及钾肥利用率的影响. 中国生态农业学报, 2017, 25(11): 1653-1660.
- JIN M C, ZHANG S Y, GAO H J, GAO S F, WANG Y K. Effects of reducing potassium fertilizer on rice yield and potassium use efficiency under wheat straw return condition. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(11): 1653-1660. (in Chinese)
- (责任编辑 李云霞)