

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.20410

辽河三角洲水稻化肥减施潜力分析与验证

宫亮, 金丹丹, 牛世伟, 王娜, 徐嘉翼, 隋世江

(辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 辽宁 沈阳 110161)

摘要: 在化肥零增长的背景下, 减少化肥用量已经成为我国农业生产的重点。作为单产最高的北方粳稻主产区之一, 辽河三角洲化肥减施潜力及对产量的影响有待研究。采用线性加平台函数计算辽河三角洲稻作区氮肥推荐用量; 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; 对比 240 个农户习惯施肥调查结果, 分析辽宁省水稻生产化肥减施潜力。依据 8 年定位试验结果, 对比推荐施肥和习惯施肥对土壤氮库及水稻产量的影响, 验证化肥减施时效性。辽河三角洲稻作区目标产量为 $10000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的 N、 P_2O_5 和 K_2O 的推荐用量分别为 234、111 和 $101 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 农户 N、 P_2O_5 和 K_2O 习惯用量平均为 271.5、117.0 和 $96.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 82.1% 的农户氮肥效率较低; 分别有 21.7%、9.6% 和 7.1% 的农户氮肥、磷肥和钾肥减施潜力较大, 氮肥和磷肥减施空间分别为 13.7% 和 5.1%, 钾肥需要适量补充; 在略增产或减产 1% 以内的情况下, 推荐施肥较习惯施肥降低了氮肥用量 15.15% ~ 21.15%, 0 ~ 20 cm 土壤全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量均无显著变化, 矿质氮含量增加了 4.63% ~ 19.24%。辽河三角洲稻作区农民习惯施肥量差异较大, 盲目施肥现象依然存在, 氮肥过量施用问题突出, 可减施 13.7%, 磷肥可减施 5.1%, 钾肥需要适量补充。推荐施氮量具有年际间波动变化的特点, 能够对土壤氮库进行有效补充, 可以实现稳产。

关键词: 水稻; 化肥减施潜力; 化肥减施空间; 推荐施肥; 养分平衡

肥料是粮食的“粮食”, 对作物增产具有重要作用, 而化肥对粮食的增产贡献率可达 20% ~ 60%^[1-2], 是影响粮食产量增长的重要因素。但过量施用化肥不仅增加生产成本^[3], 还会导致作物减产, 引发生态环境问题^[4-8]。中国是目前世界上最大的化肥生产国和消费国, 2014 年我国粮食产量达到 6.1 亿 t, 较 1970 年增加了 2.5 倍, 同期化肥用量增加了 17.1 倍^[9], 化肥增幅远超过粮食增幅。为此, 农业农村部(原农业部)2015 年制定了《到 2020 年化肥使用零增长行动方案》, 科学减少化肥施用量已成为我国农业生产的重点。中国是世界第二大水稻生产国, 常年种植面积 3000 万 hm^2 左右, 约占世界水稻种植面积的 1/5^[10]。稻田氮肥用量占我国氮肥总消费量的 30% 以上^[11], 但当季回收利用率仅为 27.2%^[4], 水稻平均氮肥施用量为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比世界水稻氮肥平均施用量高出 75%^[12]。史常亮等^[13] 调查结果显示, 我国

水稻施肥强度高于玉米和小麦, 其中, 东北稻作区的化肥折纯平均施用量为 $311.22 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 超过国际公认的化肥安全施用量上限, 有消减空间。张灿强等^[14] 研究认为, 辽宁地区水稻生产化肥施用量可以减少 $94.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 消减比例为 26.3%。王颖^[15] 调查结果表明, 辽宁省水稻化肥折纯平均施用量为 $391.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 农户间施肥量差异较大, $7500 \sim 9000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 产量水平氮肥和施肥总量较高, 是控肥减施的重点。已有的研究指出了辽宁省水稻生产化肥减施空间和控肥重点对象, 但在降低肥料用量后, 土壤肥力是否降低? 作物产量是否能够保持稳定? 化肥减施能够持续多久? 是需要深入研究的问题。国内外众多学者在推荐施肥方面作了大量研究, 如肥料效应函数法^[16-19], 基于土壤养分的测土配方施肥法^[20-22], 基于作物的实时氮肥管理模式 (RTNM)^[23], 实时实地氮肥管理技术 (SSNM)^[24], 基于产量反应和农学效率的养分专家系统 (NE)^[25] 等, 实现了氮肥精量管理并有效降低了化肥用量^[26-28], 达到了节肥增效的目的^[29-31], 但关于推荐施肥量年际间变化的报道较少^[32]。为此, 本文以辽宁省水稻高产产区辽河三角洲为研究对象, 调查分析该地区农户习惯施肥现状, 并利用课

收稿日期: 2020-07-13; 录用日期: 2020-09-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0200200)。

作者简介: 宫亮 (1981-), 男, 辽宁本溪人, 研究员, 硕士, 主要从事植物营养研究工作。E-mail: gongliang1900@sina.com。

课题组前期研究成果^[33], 确定化学氮肥推荐用量, 利用衡量监控法^[34]估算了各稻作区化学磷、钾肥推荐用量, 以期明确当前辽河三角洲稻田化肥减施潜力, 并利用8年的定位试验结果对氮肥减施的时效性进行了验证, 为制定水稻化肥减施策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 地区概况

辽河三角洲稻作区位于辽河平原的南端, 包括盘山县、大洼县和大石桥市等, 属暖温带半湿润季风气候, 年平均气温8.3℃, 年平均降水量610 mm, 无霜期165~170 d, 主要为盐渍型水稻土, 近3年水稻平均产量9.5 t·hm⁻²。

1.2 数据来源

课题组2020年对辽河三角洲水稻主产区进行了农户习惯施肥调研, 分别选择高、中、低产代表乡镇为调研点, 每个调研点选择2~5个村, 每个村选择10户进行调研, 共计240份调查问卷。参考农业农村部(原农业部)《小麦、玉米、水稻三大粮食作物区域大配方与施肥建议(2013)》, 结合调查情况确定高产标准为产量在10.5 t·hm⁻²以上, 低产标准为产量在9.0 t·hm⁻²以下, 调研点包括营口市、大石桥市、盘山县、大洼县。2011~2018年水稻种植面积、产量数据来源于《辽宁省统计年鉴》。

1.3 推荐施肥量计算方法

二次项、指数、直线及直线加平台等肥料效应函数分别适用于不同条件下计算肥料用量和作物产量的相关性。函数统计检验的拟合程度、同一产量水平下推荐施肥量的节省程度和稳定性是选择函数模型的3个重要条件^[35]。近年来, 随着育种水平的不断提高, 高产作物品种通常具有基础产量高, 耐肥水, 抗倒伏等特点, 在某一产量范围内, 施肥量与作物产量无显著相关性, 产量和施氮量曲线在适宜施氮量附近已相当平缓, 少量增加或减少氮肥的施用量对产量的影响很小^[36-37], 因此, 可应用线性加平台函数拟合作物产量与施氮量的相关性^[38], 计算作物目标产量的推荐施氮量。本文以辽河三角洲稻作区近3年平均产量增产5%为目标产量(10000 kg·hm⁻²), 推荐施氮量根据课题组多年多点试验结果, 利用线性加平台函数模型计算确定^[16, 18, 33]。

磷、钾肥根据国际普遍应用的衡量监控法确定用量^[34], 当土壤肥力中等时, 施肥量等于水稻收获带走的养分量, 校正系数为1.0; 当土壤肥力较高时, 施肥量低于养分带走量, 校正系数为0.5~0.75; 当土壤肥力较低时, 施肥量高于养分带走量, 校正系数为1.25。辽宁省100 kg水稻籽粒P₂O₅和K₂O需求量分别为0.89和2.69 kg^[39], 本文以此为依据计算磷、钾携出量。辽河三角洲稻作区土壤有效磷平均含量11.48 mg·kg⁻¹^[40], 处于缺乏水平^[41], 且均为盐渍型水稻土, pH在8左右, 磷肥有效性较低^[42], 故校正系数按1.25计算; 速效钾平均含量为146.34 mg·kg⁻¹^[40], 属于中等水平, 但存在含量下降问题^[43], 为保持土壤钾含量处于稳定水平, 校正系数按1.25计算。水稻吸收的钾80%存在于茎秆中, 故秸秆是一种重要的速效性钾素资源, 可与传统钾肥起到相同作用^[44]。北方水稻主产区约有10%秸秆被移除作燃料使用^[45], 因此, 约70%水稻地上部吸收的钾归还土壤。本文以此为依据计算钾携出量, 施钾量=钾携出量=产量/100×100 kg籽粒养分需钾量×0.3×校正系数。秸秆氮主要对维持和培育土壤有机碳、氮库有利, 对推荐施氮量的影响不大^[32]。水稻秸秆还田后释放的氮磷养分不足推荐施肥的1%^[46], 因此, 可不考虑秸秆还田对氮、磷肥用量的影响^[47]。

1.4 合理施肥标准

以目标产量为标准, 当农户产量高于此标准时定义为高产, 反之为低产; 以目标产量条件下推荐的N、P₂O₅和K₂O用量为肥料合理用量, 与之相对应的肥料偏生产力为标准偏生产力, 农户施肥的偏生产力高于标准偏生产力则为养分高效, 反之为养分低效。高产高效为合理施肥, 高产低效和低产低效为过量施肥, 低产高效为肥料用量不足。其中, 低产低效农户具有较大化肥减施潜力。

1.5 氮肥减施验证试验设计

依托2011~2018年的定位试验结果, 从水稻产量、土壤速效养分和矿质氮含量变化等方面对比分析推荐施肥量与农民习惯施肥量对水稻产量和土壤肥力的影响, 从而验证推荐施肥对化肥减施的时效性。

1.5.1 试验设计

试验地点为盘山县航程农场, 位于辽河三角洲中心地带。0~20 cm土壤理化性质为pH 8.2, 有机质22.57 g·kg⁻¹, 全氮1.42 g·kg⁻¹, 碱解

氮 $105.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $21.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $164.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 矿质氮 $80.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 容重 $1.39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。试验设置 6 个氮肥水平, 在农民习惯施氮量 $260 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 基础上, 设置 3 个减氮处理, 氮用量分别为 N 0、160 和 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2 个增氮处理施氮量分别为 N 315 和 $420 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 小区面积 50 m^2 , 3 次重复, 随机区组排列。氮肥为尿素 (N 46%), 氮肥的基肥、分蘖肥、穗粒肥施用比例分别为 40%、30%、30%。各处理磷肥 (P_2O_5) 和钾肥 (K_2O) 用量均为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷肥为磷酸二铵 (P_2O_5 46%、N 18%) 和过磷酸钙 (P_2O_5 18%), 钾肥为氯化钾 (K_2O 60%), 全部基施。各小区之间用 PVC 板分隔并筑埂, PVC 板埋深 30 cm, 以减少小区间肥水渗透。各小区均设有单独的排水口和进水口, 单排单灌。供试水稻品种为盐丰 47, 插秧密度为 $20 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 株距 \times 行距为 $30 \text{ cm} \times 16.5 \text{ cm}$ 。每年 5 月下旬插秧, 10 月上旬收获, 田间管理措施按当地习惯统一进行。

1.5.2 测定调查项目

2011 ~ 2018 年水稻成熟后, 各处理随机选 3 块样方测定水稻产量, 每块样方 6 m^2 , 将样方产量折算成公顷产量。收获后每个小区用“十字交叉”法采取 5 点土壤样品, 采样深度 20 cm, 混合为 1 个土样。冷藏保存带回化验室后立即测定, 如当天未能完成测试, 将样品放置 -20°C 冰柜中保存。用烘干法测定新鲜土壤水分含量, 连续流动分析仪 (AA3, 德国布朗卢比公司) 测定新鲜土壤样本硝态氮和铵态氮含量。2018 年水稻收获后对各处理 0 ~ 20 cm 土壤全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量进行测定, 全氮采用凯氏定氮法, 碱解氮采用碱解扩散法, 有效磷测定方法为碳酸氢钠法, 速效钾测定方法为火焰光度法。

1.6 计算方法和数据分析

土壤残留矿质氮含量 = (铵态氮含量 + 硝态氮含量) \times 土层深度 \times 容重 \times 面积

式中土层深度为 20 cm, 容重为 $1.39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 面积为 10000 m^2 。

氮磷钾肥偏生产力 = 水稻产量 / (N、 P_2O_5 、 K_2O) 施用量

化肥减施空间 = (农民习惯施肥量 - 推荐施肥量) / 农民习惯施肥量 $\times 100\%$

试验数据均采用 Excel 2007、SigmaPlot 12 进行统计分析和图表处理。

2 结果与分析

2.1 辽河三角洲稻区水稻生产现状

2011 ~ 2018 年辽河三角洲水稻种植面积约 $15 \text{ 万} \text{ hm}^2$, 年际间变化在 $0.3 \text{ 万} \text{ hm}^2$ 左右, 截至 2018 年, 水稻种植面积占辽宁省水稻种植总面积的 31.5%; 单产由 $9.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2012) 上升到 $9.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2018), 高于同期全省平均水平 (图 1 a)。调研数据 (图 1 b) 表明, 辽河三角洲稻作区农户 N、 P_2O_5 和 K_2O 用量平均为 271.5 、 117.0 和 $96.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 最小施 N 量 $154.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最大施 N 量 $358.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 两者相差 2.3 倍, 有农户 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别高达 178.5 和 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 也有农户不施钾肥, 盲目施肥现象依然存在。

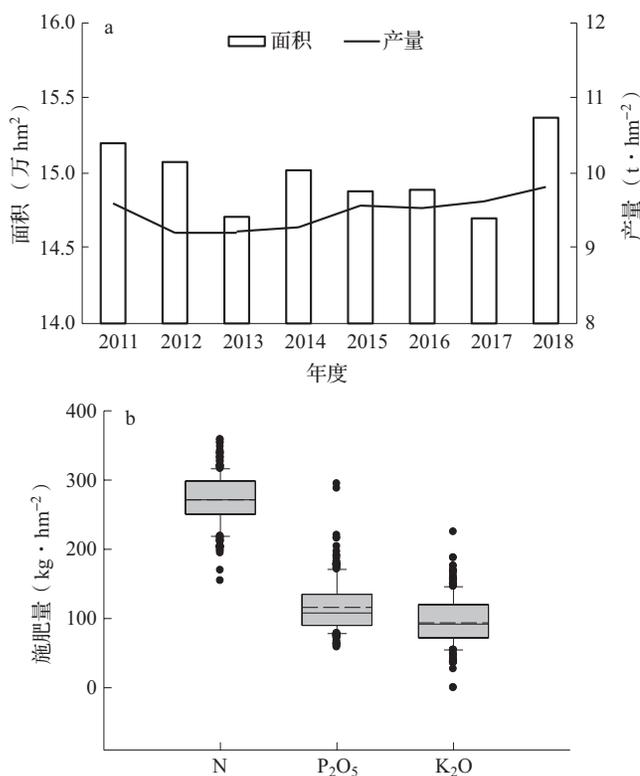


图 1 辽河三角洲水稻种植面积、单产和农户调研水稻氮磷钾肥施用量

注: · 异常值, —— 均值, —— 中位线, 工 1.5IQR 内的范围, □ 25% ~ 75%。

2.2 辽河三角洲水稻节肥潜力分析

辽河三角洲稻作区仅有 11.3% 的农户实现了氮肥高产高效, 82.1% 的农户氮肥效率较低, 其中 21.7% 的农户处于低产低效水平, 所以氮肥减施潜力较大 (图 2 a)。与农民平均习惯施氮量相比, 可

减施氮肥 13.7%，氮肥偏生产力可提高 $5.8 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1)；约 40% 农户实现了磷肥和钾肥高产高效，磷肥和钾肥处于低产低效水平的农户比例分别为 9.6% 和 7.1%，所以减施潜力较大 (图 2b、c)。与

农民平均习惯施磷量相比，可减施磷肥 5.1%，偏生产力可提高 $4.6 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1)；农民平均习惯施钾量低于推荐施钾量，且有个别农户不施钾肥，所以钾肥需要适量补充。

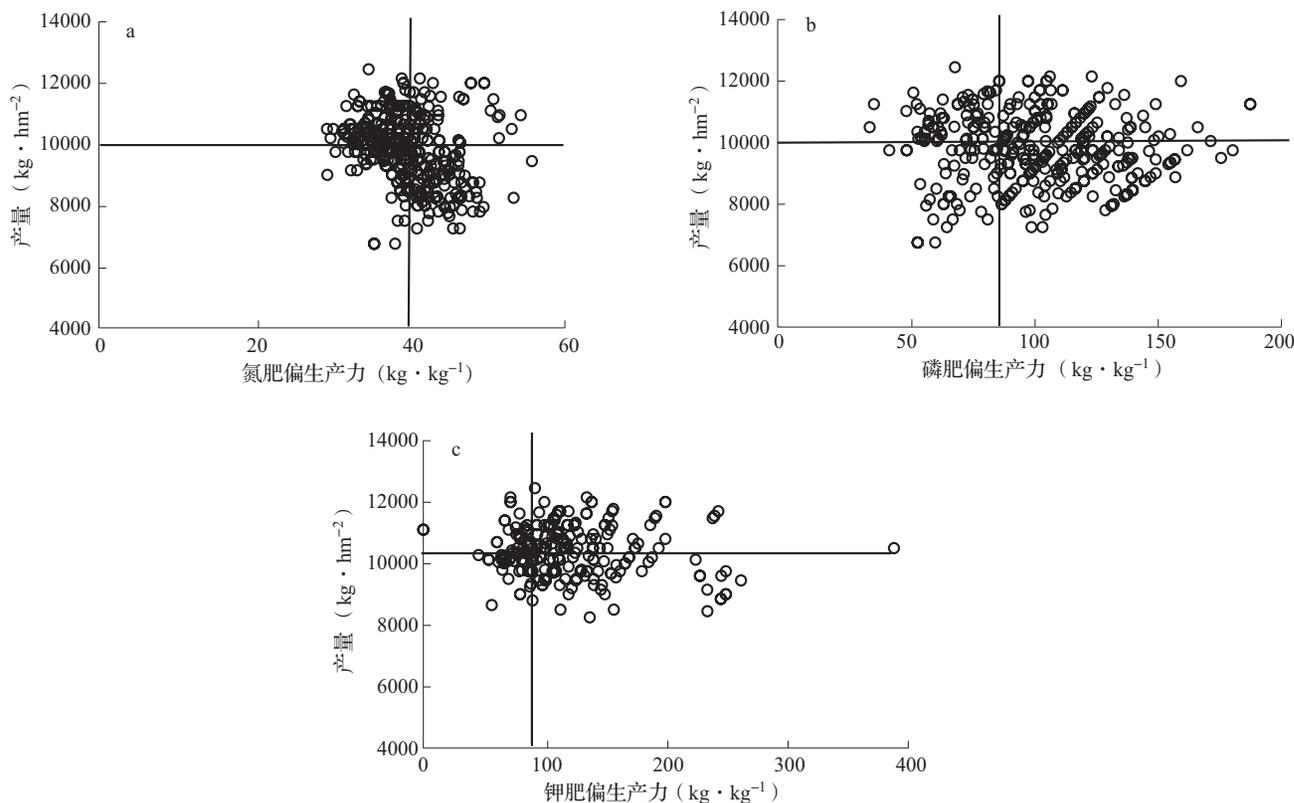


图 2 农户氮磷钾肥偏生产力与水稻产量的关系

表 1 不同稻作区化肥偏生产力及减施潜力

施肥量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)						偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)						减肥潜力 (%)		
推荐施肥			习惯施肥			推荐施肥			习惯施肥			N	P_2O_5	K_2O
N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O			
234	111	101	271	117	96	42.7	90.1	99.0	36.9	85.5	104.2	13.7	5.1	--

2.3 辽河三角洲氮肥减施潜力验证

2.3.1 耕层土壤全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量变化

试验开展 8 年后，与基础土壤相比，N0 处理全氮含量下降了 $0.147 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，差异达到显著水平，其他处理全氮含量无显著变化；N0 处理碱解氮下降了 $19.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，差异达到显著水平，N210、N315 和 N420 处理碱解氮含量略有增加，但差异未达到显著水平；各处理有效磷含量略有增加 (除 N260 处理外)，速效钾含量略有降低，但均未达到

显著水平 (图 3)。

2.3.2 耕层土壤矿质氮含量变化

表 2 表明，在略增产或减产 1% 以内的情况下，推荐施肥较农户习惯施肥降低了氮肥用量 15.15% ~ 21.15%，氮肥偏生产力提高了 $6.72 \sim 10.01 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。农户习惯施肥量土壤矿质氮含量逐年升高，当含量达到 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右时趋于稳定。推荐施肥土壤矿质氮也呈现出逐渐增加的趋势，较试验前土壤矿质氮含量增加了 4.63% ~ 19.24%。

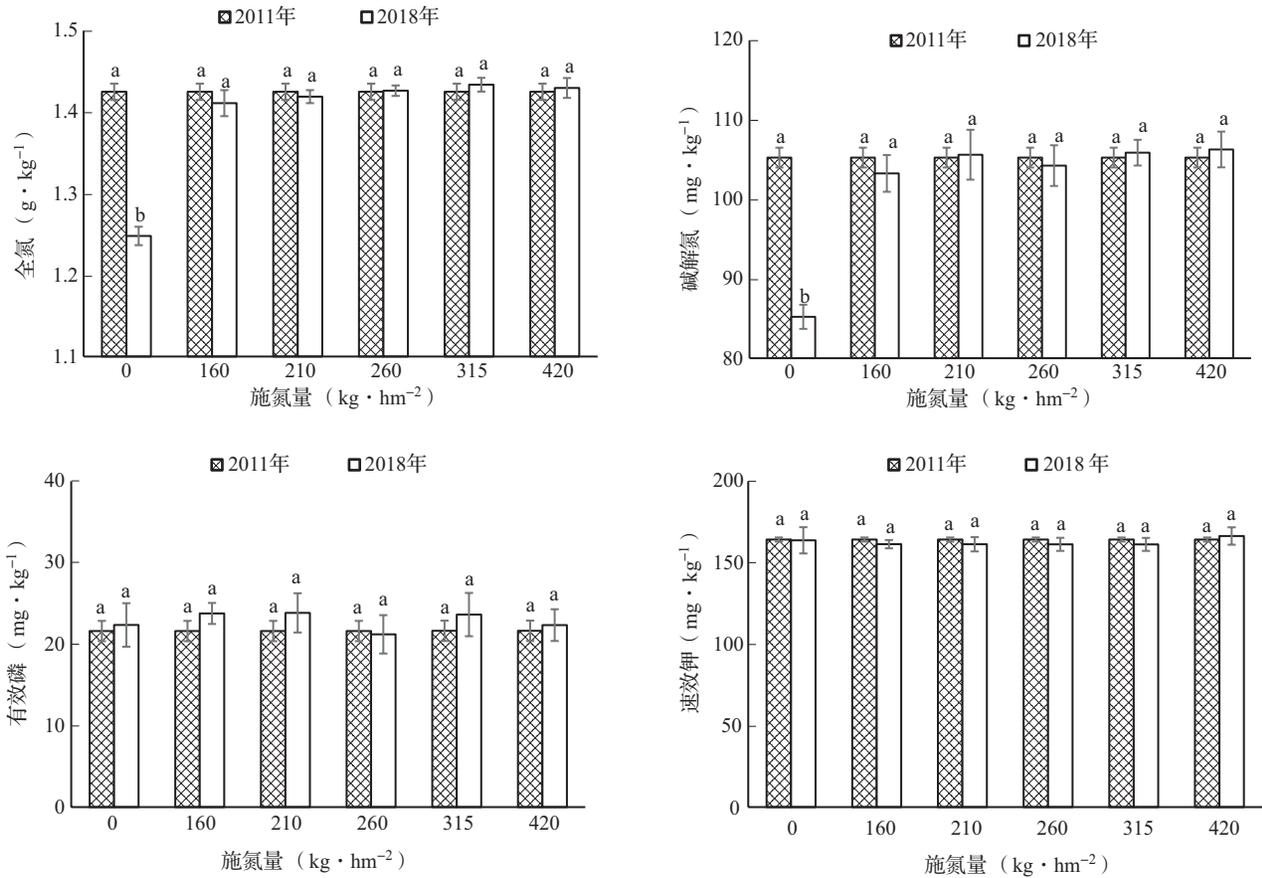


图3 土壤全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量(0~20 cm)

注: 方柱上不同字母表示处理间在0.05水平差异显著。

表2 推荐施肥与习惯施肥产量、偏生产力和土壤矿质氮含量对比

年份	习惯施肥				推荐施肥				减肥潜力 (%)	产量变化 (%)
	施氮量 (kg·hm ⁻²)	产量 (kg·hm ⁻²)	偏生产力 (kg·kg ⁻¹)	土壤矿质氮 (kg·hm ⁻²)	施氮量 (kg·hm ⁻²)	产量 (kg·hm ⁻²)	偏生产力 (kg·kg ⁻¹)	土壤矿质氮 (kg·hm ⁻²)		
2011	260	10024	38.55	112.97	212	9927	46.91	85.03	18.60	-0.96
2012	260	9901	38.08	114.09	205	9860	48.09	84.55	21.15	-0.42
2013	260	9958	38.30	116.07	219	9969	45.55	91.79	15.83	0.12
2014	260	9973	38.36	113.55	207	9933	47.89	85.61	20.23	-0.40
2015	260	10008	38.49	118.34	217	9971	46.02	91.86	16.67	-0.37
2016	260	9998	38.45	120.10	218	9971	45.72	93.50	16.13	-0.27
2017	260	10029	38.57	120.70	220	9980	45.29	94.71	15.25	-0.49
2018	260	10007	38.49	120.51	221	10020	45.42	96.36	15.15	0.13

3 讨论

孙丽惠^[48]2008年调查结果表明, 辽河三角洲稻作区氮用量为400~442 kg·hm⁻², P₂O₅用量约为70~105 kg·hm⁻², K₂O用量约为45~90 kg·hm⁻²。当前辽河三角洲稻作区氮肥用量降低了

约30%, 磷、钾肥用量有所增加, N、P₂O₅和K₂O比例约为2.7:1:1。说明自实施“测土配方施肥”和开展“化肥零增长行动”以来, 辽河三角洲稻作区化肥施用情况明显得到改善, 因此近年来水稻单产一直处于较高水平。

王永欢等^[49]利用肥料效应函数模型计算得到

盘锦地区水稻目标产量为 8250 ~ 9750 kg · hm⁻², 最佳氮用量为 270 ~ 315 kg · hm⁻²。本文利用线性加平台函数模型计算目标产量推荐施肥量, 在目标产量相近的情况下, 显著降低了推荐施氮量, 与巨晓棠^[32]、李波等^[50] 研究结果接近。基于本文目标产量和推荐施氮量的条件下, 作为辽宁省水稻产量最高的地区, 约有 80% 的农户氮肥效率较低, 其中 20% 的农户处于低产低效, 是未来控氮减氮的重点对象; 与农民平均习惯施氮量相比, 辽河三角洲稻作区氮肥减施空间约为 14%。因此, 选择适宜的氮肥种类并优化施用方法, 将是该地区今后控氮减氮的重点。

孙洪仁等^[51] 研究认为, 目标产量在 10.5 kg · hm⁻² 条件下, P₂O₅ 适宜用量为 95 kg · hm⁻², 低于本文推荐量, 主要是因为笔者考虑了调查区土壤有效磷含量本底值较低, 同时盐渍型水稻土磷肥有效性差, 因此提高了用量, 这与付立东等^[52] 推荐施磷量接近。基于本文目标产量和推荐施磷量的条件下, 与农民平均习惯施磷量相比, 辽河三角洲稻作区磷肥减施潜力不足 10%, 减施空间约为 5%。因此, 加强该地区土壤中磷素的活化利用, 是未来控磷减磷的方向。

索巍巍等^[53] 研究表明, 辽河三角洲稻区目标产量为 9750 kg · hm⁻², 合理施钾量为 90 kg · hm⁻²; 王永欢等^[49] 则认为 K₂O 用量为 75 kg · hm⁻² 即可达到这一目标产量, 上述推荐施钾量均低于本文推荐量。主要是因为上述研究结果的目标产量较低, 且本文考虑到辽宁稻田钾素含量处于下降的趋势, 所以提高了推荐施用量以维持土壤钾持续供应能力, 这与孙洪仁等^[51] 和孙彬彬等^[54] 研究结果相近。基于本文目标产量和推荐施钾量的条件下, 有 20% 的农户钾肥用量有较大减施潜力, 但辽河三角洲稻作区农民平均习惯施钾量低于推荐施钾量, 同时有个别农户不施钾肥, 说明该稻作区钾肥虽然减施潜力较大, 但空间有限。这可能与辽宁省土壤钾素含量下降有关。钾肥是不可再生矿产资源, 但作物秸秆中的钾是较好的钾肥来源, 通过秸秆还田对土壤钾进行补充, 是辽宁省水稻生产中优化施钾的重要措施。

在保证目标产量波动 1% 以内的条件下, 通过线性加平台函数模型确定推荐施氮量可降低氮肥用量约 15% ~ 20%, 但该施氮量有较大的时间变异性, 前 5 年波动较大, 呈现逐年递增的趋势, 5 年

后逐渐趋于稳定。土壤肥力不降低, 尤其是保证氮素供应能力是获得作物稳产高产的基础。因此, 氮肥施用是否合理, 除了考虑到氮肥的增产效应外, 还应考虑其对土壤氮库的影响^[55-56]。本试验开展 8 年后, 0 ~ 20 cm 土壤全氮和碱解氮含量除不施氮肥处理显著下降外, 其他处理均无明显变化趋势, 这与前人研究结果一致^[57-59]; 农户习惯施肥处理土壤矿质氮含量逐渐升高, 达到 120 kg · hm⁻² 左右时趋于稳定, 说明习惯施肥虽然对土壤氮库进行了充分补充, 但土壤矿质氮含量达到饱和, 增加了氮素流失风险; 推荐施肥土壤矿质氮增加了 4.63% ~ 19.24%, 使其保持在 90 kg · hm⁻² 左右, 在保证粮食产量的同时, 对土壤氮库进行了有效补充。

4 结论

辽河三角洲稻作区农户 N、P₂O₅ 和 K₂O 习惯用量平均分别为 271.5、117.0 和 96.1 kg · hm⁻², 有 82.1% 的农户氮肥效率较低, 氮肥过量施用问题突出; 目标产量为 10000 kg · hm⁻² 时的 N、P₂O₅ 和 K₂O 的推荐用量分别为 234、111 和 101 kg · hm⁻², 氮肥和磷肥可分别减施 13.7% 和 5.1%, 钾肥需要适量补充。利用线性加平台函数模型确定的推荐施氮量在获得目标产量的同时, 能够对土壤氮库进行有效补充, 可以实现稳产。

参考文献:

- [1] 房丽萍, 孟军. 化肥施用对中国粮食产量的贡献率分析—基于主成分回归 C-D 生产函数模型的实证研究[J]. 中国农村通报, 2013, 29 (17): 156-160.
- [2] 王祖力, 肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析[J]. 农业经济问题, 2008 (8): 65-68.
- [3] 赵志坚, 胡小娟, 彭翠婷, 等. 湖南省化肥投入与粮食产出变化对环境成本的影响分析[J]. 生态环境学报, 2012, 21 (12): 2007-2012.
- [4] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (2): 259-273.
- [5] 俞巧钢, 叶静, 杨梢娜, 等. 不同施氮量对单季稻养分吸收及氨挥发损失的影响[J]. 中国水稻科学, 2012, 26 (4): 487-494.
- [6] Delgado J A, Shaffer M J, Lai H, et al. Assessment of nitrogen losses to the environment with a Nitrogen Trading Tool (NTT) [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63 (2): 193-206.
- [7] 尹娟, 费良军, 田军仓, 等. 水稻田中氮肥损失研究进展

- [J]. 农业工程学报, 2005, 21 (6): 189-191.
- [8] 郭腾飞, 梁国庆, 周卫, 等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (2): 337-345.
- [9] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [10] 徐春春, 纪龙, 陈中督, 等. 中国水稻生产、市场与进出口贸易的回顾与展望[J]. 中国稻米, 2021, 27 (4): 17-21.
- [11] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 等. 实时实地氮肥管理对不同杂交水稻氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41 (2): 470-479.
- [12] 马汉云, 王青林, 祁玉良, 等. 水稻氮素利用基因型鉴定筛选及其响应研究[J]. 广东农业科学, 2011, 38 (21): 31-34, 46.
- [13] 史常亮, 郭焱, 朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2016, 37 (4): 671-679.
- [14] 张灿强, 王莉, 华春林, 等. 中国主要粮食生产的化肥削减潜力及其碳减排效应[J]. 资源科学, 2016, 38 (4): 790-797.
- [15] 王颖. 辽宁省习惯施肥下的水稻产量及肥料利用率分析[J]. 中国农技推广, 2017, 33 (12): 36-39.
- [16] 官亮, 隗英华, 王建忠, 等. 盘锦地区稻田田面水氮素动态变化及化学氮肥投入阈值研究[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30 (6): 96-100.
- [17] 施泽升, 续勇波, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区水稻氮肥投入阈值研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (2): 462-470.
- [18] 官亮, 曲航, 刘艳, 等. 辽河三角洲地区高产水稻氮肥投入阈值及利用率[J]. 中国土壤与肥料, 2017 (5): 23-28.
- [19] 连彩云, 马忠明. 北方平原区春玉米化学氮肥投入阈值[J]. 西北农业学报, 2016, 25 (1): 9-15.
- [20] 黄德明. 十年来我国测土施肥的进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (4): 495-499.
- [21] 自由路, 杨俐苹. 我国农业中的测土配方施肥[J]. 土壤肥料, 2006 (2): 3-7.
- [22] 卜容燕, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 中稻氮磷钾肥的施肥效果及推荐用量[J]. 中国农学通报, 2010 (14): 218-221.
- [23] Peng S, Garcia F V, Laza R C, et al. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high yielding irrigated rice [J]. Field Crops Research, 1996, 47: 243-252.
- [24] Dobermann A, Witt C, Dawe D, et al. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia [J]. Field Crops Research, 2002, 74: 37-66.
- [25] 何萍, 金继运, Mirasol F P, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 (2): 499-505.
- [26] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36 (12): 1456-1461.
- [27] 范立, 彭显龙, 刘元英, 等. 寒地水稻实地氮肥管理的研究与应用[J]. 中国农业科学, 2005, 38 (9): 1761-1766.
- [28] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和稻米品质的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40 (1): 123-132.
- [29] 徐新朋. 基于产量反应和农学效率的水稻和玉米推荐施肥方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [30] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 915-924.
- [31] 刘东海, 陈云峰, 李双来, 等. 养分专家系统推荐施肥对湖北中稻产量和养分利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019 (4): 84-88.
- [32] 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[J]. 土壤学报, 2015, 52 (2): 249-260.
- [33] 孙文涛, 官亮, 隗英华, 等. 水稻高产高效养分管理关键技术研究与应[J]. 中国科技成果, 2015 (4): 63-64.
- [34] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009. 3-4.
- [35] 陈新平, 周金池, 张福锁, 等. 小麦-玉米轮作制中氮肥效应模型的选择—经济、环境效益分析[J]. 土壤学报, 2000, 37 (3): 346-354.
- [36] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (1): 1-4.
- [37] 贾良良, 陈新平, 张福锁, 等. 北京市冬小麦氮肥适宜用量评价方法的研究[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6 (3): 67-73.
- [38] 崔振岭. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系优化氮肥管理—从田块到区域尺度[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [39] 张宇, 刘小虎, 姜文婷, 等. 利用 QUEFTS 模型估算辽宁省水稻氮、磷和钾养分需求量[J]. 中国土壤与肥料, 2019 (2): 91-97.
- [40] 刘顺国. 辽宁省水稻测土配方施肥相关参数的研究[J]. 辽宁农业科学, 2011 (3): 20-24.
- [41] 刘顺国, 邢岩, 韩晓日, 等. 辽宁省水稻测土配方施肥指标体系研究[J]. 辽宁农业科学, 2009 (5): 17-20.
- [42] 王庆仁, 李继云, 李振声. 植物高效利用土壤难溶态磷研究动态及展望[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4 (2): 107-116.
- [43] 徐志强. 辽宁省耕地土壤肥力状况及变化趋势[J]. 辽宁农业科学, 2012 (2): 29-33.
- [44] Yu C J, Qin J G, Xu J, et al. Straw combustion in circulating fluidized bed at low-temperature: transformation and distribution of potassium [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2010, 88 (5): 874-880.
- [45] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (7): 173-179.
- [46] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (6): 272-276.

- [47] 彭显龙, 王伟, 周娜, 等. 基于农户施肥和土壤肥力的黑龙江水稻减肥潜力分析[J]. 中国农业科学, 2019, 52(12): 2092-2100.
- [48] 孙丽惠. 辽宁水稻生产主要问题分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [49] 王永欢, 韩晓日, 王丽, 等. 盘锦地区水稻肥料效应函数法推荐施肥模型研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 373-378.
- [50] 李波, 宫亮, 曲航, 等. 辽河三角洲稻区施氮水平对水稻生长发育及产量的影响[J]. 作物杂志, 2020(1): 173-178.
- [51] 孙洪仁, 张吉萍, 江丽华, 等. 我国水稻土壤有效磷和速效钾丰缺指标与适宜磷钾施用量研究[J]. 中国稻米, 2018, 24(5): 1-10.
- [52] 付立东, 王宇, 李旭, 等. 磷肥不同施用量对水稻产量及磷肥利用率的影响[J]. 北方水稻, 2011, 41(4): 20-24.
- [53] 索巍巍, 付立东, 王宇, 等. 钾肥对水稻产量及钾肥利用率的影响[J]. 北方水稻, 2014, 44(2): 18-25.
- [54] 孙杉杉, 韩晓日, 王颖, 等. 盘锦地区水稻平衡施肥技术研究[J]. 北方水稻, 2008, 38(3): 47-49, 64.
- [55] 郭李萍, 王兴仁, 张福锁, 等. 不同年份施肥对作物增产效应及肥料利用率的影响[J]. 中国农业气象, 1999, 20(4): 20-23.
- [56] 蔡红光, 米国华, 张秀芝, 等. 不同施肥方式对东北黑土春玉米连作体系土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 89-97.
- [57] 敖和军, 邹应斌, 申建波, 等. 早稻施氮对连作晚稻产量和氮肥利用率及土壤有效氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 772-780.
- [58] Ladha J K, Dawe D, Ventura T S, et al. Long-term effects of urea and green manure on rice yields and nitrogen balance [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64: 1993-2001.
- [59] Dobermann A, Witt C, Abdulrachman S, et al. Soil fertility and indigenous nutrient supply in irrigated rice domains of Asia [J]. Agronomy Journal, 2003, 95: 913-923.

Analysis and verification of fertilizer reduction potential of rice in Liaohe Delta

GONG Liang, JIN Dan-dan, NIU Shi-wei, WANG Na, XU Jia-yi, SUI Shi-jiang (Institute of Plant Nutrition and Environmental Resource, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang Liaoning 110161)

Abstract: With the current tendency of zero growth in chemical fertilizer application, reduction of chemical fertilizer application has been concerned in the agricultural production in China. Liaohe Delta is one of the main areas of Japonica rice-producing with the highest yield, where the potential of fertilizer application reduction and its effect on rice yield need to be studied. The linear plus platform function was used to calculate the recommended application of nitrogen fertilizer in the Japonica rice-producing area of Liaohe Delta. Based on crop demand on the nutrients and the nutrients in paddy soil, the appropriate application of P and K fertilizer was estimated by means of keeping P and K balance. The potential of fertilizer application reduction was determined by analyzing the survey data from 240 farmers' fertilization practice. Based on the 8-year experiment, the effects of recommended fertilization and farmers' fertilization on soil nitrogen pool and rice yield were compared to verify the time-efficiency of chemical fertilizer reduction. When the target yield of rice reaches up to 10000 kg · hm⁻² in Liaohe Delta, the recommended amount of N, P₂O₅ and K₂O application were 234, 111 and 101 kg · hm⁻². However, the average amount of N, P₂O₅ and K₂O application were 271.5, 117.0 and 96.1 kg · hm⁻² in farmers' fertilization practice, with low nitrogen use efficiency of 82.1% farmers. A good potential of N, P, and K fertilization reduction was showed from the 21.7%, 9.6% and 7.1% farmers, with 13.7% decrease in N fertilization, 5.1% decrease in P fertilization, and K fertilizer needs to be supplemented in an appropriate amount. When rice yield increased slightly or decreased by less than 1%, the amount of N fertilizer application decreased by 15.15% ~ 21.15% compared with that in farmers' fertilization practice, with no significance on total N and alkaline hydrolysis N, available P and available K in the 0 ~ 20 cm soil, and the mineral I content increased by 4.63% ~ 19.24%. The farmers' fertilization is in a different range in Liaohe Delta, with over-application of N fertilizer. It is recommended that 13.7% N and 5.1% P fertilization can be reduction and K should be supplied appropriately. The recommended amount of fertilizer application varies with time, which contributes to soil N pool supply and stable rice yield.

Key words: rice; fertilizer reduction potential; fertilizer reduction space; recommended fertilization; nutrient balance