



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

辽河三角洲稻区两种合理氮肥推荐阈值的方法研究

李波, 宫亮, 曲航, 金丹丹, 孙文涛

引用本文:

李波, 宫亮, 曲航, 等. 辽河三角洲稻区两种合理氮肥推荐阈值的方法研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 179–185.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0117>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

应用于水稻生产的增效减负环保型施肥技术比对——以宁夏引黄灌区为例

张爱平, 高霁, 刘汝亮, 陈哲, 杨世琦, 杨正礼, 张晴雯

农业资源与环境学报. 2015(2): 175–184 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0334>

控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响

姬景红, 李玉影, 刘双全, 佟玉欣, 任桂林, 李杰, 刘颖, 张明怡

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 153–160 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0231>

稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响

李敏, 叶舒娅, 刘枫, 郭熙盛, 武际, 黄义德, 郭肖颖

农业资源与环境学报. 2015(6): 559–564 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0157>

氮肥利用率测定规范化探讨

田昌玉, 林治安, 赵秉强, 车升国, 孙文彦, 李志杰

农业资源与环境学报. 2016, 33(4): 327–333 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0025>

不同氮肥管理方式对华北粮田2排放和作物产量的影响分析

舒晓晓, 王艳群, 李迎春, 彭正萍, 魏珊珊, 石新丽, 赵延伟

农业资源与环境学报. 2016, 33(4): 340–348 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0037>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李 波, 宫 亮, 曲 航, 等. 辽河三角洲稻区两种合理氮肥推荐阈值的方法研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 179–185.

LI Bo, GONG Liang, QU Hang, et al. Optimal nitrogen fertilizer application rate for single-cropping paddy rice in Liaohe Delta[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 179–185.

辽河三角洲稻区两种合理氮肥推荐阈值的方法研究

李 波, 宫 亮, 曲 航, 金丹丹, 孙文涛*

(辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 沈阳 110161)

摘 要:为研究辽河三角洲单季稻区合理氮肥投入阈值,于2012、2014、2016、2018年依托长期田间定位试验,借助不同的分析方法,即产量-效应曲线法和土壤氮素平衡法,研究不同施氮水平(纯氮0~420 kg·hm⁻²)对水稻产量、氮肥利用率以及土壤氮素平衡的影响。结果表明:采用产量-效应曲线法得出辽河三角洲地区的理论施氮量为217 kg·hm⁻²,采用土壤氮素平衡方法得出的理论施氮范围为221~235 kg·hm⁻²。当施氮量为210~260 kg·hm⁻²时,水稻产量(10 071~10 227 kg·hm⁻²)及氮肥利用率(36%~43%)均较高,施氮量超过260 kg·hm⁻²时,水稻氮肥利用率显著降低。综合考虑水稻产量、氮肥利用率以及土壤氮素平衡三个指标,目标产量超过10 000 kg·hm⁻²时,辽河三角洲地区氮肥施用推荐阈值为217~235 kg·hm⁻²。本研究得到的推荐氮肥用量比当地农民常规用量(270~300 kg·hm⁻²)降低了13%~28%,有效减少了氮素在土壤中的盈余与淋失风险,为该地区水稻减氮高产栽培提出了切实可依的理论依据。

关键词:氮肥;水稻;产量;氮素平衡;推荐阈值

中图分类号:S143.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)02-0179-07

doi: 10.13254/j.jare.2019.0117

Optimal nitrogen fertilizer application rate for single-cropping paddy rice in Liaohe Delta

LI Bo, GONG Liang, QU Hang, JIN Dan-dan, SUN Wen-tao*

(Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract: The Liaohe Delta region, one of the main commodity grain production bases in northeast China, has better temperature and light conditions for paddy rice with higher yields and good taste. However, it is common for local farmers to use up to 270~300 kg N·hm⁻² to increase rice grain yield. In the present study, the optimal nitrogen fertilizer application rate (ONR) in this area was determined based on a long-term field experiment with treatments comprising different nitrogen application rates (pure nitrogen 0~420 kg·hm⁻²) in 2012, 2014, 2016, and 2018. Both yield-response curve and rice-soil nitrogen balance analysis methods were adopted to obtain the ONR. The results showed that ONR for rice planting in Liaohe Delta was determined to be 217 kg·hm⁻² via the yield-response curve method and 221~235 kg·hm⁻² based on the rice-soil nitrogen balance method. Moreover, the maximal nitrogen use efficiency varied from 36% to 43% with nitrogen application rates ranging from 210 kg·hm⁻² to 260 kg·hm⁻². Based on a combination of the factors affecting the nitrogen use efficiency of rice, rice target yield and rice-soil nitrogen balance, the ONR for rice planting in Liaohe Delta was finally determined to be 217~235 kg·hm⁻², which was 13%~28% lower than the amount conventionally used by local farmers. This study provides a practical theoretical basis for reducing nitrogen surplus for rice planting in Liaohe Delta on the premise of guaranteeing grain yield of rice and is also helpful for reducing the risk of nitrogen leaching to both local soil and underground water.

Keywords: nitrogen; paddy rice; yield; nitrogen balance; optimal nitrogen rate

收稿日期:2019-03-06 录用日期:2019-04-26

作者简介:李 波(1979—),女,辽宁盘锦人,副研究员,主要从事农田系统氮素循环研究。E-mail:libocaas@163.com

*通信作者:孙文涛 E-mail:wentaosw@163.com

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFD0200200, 2017YFD0300700)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China(2018YFD0200200, 2017YFD0300700)

辽河三角洲地区位于辽宁省盘锦市冲击平原地带,光温条件较好,水稻产量潜力较高。随着人们对辽河三角洲垦区的开发、对水稻品种的选育,该地区水稻种植已经规模化,且产量较高、品质尤佳、稳产性较好。近年来,该地区已经成为东北地区水稻主产区、高产区的典型代表。该地区水稻种植面积约18万 hm^2 ,产量最高可达12 750 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,为农民增收做出了巨大贡献。然而,该地区常规氮肥施入量较大,约为270~300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于东北其他稻区的氮肥投入量^[1];当季氮肥利用率较低,约为30%~35%^[2],显著低于世界粮食作物氮肥利用率平均水平^[3]。高比例的氮肥投入无疑增加了该地区的地表水、地下水污染风险,因此合理且有实践指导意义的氮肥推荐阈值亟待提出^[4]。

氮素管理指标的确定,对于提高氮素管理水平具有至关重要的作用。目前水田比较常用的氮肥阈值的估算方法主要有两类^[5]:①基于田间试验的施氮量-作物产量(经济效益)的效应函数(线性或指数函数),通过产量拐点确定合理施氮量。此类方法的优点是可以通过明显的拐点或突变点确定合理施氮量^[6],测试指标少,结果可信度高;缺点是要求时间较长、受限于区域气候条件,且并未直接考虑氮肥施用的环境效应^[7]。②根据土壤-作物体系氮素的输入与输出平衡关系,确定合理氮肥施用量。由于氮素损失主要发生在土壤与空气或者水体的界面上,因此,将作物-土壤看成一个稳定的综合生态系统,当系统中氮素的输入输出保持平衡时对环境的影响最小。本研究采用上述两种研究方法,从水稻籽粒目标产量出发,基于多年的田间试验结果,充分考虑氮素投入的合理性,为辽河三角洲单季稻区水稻种植提供合理氮肥推荐用量,旨在为辽宁稻区乃至东北稻区氮肥的合理投入提供切实可依的参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究依托于辽宁省农业科学院水稻长期定位试验(2011—2018年)。试验在辽河三角洲中心地带盘锦市盘山县坝墙子镇航呈农场(122°14′17″E,41°09′31″N)进行,该地属温带半湿润季风气候类型,年均降雨量650 mm,年均气温8~9℃,无霜期165~170 d。供试土壤为盐碱水稻土,土壤pH 7.90,有机质含量22.6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮1.42 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮80.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷21.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾164.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,容重1.39

$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

1.2 试验设计

设置6个氮肥处理,纯氮用量分别为0、160、210、260、315、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30 cm×16.5 cm。田间管理措施按当地习惯统一进行管理。

1.3 测定项目

由于个别奇数年水稻产量数据稳定性较差,本研究选取偶数年,即2012、2014、2016、2018年的研究结果进行分析。水稻成熟后,每个处理随机选3 m^2 测定水稻产量,取9穴水稻测定每穴水稻产量构成因子指标,其中包括有效分蘖、千粒重、穗粒数和秕谷率。采用凯氏定氮法测定水稻植株、籽粒氮素含量。

1.4 合理氮肥推荐量的估算方法

1.4.1 效应模型

基于产量与氮素投入量的效应模型,即线性加平台模型^[2]与一元二次方程模型,计算最佳经济效益施氮量(EONR)。

1.4.2 氮素平衡关系

基于土壤-水稻体系氮素的输入与输出平衡关系,得出氮肥推荐用量。其中氮素输入因子包括:①化学氮肥,②大气沉降,③灌溉水;输出因子包括:④植株氮积累量(籽粒氮素积累量+秸秆氮素积累量),⑤氮挥发,⑥反硝化,⑦氮淋溶。

根据体系氮素输入输出平衡的原理,计算氮平衡参数^[8]:

$$\text{土壤氮素盈余}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})=\text{①}-\text{④}$$

$$\text{土壤氮素平衡}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})=(\text{①}+\text{②}+\text{③})-(\text{④}+\text{⑤}+\text{⑥}+\text{⑦})$$

$$\text{籽粒氮素积累量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})=[\text{籽粒产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})\times\text{百千克籽粒吸氮量}(N_{100})]/100$$

$$\text{秸秆氮素积累量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})=[\text{秸秆产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})\times\text{百千克秸秆吸氮量}(N_{100})]/100$$

$$\text{氮肥利用率}=(\text{施氮区作物氮积累量}-\text{无氮区作物氮积累量})/\text{施氮量}\times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 基于产量与施氮量效应函数预测理论施氮量

采用生物统计方法,根据表1的数据绘制出肥料效应方程(图1),计算最佳经济施氮量(EONR)。图1A的数据拟合为线性加平台效应函数,从中可以看出线性加平台模型为两个分段函数,即线性段与平台段,低氮段符合简单线性正相关($y=15.33x+6865$, $0<x<217$, $R^2=0.98$),中氮段符合产量恒定关系($y=10194$, $217<x<315$)。由于此试验设置的高氮水平有限,因此产量显著降低的氮素临界点还无法确定,但是可以推知在高氮段符合线性或非线性负相关关系。根据图1A模型预测得出EONR为217 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,超过该施氮量,水稻籽粒产量不再显著增加,氮肥利用率显著下降,肥料对产量的贡献呈报酬递减趋势。

根据图1B,水稻籽粒产量与施氮量之间的关系符合传统的一元二次肥效方程($y=-0.0422x^2+23.685x+6829$, $R^2=0.96$)。通过调查发现近几年来水

稻籽粒价格与尿素价格年际间差异不大。盘锦当地的水稻籽粒价格取四年均值,为每千克2.90元;尿素价格取四年均值为每吨2000元,折合后每千克纯氮4.35元。根据得到的一元二次方程与水稻及氮肥价格,计算得出最高产量施氮量为281 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,EONR为259 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。比较而言,线性加平台模型得出的EONR显著低于一元二次方程模型的预测结果,从数据的相关性来看,线性加平台模型更准确地描述了水稻产量与施氮量之间的函数关系。此外,从不同处理的氮肥利用率结果(表1)得知,施氮量为160~260 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,氮肥利用率较高,在36.0%~43.0%之间。施氮量为210 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,氮肥利用率最高,为43.0%,超过此施氮量,氮肥利用率逐渐降低,当施用量为420 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,氮肥利用率只有21.7%。

因此,综合产量-肥料效应关系与氮肥利用率两个指标,本研究选用EONR 217 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为辽河三角洲地区理论氮肥用量。虽然,产量效应法在当前应用比较普遍,然而该方法所得到的推荐用量通常依靠几年

表1 不同施氮量对水稻产量及植株含氮量的影响

Table 1 Effect of nitrogen application rate on rice grain yield and plant nitrogen contents

施氮量 Nitrogen application rates/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	籽粒产量 Grain yield/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	秸秆产量 Straw yield/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	百千克籽粒吸氮量 N_{100} of grain/ $\text{kg}\cdot 100\text{ kg}^{-1}$	百千克秸秆吸氮量 N_{100} of straw/ $\text{kg}\cdot 100\text{ kg}^{-1}$	氮肥利用率 N use efficiency/%
0	6909±393c	6117±307c	1.10±0.01c	0.51±0.01c	—
160	9131±219b	8159±203b	1.28±0.04b	0.63±0.01b	38.2
210	10227±419a	8913±49.8a	1.33±0.01ab	0.69±0.03a	43.0
260	10071±316a	8979±177a	1.36±0.04ab	0.71±0.01a	36.0
315	10313±587a	9014±146a	1.39±0.01a	0.71±0.01a	31.8
420	9226±379b	8106±144b	1.42±0.02a	0.74±0.01a	21.7

注:以上结果为2012、2014、2016、2018年试验结果的均值。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Notes: The results were the averages of those from experiments in the year of 2012, 2014, 2016 and 2018. The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ level.

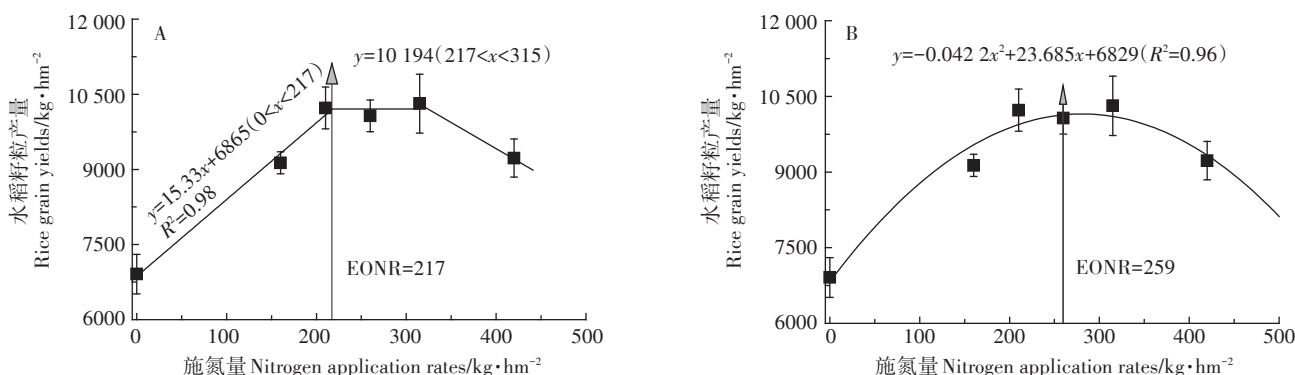


图1 水稻籽粒产量与氮肥施用量的关系

Figure 1 Response curve derived from nitrogen application rates and rice grain yields

的田间试验为基础,在时间与空间上的普遍适用性受到限制,且没有考虑到土壤氮库的亏缺与盈余,并未从理论上回答作物产量与土壤氮平衡的相关问题。

2.2 基于土壤氮素平衡理论预测理论施氮量

根据氮平衡理论,当体系氮输入总量与输出总量达平衡时,即所有氮源输入因子与输出因子差值为零时,土壤中氮素处于既不盈余也不亏缺的状态。表2为辽河三角洲地区田块尺度的水稻-盐渍土氮素平衡的输入输出关系。其中灌溉形式的氮输入通过查阅当地水利部门近几年的灌溉水平均用量以及测量灌溉水中的氮素含量而得,沉降形式的氮素输入通过查阅当地气象部门数据所得。由于本试验中并未测试氮损失指标,因此氨挥发、反硝化、氮淋溶形式的氮损失比例通过参考以往相关研究结果估算而来。根据陈振华等^[9]对辽河平原稻田氨挥发损失的研究结果得知,该地区氨挥发损失率占总施氮量的4.66%~11.66%,因此,本研究使用上限11.66%作为氨挥发量计算的依据。基于我国南方稻区氮素反硝化形式损失的研究结果发现,其损失比例与环境条件紧密相关,基本上为总施氮量的18%~26%^[10-12]。由于辽河三角洲稻区生育期积温显著低于我国南方稻区,反硝化形式的氮素损失相对较低,因此本研究中选择反硝化损失率为10%来计算系统中反硝化损失量。此外,课题组前期研究发现辽河三角洲稻田的氮淋溶损失率较低,其损失率与我国南方稻区的研究结果一致^[11-12],占总氮投入量的比例低于1%,因此本研究中设定氮淋溶损失率为1%来计算系统中氮素淋溶损失量。根据以上数值,计算得出辽河三角洲稻区氨挥发、反硝化和氮淋溶形式的氮素损失量为1.6~49.0 kg·hm⁻²·a⁻¹,三者合计损失量为36.3~95.2 kg·hm⁻²·a⁻¹

(表2)。当水稻-土壤系统氮素达平衡时,辽河三角洲地区理论施氮量应为210~260 kg·hm⁻²之间,进一步计算得出氮素理论施用量为221~235 kg·hm⁻²。

除土壤氮平衡指标外,很多专家推荐使用土壤氮盈余指标来考察区域的合理施氮阈值,即不考虑其他形式的氮素投入以及氮素的损失,只计算化学氮素投入量与植株氮积累量的差异。由于氮素盈余的参考指标取决于气候条件、农业生态类型及土壤环境容量等因素,因此目前为止还未制定统一的参考标准。如荷兰在制定氮参考指标时综合考虑了政策、农业经济和环境状况,对砂壤和黏壤耕地年氮素盈余参考指标分别设为60 kg·hm⁻²和100 kg·hm⁻²^[13]。洛桑试验站的小麦试验得出土壤氮盈余为18~41 kg·hm⁻²时,氮素输入与输出达到平衡^[14]。我国学者巨晓棠^[5]指出,我国主要水稻高产农作区的合理氮肥投入阈值应为192~211 kg·hm⁻²,当施入氮素192 kg·hm⁻²时氮盈余为38 kg·hm⁻²,表示氮素既不在土壤中过度积累,又不消耗土壤氮库。参考以上研究结果,鉴于本试验区的气候条件,认为氮盈余指标为30 kg·hm⁻²时土壤氮素系统达到平衡。通过表2发现,施氮量为210、260 kg·hm⁻²时氮盈余量分别为12.3 kg·hm⁻²和59.4 kg·hm⁻²,位于30 kg·hm⁻²的上下区间,由此计算得出辽河三角洲地区合理氮素推荐阈值为228~232 kg·hm⁻²。比较发现,根据土壤氮平衡参数得到的推荐阈值(221~235 kg·hm⁻²)与氮盈余指标得到的结果(228~232 kg·hm⁻²)基本一致。此外,当施氮量为210~260 kg·hm⁻²时,氮肥利用率也较高(36.0%~43.0%)。综合比较土壤氮盈余、氮平衡以及氮肥利用率三个指标,最终得出辽河三角洲地区理论氮肥投入阈值应为221~235 kg·hm⁻²。

表2 辽河三角洲单季稻体系的氮素平衡(kg·hm⁻²·a⁻¹)

Table 2 Nitrogen balance in rice planting system in Liaohe Delta of Northeast Plain(kg·hm⁻²·a⁻¹)

氮素输入 Input			氮素输出 Output						氮平衡 N balance	氮盈余 N surplus	籽粒产量 Grain yield
施氮量 N application rate	灌溉 Irrigation	沉降 Deposition	植株 N 积累量 Total N accumu- lation in plant	籽粒 N 积 累量 Grain N	秸秆 N 积 累量 Straw N	氨挥发 NH ₃ volatilization	反硝化 Denitrification	淋溶 Leaching			
0	10.65±1.93	14.25±2.35	107±2.01	75.7±3.82	31.5±2.89	0	0	0	-82.1	-107	6909±393
160	10.65±1.93	14.25±2.35	169±3.31	117±4.34	51.7±2.43	18.7	16.0	1.6	-20.4	-8.7	9131±219
210	10.65±1.93	14.25±2.35	198±3.89	136±1.62	61.7±1.88	24.5	21.0	2.1	-10.7	12.3	10 227±419
260	10.65±1.93	14.25±2.35	201±3.05	137±3.81	63.6±1.44	30.3	26.0	2.6	25.0	59.4	10 071±316
315	10.65±1.93	14.25±2.35	207±2.50	143±1.31	64.1±1.21	36.7	31.5	3.2	61.5	108.0	10 313±587
420	10.65±1.93	14.25±2.35	198±2.80	131±4.75	67.4±2.55	49.0	42.0	4.2	151.7	222.0	9226±379

注:氨挥发、反硝化、氮淋溶指标参考以往研究结果,损失比例分别取11.66%^[9]、10%^[10-12]、1%^[11-12]。

Notes: The nitrogen loss by the NH₃ volatilization, denitrification and leaching was calculated based on the proportions of 11.66%^[9], 10%^[10-12] and 1%^[11-12] of total nitrogen application rates, respectively.

3 讨论

3.1 不同推荐施氮量的方法比较

关于合理氮素推荐用量的方法,农业专家们提出了不同建议。例如,Ju等^[15]提出理论施氮量(Theoretical nitrogen rate)可以根据目标产量与氮肥的损失率(20%~35%)计算而得,即投入化肥氮素 $N_{fert}=(\text{植株氮累积量 } N_{uptake}-\text{秸秆氮累积量 } N_{straw})/(1-\text{氮肥损失率})=\text{籽粒氮累积量 } N_{grain}/(1-\text{氮肥损失率})=\text{目标产量} \times N_{100}/100/(1-\text{氮肥损失率})$ 。根据该公式,辽河三角洲地区目标产量选取线性加平台模型中的稳定产量 $10\,194\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, N_{100} 选取多年均值1.35,由于该地区农民常规施氮较高,氮肥的损失率选用35%,由此计算得出 $N_{fert}=(10\,194\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2} \times 1.35)/100/0.65=212\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。此外,巨晓棠^[5]也深刻分析了作物-土壤系统氮素平衡所涉及的氮素指标及其相互关系,提出在我国目前的施肥技术条件下,推荐施氮量可以约等于作物地上部氮素携出量,并通过田间试验和同位素示踪试验证实了这一方法的合理性和适用性。根据该理论, $N_{fert}=N_{uptake}=\text{目标产量} \times N_{100}/100$,由此公式计算的理论施氮量不考虑氮素损失率,只考虑目标产量与 N_{100} 即可。若以全国水稻为参考对象,选定 $N_{100}=2.4$ ^[5],根据此公式计算的辽河三角洲地区 $N_{fert}=10\,194\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2} \times 2.4/100=245\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。通过以上两种方法计算的理论施氮量有明显差异,事实上,巨晓棠^[5]也发现 $N_{100}=2.4$ 时,东北地区的理论施氮量显著高于实际施用量,推测为东北地区耕作史较短、土壤矿化能力较强所致。根据公式发现, N_{100} 的目标值设定对植株地上部氮素携出量起决定性作用,我国农业区域跨度大,水稻产区气候、土壤条件千差万别,统一采取既定数值并不能代表我国不同稻区对氮肥的需求。根据以往测量结果,辽河三角洲稻区 N_{100} 为1.35左右,吉林稻区在1.46左右^[16],且系统中氮损失总量显著低于南方稻区,因此该地区 N_{100} 应选取低于2.4且高于2.1的数值来计算其理论施氮量,由此计算得出理论施氮量应为 $214\sim 245\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。虽然这种简化的施氮推荐方法为氮肥投入提供了新思路,然而基于田块尺度的精量定氮还需要因地制宜,并且长期采用该方法对土壤、作物和环境的实际影响也有待进一步探究。

此外,参考宁运旺等^[17]氮素归还指数(RNRI)法也可预测辽河三角洲地区合理氮素投入量,其理论基础为 $N_{fert}=\text{目标产量} \times N_{100} \times \text{RNRI}/100=10\,194\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2} \times 1.35 \times 1.52/100=209\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中 $\text{RNRI}=1.52$ 根据江

苏太湖地区粳稻生产所需要的氮归还指标而定。由此得出的理论推荐用量($209\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著低于本研究得出的推荐用量($217\sim 235\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),可能是因为辽河三角洲稻区的实际RNRI值高于1.52,但具体为多少合适,还需要进一步研究。

再次,采用养分管理专家系统(Nutrient Expert, NE系统)也可获得辽河三角洲地区的推荐氮肥用量。该方法主要以基于大量肥料田间试验建立起来的农学数据库、土壤基础养分供应以及产量反应和农学效率的关系为理论依据,充分考虑作物栽培、秸秆还田、具体田块等综合信息而建立的推荐施肥方法,被认为是当前提高氮肥利用率、减少氮素损失的最先进推荐方法。根据该系统,输入辽河三角洲地区的田块信息,包括土壤性质、水稻目标产量、农民常规施氮类型与方法等指标,得出该地区水稻推荐施氮量为 $168\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。比较发现此推荐量显著低于其他几种计算方法得到的推荐用量。基于多年的田间试验结果,与此施肥量对应的辽河三角洲地区的水稻产量约为 $9100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右,与该地区最高产量潜力 $10\,194\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 存在一定的差距,其结果说明NE系统还需要针对辽河三角洲地区水稻种植进一步完善数据库信息。

3.2 地域差别与施肥方法优化

我国水稻种植区分布广泛,水稻种植模式南北差异较大,由气候条件以及栽培措施的不同引起的氮素用量差别较大。如Zhang等^[18]对全国27个省份的4218个水稻田块进行了调查,发现氮素施用量为 $(209 \pm 140)\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。凌启鸿等^[19]通过目标产量精确定量施氮的研究发现,我国南方13个位点的水稻目标产量为 $10\,500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,施氮范围应为 $255\sim 334\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。朱兆良^[20]对江苏常熟地区12个水稻试验点进行调查发现,该地区平均施氮量为 $218\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,水稻平均产量为 $8099\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。相比之下,辽河三角洲稻区产量潜力较高,超过 $10\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而施氮量却比南方地区低很多,其差异主要与气候条件导致的氮素损失有关,据报道,稻田氨挥发和反硝化的程度与淹水条件下土壤温度呈显著正相关。

然而,对比东北各区域发现,尽管辽河平原稻区产量略高于松嫩平原、三江平原稻区,而施氮量却显著高于后两者。尤其是三江平原稻区,平均施氮量比辽河平原稻区低30%~40%左右,而产量降幅却小于10%,这主要与区域的土壤、气候条件以及水稻品种有关。辽河三角洲稻区土壤类型属于滨海盐碱土,土壤pH较高,有机质含量中等;而三江平原地区土壤

pH呈中性,有机质含量高,由土壤条件导致的氮素损失差别较大;此外,由于气候带的差异,三江平原稻区水稻生育期积温比辽河平原稻区低很多,氮素损失率相对较低。从施肥技术角度看,三江平原稻区引进了日本大型农耕机械,采用机械化侧深施肥技术比较普遍。该技术通过苗侧3 cm土深5 cm的插秧期施肥技术,可以有效提高氮素利用率10%以上,最终减少氮肥投入。相比之下,目前辽河平原地区的水稻种植普遍采用春季旋耕施入基肥,基肥比例为生育期全氮的60%~80%,追肥比例20%~40%,普遍采用田面撒施方式完成,大大增加了泡田过程导致的氮素损失以及非根区无效施肥导致的损失。若在辽河平原稻区适合机械化操作的田块推广机械化侧深施肥技术,氮肥的利用率也有望提高,其区域理论施氮量也会显著降低。

4 结论

(1)基于施氮量与水稻籽粒产量关系的肥料效应方程,推算得到辽河三角洲单季稻区的理论氮肥推荐用量为 $217 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(2)基于土壤氮盈余指标与土壤系统氮素平衡理论,得出该地区理论氮肥用量为 $221 \sim 235 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(3)基于水稻产量与氮肥利用率两个指标,推测得知该地区理论施氮范围应在 $210 \sim 260 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间。

(4)综合考虑水稻目标产量、经济效益、氮肥利用率以及土壤氮素平衡因素,辽河三角洲单季稻区目标产量为 $10\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上时,氮肥施用推荐阈值为 $217 \sim 235 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

参考文献:

- [1] 侯云鹏,韩立国,孔丽丽,等.不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):836-845.
HOU Yun-peng, HAN Li-guo, KONG Li-li, et al. Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application doses[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4):836-845.
- [2] 宫亮,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.
GONG Liang, QU Hang, LIU Yan, et al. Nitrogen threshold and nitrogen use efficiency of high yield rice in the Liaohe River Delta[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5):23-28.
- [3] 巨晓棠,谷保静.氮素管理的指标[J].土壤学报,2017,54(2):281-296.
JU Xiao-tang, GU Bao-jing. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2):281-296.
- [4] Zhang F S, Cui Z L, Chen X P, et al. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China[J]. *Advances in Agronomy*, 2012, 116:1-40.
- [5] 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):249-261.
JU Xiao-tang. Improvement and validation of theoretical rate (TNR): Discussing the methods for N fertilizer recommendation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2):249-261.
- [6] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Development of regional nitrogen rate guidelines for intensive cropping systems in China[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105:1411-1416.
- [7] 张亦涛,王洪媛,雷秋良,等.农田合理施氮量的推荐方法[J].中国农业科学,2018,51(15):2937-2947.
ZHANG Yi-tao, WANG Hong-yuan, LEI Qiu-liang, et al. Recommended methods for optimal nitrogen application rate[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(15):2937-2947.
- [8] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2003, 83:111-124.
- [9] 陈振华,陈利军,武志杰,等.辽河下游平原不同水分条件下稻田氨挥发[J].应用生态学报,2007,18(12):2771-2776.
CHEN Zhen-hua, CHEN Li-jun, WU Zhi-jie, et al. Ammonia volatilization from rice field under different water conditions in lower Liaohe River Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12):2771-2776.
- [10] 王书伟,颜晓元,单军,等.利用膜进样质谱法测定不同氮肥用量下反硝化氮素损失[J].土壤,2018,50(4):664-673.
WANG Shu-wei, YAN Xiao-yuan, SHAN Jun, et al. Quantitative determination of N loss through denitrification under different N fertilizer application rates by membrane inlet mass spectrometry (MIMS)[J]. *Soils*, 2018, 50(4):664-673.
- [11] 朱兆良,张福锁.主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究[M].北京:科学出版社,2010:2-5.
ZHU Zhao-liang, ZHANG Fu-suo. Basic study on nitrogen behavior and efficient utilization of nitrogen fertilizer in major farmland ecosystems[M]. Beijing: Science Press, 2010:2-5.
- [12] 陈婧.基于统计模型的中国南方稻区适宜施氮量及氮素损失估算[D].南京:南京农业大学,2011.
CHEN Jing. Quantifying optimum nitrogen rates and nitrogen losses for rice production in southern China based on statistical model[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [13] Oenema O, Kros H, De Vries W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(1/2):3-16.
- [14] Brentrup F, Palliere C. Nitrogen use efficiency as an agro-environmental indicator[C]//OECD Workshop on agri-environmental indicators: Lessons learned and future directions. Leysin: OECD, 2010: 23-26.
- [15] Ju X T, Christie P. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in intensive cropping systems: A case

- study on the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124: 450-458.
- [16] 卞建民, 李育松, 胡昱欣, 等. 吉林西部农田生态系统氮平衡及其水环境影响研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(7):1862-1868.
- BIAN Jian-min, LI Yu-song, HU Yu-xin, et al. Nitrogen balance of farmland ecosystem in the western Jilin Province and its effect on water environment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34 (7) : 1862-1868.
- [17] 宁运旺, 张永春. 基于土壤氮素平衡的氮肥推荐方法——以水稻为例[J]. 土壤学报, 2015, 52(2):281-292.
- NING Yun-wang, ZHANG Yong-chun. Soil nitrogen balance based recommendation of nitrogen fertilization: A case study of rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2):281-292.
- [18] Zhang W F, Dou Z X, He P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2013, 110: 8375-8380.
- [19] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12):2457-2467.
- LING Qi-hong, ZHANG Hong-cheng, DAI Qi-gen, et al. Study on precise and quantitative N application in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12):2457-2467.
- [20] 朱兆良. 推荐氮肥适宜用量的方法论刍议[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1):1-4.
- ZHU Zhao-liang. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1):1-4.