

# 东北黑土水稻主产区氮肥减施潜力研究

尹映华<sup>1</sup>, 彭晓宗<sup>1</sup>, 翟丽梅<sup>1</sup>, 张亦涛<sup>2</sup>, 王洪媛<sup>1</sup>, 刘宏斌<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 农业农村部面源污染控制重点实验室, 北京 100081;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 东北平原是中国重要的商品粮生产基地, 水稻是该地区的主要粮食作物之一, 虽然该地区黑土质量和肥力均较高, 但农田施肥过量的现象仍较为普遍。因此, 为了阐明黑土区水稻施肥空间格局、差异特征及减施潜力, 本文选择东北平原黑土水稻种植区为研究对象, 在黑龙江、吉林、辽宁三省水稻施肥和产量进行了大规模调研分析基础上, 结合土壤本底供氮能力培养试验, 开展相关研究。结果表明: 区域内由南至北施氮强度和经济产量均逐渐下降, 施氮强度下降幅度大于产量下降, 氮肥偏生产力逐渐增加。通过与理论适宜施氮量对比发现, 辽宁稻区理论减氮潜力达 16.7%~24.7%, 吉林中、西部稻区潜力达 8.7%~17.8%, 黑龙江稻区还有 2.0%~11.4% 理论减氮空间。三省典型水稻土壤累积矿化量没有明显差异。因此, 地上部生物量变化所引起的氮携出量的变化是引起东北黑土区黑龙江、吉林和辽宁水稻施氮量差异的主要影响因素。

**关键词:** 水稻; 东北平原; 氮肥; 化肥减施

DOI: 10.11821/dlxb202207006

## 1 引言

水稻养活了世界上一半以上的人口, 是最重要的粮食作物之一<sup>[1]</sup>。因此, 稳定水稻生产是保障粮食安全的重要途径。氮素是水稻生长的限制因子, 同时也是衡量土壤肥力的重要指标, 氮肥的增加或减少都会引起水稻产量的变化<sup>[2]</sup>。据统计中国的氮肥施用量占据了世界氮肥施用的 36.2%<sup>[3]</sup>。氮肥的不合理施用导致了资源的浪费和环境污染<sup>[4]</sup>。因此确定合理的氮肥施用量, 改进氮肥管理措施是实现水稻清洁生产和保障中国粮食安全的重要举措。然而, 中国不同区域由于气候水文, 氮肥管理措施, 经济发展水平的差异, 导致中国各地区施氮量存在很大的差异<sup>[4-5]</sup>。2007—2009 年武良对 6611 个水稻种植户的调查结果显示, 中国水稻平均施氮量为 220 kg hm<sup>-2</sup>, 变异系数达 40%<sup>[6]</sup>。在中国南方江苏、湖南、广东、浙江四大稻区的田间试验研究表明, 四大稻区施肥量存在明显差异, 其中江苏省水稻氮肥用量高达 350 kg hm<sup>-2</sup>, 水稻氮肥偏生产力仅为 35 kg kg<sup>-1</sup><sup>[7]</sup>。因此, 在全国范围内, 氮肥的施用存在很大的空间异质性。在经济发达和人口密集的黄淮海区域, 化肥施用量高, 作物单产与化肥施用量之间甚至出现了强负脱钩现象<sup>[8]</sup>。而在经济不发达的区域由于施肥量低而不能满足作物的需求, 土壤养分入不敷出, 耕地质量下降。因

收稿日期: 2021-10-18; 修订日期: 2022-04-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0200200); 国家自然科学基金项目(32072683) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2018YFD0200200; National Natural Science Foundation of China, No.32072683]

作者简介: 尹映华(1998-), 男, 湖南宁乡人, 硕士生, 主要从事化肥减施增效研究。E-mail: yinyinghua0822@163.com

通讯作者: 翟丽梅(1978-), 女, 河北唐山人, 研究员, 主要从事农业面源污染防治研究。E-mail: zhailimei@caas.cn

1650-1661 页

此,明确影响区域间的施肥量差异的影响因素以及减氮潜力可以为中国不同区域间的合理施肥提供参考。

东北平原是中国重要的商品粮生产基地,是世界三大黑土地之一,拥有较高的土壤肥力和较好的水源条件,每年生产的粮食占据了全国粮食总产量的1/5。但气温较低,每年只能种植一季水稻。然而,即便在生产条件差距不大的条件下,东北平原黑土区的氮肥施用量依然存在很大的空间异质性。目前对于区内黑龙江、吉林、辽宁三省施肥的空间分布格局、差异特征与减施潜力尚不清楚。因此,本文以东北平原黑土稻区为研究对象,旨在从作物需氮、土壤供氮能力以及氮肥管理措施的角度来分析影响黑土区施氮空间异质性的影响因素以及结合调研数据和理论适宜施氮量确定黑土水稻区的减氮潜力,为实现中国黑土稻区减肥增效提供参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 区域概况

东北黑土区主要位于中国东北地区,包括黑龙江,吉林全省、辽宁东北部和内蒙古自治区“东四盟”区域,涵盖了黑土、黑钙土、暗棕壤、棕壤、白浆土和草甸土6种土壤类型,农作物熟制以一年一熟为主,主要种植水稻、玉米、小麦、大豆等粮食作物。虽然黑土区包括了东北三省及内蒙古东四盟区域,但水稻种植主要分布在黑龙江,吉林和辽宁三省水资源丰富的地区。据国家统计局数据,截至2019年东北三省的水稻播种面积达516万 $\text{hm}^2$ ,稻谷产量达3756万t。据第二次土壤普查数据,东北三省间土壤全氮和有机质因土壤类型的不同而存在较大差异,有机质含量在30~60  $\text{g kg}^{-1}$ ,全氮含量在2~5  $\text{g kg}^{-1}$ ,变异系数较大。

### 2.2 数据来源

**2.2.1 调研问卷** 本文选择东北平原黑土稻区作为研究区域,其包含了辽宁、吉林和黑龙江三省。2017年在辽宁、吉林和黑龙江进行了水稻种植户施肥情况调查,不同省份水稻播种面积摘自各调研省份统计年鉴<sup>①</sup>,依据面积比例关系分配不同区域内的调研问卷数量。每个调研区县包含了所有水稻典型种植乡镇,每个乡镇至少包含1个村,每村调研5户,对于人均耕地面积大、农场规模大的乡镇,可以适当减少问卷数量。问卷中详细信息包括耕地面积、产量、施肥时间、施肥方式、肥料用量、肥料类型及其氮磷钾养分含量。通过将肥料用量乘以其养分含量来计算氮磷钾养分投入。

辽宁稻区共收集问卷1434份,其中有效问卷1431份,水稻耕地总调查面积达3378.1  $\text{hm}^2$ ;在吉林稻区收集问卷1694份,其中有效问卷1693份,水稻耕地总调查面积达2813.5  $\text{hm}^2$ ;黑龙江稻区共收集问卷2007份,其中有效问卷2005份,覆盖了10269.0  $\text{hm}^2$ 水稻耕地面积。调查地块分布情况如图1所示。

**2.2.2 典型黑土培养** 培养实验土壤样品采集:本试验在2019年4—5月份水稻种植前,于黑龙江省、吉林省和辽宁省分别选择4个具有代表性的水稻生产区共12个点位,每个点位在成规模化的水稻种植区域按照对角线选择5个田块进行土壤环境样品采样,在每个田块内随机选择20个样点,采集0~20 cm层次的耕层土壤。将相同点位的土壤样品混合,挑出植物根系、残体等杂物,过2 mm筛,取足量放置在-20  $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中恒温保存用于土壤有机氮矿化培养,剩余土壤在阴暗条件下风干保存。具体土壤编号、取样点位置和

① 辽宁统计局,2016;吉林统计局,2016;黑龙江统计局,2016。

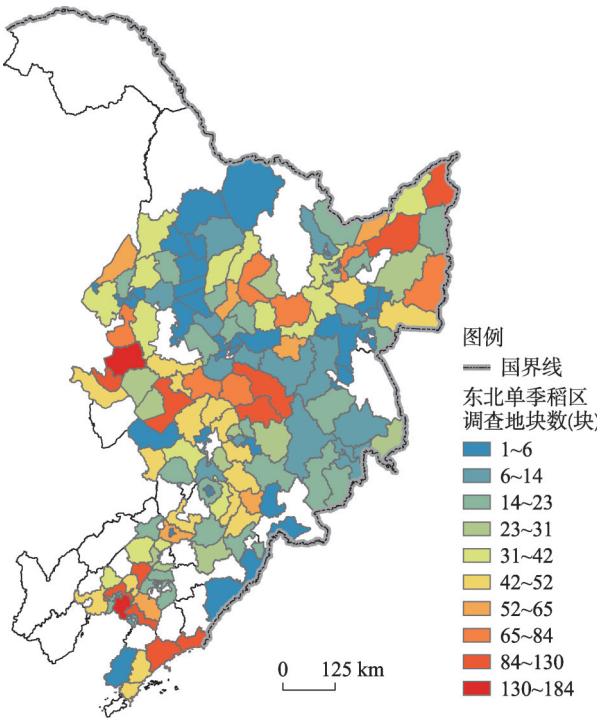
土壤类型等见表 1，取样点空间位置图见图 2。

土壤有机氮矿化培养：采用改进的长期淹水密闭培养—间歇淋洗法进行。称过 2 mm 筛的相当于 10.00 g 干土的鲜样，加过 2 mm 筛的石英砂 5.00 g，置于 50 ml 离心管中混匀，添加适量无菌去离子水，使土壤含水量达到最大持水量的 60%，密封后放入 12 ℃ 的恒温培养箱中预培养 14 d，用于恢复土壤微生物，模拟新鲜土壤环境，然后进行初始矿质氮淋洗测定。将初始淋洗后样品加入无菌去离子水 20 ml，置于 25 ℃ 恒温培养箱中培养 56 d。于培养的第 7 d、14 d、21 d、35 d、42 d、56 d 进行非破坏性取样全部取出淋洗，通过 AA3 流动分析仪测定  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量，淋洗过后放回培养箱继续培养。

2.3 数据处理与分析

理论施氮量，表观氮盈余及氮肥偏生产力计算：

依据作物需氮量理论，氮沉降等其他来源氮和秸秆还田氮素输入约等于肥料氮素的损失量，因此常规管理条件下区域适宜施氮量约等于作物地上部氮素携出量<sup>[9]</sup>，为了保证数据的可靠性，我们通过文献梳理和田间实验数据分别得出籽粒和秸秆含氮量进行计算。即：



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1827号标准地图制作，底图边界无修改。

图 1 调查地块分布

Fig. 1 Geographic location of the survey sites

表 1 供试土壤点位信息及土壤类型  
Tab. 1 Location and soil type of sampling sites

取样省份	土壤编号	采样地址	经纬度	土壤类型
黑龙江	HZ	大庆市肇源县	45.87°N, 125.34°E	草甸土
	HS	绥化市北林区	46.87°N, 127.13°E	草甸黑土
	HN	哈尔滨阿城区	45.65°N, 126.95°E	草甸土
	HF	哈尔滨方正县	45.82°N, 128.81°E	白浆土
	JG	长春市公主岭市	45.52°N, 124.73°E	草甸黑土
吉林	JDA	延边州敦化市	43.43°N, 128.43°E	白浆土
	JDB	延边州敦化市	43.45°N, 128.51°E	草甸土
	JS	松原市宁江区	45.30°N, 124.78°E	草甸土
辽宁	LD	丹东市东港市	39.98°N, 124.04°E	盐渍黑土
	LL	辽阳市灯塔市	41.35°N, 123.28°E	草甸土
	LK	铁岭市开原市	42.27°N, 123.75°E	草甸土
	LP	盘锦市盘山县	41.15°N, 122.33°E	盐渍黑土

$$N_p = N_n = (1 \pm 0.05) \times \frac{G_y \times G_n + S_y \times S_n}{1000} \quad (1)$$

式中:  $N_p$  为区域理论适宜施氮量 ( $\text{kg hm}^{-2}$ );  $N_n$  为区域作物需氮量 ( $\text{kg hm}^{-2}$ );  $G_y$  和  $S_y$  分别为区域籽粒和秸秆产量 ( $\text{kg hm}^{-2}$ ),  $G_n$  和  $S_n$  分别为籽粒和秸秆含氮量 ( $\text{g kg}^{-1}$ )。通过在黑龙江, 吉林和辽宁省进行的田间试验和文献中发表的数据结果<sup>[10]</sup>, 确定了黑龙江, 吉林和辽宁常规施肥处理的水稻籽粒平均含氮量分别为  $10.5 \sim 11.7 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $11.9 \sim 12.8 \text{ g kg}^{-1}$  和  $13.2 \sim 14.9 \text{ g kg}^{-1}$ , 秸秆平均含氮量分别为  $5.5 \sim 6.1 \text{ g kg}^{-1}$ ,  $6.5 \sim 8.7 \text{ g kg}^{-1}$  和  $6.2 \sim 7.5 \text{ g kg}^{-1}$ , 籽粒和秸秆产量来自调查数据。

区域内的表观氮盈余以区域内实际施氮量和理论适宜施氮量的差值来表征, 氮肥生产效率用氮肥偏生产力 NPFP ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) 进行计算。即:

$$N_s = N_a - N_p \quad (2)$$

$$\text{NPFP} = \frac{G_y}{N_a} \quad (3)$$

式中:  $N_a$  为区域实际施氮量 ( $\text{kg hm}^{-2}$ );  $N_s$  为区域表观氮盈余 ( $\text{kg hm}^{-2}$ )。其中区域实际施氮量和籽粒产量来自农户调研数据。

所有数据均采用 Microsoft Excel 2019 进行数据统计和处理, 采用 SPSS 26 中 ANOVA 进行单因素方差分析, 利用 Duncan 法进行多重比较 ( $P < 0.05$ ), 采用 Origin 2020 Pro 进行图形绘制, 采用 ArcGIS10.2 进行地图绘制。

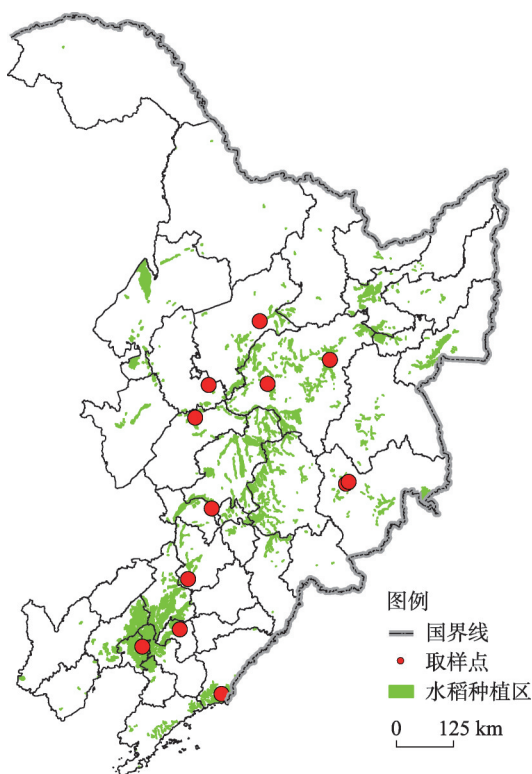
### 3 结果与分析

#### 3.1 施氮强度及产量空间分布

东北平原黑土稻区施氮强度空间变异性较大 (图 3a), 由南至北, 施氮强度逐渐降低。辽宁、吉林和黑龙江平均施氮量分别为  $243.7 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $162.8 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $142.8 \text{ kg hm}^{-2}$  (图 3b)。辽宁纯氮施用量显著高于吉林和黑龙江 ( $P < 0.01$ ), 分别多投入了 49.7% 和 70.7%。东北平原水稻优势区地上部生物量由南至北呈现下降趋势 (图 3c)。辽宁、吉林和黑龙江三省平均地上部生物量分别为  $17.7 \text{ t hm}^{-2}$ 、 $16.1 \text{ t hm}^{-2}$  和  $14.9 \text{ t hm}^{-2}$  (图 3d), 相比于黑龙江, 吉林和辽宁的地上部生物量显著高出了 8.2% 和 19.1% ( $P < 0.01$ )。

#### 3.2 水稻土供氮特征

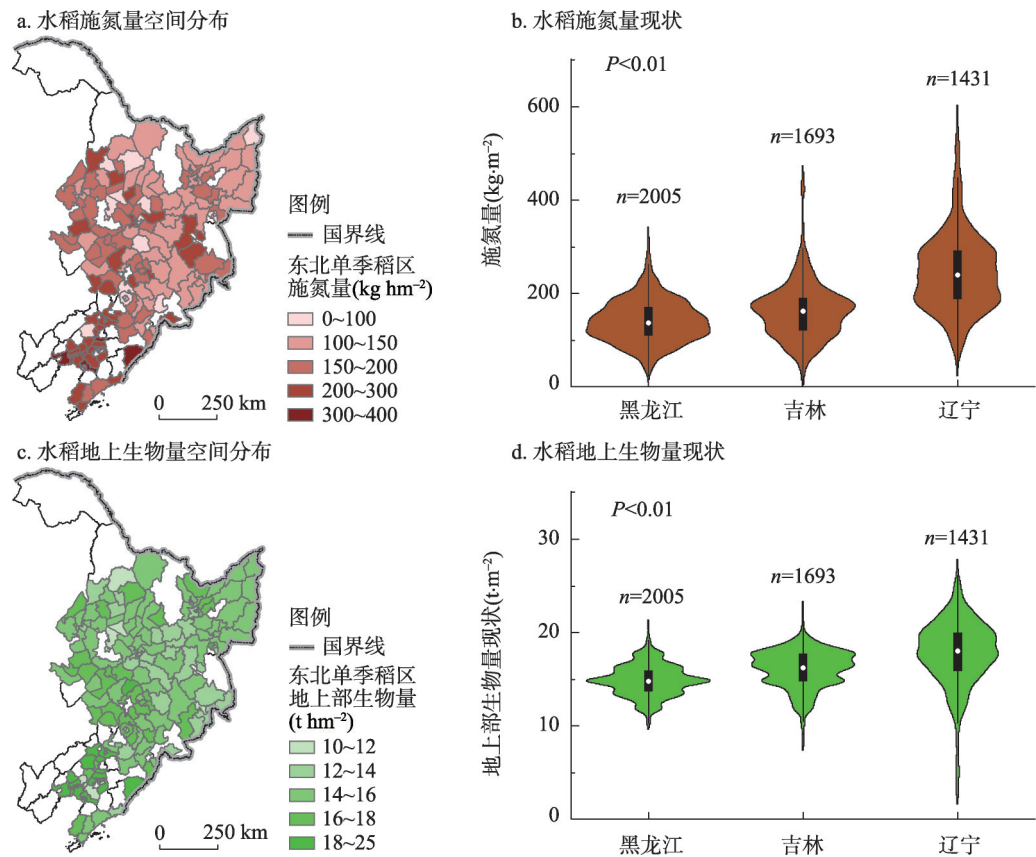
不同区域水稻土壤氮素矿化量均随着培养时间的增加而增加 (图 4)。黑龙江不同区域水稻土前期矿化速率较高, 在 42 d 后矿化速率开始呈减缓趋势, 吉林不同区域土壤在 35 d 后矿化速率开始放缓, 辽宁不同区域水稻土矿化速率在前期略低于其他两省, 但矿



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1827号标准地图制作, 底图边界无修改。

图2 供试土壤样品取样点

Fig. 2 Geographic location of the sampling sites



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1827号标准地图制作,底图边界无修改。

图3 水稻施氮量和地上生物量的空间分布及现状

Fig. 3 Spatial distribution and status of nitrogen application and aboveground biomass of rice

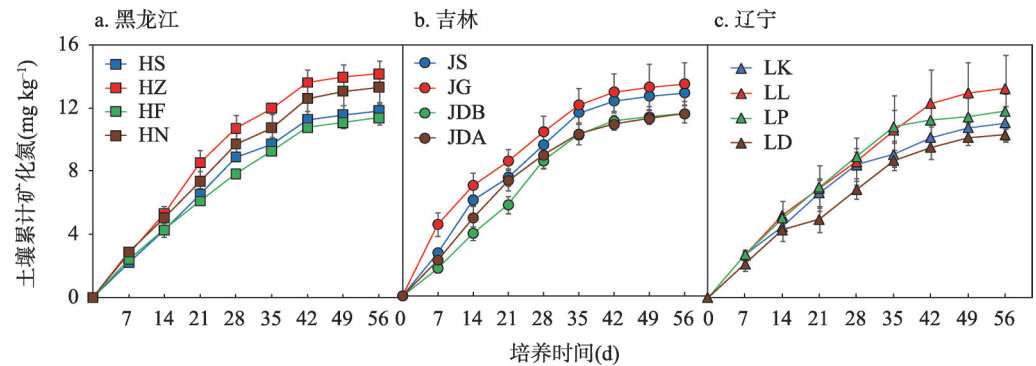


图4 土壤氮素累积矿化量

Fig. 4 The cumulative amount of soil nitrogen mineralization

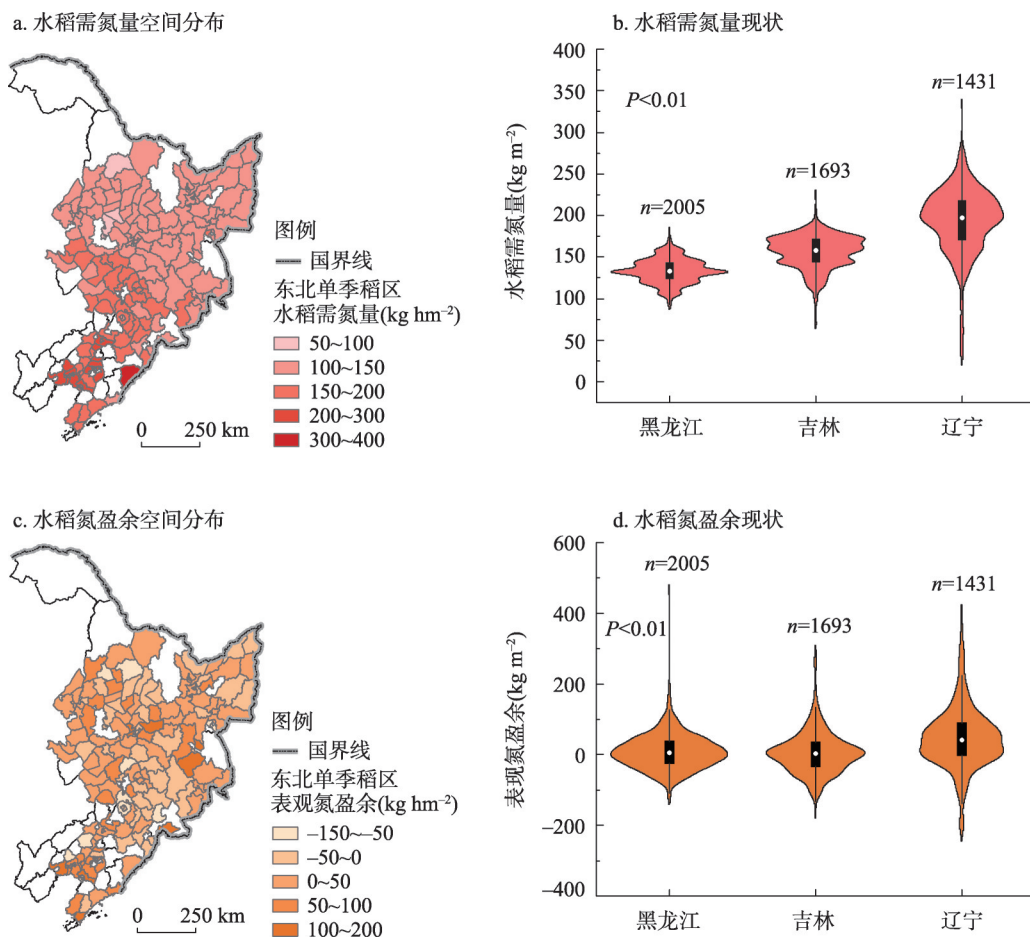
化速率持续时间较长,在49 d后才有放缓趋势。56 d培养结束后,黑龙江、吉林和辽宁三省典型水稻土的累积矿化量分别为11.4~14.2 mg kg<sup>-1</sup>、11.6~13.5 mg kg<sup>-1</sup>和10.3~13.2 mg kg<sup>-1</sup>,通过差异性显著检验得出三大省份典型水稻土累积矿化量并没有显著差异( $P > 0.05$ )。

### 3.3 理论需氮量与氮盈余量

区内水稻的理论需氮量由南至北逐渐增加(图5a)。辽宁、吉林和黑龙江平均水稻需氮量分别为 $193.3 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $156.4 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $133.2 \text{ kg hm}^{-2}$ (图5b), 当目标产量上下变化幅度在5%之间时, 辽宁、吉林和黑龙江理论适宜施氮量分别为 $183.6\sim 203.0 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $148.6\sim 164.2 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $126.5\sim 139.9 \text{ kg hm}^{-2}$ 。3个省份之间水稻的理论适宜施氮量差异显著( $P < 0.01$ )。结合区内实际施氮量计算结果表明, 稻区内的氮盈余量也呈现了空间上的差异(图5c)。辽宁氮盈余量较高, 而黑龙江和吉林氮盈余量较小。其中, 黑龙江和吉林的平均氮盈余为 $9.66 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $6.41 \text{ kg hm}^{-2}$ , 显著( $P < 0.01$ )低于辽宁稻区的氮盈余 $49.15 \text{ kg hm}^{-2}$ (图5d), 这与当地的产量水平和施氮量密切相关。

### 3.4 氮肥生产效率评价

东北平原黑土稻区氮肥生产效率由南至北呈升高趋势。辽宁、吉林和黑龙江平均籽粒产量分别为 $9411.9 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $8185.7 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $7629.4 \text{ kg hm}^{-2}$ , 平均氮肥偏生产力分别为 $43.4 \text{ kg kg}^{-1}$ 、 $58.1 \text{ kg kg}^{-1}$ 和 $60.8 \text{ kg kg}^{-1}$ (图6)。吉林和黑龙江较辽宁稻区氮肥偏生产



注: 基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1827号标准地图制作, 底图边界无修改。

图5 水稻需氮量和氮盈余的空间分布及现状

Fig. 5 Spatial distribution and status of nitrogen demand and nitrogen surplus of rice

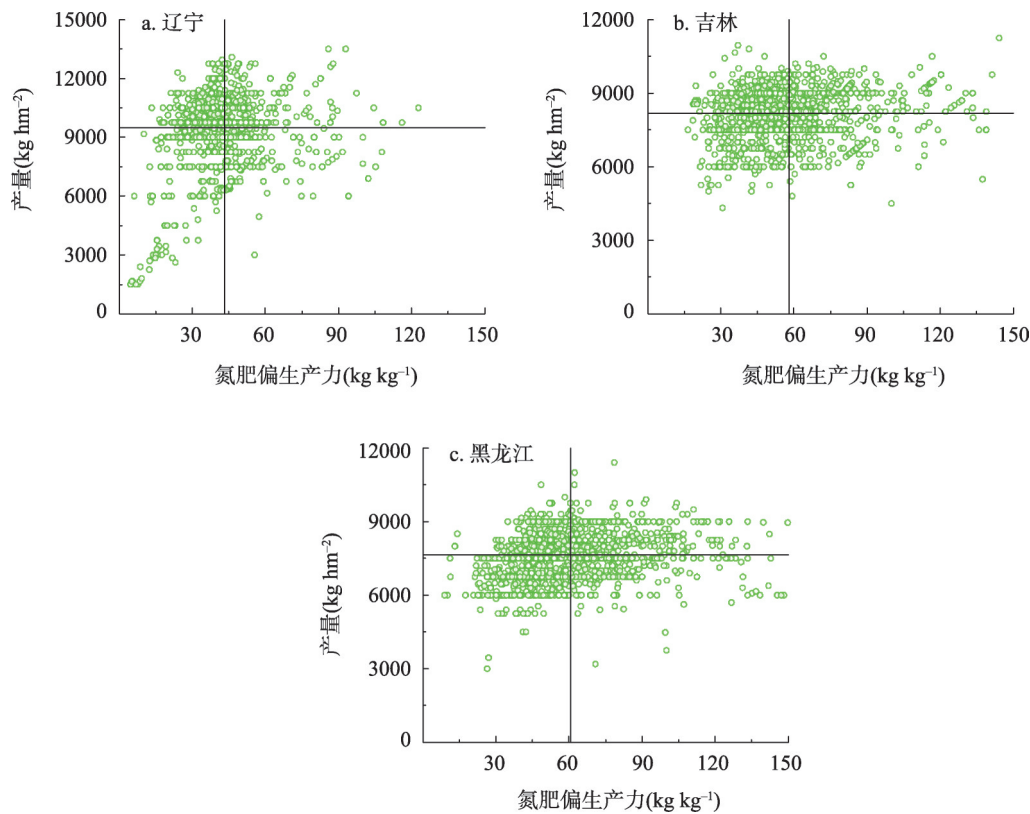


图6 辽宁稻区、吉林稻区和黑龙江稻区氮肥偏生产力现状  
Fig. 6 Nitrogen partial productivity in rice production regions of Liaoning, Jilin and Heilongjiang

力分别提高了33.9%和40.1%。辽宁不同地块间氮肥生产效率离散程度较大,有22.5%的地块实现了当前区域水平下的氮肥高产高效,另有24.3%的地块处于低产低效水平(图6a)。吉林和黑龙江地块间氮肥生产效率分布比较集中,其中吉林有19.8%的地块实现了高产高效,另有25.7%的地块处于低产低效水平(图6b);黑龙江有21.2%的地块实现了高产高效,另有38.6%的地块处于当前区域水平下的低产低效(图6c)。

## 4 讨论

### 4.1 施氮量空间异质性影响因素

本文研究表明,在东北平原黑土稻区氮肥的施用强度呈现从南到北逐渐降低的空间分布特征(图3a)。这种差异可能是气候、品种、土壤供氮和氮肥管理措施等多因素综合影响下的结果<sup>[5]</sup>。通过相关性分析,水稻施氮量与水稻需氮量之间呈现极显著正相关关系(图7)。因此,作物对氮需求的差异是直接影响施氮量差异的主要因素。本文的调查数据表明,东北平原黑土稻区由南至北,水稻的地上部生物量逐渐降低(图3c)。这可能是由于水稻生育期的不同所导致的。辽宁地处暖温带,温带大陆性季风气候区,水稻生育期为140~170 d。而吉林和黑龙江水稻生育期分别为140~150 d和120~145 d<sup>[11]</sup>。研究表明,在一定生育期范围内,生育期与生物产量及经济产量呈正相关关系<sup>[12]</sup>。因此,地上

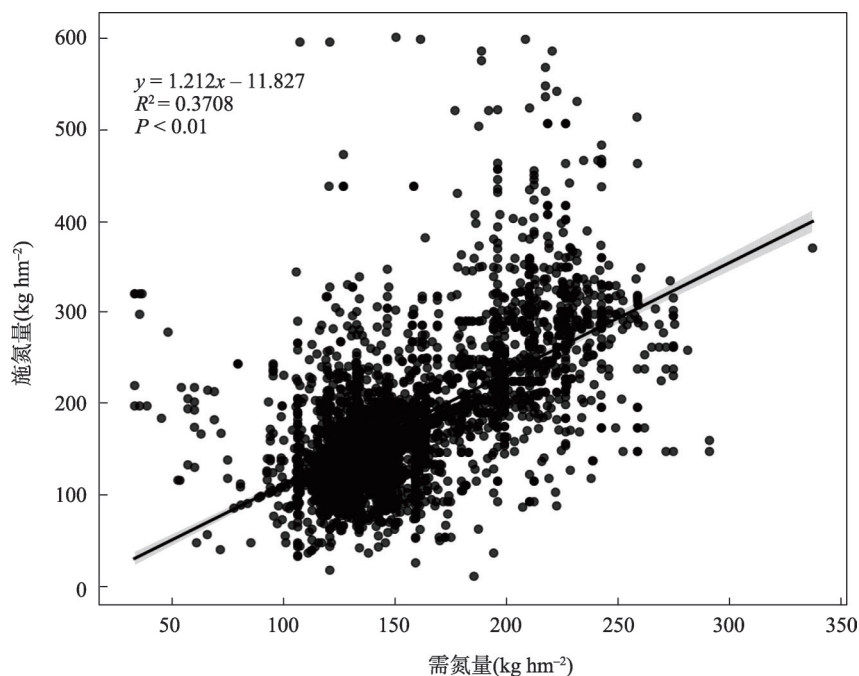


图7 水稻施氮量和需氮量之间的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between nitrogen application and nitrogen demand of rice

部生物量随着生育期由南至北的逐渐缩短而有所降低。根据“作物需氮量”理论<sup>[9]</sup>, 我们计算得出东北三省之间水稻理论需氮量在空间上的变化趋势与水稻的地上部生物量变化特征一致, 水稻产量越高对氮素的需求越高, 这主要是因为氮素是产量形成的必需元素<sup>[13]</sup>。在水稻地上部生物量较高的辽宁地区, 水稻的理论需氮量高。因此, 东北三省水稻需氮量的空间差异性可能是导致施氮量空间差异的主要影响因素。

其次, 土壤的供氮能力也会对施氮量产生影响。土壤中绝大部分的氮素以有机氮形式存在, 约占土壤总氮含量的85%~95%<sup>[14]</sup>, 有机氮需要在微生物的作用下矿化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 才能被植物吸收利用<sup>[15]</sup>。因此土壤氮素矿化效率可以有效反映土壤供氮能力<sup>[16]</sup>。研究表明, 土壤有机氮矿化受土壤质地, 耕作方式, 施肥状况和水热条件的影响<sup>[17]</sup>。本文中东北三省典型水稻土累积矿化量没有显著差异 ( $P > 0.05$ ) (图4)。这可能是因为水稻土是在人为水耕熟化和自然成土因素的双重作用下形成的<sup>[18]</sup>, 东北三省相似的水热条件, 耕作方式和施肥状况导致典型水稻土氮矿化相关微生物群落发生了趋同效应<sup>[19]</sup>。因此土壤本底供氮能力不是构成黑土稻区区域间施氮量差异的主要原因。

除了土壤本底肥力和作物需氮, 不同的氮肥管理措施可以通过影响氮素损失来影响施氮量<sup>[20]</sup>。调研数据表明, 黑龙江基肥施用主要在4月下旬和5月上旬, 吉林主要在5月中上旬, 而黑龙江和吉林一般在5月中上旬插秧, 基肥施用虽然早于插秧, 但寒地稻区5月份气温较低, 且基施的氮肥比例较少, 因此肥料氮损失较少, 在保证产量稳定的前提下减少了氮肥施用量<sup>[21]</sup>。辽宁在5月中上旬施用基肥, 6月中上旬插秧, 基肥期氮占全生育期氮投入量的59%。过早和过量的施用基肥使氮肥损失风险提高<sup>[22]</sup>, 也可能是辽宁稻区施氮量高的原因之一。

## 4.2 东北平原黑土区水稻减氮潜力

本文发现, 辽宁的氮肥施用相较于黑龙江和吉林分别增加了 70.7% 和 49.7% (图 3b), 但产量却只增加了 24.3% 和 15.9% (图 3d) 过高的氮素投入水平导致了辽宁的氮肥偏生产力仅为  $43.4 \text{ kg kg}^{-1}$ , 远低于黑龙江和吉林的  $60.8 \text{ kg kg}^{-1}$  和  $58.1 \text{ kg kg}^{-1}$  (图 6)。值得一提的是, 虽然黑龙江有 38.6% 的地块在当前区域生产水平下“低产低效”, 但由于黑龙江平均氮肥偏生产力高达  $60.8 \text{ kg kg}^{-1}$ , 而全国平均水稻氮肥偏生产力仅为  $37 \text{ kg kg}^{-1}$ <sup>[6]</sup>, 因此黑龙江有 85.3% 的地块氮肥生产效率高于全国平均水平。虽然东北平原黑土稻区氮肥偏生产力整体高于全国平均水平, 但纬度和产量与东北地区相近的日本, 其水稻氮肥偏生产力高达  $75 \text{ kg kg}^{-1}$ <sup>[23]</sup>, 因此东北平原黑土稻区仍有较大的优化施氮空间。将区域施氮量与理论适宜施氮量对比发现, 辽宁理论减氮潜力达 16.7%~24.7%, 吉林中、西部水稻种植区减氮潜力达 8.7%~17.8%, 黑龙江还有 2.0%~11.4% 理论减氮空间。根据 2021 年农业农村部发布的春季施肥指导意见, 目前辽宁、吉林和黑龙江三省平均产量水平所对应的推荐施氮量分别为  $159.6\sim 184.7 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $136.8\sim 159.6 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $93.0\sim 117.3 \text{ kg hm}^{-2}$ , 与区域实际施肥量对比后发现辽宁、吉林和黑龙江的减氮潜力分别为 24.2%~34.5%, 2.0%~16.0% 和 17.9%~34.9%。略高于通过理论适宜施氮量得出的减氮潜力, 但均表现出了较高的减氮潜力。虽然本文计算得出了东北平原黑土稻区不同省份的理论减氮潜力, 但目前主要依据文献中已经发表的适宜需氮量理论来进行的计算<sup>[9]</sup>, 还未在 3 个省份开展大田试验进行验证。因此, 建议东北平原黑土稻区实现氮肥减施和氮素的高效利用还需通过改进施肥技术来实现, 而不是简单降低氮素输入<sup>[24]</sup>。

东北水稻主产区是中国粮食生产的重要基地, 为国家的粮食安全做出了巨大贡献。已有研究表明, 化肥氮对粮食产量的贡献达到了 45%<sup>[25]</sup>, 单纯减氮会降低水稻产量, 影响粮食安全。施氮量, 氮肥管理措施和生育期的差异导致了水稻产量在东北三省呈现很大的差异。由于生育期受气候和品种影响较大, 因此, 水稻产量的稳定在很大程度上取决于氮肥的施用量和管理措施。东北三省应该因地制宜的采取不同措施实现氮肥高效利用从而稳定粮食生产。对于黑龙江和吉林等氮肥减施潜力较小的地方, 建议通过深施肥技术和缓控释肥等新型肥料的引入来实现氮肥减施和氮素的高效利用, 而在氮肥施用量较高的辽宁, 可以适当减少化肥氮的输入, 从而使化肥氮的施用在合理的施氮量范围内。

即便在施氮肥的基础上, 作物氮携出量的 50% 以上来源于土壤<sup>[26]</sup>。因此, 不合理的氮肥施用以及长期的土壤碳氮亏损可能会降低土壤肥力。有机质是衡量土壤肥力的重要指标<sup>[27]</sup>。近些年来, 黑土地长期高强度重用轻养, 导致黑土层变薄, 变瘦和变硬, 有机质含量逐年下降<sup>[28]</sup>, 影响了黑土区粮食生产的可持续发展。2017 年国家各部委联合发布了《东北黑土地保护规划纲要 (2017—2030 年)》来探索合理的黑土保护策略。研究表明, 通过有机肥替代部分化肥, 秸秆还田, 深松深翻和合理轮作等方式可以有效改善土壤结构, 生物学和理化性质<sup>[29-30]</sup>。因此, 在黑土区通过适当的增加有机物料的投入和改善农艺措施可以保护黑土免受破坏, 同时实现氮肥的高效利用。

## 5 结论

东北水稻主产区施氮量和地上部生物量由南至北均逐渐减少, 而氮肥偏生产力逐渐增加。区域内不同省份水稻土供氮能力无明显不同 ( $P < 0.05$ ), 水稻需氮量是引起不同省份间施肥差异的主导因素。与理论适宜施氮量相比, 辽宁水稻种植区理论减氮潜力达

16.7%~24.7%, 吉林中、西部水稻种植区潜力达 8.7%~17.8%, 黑龙江水稻种植区还有 2.0%~11.4%理论减氮空间。为稳定粮食生产和实现黑土保护, 建议主要通过高效施肥技术、缓释肥料品种的引入和增加有机物料投入来实现黑土区粮食生产的可持续发展。

## 参考文献(References)

- [1] Borah P, Sharma E, Kaur A, et al. Analysis of drought-responsive signalling network in two contrasting rice cultivars using transcriptome-based approach. *Scientific Reports*, 2017, 7(1). DOI: 10.1038/srep42131.
- [2] Zhao X Q, Wang W S, Xie Z Y, et al. Comparative analysis of metabolite changes in two contrasting rice genotypes in response to low-nitrogen stress. *The Crop Journal*, 2018, 6(5): 464-474.
- [3] Liu T Q, Huang J F, Chai K B, et al. Effects of N fertilizer sources and tillage practices on  $\text{NH}_3$  volatilization, grain yield, and N use efficiency of rice fields in Central China. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 385. DOI: 10.3389/fpls.2018.00385.
- [4] Zhao Xueyan, Liu Jianghua, Wang Rong, et al. Spatial-temporal coupling relationship between chemical fertilizer application and grain yield in China at city scale. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(7): 1471-1482. [赵雪雁, 刘江华, 王蓉, 等. 基于市域尺度的中国化肥施用与粮食产量的时空耦合关系. *自然资源学报*, 2019, 34(7): 1471-1482.]
- [5] Liu Qinpu. Distribution of fertilizer application and its environmental risk in different provinces of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(18): 3596-3605. [刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析. *中国农业科学*, 2014, 47(18): 3596-3605.]
- [6] Wu Liang. Nitrogen fertilizer demand and greenhouse gas mitigation potential under nitrogen limiting conditions for Chinese agriculture production [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. [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.]
- [7] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. *Field Crops Research*, 2006, 96(1): 37-47.
- [8] Guo Zhen. On the mutual evolution and regional differences of China's grain crops fertilizer application and yield growth. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Social Science Edition)*, 2020, 23(4): 80-85. [郭珍. 中国粮食作物化肥施用与单产增长的相互演进态势及其地区差异分析. *湖南科技大学学报(社会科学版)*, 2020, 23(4): 80-85.]
- [9] Ju Xiaotang. Improvement and validation of theoretical N rate (TNR): Discussing the methods for N fertilizer recommendation. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2): 249-261. [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.]
- [10] Wang Qiuju, Li Pengfei, Liu Feng, et al. Study and application of nitrogen fertilizer optimization in paddy field of meadow albic soil in Sanjiang Plain: A case study at Qianjin Farm. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(5): 30-37. [王秋菊, 李鹏绯, 刘峰, 等. 三江平原草甸白浆土水田氮肥优化研究及应用: 以前进农场为例. *中国土壤与肥料*, 2019(5): 30-37.]
- [11] Gao Mengshuang, Xu Yinlong, Yin Hong, et al. Analysis on the changes of rice growth period over Northeast China in 1992-2012. *Climate Change Research*, 2018, 14(5): 495-504. [高孟霜, 许吟隆, 殷红, 等. 1992—2012年东北水稻生育期变化分析. *气候变化研究进展*, 2018, 14(5): 495-504.]
- [12] Lang Youzhong, Dou Yongxiu, Wang Meie, et al. Effects of growth duration on grain yield and quality in rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(3): 528-534. [郎有忠, 窦永秀, 王美娥, 等. 水稻生育期对籽粒产量及品质的影响. *作物学报*, 2012, 38(3): 528-534.]
- [13] Liu Qiuyuan, Zhou Lei, Tian Jinyu, et al. Relationships among grain yield, rice quality and nitrogen uptake of inbred middle-ripe japonica rice in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(5): 904-914. [刘秋员, 周磊, 田晋钰, 等. 长江中下游地区常规中熟粳稻产量、品质及氮素吸收性状的相互关系分析. *作物学报*, 2021, 47(5): 904-914.]
- [14] Wang Yuan, Zhou Jianbin, Yang Xueyun. Effects of different long-term fertilization on the fractions of organic nitrogen and nitrogen mineralization in soils. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(6): 1173-1180. [王媛, 周建斌, 杨学云. 长期不同培肥处理对土壤有机氮组分及氮素矿化特性的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(6): 1173-1180.]
- [15] Peng Zhengping. Absorption, transportation and regulation of nitrogen element in plants. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2019, 42(2): 1-5. [彭正萍. 植物氮素吸收、运转和分配调控机制研究. *河北农业大学学报*, 2019, 42(2): 1-5.]

- [16] Zhang Fangfang, Ma Ningbo, Yue Shanchao, et al. Evaluation of nitrogen supply capacity of paddy and wheat rotation soil in Hanzhong Basin by different determination methods. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(19): 3996-4009. [张方方, 马宁博, 岳善超, 等. 基于不同方法的汉中盆地稻麦轮作土壤供氮能力评价. *中国农业科学*, 2020, 53(19): 3996-4009.]
- [17] Liu Zhimei, Wu Shengjun, Liang Zhen, et al. Research progress on soil nitrogen mineralization and its influence factors in the water level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(11): 81-91. [刘志梅, 吴胜军, 梁震, 等. 三峡库区消落带土壤氮矿化及影响因素研究进展. *中国农业科技导报*, 2017, 19(11): 81-91.]
- [18] Zhang Mingkui, Qiu Zhiteng. Stagnic anthrosols in Guizhou: Formation, taxonomic classification and geographical distribution. *Journal of Agriculture*, 2021, 11(7): 44-50, 76. [章明奎, 邱志腾. 贵州省水耕人为土的形成、分类与分布规律. *农学学报*, 2021, 11(7): 44-50, 76.]
- [19] Zhou J, Jiang X, Zhou B K, et al. Thirty four years of nitrogen fertilization decreases fungal diversity and alters fungal community composition in black soil in northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 95: 135-143.
- [20] Xia L L, Lam S K, Chen D L, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1917-1925.
- [21] Kong Lili, Hou Yunpeng, Yin Caixia, et al. Nitrogen fertilizer management for high nitrogen utilization efficiency and rice yield under straw incorporation in a cold region. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(7): 1282-1293. [孔丽丽, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 秸秆还田下寒地水稻实现高产高氮肥利用率的氮肥运筹模式. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(7): 1282-1293.]
- [22] Zhao Can, Liu Guangming, Dai Qigen, et al. Research progress on effects of nitrogen fertilizer on yield, quality and nitrogen use efficiency of rice. *China Rice*, 2022, 28(1): 48-52, 57. [赵灿, 刘光明, 戴其根, 等. 氮肥对水稻产量、品质和氮利用效率的影响研究进展. *中国稻米*, 2022, 28(1): 48-52, 57.]
- [23] Dobermann A, Witt C, Abdulrachman S, et al. Estimating indigenous nutrient supplies for site-specific nutrient management in irrigated rice. *Agronomy Journal*, 2003, 95(4): 924-935.
- [24] Ju Xiaotang, Zhang Chong. The principles and indicators of rational N fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 1-13. [巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标. *土壤学报*, 2021, 58(1): 1-13.]
- [25] Yu Chaoqing. The coupled effects of water and nitrogen on China's food and environmental securities. *Scientia Sinica: Terrae*, 2019, 49(12): 2018-2036. [喻朝庆. 水-氮耦合机制下的中国粮食与环境安全. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(12): 2018-2036.]
- [26] Wang Shihong, Nie Junjun, Li Qiuzhi, et al. Effects of nitrogen application rate on nitrogen absorption and utilization, and fate of nitrogen in soil-cotton system. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(4): 738-745. [王士红, 聂军军, 李秋芝, 等. 施氮量对土壤-棉花系统中氮素吸收利用和氮素去向的影响. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(4): 738-745.]
- [27] Yin Sijia, Li Hui, Xu Zhiqiang, et al. Spatial variations and relationships of topsoil fertility indices of drylands in the typical black soil region of Northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(10): 2132-2141. [尹思佳, 李慧, 徐志强, 等. 东北典型黑土区旱地耕层土壤肥力指标的纬度变化特征及其关系. *中国农业科学*, 2021, 54(10): 2132-2141.]
- [28] Wang Jingkuan, Xu Xiangru, Pei Jiubo, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in Northeast China. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(3): 695-701. [汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等. 东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战. *土壤通报*, 2021, 52(3): 695-701.]
- [29] Liu Pingqi, Zhang Mengxuan, Wang Ligang, et al. Effects of subsoiling and straw return on soil respiration and soil organic carbon balance in black soil of northeast China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1150-1160. [刘平奇, 张梦璇, 王立刚, 等. 深松秸秆还田措施对东北黑土土壤呼吸及有机碳平衡的影响. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5): 1150-1160.]
- [30] Zhang X Y, Fang Q C, Zhang T, et al. Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 888-900.

## Nitrogen fertilizer reduction potential in the main rice producing region of black soil in Northeast China

YIN Yinghua<sup>1</sup>, PENG Xiaozong<sup>1</sup>, ZHAI Limei<sup>1</sup>, ZHANG Yitao<sup>2</sup>,  
WANG Hongyuan<sup>1</sup>, LIU Hongbin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The Northeast China Plain is an important commercial grain production base of the country, with rice being one of the region's principal food crops. Despite the exceptional quality and fertility of the region's black soil, excessive fertilizer application is nonetheless widespread. As a result, large-scale surveys and soil incubation experiments were conducted in Heilongjiang, Jilin and Liaoning provinces to clarify the spatial pattern, differential characteristics and the reduction potential of rice fertilization in the black soil area. The findings revealed that both nitrogen (N) application intensity and economic yield dropped progressively from south to north in the region, with the decrease in N application intensity being greater than that in yield. As a result, N fertilizer partial productivity steadily increased from south to north. Compared to the theoretically suitable N application rate, the theoretical N reduction potential of rice area in Liaoning, central and western Jilin and Heilongjiang were determined to be 16.7%~24.7%, 8.7%~17.8%, and 2.0%~11.4%, respectively. In the three provinces, there is no significant difference in the quantity of accumulative soil mineralization of typical rice soils. Therefore, variances in N application to rice in Heilongjiang, Jilin, and Liaoning are mostly influenced by changes in the N quantity carried by aboveground biomass.

**Keywords:** rice; Northeast China Plain; nitrogen; fertilizer reduction