

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23045

## 滨海盐碱稻区水稻氮肥适宜用量及运筹模式研究

李波<sup>1</sup>, 曲航<sup>1</sup>, 宫亮<sup>1</sup>, 金丹丹<sup>1</sup>, 于广星<sup>2</sup>, 郑文静<sup>2</sup>, 孙文涛<sup>1\*</sup>

(1. 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;

2. 辽宁省水稻研究所, 辽宁 沈阳 110101)

**摘要:** 通过在辽河三角洲滨海盐碱稻区设置田间小区试验, 探明了不同氮肥用量 (0 ~ 420 kg/hm<sup>2</sup>) 和运筹模式 (基肥: 蘖肥: 穗肥分别为 6:3:1 与 4:3:3, 以下简称 6:3:1 模式与 4:3:3 模式) 对水稻生长发育以及产量品质的影响。通过对水稻分蘖动态调查研究表明, 两种氮肥运筹模式下水稻平均茎蘖数均与施氮量呈显著正相关 ( $r^2 \geq 0.90$ ), 同时, 6:3:1 模式下氮肥用量对水稻平均茎蘖数的影响程度高于 4:3:3 模式。通过分析不同施氮量与产量的相关关系, 发现了两者符合线性加平台肥料效应模型, 拟合得到 6:3:1 模式与 4:3:3 模式下的最佳施氮量 (EONR) 分别为 216 kg/hm<sup>2</sup> (210 ~ 235 kg/hm<sup>2</sup>) 与 316 kg/hm<sup>2</sup> (300 ~ 332 kg/hm<sup>2</sup>), 6:3:1 模式的 EONR 比 4:3:3 模式高 46.3%。通过考查两种氮肥运筹模式下的氮素利用率指标, 发现 4:3:3 模式下各处理氮素利用率 (37.2% ~ 40.8%) 显著高于 6:3:1 模式 (29.9% ~ 34.2%)。通过分析稻米营养与食味品质, 在兼顾产量的前提下, 再次明确了 6:3:1 模式与 4:3:3 模式下适宜氮肥用量分别为 300 ~ 332 与 210 ~ 235 kg/hm<sup>2</sup>。综合考虑水稻产量、氮素利用率以及稻米品质 3 个指标, 推荐辽河三角洲滨海盐碱稻区的适宜氮肥施用量为 210 ~ 235 kg/hm<sup>2</sup>, 最宜采用的氮肥运筹模式为 4:3:3。研究结果可以为辽河三角洲盐碱稻区合理施肥与氮肥高效利用提供切实的技术指导, 为该地区水稻产业绿色发展提供理论支撑。

**关键词:** 水稻; 滨海盐碱稻区; 产量与品质; 适宜施氮量; 氮肥运筹模式

东北地区盐碱化土地面积约占全国盐碱化总面积的 7.7%<sup>[1]</sup>, 辽河三角洲地区位于东北地区的最南端, 形成于辽河冲击平原, 为辽宁省水稻高产优质典型区域。该地区占地面积 6.916 万 hm<sup>2</sup>, 土壤类型为盐渍化水稻土, 多年来一直种植水稻。众所周知, 盐碱地保肥能力差, 氮肥资源利用率低<sup>[2-3]</sup>, 如何提高盐碱稻区氮肥利用效率以及探寻合理施肥技术措施是盐碱地种稻亟待解决的问题。据调查显示, 东北盐碱稻区的施氮量显著高于周边其他稻区<sup>[3-5]</sup>, 如黑龙江省西部盐碱稻区的施氮量为 165 ~ 180 kg/hm<sup>2</sup>, 比本省东部三江平原稻区 (90 ~ 135 kg/hm<sup>2</sup>) 和中部松嫩平原稻区 (120 ~ 165 kg/hm<sup>2</sup>) 平均高出 15 ~ 60 kg/hm<sup>2</sup><sup>[6]</sup>; 吉

林省西部苏打盐碱稻区施氮量 (180 ~ 220 kg/hm<sup>2</sup>) 也显著高于中部非盐碱稻区 (165 ~ 180 kg/hm<sup>2</sup>)。而辽河平原稻区, 尤其是其南部辽河三角洲稻区, 当地农民施氮量高达 270 ~ 300 kg/hm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>, 氮肥利用率较低, 为 28.4% ~ 32.1%<sup>[8]</sup>, “以高肥促高产”的耕作理念在农民心里根深蒂固<sup>[9]</sup>。同时, 盐碱稻区农民普遍重基肥轻穗肥, 基氮投入比例高达总氮用量的 60% ~ 70%, 与水稻生长发育对养分的需求严重不符<sup>[10]</sup>。考虑到水稻需肥的两个关键时期分别为分蘖期和幼穗分化期, 尤以幼穗分化期对氮素需求最大<sup>[11]</sup>, 前期盲目施氮会增加泡田过程的氮肥损失, 造成氮肥的严重浪费<sup>[12-13]</sup>。此外, 不合理的氮肥施用还会导致稻米品质及适口性显著下降<sup>[14]</sup>, 因此, 探究盐碱稻区合理氮肥用量以及施用技术, 对于该地区水稻产业长期绿色发展具有重要意义。本研究以辽河三角洲盐碱稻区常规水稻为研究对象, 考察氮肥用量及施用方式对水稻分蘖动态及产量品质的影响, 提出该地区最适宜氮肥用量和运筹模式, 为该地区水稻产业绿色发展提供理论依据。

收稿日期: 2023-01-29; 录用日期: 2023-05-04

基金项目: 辽宁省应用基础研究计划项目 (2022JH2/101300283); 中央引导地方科技发展资金 (2023JH6/100100033); 辽宁省农业科学院院长基金项目 (2022QN2305)。

作者简介: 李波 (1979-), 研究员, 博士, 主要从事农田系统氮素循环研究。E-mail: libocaas@163.com。

通讯作者: 孙文涛, E-mail: wentaow@163.com。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地点位于辽河三角洲中心地带盘锦市盘山县坝墙子镇姜家村 (122° 14' 17" E, 41° 9' 31" N), 该地属温带半湿润季风气候类型, 年均降水量 650 mm, 年均气温 8 ~ 9℃, 无霜期 165 ~ 170 d。试验点水稻生长季降水量 400 ~ 800 mm, 降水主要发生在 7—9 月; 日均气温变化范围 10.5 ~ 30.5℃, 平均值为

22.7℃ ± 4.2℃ (图 1)。供试土壤为轻度盐渍型水稻土, 土壤 pH 7.57 ± 0.18, 全盐含量 1.73‰ ± 0.12‰, 电导率 304 mS/cm ± 29.8 mS/cm, 有机质含量 30.2 g/kg ± 0.56 g/kg, 全氮 1.60 g/kg ± 0.21 g/kg, 碱解氮 101 mg/kg ± 7.63 mg/kg, 有效磷 18.5 mg/kg ± 3.46 mg/kg, 速效钾 257 mg/kg ± 10.71 mg/kg, 容重 1.39 g/cm<sup>3</sup> ± 0.08 g/cm<sup>3</sup>。试验年份为 2018—2021 年, 4 年的温度与降水变化如图 1 所示, 生育期内总降水量为 361 ~ 786 mm, 活动积温为 3374 ~ 3507℃。

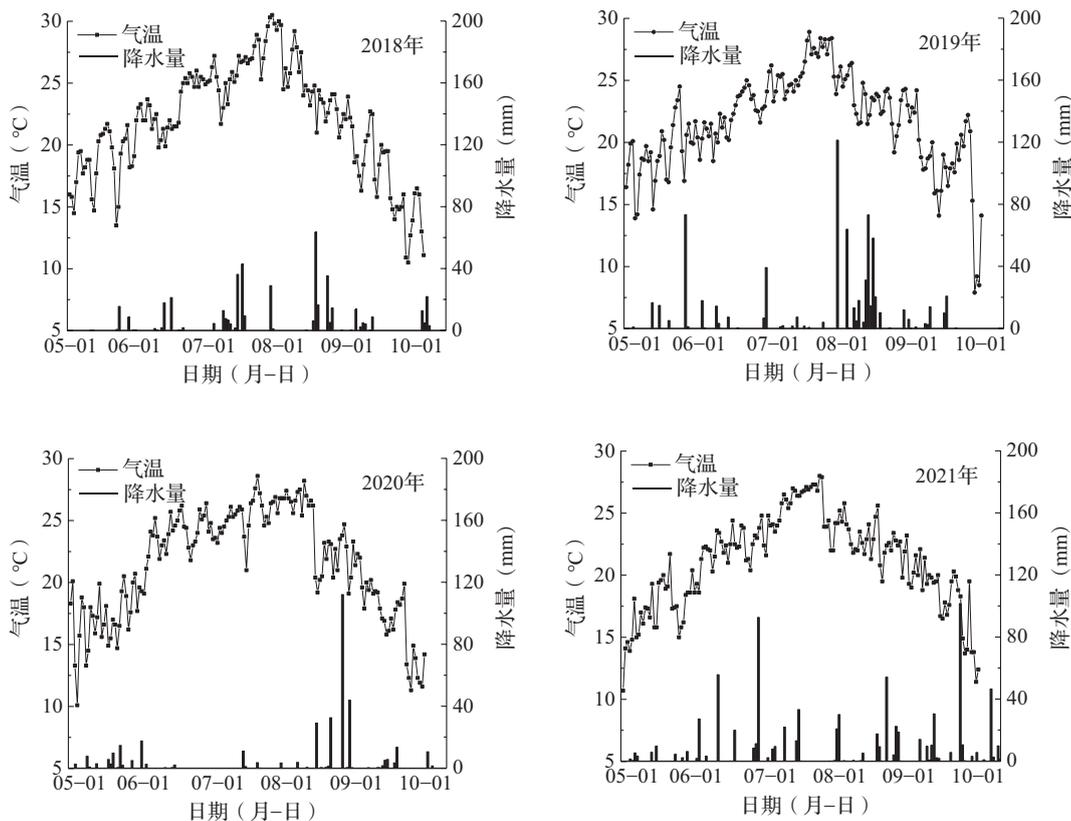


图 1 水稻生长季气温和降水量分布

### 1.2 试验设计

种植品种为该地区主栽常规水稻品种盐丰 47。试验设置 6 个氮肥处理, 小区面积 50 m<sup>2</sup>, 3 次重复, 随机区组排列, 纯氮用量分别为 0、160、210、260、315、420 kg/hm<sup>2</sup>, 记为 N0、N160、N210、N260、N315、N420。2018—2019 年氮肥运筹为基肥: 蘖肥: 穗肥 = 6: 3: 1 (简称 6: 3: 1 模式), 2020—2021 年氮肥运筹为基肥: 蘖肥: 穗肥 = 4: 3: 3 (简称 4: 3: 3 模式), 其中 6: 3: 1 模式为当地农民主要施氮模式, 4: 3: 3 模式拟定为合理施氮模式。为使 6: 3: 1 模式与 4: 3: 3 模式的试验结果具有代表性, 采用 2018—2019 两年试验均值与

2020—2021 两年试验均值进行比较。基肥旋地时施入, 秧苗 5 月 25 日移栽, 6 月 10 日施分蘖肥, 7 月 10 日施穗肥, 10 月 8 日收获, 插秧规格为 30 cm × 18.2 cm。各处理磷肥 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 和钾肥 (K<sub>2</sub>O) 用量均为 90 kg/hm<sup>2</sup>, 全部基施。氮肥使用大颗粒尿素, 磷肥使用过磷酸钙, 钾肥为硫酸钾。各小区之间用聚氯乙烯特制硬板分隔, 板子入地深度 30 cm, 地上部预留 50 cm, 并用竹竿固定以保证各小区之间的单排单灌, 田间管理与当地农民常规管理方法一致。

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 茎蘖动态

每种处理定点选取有代表性的植株 10 穴, 自

移栽后 10 d 开始, 每隔 7 d 调查 1 次茎蘖总数, 直到茎蘖数不再变化为止。

### 1.3.2 产量及其构成因子

成熟期进行取样, 每个小区收获 3 m<sup>2</sup>, 脱粒风干 1 个月后测定产量以及含水量, 并按照标准含水量 (15.5%) 进行产量折算, 同时成熟期各处理选取 9 穴植株, 分别调查有效穗数、穗粒数、结实率和千粒重指标。

### 1.3.3 氮素利用率的计算<sup>[15-16]</sup>

水稻籽粒及茎叶氮素含量采用元素分析仪 (EURO EA3000) 测定。

$$RE_N (\%) = \frac{U - U_0}{N} \times 100 \quad (1)$$

$$AE_N (\text{kg/kg}) = \frac{Y - Y_0}{N} \quad (2)$$

$$HIN (\%) = \frac{U_{\text{grain}}}{U} \times 100 \quad (3)$$

$RE_N$  代表氮素利用率,  $AE_N$  代表氮素农学效率,  $HIN$  代表氮素收获指数,  $U$ 、 $U_0$  分别是施氮处理与不施氮处理水稻地上部的氮积累总量,  $U_{\text{grain}}$  为水稻籽粒氮积累量,  $Y$  与  $Y_0$  为施氮处理与不施氮处理水稻籽粒产量,  $N$  为施氮量。

### 1.3.4 稻米品质

稻米营养品质测试指标选择稻米蛋白质含量与直链淀粉含量, 蛋白质含量采用籽粒全氮含量乘以 5.95 的转换系数得到<sup>[17]</sup>, 直链淀粉含量采用近红外养分分析仪 (DA7200, Perten, Sweden) 测试。稻米食味品质测试指标为米饭的硬度、黏度、食味值, 硬度、黏度满分均为 10 分, 食味值满分为 100 分, 采用稻米食味分析仪 (STA1B, Satake,

Japan) 测试<sup>[18]</sup>。

### 1.4 数据分析

基于施氮量与水稻产量的肥料效应函数, 通过产量拐点确定最佳施氮量 (EONR), 本研究选用线性加平台数学模型拟合<sup>[8]</sup>, 采用 SPSS 21.0 完成参数拟合以及方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥施用下群体茎蘖动态变化

在 6:3:1 模式下, 分析了施氮量与所有生育时期茎蘖数均值的相关性, 结果发现, 两者呈显著正相关, 即随着施氮量的增加茎蘖数显著增加 ( $y=0.370x+205$ ,  $r^2=0.96$ ); 同理, 4:3:3 模式下, 两者也呈显著正相关 ( $y=0.247x+240$ ,  $r^2=0.90$ ), 然而 N260 与 N315 之间的茎蘖数均值无显著差异。如图 2 所示, 茎蘖数在移栽后第 20 ~ 30 d 急速增加, 在移栽后第 30 ~ 35 d 出现最大分蘖, 之后茎蘖数逐渐下降, 在移栽后第 60 d 左右稳定下来。如图 2a 所示, 6:3:1 模式的分蘖高峰期出现在移栽后第 30 ~ 40 d, 最大茎蘖数出现在移栽后第 37 d, 之后无效分蘖死亡, 茎蘖总数达到稳定数值, 而 N420 最大茎蘖数出现在移栽后第 42 d, 比其他施氮处理晚 4 ~ 5 d。N0 茎蘖数最低, 为 215 万个/hm<sup>2</sup>, N420 茎蘖数最高, 为 N0 的 1.89 倍。如图 2b 所示, 4:3:3 模式下, 随着施氮量增加茎蘖数增多, 而这种趋势在中高氮量处理下差异缩小, 尤其在 N260 与 N315 之间差异不显著, N420 的茎蘖数也仅为 N260 的 1.05 倍。总体看来, 两种模式下茎蘖数与施氮量均呈显著的正相关关系 ( $r^2 \geq 0.90$ ), 4:3:3 模式在中低氮端对氮肥用量反应较大, 在

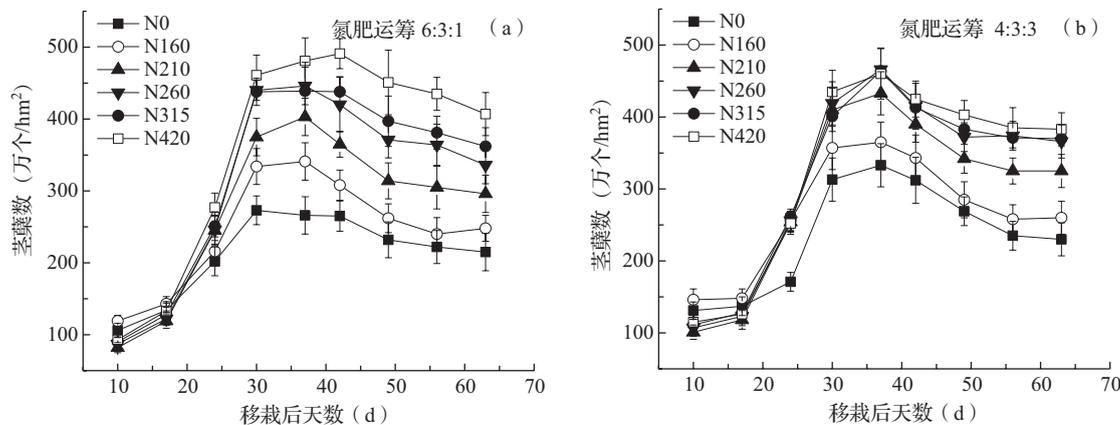


图 2 不同施氮方式下水稻茎蘖动态变化规律

高氮端对氮肥用量反应较小，而6:3:1模式在整个氮肥梯度内氮肥用量对分蘖动态影响都较大。

### 2.2 氮肥施用对产量及其构成因子的影响

从表1看出，无论哪种运筹模式，最大产量都可达到10000 kg/hm<sup>2</sup>以上，说明该地区水稻产量潜力高。6:3:1模式下，随着氮肥增加产量逐渐增加，N420产量最高达11606 ~ 11786 kg/hm<sup>2</sup>；而4:3:3模式下，产量随氮肥用量呈现先升高后降低的趋势，N315产量最高，为10234 ~ 10390 kg/hm<sup>2</sup>，而N420产量却下降至9768 ~ 9878 kg/hm<sup>2</sup>。从产量构成因子看，以两年的结果均值作以比较，两种氮肥运筹模式下株高与施氮量均呈正比（6:3:1模式

$y=0.049x+64.7, r^2=0.97$ ；4:3:3模式  $y=0.042x+75.2, r^2=0.95$ ）；有效穗数与施氮量也均呈正比（6:3:1模式  $y=0.472x+203, r^2=0.94$ ；4:3:3模式  $y=0.505x+227, r^2=0.88$ ）。从千粒重来看，两种氮肥运筹模式下规律一致，即千粒重与施氮量呈显著负相关（6:3:1模式  $y=-0.0083x+28.0, r^2=0.88$ ；4:3:3模式  $y=-0.0108x+27.5, r^2=0.93$ ）；然而对于穗粒数来说，6:3:1模式下穗粒数与氮肥用量呈正相关关系（ $y=0.069x+108, r^2=0.89$ ），4:3:3模式下穗粒数与施氮量无显著相关性，穗粒数呈现出先升高后降低的趋势，最大穗粒数出现在N260。

### 2.3 不同氮肥运筹模式下产量与施氮量的关系

从图3看出，该肥效方程符合线性加平台的分

表1 氮肥施用对水稻产量及其构成因子的影响

运筹模式	处理	株高 (cm)	有效穗 (万个/hm <sup>2</sup> )	穗粒数 (个/穗)	千粒重 (g)	籽粒产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	秸秆产量 (kg/hm <sup>2</sup> )
6:3:1 (2018年)	N0	65.1 ± 3.2d	220 ± 10e	101 ± 5c	27.3 ± 1.2a	6380 ± 333d	4167 ± 221e
	N160	71.8 ± 2.5c	245 ± 11d	118 ± 6b	26.9 ± 1.1a	9732 ± 319c	6052 ± 323d
	N210	76.4 ± 3.0bc	290 ± 13c	125 ± 5b	26.5 ± 1.1ab	10102 ± 401c	6308 ± 356cd
	N260	80.2 ± 2.8ab	332 ± 14b	126 ± 5b	26.6 ± 1.1ab	10678 ± 455bc	6782 ± 368bc
	N315	82.3 ± 3.6ab	371 ± 16ab	126 ± 4ab	25.2 ± 1.0bc	11420 ± 586ab	7200 ± 402b
	N420	84.3 ± 1.7a	401 ± 16a	134 ± 4a	23.8 ± 1.1c	11786 ± 546a	8253 ± 455a
6:3:1 (2019年)	N0	62.9 ± 2.7d	212 ± 12e	109 ± 6c	27.7 ± 1.2a	6120 ± 423e	3909 ± 455e
	N160	72.6 ± 2.6c	251 ± 13d	124 ± 6b	27.3 ± 1.1a	9098 ± 330d	5366 ± 325d
	N210	74.2 ± 2.0bc	302 ± 15c	131 ± 4a	26.5 ± 1.1ab	10088 ± 456c	6100 ± 481cd
	N260	78.0 ± 3.0ab	338 ± 16ab	130 ± 5a	26.0 ± 1.2ab	10464 ± 515bc	6610 ± 375bc
	N315	80.7 ± 1.4a	367 ± 15a	126 ± 7ab	25.6 ± 1.0bc	11328 ± 476ab	7154 ± 436b
	N420	82.9 ± 2.7a	391 ± 13a	138 ± 6a	24.2 ± 1.0c	11606 ± 538a	8139 ± 480a
4:3:3 (2020年)	N0	73.5 ± 3.5d	225 ± 11d	120 ± 6c	27.0 ± 1.3a	6238 ± 385c	4289 ± 206d
	N160	80.3 ± 3.9c	263 ± 14c	123 ± 7b	26.1 ± 1.2a	9152 ± 316b	5986 ± 314c
	N210	85.3 ± 2.1b	346 ± 15b	138 ± 6c	25.6 ± 1.0bc	10100 ± 546a	7300 ± 357b
	N260	87.2 ± 3.2ab	389 ± 13a	150 ± 6a	24.2 ± 1.0c	10345 ± 512a	7658 ± 403ab
	N315	87.6 ± 3.1ab	398 ± 17a	140 ± 7b	24.3 ± 1.0c	10390 ± 612a	8259 ± 498a
	N420	91.4 ± 2.5a	410 ± 15a	124 ± 6c	22.8 ± 1.0d	9768 ± 588a	8396 ± 465a
4:3:3 (2021年)	N0	75.1 ± 3.1c	235 ± 11d	122 ± 5c	27.2 ± 1.2a	6482 ± 308c	4461 ± 306d
	N160	82.1 ± 3.2b	275 ± 13c	127 ± 6c	26.5 ± 1.1a	9354 ± 345b	6114 ± 456c
	N210	87.1 ± 3.1a	340 ± 15b	142 ± 6b	25.8 ± 1.2ab	10130 ± 449a	7316 ± 446b
	N260	87.6 ± 2.1a	393 ± 17a	154 ± 5a	24.4 ± 1.0b	10059 ± 496a	7856 ± 336ab
	N315	88.2 ± 3.0a	406 ± 14a	144 ± 6ab	24.3 ± 1.4b	10234 ± 555a	8447 ± 399a
	N420	92.0 ± 2.5a	424 ± 18a	120 ± 6c	22.6 ± 1.2c	9878 ± 487a	8548 ± 498a

注：不同字母表示处理间5%水平存在显著性差异。

段函数,即在低氮端符合简单线性正相关,在中高氮端符合产量恒定的函数关系。模型预测得出6:3:1模式(图3a)的最佳施氮量(EONR)为316 kg/hm<sup>2</sup>(300~332 kg/hm<sup>2</sup>),4:3:3模式(图3b)的EONR

为216 kg/hm<sup>2</sup>(210~235 kg/hm<sup>2</sup>),6:3:1模式的EONR比4:3:3模式高出46%。超过EONR后肥料对产量的贡献呈报酬递减趋势,氮素利用效率与收获指数率显著下降。

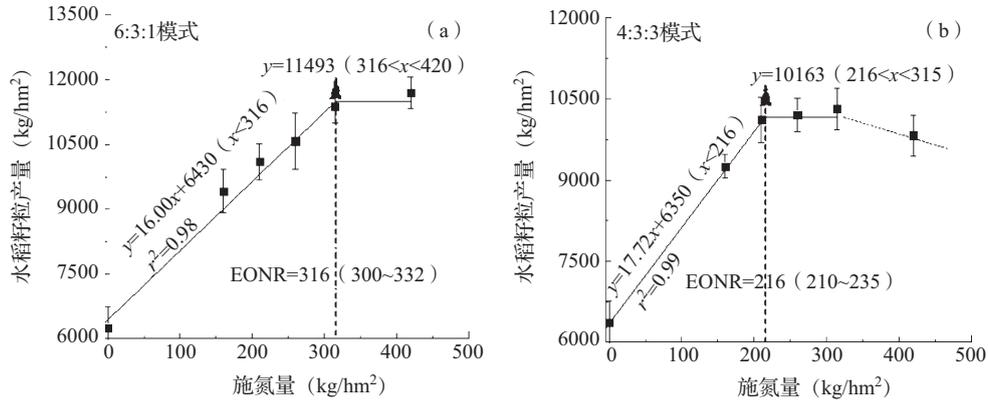


图3 不同氮肥运筹模式下最佳施氮量比较

注:6:3:1模式数值为2018—2019两年数据均值,4:3:3模式数值为2020—2021两年数据均值。EONR为最佳施氮量。

#### 2.4 氮肥施用对氮素利用率的影响

从表2得知,随施氮量增加籽粒与秸秆含氮量逐渐增加,植株的氮累积量与施氮量呈显著正相关(6:3:1模式 $y=0.335x+81.5$ , $r^2=0.99$ ;4:3:3模式 $y=0.378x+96.9$ , $r^2=0.99$ )。当N420时,6:3:1模式与4:3:3模式的氮累积量达最大值,分别为229与251 kg/hm<sup>2</sup>。从氮素利用率来看,4:3:3模式的氮素利用率整体上高于6:3:1模式,4:3:3

模式与6:3:1模式最高氮素利用率分别为40.8%(N210)与34.2%(N420)。4:3:3模式与6:3:1模式氮素农学效率、氮素收获指数最高的处理均为N160,分别为18.1 kg/kg、0.75与19.8 kg/kg、0.79。以产量稳定为前提,综合考虑氮素利用率、氮素农学效率、氮素收获指数几个因子,6:3:1模式适宜的氮肥区间应在N260~315 kg/hm<sup>2</sup>之间,4:3:3模式则在N210~260 kg/hm<sup>2</sup>之间。

表2 氮肥施用对水稻植株氮素累积及利用率的影响

运筹模式	处理	氮素含量(%)		氮累积量(kg/hm <sup>2</sup> )		植株氮累积量(kg/hm <sup>2</sup> )	氮素利用率(%)	氮素农学效率(kg/kg)	氮素收获指数
		籽粒	秸秆	籽粒	秸秆				
6:3:1	N0	1.04c	0.50c	65.0d	20.2d	85.2e	—	—	0.76b
	N160	1.14b	0.51c	107.0c	29.1c	136.0d	31.8b	19.8a	0.79a
	N210	1.14b	0.53c	115.2c	32.9c	148.0c	29.9b	18.3b	0.78a
	N260	1.17b	0.61b	124.3c	40.8b	165.0b	30.7b	16.6c	0.75b
	N315	1.25ab	0.57b	142.4b	40.9b	183.0b	31.0b	16.3c	0.78a
	N420	1.41a	0.78a	165.3a	63.9a	229.0a	34.2a	13.0d	0.72c
4:3:3	N0	1.08c	0.58c	68.7d	25.4e	94.1e	—	—	0.73ab
	N160	1.26b	0.66b	117.2c	39.9cd	157.0d	39.0b	18.1a	0.75a
	N210	1.30b	0.66b	131.0b	48.2c	180.0c	40.8a	17.9a	0.73ab
	N260	1.35ab	0.75bc	137.9ab	58.2bc	196.0bc	39.2b	14.8b	0.70bc
	N315	1.43a	0.86b	146.7a	71.8b	219.0b	39.7ab	12.5b	0.67c
	N420	1.48a	1.25a	145.3a	106a	251.0a	37.4c	8.3c	0.58d

注:6:3:1模式数值为2018—2019两年数据均值,4:3:3模式数值为2020—2021两年数据均值,不同字母表示处理间5%水平存在显著性差异。

## 2.5 施氮量对稻米品质的影响

从图4可以看出,随着施氮量的增加,蛋白质含量显著增加,6:3:1模式蛋白质含量从6.18%增加到8.39%,4:3:3模式从6.50%增加到8.45%。两种氮肥运筹模式直链淀粉含量逐渐下降,米饭的硬度逐渐增加,黏度逐渐下降,米饭的食味值显著下降。米饭的硬度与蛋白质含量呈极显著的正相关关系(6:3:1模式 $y=0.650x+2.37$ , $r^2=0.95$ ;4:3:3模式 $y=0.879x+0.577$ , $r^2=0.95$ ),米饭的食味值与硬度呈显著的负相关关系(6:3:1模式 $y=-5.92x+101$ , $r^2=0.93$ ;4:3:3模式 $y=-9.87x+$

126, $r^2=0.99$ ),米饭的食味值与直链淀粉含量呈显著正相关关系(6:3:1模式 $y=5.124x-41.4$ , $r^2=0.89$ ;4:3:3模式 $y=7.699x-93.5$ , $r^2=0.94$ )。由于6:3:1模式与4:3:3模式适宜氮肥用量分别在300~332与210~235 $\text{kg}/\text{hm}^2$ 之间,当低于此氮肥区间稻米食味品质无显著变化,高于此区间食味品质急剧降低,介于此氮肥区间的食味品质处于中等偏上水平。因此,在合理的氮肥运筹模型下(4:3:3),辽河三角洲盐碱稻区氮肥适宜用量为210~235 $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,此施氮量可保证该地区水稻高产、营养与食味品质较优。

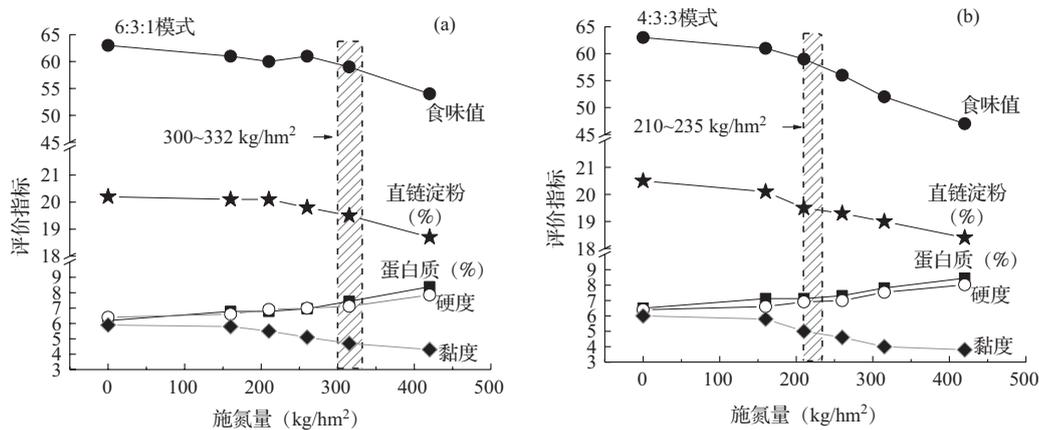


图4 氮肥用量与稻米品质的关系

## 3 讨论

## 3.1 施氮方式对产量与氮素利用率的影响

施氮不足会导致有效分蘖降低、穗数减少、产量降低;过量施氮会导致营养体徒长、分蘖期延长、籽粒贪青晚熟、产量降低。然而,当目标产量一定时,产量构成因子之间存在一定的协调关系,即当施氮较多时,穗粒数较多、千粒重较低,产量形成主要依靠生殖器官数量的增加来完成;而当施氮肥较少时,穗粒数下降、千粒重增加,产量形成主要依靠生殖器官的壮大来完成,因此适量的氮肥施用可以平衡产量因子之间的协调性,促进高产。基肥的损失是导致水稻氮素利用率低的主要原因<sup>[12]</sup>,生育前期高浓度的氮肥长时间暴露在田面水和土壤中,通过淋溶、氨挥发和反硝化作用等途径快速损失<sup>[19-20]</sup>,造成无效施氮,氮素利用率下降。在辽河三角洲盐碱稻区,课题组前期研究表明,无论种植优质稻还是常规稻,施氮达到400 $\text{kg}/\text{hm}^2$ 时并未出现倒伏现象;而在辽河平原非盐碱稻区,高氮造

成的倒伏现象却比较严重,其原因可能与土壤的盐碱条件有关。本试验中氮肥主要为尿素态氮,尿素水解使土壤表面的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 含量增加<sup>[19]</sup>,盐碱土壤中富含的 $\text{OH}^-$ 与 $\text{NH}_4^+$ 反应促进了氨的形成与挥发<sup>[20]</sup>,从而造成了氮素流失。李洋洋<sup>[3]</sup>研究表明,尿素中氨挥发量与土壤pH呈正相关,施氮量相同时,中度盐碱土氨挥发比例比轻度盐碱土高1%~5%;基肥与分蘖肥阶段氨挥发占总量的67%~80%,穗肥阶段占20%~33%,因此,在盐碱土壤条件下适当氮肥后移有利于降低氨挥发损失。

采用氮肥后移能避免前期群体徒长,促进氮素向籽粒转运,提高籽粒氮收获指数<sup>[21]</sup>。郭晓红等<sup>[13]</sup>研究了黑龙江苏打盐碱地氮肥运筹方式对水稻产量及氮素利用率的影响,发现施氮150 $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,4:3:3模式的水稻产量及氮素利用率最高。罗文姬等<sup>[22]</sup>研究表明,与6:3:1模式和5:3:2模式相比,4:3:3模式水稻产量及氮素积累量更高。段小丽等<sup>[12]</sup>研究表明,与全部基肥相比,4:3:3模式与2:3:5模式的田面水总氮浓度分别降低了

2.90%与15.5%，而4:3:3模式水稻产量最高。王艳等<sup>[23]</sup>在施氮量为225 kg/hm<sup>2</sup>的前提下，设置基: 蘖: 穗分别为3.6:2.4:4和4.8:3.2:2两种比例，发现最佳组合为前者，显著提高氮素利用率及产量。综上所述，基于水稻氮素需求规律，适当调节氮肥后移，基肥占比控制在总氮50%以内，穗肥占比宜控制在总氮30%之内，有助于水稻高产、氮肥高效。

### 3.2 适宜氮肥用量推算

关于适宜氮肥用量推荐方法的研究已有很多<sup>[24-25]</sup>。巨晓棠<sup>[24]</sup>指出，2009—2012年中国主要水稻高产农作区的适宜氮肥投入阈值为192~211 kg/hm<sup>2</sup>，本研究得出辽河三角洲稻区适宜氮肥用量应为210~235 kg/hm<sup>2</sup>，略高于全国平均水平以及东北其他水稻产区（如三江平原与松嫩平原）氮肥常规用量<sup>[6]</sup>，主要由于该地区位于东北平原的最南端，光热条件较好，水稻产量较高，对氮肥养分需求较大。然而，与当地农民习惯施氮相比（270~300 kg/hm<sup>2</sup>）<sup>[7]</sup>，本研究推荐用量显著降低了50~80 kg/hm<sup>2</sup>的氮肥投入，比当地农民氮肥利用率（28.4%~32.1%）提高了10%左右<sup>[8]</sup>。

### 3.3 施氮量与稻米品质的关系

近年来关于氮肥用量与稻米品质相关性的研究逐渐增多<sup>[26-29]</sup>，表现为施氮越多品质越差。

Zhao等<sup>[26]</sup>研究了辽河三角洲养蟹稻田不同氮肥施用方式对稻米产量及品质的影响，发现施氮量为210 kg/hm<sup>2</sup>时，稻米的产量稳定、食味品质最佳。李浩<sup>[27]</sup>也研究了辽河三角洲稻区施肥量对水稻产量及品质的影响，并得出了一致的结论，即施氮量为210 kg/hm<sup>2</sup>时稻米的产量稳定和品质较优。Liang等<sup>[28]</sup>进一步研究了辽河三角洲稻区不同施氮量对水稻产量和品质的影响，发现随施氮量的增加稻米食味值逐渐下降，当施氮量≤160 kg/hm<sup>2</sup>时，稻米食味值最高。以上研究结果都与本研究结果相似。然而兼顾到产量与品质双重指标时，辽河三角洲稻区的合理施氮量应处于210~235 kg/hm<sup>2</sup>范围内。此外，彭显龙等<sup>[29]</sup>指出，当稻米蛋白质含量超过8%时，适口性较差，本研究中两种氮肥运筹模式下，只有N420稻米蛋白质含量超过了8%，而此氮肥处理下稻米食味值呈现急速下降，说明过度施氮严重影响了稻米的食味品质。辽宁地区稻米品质区域差异较大<sup>[30]</sup>，在外观品质上，辽河三角洲稻区垩白度高于其他稻区；在营养品质上，辽河三角洲稻区蛋白质含量高于其他稻区，直链淀粉含量低于其他稻区；在食味品质上，辽

河三角洲稻区处于中等水平。尽管该地区稻米垩白度较高、蛋白质含量较高，但土壤盐渍化水平增加了稻米阳离子的含量与韧性<sup>[31]</sup>，稻米口感却处于中等偏上水平。今后辽河三角洲种稻应该适当减少氮肥用量，降低蛋白质含量，增加稻米适口性。同时，培育适合该地区的优质水稻品种，针对性科学施肥，进而满足人民日益增长的对优质稻米的迫切需求，是今后该地区水稻产业绿色发展的方向。

## 4 结论

水稻茎蘖数与施氮量呈显著正相关，6:3:1氮肥运筹模式下，氮肥用量对群体分蘖动态影响较大；而对于4:3:3模式而言，在中低氮处理下氮肥用量对群体分蘖动态影响较大，在高氮处理下影响较小。通过肥料效应函数拟合得到4:3:3模式与6:3:1模式下的最佳施氮量分别为210~235与300~332 kg/hm<sup>2</sup>，4:3:3模式有效节约了氮肥用量、提高了氮肥利用率。通过对稻米营养与食味品质两项指标的研究，再次明确了施氮区间为210~235 kg/hm<sup>2</sup>时，两项品质处于较优水平。综上所述，辽河三角洲滨海盐碱稻区的适宜氮肥用量为210~235 kg/hm<sup>2</sup>，最宜采用的氮肥运筹策略为基: 蘖: 穗为4:3:3。

## 参考文献:

- [1] 王春裕. 中国东北盐渍土 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 黄立华, 沈娟, 冯国忠, 等. 不同氮磷钾肥配施对盐碱地水稻产量性状和吸肥规律的影响 [J]. 农业现代化研究, 2010, 31 (2): 216-219.
- [3] 李洋洋. 苏打盐碱地稻田氨挥发及氮素利用效率研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2017.
- [4] 宫亮, 金丹丹, 牛世伟, 等. 辽宁省水稻主产区化肥减施潜力分析 [J]. 中国农业科学, 2021, 54 (9): 1926-1936.
- [5] 马波, 来永才, 王俊河, 等. 施氮量、种植密度对寒地盐碱条件下水稻产量及干物质积累的互作效应 [J]. 中国稻米, 2022, 28 (6): 89-93.
- [6] 尹映华, 彭晓宗, 翟丽梅, 等. 东北黑土水稻主产区氮肥减施潜力研究 [J]. 地理学报, 2022, 77 (7): 1650-1661.
- [7] 李波, 宫亮, 曲航, 等. 辽河三角洲稻区两种合理氮肥推荐值的方法研究 [J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37 (2): 179-185.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 彭晓宗. 东北单季稻区氮肥施用特征与减施潜力研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [11] 任万军. 杂交稻高产高效施氮研究进展与展望 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (6): 1505-1503.

- [12] 段小丽, 张富林, 倪承凡, 等. 前氮后移对水稻产量形成和田面水氮素动态变化的影响 [J]. 水土保持学报, 2020, 34 (1): 255–261.
- [13] 郭晓红, 姜红芳, 兰宇辰, 等. 氮肥运筹对苏打盐碱地水稻产量和氮肥利用率的影响 [J]. 核农学报, 2020, 34 (8): 1796–1804.
- [14] Liang H L, Gao S Y, Ma J X, et al. Effect of nitrogen application rates on the nitrogen utilization, yield and quality of rice [J]. Food and Nutrition Sciences, 2021, 12: 13–27.
- [15] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 等. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (3): 763–772.
- [16] 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.
- [17] 袁锐. 施氮量对水稻产量和强、弱勢粒氨基酸含量与组分的影响 [D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [18] Champagne E T, Richard O A, Bett K, et al. Quality evaluation of US medium-grain rice using a Japanese taste analyzer [J]. Cereal Chemistry, 1996, 73: 290–294.
- [19] Sommer S G, Schjoerring J K, Denmead O T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops [J]. Advances in Agronomy, 2004, 82: 557–622.
- [20] Mandal S, Thangarajan R, Bolan N S, et al. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat [J]. Chemosphere, 2016, 142: 120–127.
- [21] 白志刚. 氮肥运筹对水稻氮代谢及稻田氮肥利用率的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [22] 罗文姬, 江立庚, 覃丽玲, 等. 氮肥基追比对机插稻产量和氮肥利用效率的影响 [J]. 作物杂志, 2016(5): 119–123.
- [23] 王艳, 易军, 高继平, 等. 不同叶龄蘖、穗氮肥组合对梗稻产量及氮素利用的影响 [J]. 作物学报, 2020, 46 (1): 102–116.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Zhao W N, Liang H L, Fu Y, et al. Effects of different fertilization modes on rice yield and quality under a rice–crab culture system [J]. Plos One, 2020, 15 (3): 0230600.
- [27] 李浩. 生态种养模式氮素运筹环境下稻蟹产量品质与氮素利用研究 [J]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [28] Liang H L, Gu B Y, Wang T Y, et al. Relationship between protein structure and eating quality of rice under different nitrogen application rate [J]. Cereals & Grains Association, 2022 (3): 692–703.
- [29] 彭显龙, 匡旭, 李鹏飞, 等. 协调水稻产量和品质的植株临界氮浓度的确定 [J]. 土壤通报, 2021, 52 (1): 109–116.
- [30] 张丽娜, 易军, 本间香贵, 等. 辽宁省不同地域稻米品质比较分析 [J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52 (6): 729–735.
- [31] 滕祥勇, 李鹏志, 林秀云, 等. 碱性盐胁迫对水稻苗期矿质离子吸收与分配的影响 [J]. 东北农业科学, 2022, 47 (1): 11–16.

### Study on the optimum nitrogen application rate and nitrogen application model on rice in coastal saline-alkaline regions

LI Bo<sup>1</sup>, QU Hang<sup>1</sup>, GONG Liang<sup>1</sup>, JIN Dan-dan<sup>1</sup>, YU Guang-xing<sup>2</sup>, ZHENG Wen-jing<sup>2</sup>, SUN Wen-tao<sup>1\*</sup> (1. Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang Liaoning 110161; 2. Liaoning Rice Research Institute, Shenyang Liaoning 110101)

**Abstract:** Field experiments in the coastal saline-alkaline rice area of the Liaohe River Delta were implemented to investigate the effects of different nitrogen fertilizer application rates (0–420 kg/hm<sup>2</sup>) and application methods (6 : 3 : 1 and 4 : 3 : 3 for basal fertilizer : tiller fertilizer : panicle fertilizer) on rice growth, as well as yield and quality. Dynamic investigations of rice tillering showed that the average number of tillers per hectare was positively correlated with nitrogen application rate under both 6 : 3 : 1 and 4 : 3 : 3 modes ( $r^2 \geq 0.90$ ), and the effect of nitrogen fertilizer on the average number of tillers was greater under the 6 : 3 : 1 mode than under the 4 : 3 : 3 mode. By analyzing the relationship between different nitrogen application rates and yield, a linear-plus-plateau fertilizer response model was fitted for both modes. The optimal nitrogen application rates (EONR) under the 6 : 3 : 1 and 4 : 3 : 3 modes were determined to be 216 kg/hm<sup>2</sup> (range: 210–235 kg/hm<sup>2</sup>) and 316 kg/hm<sup>2</sup> (range: 300–332 kg/hm<sup>2</sup>), respectively, and the EONR under the 6 : 3 : 1 mode was 46.3% higher than that under the 4 : 3 : 3 mode. By comparing nitrogen use efficiency, it was found that nitrogen use efficiency was significantly higher under the 4 : 3 : 3 mode (37.2%–40.8%) than under the 6 : 3 : 1 mode (29.9%–34.2%) for all treatments. By analyzing rice nutrition and taste quality, while considering yield, it was further confirmed that the appropriate nitrogen application rates under the 6 : 3 : 1 and 4 : 3 : 3 modes were 300–332 and 210–235 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. Considering the three indicators of rice yield, nitrogen use efficiency, and rice quality, this study recommends an appropriate nitrogen application rate of 210–235 kg/hm<sup>2</sup> and the 4 : 3 : 3 mode in the coastal saline-alkali rice area of the Liaohe River Delta. These results provide practical technical guidance for rational fertilization and efficient use of nitrogen fertilizer for Liaohe River Delta, which can be helpful for green development of the rice industry in the region.

**Key words:** rice; coastal saline-alkaline region; yield and quality; the optimum nitrogen application rate; nitrogen application model