

氮肥水平与栽植密度对植稻土壤养分含量变化与氮肥利用效率的影响

李思平 曾路生* 吴立鹏 张玉晓 解军蕊 丁效东*

(青岛农业大学 资源与环境学院, 山东 青岛 266109; *通信联系人, E-mail: zenglsh@163.com; xiaodongding2004@163.com)

Effects of Nitrogen Fertilizer Level and Planting Density on Changes in Soil Nutrient contents and Nitrogen Use Efficiency in Rice

LI Siping, ZENG Lusheng*, WU Lipeng, ZHANG Yuxiao, XIE Junrui, DING Xiaodong*

(College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; *Corresponding author, E-mail: zenglsh@163.com; xiaodongding2004@163.com)

Abstract: 【Objective】In order to improve soil fertility, rice grain yield, and nitrogen fertilizer utilization efficiency, 【Method】a two-factor field experiment (nitrogen fertilizer level and planting density) was carried out in paddy fields in Rencheng District, Jining City, Shandong Province. The nitrogen application rates were as follows: zero nitrogen (N_1), 0 kg/hm²; low nitrogen (N_2), 216 kg/hm²; medium nitrogen (N_3), 288 kg/hm²; and high nitrogen (N_4), 360 kg/hm², coupling with three planting densities including low density(D_1 , 240 000 hill/hm²), medium density(D_2 , 270 000 hill/hm²) and high density(D_3 , 300 000 hill/hm²). The soil nutrient contents and nitrogen use efficiency were measured in mature stage under different nitrogen fertilizer levels and planting densities. 【Result】The contents of nitrogen, phosphorus, potassium and organic matter decreased significantly with the deepening soil layer. Among them, the content of alkali nitrogen in D_3N_4 treatment decreased by 60.8%, and the content of available phosphorus in D_3N_3 treatment decreased by 72.7%. With the increase of nitrogen application rate, the soil pH and organic matter content decreased, and the available potassium content increased, the partial productivity of fertilizer and nitrogen fertilizer agricultural utilization efficiency decreased, and yield increased first and then decreased. With the increase of planting density, the soil pH and available phosphorus decreased, the alkali nitrogen content of surface soil increased slightly, and the organic matter content, yield and fertilizer partial productivity increased first and then decreased, and the nitrogen agricultural utilization efficiency decreased. 【Conclusion】Under D_2N_3 , the rice yield was the highest, reaching 14 615.3 kg/hm². At the same density, the nitrogen fertilizer level of N_2 help give rise to higher rice yield, nitrogen fertilizer agricultural utilization efficiency and fertilizer partial productivity. The research results can be referenced in actual production.

Keywords: application level of nitrogen fertilizer; planting density; rice; soil nutrient; yield; fertilizer use efficiency

摘要: 【目的】为解决水稻土壤保肥能力较弱, 水稻产量较低, 氮肥利用效率不高等问题, 【方法】于山东省济宁市任城区水稻田设置氮肥水平与栽植密度双因素大田试验, 设 4 个施氮量水平, 即无氮(N_1 , 0 kg/hm²)、低氮(N_2 , 216 kg/hm²)、中氮(N_3 , 288 kg/hm²)和高氮(N_4 , 360 kg/hm²); 栽植密度设 3 个梯度, 即低密度(24 万穴/hm²)、中密度(27 万穴/hm²)和高密度(30 万穴/hm²)。以探究不同氮肥水平和栽植密度下水稻成熟期土壤养分含量及氮肥利用效率的变化。【结果】随着土层加深, 氮、磷、钾、有机质含量均明显下降。其中 D_3N_4 处理碱解氮含量下降了 60.8%, D_3N_3 处理速效磷含量降低了 72.7%。随着施氮量增加, 土壤 pH 值和有机质含量有所下降, 速效钾含量升高, 肥料偏生产力与氮肥农学利用效率降低, 产量先升高后降低; 随着栽植密度增加, 土壤 pH 值与速效磷含量有所下降, 表层土壤碱解氮含量略有升高, 有机质含量与产量及肥料偏生产力均先升高后降低, 氮肥农学利用效率降低。【结论】当栽植密度为 27 万穴/hm²时, 氮肥用量 288 kg/hm², 水稻产量最高, 为 14 615.3 kg/hm²; 相同密度下氮肥按照 216 kg/hm²施用, 水稻产量、氮肥农学效率和肥料偏生产力均较高。研究结果可在实际生产

收稿日期: 2019-04-12; 修改稿收到日期: 2019-11-04。

基金项目: 山东省现代农业产业体系水稻创新团队栽培建设项目(SDAIT-17-05); 国家重点研发计划资助项目(2018YFD0200204-06)。

中参考应用。

关键词: 氮肥施用量; 栽植密度; 水稻; 土壤养分; 产量; 肥料利用效率

中图分类号: S143.1; S511.062

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2020)01-0069-11

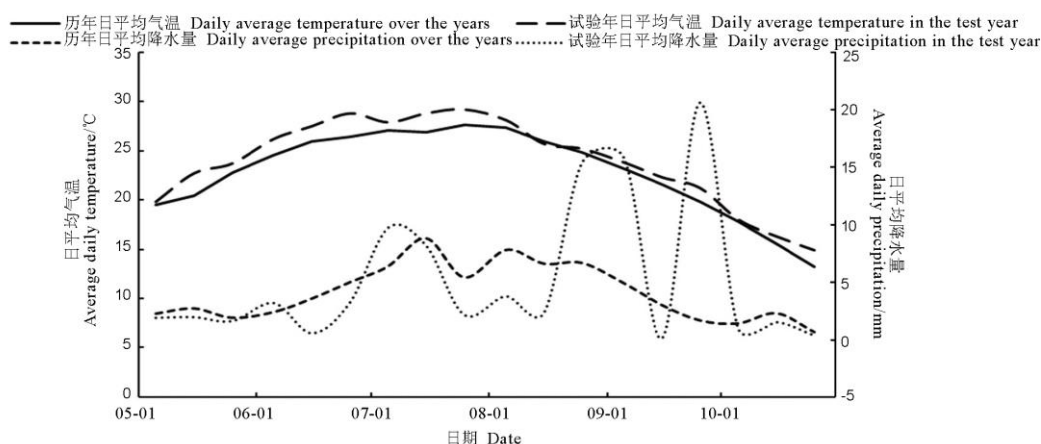
我国是世界上人口最多的国家,全国有 65% 的人口以稻米为主食。水稻作为我国最主要粮食作物,总产量占全国粮食产量的 50%,对我国的粮食安全起着至关重要的作用^[1-2]。在水稻栽培生产过程中,氮肥用量与栽植密度均为影响水稻生长发育的关键因素^[3]。20 世纪 80 年代以来,大量的氮肥投入显著提高了我国的水稻产量。但是,当氮肥供应量超过作物生长需求时,产量的限制因子已不再是氮素^[4]。目前水稻生产中仍以增施氮肥作为提高产量的主要手段,盲目过量施氮不仅降低了氮肥增产效率和肥料利用率,还会造成环境污染和生态破坏^[5]。所以,合理的氮肥施用量和运筹模式尤为重要。另外,控制水稻栽植密度也是提高产量的重要手段之一。相关研究表明,水稻稀植能够促进分蘖,发挥个体优势,提高单株生产力^[6-7]。但从农业生产的角度来看,水稻高产需要发挥群体结构优势,栽植密度过稀,会导致基本苗数不足,不利于光能与地力的充分利用^[8-10]。王成瑗等^[11]认为稀植栽培适合育苗,而合理密植栽培才是稳产的栽培手段。大量研究表明,只有合理的氮肥用量和栽植密度才能保证水稻在正常生长发育的基础上,改善生长环境,调整群体结构,从而提高氮肥利用率,增加产量^[12-14]。关于氮肥运筹对水稻根际土壤养分和氮肥利用率的影响,前人已有较多研究。陈军等^[15]研究表明,适当地前氮后移能显著增加水稻产量,增加水稻生

育后期的土壤速效养分,降低土壤 pH 值。张玉等^[16]研究认为,在水稻各需肥高峰期分次施用氮肥,能明显改善免耕水稻的根际环境,有助于提高肥料利用率,显著提高水稻生育后期根际土壤有机质、碱解氮含量。而氮肥与栽植密度相互作用下的土壤养分变化和水稻的氮肥利用率则需进一步探索。山东稻区土壤保肥能力较弱,水稻产量较低,氮肥利用效率不高。本研究通过研究不同氮肥水平和栽植密度下水稻成熟期土壤养分含量及氮肥利用效率的变化,结合水稻需肥规律,以期寻求水稻氮肥用量与栽植密度的最佳组合,为实现山东水稻的高产优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在山东济宁任城水稻试验田进行,土壤类型为肥力中等的砂姜黑土。试验前 0—20 cm 土层土壤基本理化性质为 pH 8.1,有机质 11.7 g/kg,全氮 1.19 g/kg,全磷 0.85 g/kg,全钾 1.31 g/kg,速效磷 24.6 mg/kg,速效钾 212.0 mg/kg。试验对象为第二季水稻,品种为圣稻 18,于 2017 年 6 月 17 日插秧,10 月 15 日收割。供试肥料包括尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 16%)、氯化钾(含 K_2O 60%)和硫酸锌($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)。



图中数据来自中国气象数据网地面气象资料。

The data in the figure are from China Meteorological Data Network.

图 1 山东济宁稻区水稻生育期日平均气温与日平均降水量变化趋势

Fig. 1. Trends of daily average temperature and daily average precipitation during rice growth period in Jining rice region of Shandong Province.

表 1 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层 pH 值的影响

Table 1. Effect of nitrogen fertilizer level and planting density on pH of different soil layers in rice maturity.

| 处理 Treatment | 土层深度 Soil layer | | 均值 Average value | 变异系数 Coefficient of variation |
|-------------------------------|-----------------|--------------|---------------------|----------------------------------|
| | 0—20 cm | 20—40 cm | | |
| D ₁ N ₁ | 7.72±0.06 b | 7.87±0.02 c | 7.80 | 0.014 |
| D ₁ N ₂ | 7.69±0.01 bc | 7.75±0.01 e | 7.72 | 0.005 |
| D ₁ N ₃ | 7.87±0.06 a | 7.99±0.09 ab | 7.93 | 0.011 |
| D ₁ N ₄ | 7.91±0.05 a | 8.03±0.02 a | 7.97 | 0.011 |
| D ₂ N ₁ | 7.69±0.01 bc | 7.98±0.02 ab | 7.84 | 0.026 |
| D ₂ N ₂ | 7.65±0.04 bcd | 7.80±0.02 de | 7.73 | 0.014 |
| D ₂ N ₃ | 7.63±0.05 cd | 7.74±0.06 e | 7.69 | 0.010 |
| D ₂ N ₄ | 7.59±0.01 de | 7.66±0.07 f | 7.63 | 0.006 |
| D ₃ N ₁ | 7.69±0.03 bc | 7.94±0.02 b | 7.82 | 0.023 |
| D ₃ N ₂ | 7.71±0.03 b | 7.84±0.01 cd | 7.78 | 0.012 |
| D ₃ N ₃ | 7.54±0.06 ef | 7.82±0.03 cd | 7.68 | 0.026 |
| D ₃ N ₄ | 7.51±0.01 f | 7.99±0.03 ab | 7.75 | 0.044 |
| 氮肥水平 Nitrogen level(N) | * | *** | | |
| 栽植密度 Planting density(D) | *** | *** | | |
| N×D | *** | *** | | |

N₁—氮肥用量 0kg/hm²; N₂—氮肥用量 216kg/hm²; N₃—氮肥用量 288kg/hm²; N₄—氮肥用量 360kg/hm²; D₁—栽插密度 24 万穴/hm²; D₂—栽插密度 27 万穴/hm²; D₃—栽插密度 30 万穴/hm²。每行数据后不同小写字母表示各处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著; *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$ 。下表同。

N₁, Zero nitrogen, 0kg/hm²; N₂, Low nitrogen application level, 216 kg/hm²; N₃, Medium nitrogen level, 288 kg/hm²; N₄, High nitrogen level, 360 kg/hm²; D₁, Planting density of 24000 hill/hm²; D₂, Planting density of 27000 hill/hm²; D₃, Planting density of 30000 hill/hm². Different lowercase letters in each line indicate significant difference at $P<0.05$ level; *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$. The same as in tables and figures below.

1.2 试验设计

试验设施氮量与栽植密度双因素处理, 施氮量(折合纯氮)设 4 个水平: 无氮(N₁), 0 kg/hm²; 低氮(N₂), 216 kg/hm²; 中氮(N₃), 288 kg/hm²; 高氮(N₄), 360 kg/hm²。其中, 中氮(N₃)为农民常规施氮量。水稻插秧机移栽, 密度设 3 个梯度: 低密度, 24 万穴/hm²; 中密度, 27 万穴/hm²; 高密度, 30 万穴/hm²。其中, 低密度为当地常规栽培密度。共 12 个处理, 3 次重复。小区面积为 30.24 m²(3.6 m×8.4 m), 随机区组排列, 各小区之间用塑料薄膜隔开, 嵌入土层以下 40 cm, 地面以上保留 60 cm。区组之间设置 60 cm 宽的排灌沟, 排灌沟中央开挖宽度和深度各 25~30 cm 的走水沟, 全部小区实行单排单灌。氮肥分四次施用, 其中基肥、返青肥、分蘖肥、穗肥施用量各占总施氮量的 30%, 25%, 35% 和 10%。磷肥用量(折合 P₂O₅)112.5 kg/hm², 全部作基肥; 钾肥用量(折合 K₂O)112.5 kg/hm², 全部作基肥。各处理均基施硫酸锌 15 kg/hm²。水稻种植期间保持田面水位 1~6 cm, 拔节和抽穗之前各喷施一次防病虫害农药, 其他田间管理均按当地常规方法进行。

1.3 测定项目及方法

于水稻成熟期采集土壤样品, 用土钻分别采取各小区 0~20 cm、20~40 cm 两个土层的土壤样品。每小区土样多点采集, 同层土样混匀后平铺在牛皮纸上置于阴凉处自然风干、去杂, 过 1mm 筛后装袋保存。于水稻收获期每小区选择 1m² 计算水稻产

量, 带回实验室进行脱粒烘干称重。

土壤分析测定参考文献[17]; 土壤 pH 值采用 ST-2100 型 pH 计进行测定; 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定; 土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提比色法测定; 土壤速效钾采用醋酸铵—火焰光度计法测定; 土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。

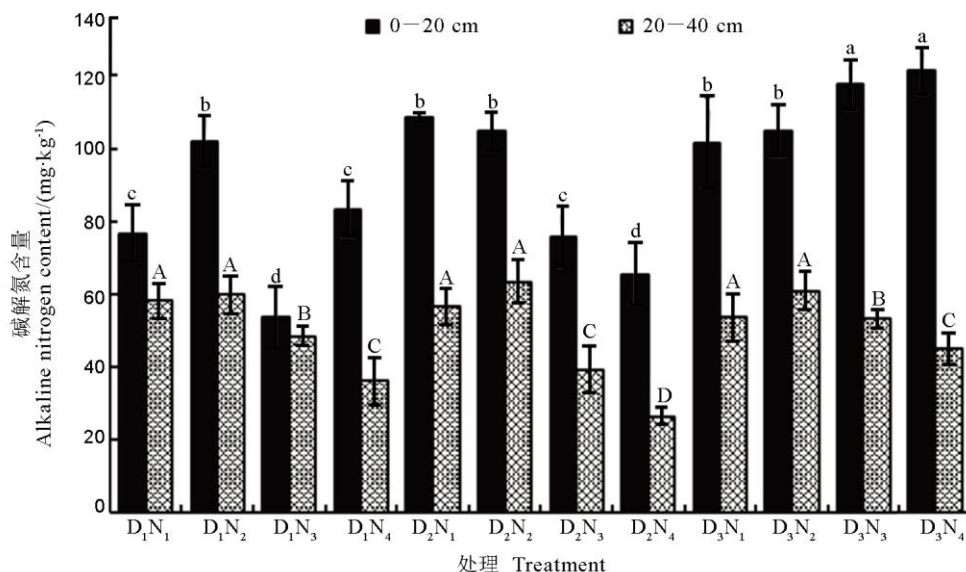
1.4 统计分析

采用 SPSS 20.0 和 Microsoft Office Excel 工作表对各指标数据进行统计分析, 并绘制图表。方差分析比较处理间的效应差异, LSD 法比较平均数之间的差异显著性, 并进行相关性分析。肥料利用率计算方法^[18]: 氮肥农学利用率(kg/kg)=(施氮处理产量—不施氮处理产量)/施氮量; 肥料偏生产力(kg/kg)=施肥后所获得的作物产量/化肥纯养分的投入量。

2 结果与分析

2.1 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层 pH 的影响

由表 1 数据可知, 分层土壤的 pH 值在 7.54~8.03 之间波动, 为微碱性土壤。随着土层加深, 各处理土壤 pH 均有所升高, 其中 D₁N₄ 处理的 20—40 cm 土层 pH 最高, 为 8.03。随着栽植密度增大, pH 有所降低, 土壤酸化程度加深, 且栽植密度对 0—20 cm 和 20—40 cm 土层 pH 的影响均呈极显著。且在低密度处理时, 施氮量的增加, 各土层 pH 有



图柱上方不同小写字母表示不同处理间 0–20 cm 土层在 $P < 0.05$ 水平上差异显著; 不同大写字母表示不同处理间 20–40 cm 土层在 $P < 0.05$ 上差异显著。图 3~4 同。

Different lowercase letters above the bars indicate significant difference between the 0–20 cm soil layers at $P < 0.05$ level, and different capital letters indicate significant difference between 20–40 cm soil layer at $P < 0.05$ level. The same as in figures below.

图 2 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层碱解氮含量的影响

Fig. 2. Effect of nitrogen fertilizer level and planting density on alkali nitrogen content in different soil layers during rice maturity.

升高的趋势, 如 0–20 cm 土壤的 D₁N₁ 处理 pH 为 7.71, 而 D₁N₄ 处理 pH 高达 7.91。但在中、高密度处理时, 随着施氮量的增加, 各处理土层 pH 有下降的趋势, 如 0–20 cm 土层的 D₃N₁ 处理 pH 为 7.69, 而 D₃N₄ 处理则低至 7.51。且氮肥水平对 0–20 cm 土层 pH 影响显著, 对 20–40 cm 土层 pH 影响极显著。另外, 在不同土层中, 氮肥水平与栽植密度的交互效应均为极显著。

2.2 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层碱解氮含量的影响

由图 2 可知, 随着土层加深, 各处理碱解氮含量均明显下降, 其中 D₃N₄ 处理碱解氮含量下降最明显, 由浅层的 114.3 mg/kg 下降至深层的 44.8 mg/kg, 下降了 60.8%。0–20 cm 土层碱解氮含量在低密度下随施氮量增多而升高; 而 20–40 cm 土层碱解氮含量均随施氮量增加先升高后降低, 且在 N₂ 水平处有峰值。随着栽植密度的增加, 0–20 cm 土层碱解氮含量略有升高趋势。由表 2 因素分析可知, 氮肥水平和栽植密度对 0–20 cm 和 20–40 cm 土层碱解氮含量的影响均极显著。另外, 不同土层中氮肥水平与栽植密度的交互效应也极显著。

2.3 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层速效磷含量的影响

由图 3 可知, 随着土层的加深, 各处理速效磷

含量均明显下降, 其中下降最大的 D₃N₃ 处理速效磷含量由表层的 92.8 mg/kg 下降至深层的 25.3 mg/kg, 降低了 72.7%。低密度下各处理的速效磷含量较高, 随着栽植密度的增加, 土壤速效磷含量呈递减趋势。且由表 2 可知, 栽植密度对 0–20 cm 和 20–40 cm 土层速效磷含量均有极显著影响。不同氮肥用量水平对各土层速效磷含量影响波动较大, 氮肥水平对 0–20 cm 土层速效磷含量无显著影响, 但 20–40 cm 土层速效磷含量在中、低密度下随施氮量的增加先升高后降低, 在高密度下先降低后升高。且氮肥水平对 20–40 cm 土层速效磷含量有极显著影响, 且在 0–20 cm 和 20–40 cm 土层中, 氮肥水平与栽植密度的交互效应也极显著。

2.4 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层速效钾含量的影响

由图 4 可知, 随土层加深各处理速效钾含量均明显降低, 其中下降最大的 D₁N₂ 处理由表层的 166.2 mg/kg 下降至深层的 88.9 mg/kg, 降低了 46.5%。无氮(N₁)和低氮(N₂)条件下, 土壤速效钾含量随栽植密度升高有降低趋势, 而中氮(N₃)和高氮(N₄)条件下, 土壤速效钾含量随栽植密度升高有升高趋势。且 0–20 cm 与 20–40 cm 土层的速效钾含量变化趋势基本一致。由表 2 可知, 氮肥水平和栽植密度对 0–20 cm 和 20–40 cm 土层速效钾含

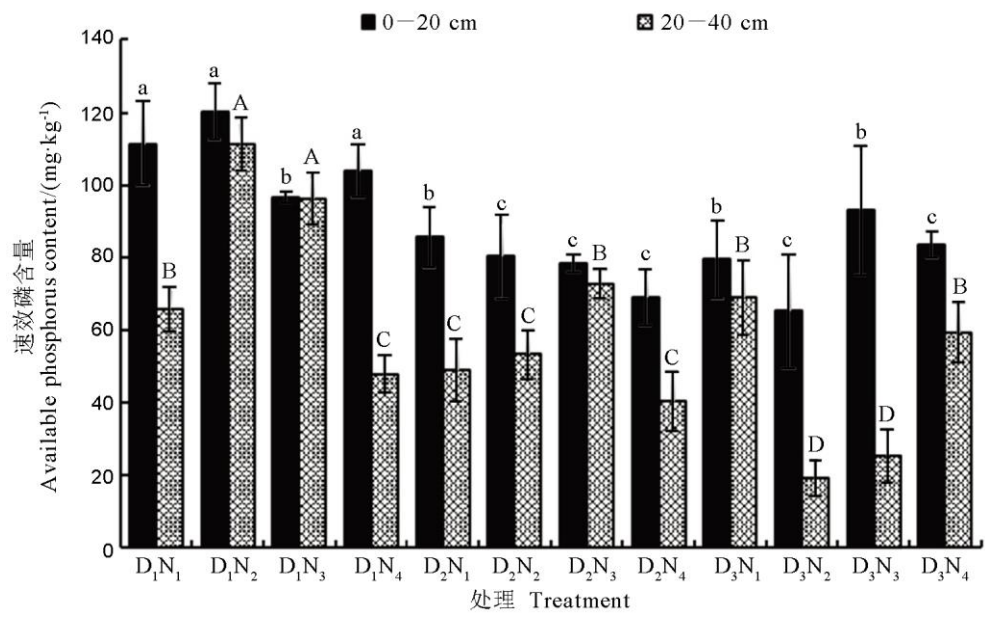


图 3 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层速效磷含量的影响

Fig. 3. Effect of nitrogen fertilizer level and planting density on available phosphorus content in different soil layers during rice maturity.

表 2 氮肥水平与栽植密度对水稻土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量的影响因素分析

Table 2. Effects of nitrogen fertilizer level and planting density on the contents of alkali nitrogen, available phosphorus and available potassium in rice soil.

| 因素分析 Factor analysis | 碱解氮 Alkaline nitrogen | | 速效磷 Available phosphorus | | 速效钾 Available potassium | |
|-------------------------|-----------------------|----------|--------------------------|----------|-------------------------|----------|
| | 0—20 cm | 20—40 cm | 0—20 cm | 20—40 cm | 0—20 cm | 20—40 cm |
| 氮肥水平 Nitrogen level | *** | *** | NS | *** | *** | *** |
| 栽植密度 Density | *** | ** | *** | *** | *** | *** |
| N×D | *** | ** | ** | *** | *** | *** |

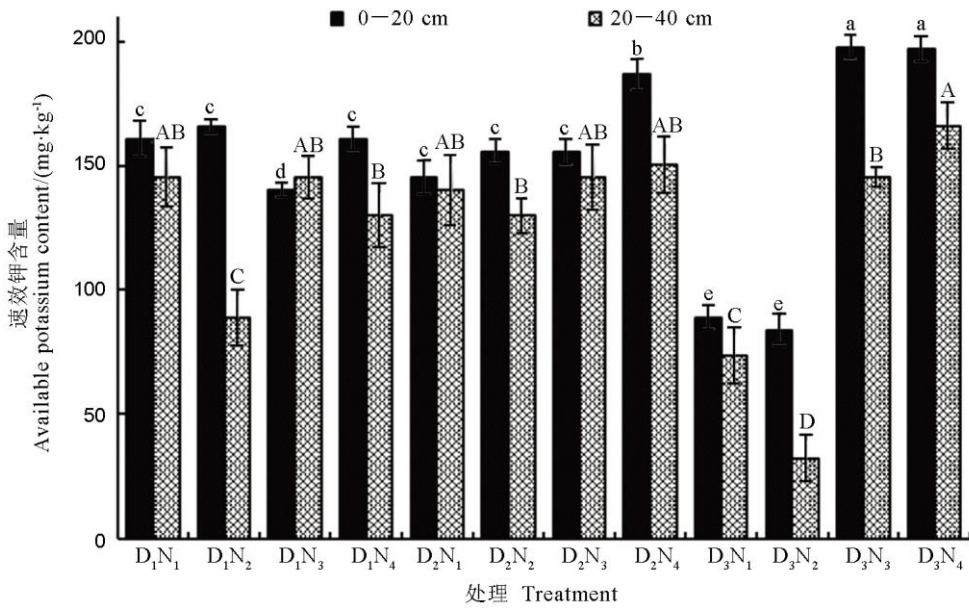


图 4 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层速效钾含量的影响

Fig. 4. Effect of nitrogen fertilizer level and planting density on available potassium content in different soil layers during rice maturity.

表3 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层有机质含量的影响

Table 3. Effect of nitrogen fertilizer level and planting density on organic matter content in different soil layers during rice maturity.

| 处理 Treatment | 土壤层次 Soil level | | 均值 Average value | 变异系数 Coefficient of variation |
|-------------------------------|-----------------|--------------|---------------------|----------------------------------|
| | 0—20 cm | 20—40 cm | | |
| D ₁ N ₁ | 25.1±1.2 ab | 14.7±0.3 de | 19.9 | 0.37 |
| D ₁ N ₂ | 20.8±2.7 d | 18.8±1.1 ab | 19.8 | 0.07 |
| D ₁ N ₃ | 21.2±0.6 cd | 12.7±1.6 e | 17.0 | 0.35 |
| D ₁ N ₄ | 25.7±0.9 a | 16.0±2.0 cd | 20.9 | 0.33 |
| D ₂ N ₁ | 22.4±0.5 bcd | 19.6±0.7 a | 21.0 | 0.09 |
| D ₂ N ₂ | 25.0±2.8 ab | 17.3±1.0 abc | 21.2 | 0.26 |
| D ₂ N ₃ | 23.7±0.5 abc | 17.9±1.8 abc | 20.8 | 0.20 |
| D ₂ N ₄ | 24.1±0.7 ab | 19.0±1.6 ab | 21.6 | 0.17 |
| D ₃ N ₁ | 23.2±0.5 bc | 16.7±0.4 bcd | 20.0 | 0.23 |
| D ₃ N ₂ | 24.8±1.9 ab | 16.2±0.5 cd | 20.5 | 0.30 |
| D ₃ N ₃ | 22.6±2.7 bcd | 16.8±1.9 bcd | 19.7 | 0.21 |
| D ₃ N ₄ | 22.9±0.3 bc | 12.9±2.3 e | 17.9 | 0.40 |
| 氮肥水平 Nitrogen level(N) | * | *** | | |
| 栽植密度 Planting density(D) | NS | * | | |
| N×D | ** | *** | | |

量影响极显著。另外,各土层氮肥水平与栽植密度的交互效应也极显著。

2.5 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层有机质含量的影响

由表3数据可知,且随着土层加深,各处理有机质含量均明显下降,其中D₂N₄处理的0—20 cm土壤有机质含量为25.7 g/kg,20—40 cm土壤有机质含量为16.0 g/kg,下降了37.7%。栽植密度对0—20 cm土层有机质含量无显著影响,而对20—40 cm土层有机质含量影响显著。且氮肥水平对0—20 cm土层pH影响显著,对20—40 cm土层pH影响极显著。另外,在不同土层中,氮肥水平与栽植密度的交互效应均为极显著。分析各处理0—40 cm土层有机质含量的均值可以看出,中密度栽植下水稻土壤有机质含量较高;随施氮量增加,中、低密度土壤有机质含量呈先减少后增加的趋势,而高密度下,有机质含量随施氮量增加而降低。

2.6 氮肥水平与栽植密度对水稻产量及肥料利用效率的影响

由表4可知,氮肥用量与栽植密度互作对水稻产量有显著影响。D₂N₃处理的产量最高,可达14 615.3 kg/hm²,对比常规处理D₁N₃,产量提高了18.5%;其次是D₂N₂,产量为14 366.2 kg/hm²。D₃N₁处理产量最低,仅有8 221.1 kg/hm²。从氮肥水平来看,288 kg/hm²的氮肥用量为最佳。从栽植密度看,27万穴/hm²的栽植密度为最佳。从产量构成因子来

看,氮肥水平和栽植密度对千粒重、穗数、结实率的交互效应均表现为极显著,其中穗数对氮肥水平和栽植密度的单因素响应也均为极显著,且变化趋势与产量相似,D₂N₃处理最高,D₃N₁最低,说明水稻穗数是影响产量最关键的构成因子。从利用效率来看,随着施氮量增加,中、低密度处理的氮肥农学利用效率有降低趋势,而高密度下D₃N₄处理氮肥农学利用效率升高较多。虽然D₃N₄处理的氮肥农学利用率最高,为10.49 kg/kg,但产量不高;D₂N₄处理氮肥利用率最低。对于肥料偏生产力而言,各密度下均以不施氮肥的N₁处理为最高,但产量不是最高,随着施氮增多偏生产力下降。结合高产高效原则,D₂N₃和D₂N₂可推荐在生产中参考应用。

2.7 氮肥水平与栽植密度作用下植稻土壤养分与水稻产量及肥料利用效率的相关性分析

由表5可知,水稻产量与土壤速效磷、速效钾含量显著相关($r=0.57^*$ 和 $r=0.44^*$),但与土壤pH和土壤碱解氮负相关,与其他指标相关性未达显著。氮肥利用效率与土壤碱解氮含量显著相关($r=0.58^*$),与土壤pH和土壤速效磷负相关。肥料偏生产力与土壤速效磷含量也显著相关($r=0.52^*$)。此外,研究发现土壤pH与速效磷含量正相关,而与碱解氮、速效钾均负相关。碱解氮与速效磷、钾的相关性不高,但速效磷与速效钾之间正相关($r=0.32$)。

表 4 氮肥水平与栽植密度交互对水稻产量、构成因子及肥料利用效率的影响

Table 4. Effects of interaction between nitrogen level and planting density on rice yield, its components and fertilizer use efficiency.

| 处理 Treatment | 产量 Yield/(kg hm ⁻²) | 千粒重 Thousand seed weight/g | 穗数 Number of panicles per 667m ² (×10 ⁴) | 穗粒数 Grain number per panicle | 结实率 Seed setting rate/% | 氮肥农学利用效率 Nitrogen fertilizer agricultural utilization efficiency/(kg kg ⁻¹) | 肥料偏生产力 Fertilizer partial productivity/(kg kg ⁻¹) |
|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--|---------------------------------|----------------------------|--|--|
| D ₁ N ₁ | 11124.1±799.2 b | 22.5±0.3 cd | 220.3±16.7 d | 224.7±12.3 abc | 89.0±1.2 abc | / | 49.44 |
| D ₁ N ₂ | 11957.9±299.7 b | 21.2±0.4 f | 246.0±13.8 cd | 229.7±8.7 a | 89.3±1.1 ab | 3.86 | 27.12 |
| D ₁ N ₃ | 12331.7±949.1 b | 24.1±0.7 a | 248.6±7.9 cd | 205.9±10.8 cd | 87.5±0.7 cde | 4.19 | 24.04 |
| D ₁ N ₄ | 11338.7±49.9 c | 21.3±1.2 ef | 241.8±15.6 cd | 220.0±1.3 abc | 88.5±1.0 bc | 0.60 | 19.38 |
| D ₂ N ₁ | 13037.5±1398.6 ab | 22.9±0.5 bc | 253.6±22.1 c | 224.6±6.9 abc | 88.3±0.4 bcd | / | 57.94 |
| D ₂ N ₂ | 14366.2±699.3 a | 22.2±0.4 cdef | 311.0±14.7 b | 207.9±15.2 bcd | 86.8±0.7 de | 6.15 | 32.58 |
| D ₂ N ₃ | 14615.3±1098.9 a | 22.2±0.6 cdef | 376.7±20.7 a | 174.8±13.7 e | 89.3±1.3 ab | 5.47 | 28.49 |
| D ₂ N ₄ | 13165.6±449.6 b | 22.4±0.7 cde | 321.1±19.3 b | 182.9±12.2 e | 86.5±0.5 e | 0.36 | 22.51 |
| D ₃ N ₁ | 8221.1±499.5 d | 22.2±0.8 cdef | 164.4±9.5 e | 224.9±10.9 abc | 90.1±0.6 a | / | 36.54 |
| D ₃ N ₂ | 9259.1±749.3 cd | 23.7±1.1 ab | 172.4±14.5 e | 226.4±7.3 ab | 88.9±0.8 abc | 4.81 | 21.00 |
| D ₃ N ₃ | 9466.7±499.5 c | 21.1±0.2 f | 233.7±18.9 cd | 191.9±16.0 de | 86.4±0.7 e | 4.33 | 18.45 |
| D ₃ N ₄ | 11999.5±148.9 b | 21.7±0.3 def | 236.2±26.7 cd | 233.9±14.8 a | 89.2±1.3 ab | 10.49 | 20.51 |
| 氮肥水平 Nitrogen level(N) | *** | NS | *** | *** | * | | |
| 密度 Growing density(D) | * | NS | *** | *** | * | | |
| N×D | *** | *** | *** | * | *** | | |

表 5 水稻成熟期 0—20 cm 植稻土壤养分与水稻产量及肥料利用率的相关性分析

Table 5. Correlation analysis between soil nutrient contents and rice yield and fertilizer utilization rate in 0—20 cm rice soil layer during rice maturity.

| 相关系数 Correlation coefficient | 土壤 pH Soil pH | 土壤碱解氮 Soil alkaline nitrogen | 土壤速效磷 Soil available phosphorus | 土壤速效钾 Soil available potassium | 土壤有机质 Soil organic matter | 氮肥农学利用效率 Nitrogen fertilizer agricultural utilization efficiency | 肥料偏生产力 Fertilizer partial productivity | 水稻产量 Yield |
|---|------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---|---|---------------|
| 土壤 pH Soil pH value | 1.00 | | | | | | | |
| 土壤碱解氮 Soil alkaline nitrogen | -0.31 | 1.00 | | | | | | |
| 土壤速效磷 Soil available phosphorus | 0.38 | -0.09 | 1.00 | | | | | |
| 土壤速效钾 Soil available potassium | -0.33 | 0.04 | 0.32 | 1.00 | | | | |
| 土壤有机质 Soil organic matter | 0.13 | -0.08 | -0.29 | -0.13 | 1.00 | | | |
| 氮肥农学利用效率 Nitrogen fertilizer agronomy utilization efficiency | -0.38 | 0.58 [*] | -0.15 | 0.02 | -0.24 | 1.00 | | |
| 肥料偏生产力 Fertilizer partial productivity | 0.17 | 0.03 | 0.52 [*] | -0.22 | 0.15 | 0.17 | 1.00 | |
| 水稻产量 Yield | -0.32 | -0.25 | 0.57 [*] | 0.44 [*] | 0.07 | 0.06 | 0.14 | 1.00 |

3 讨论

3.1 不同氮肥水平对植稻土壤养分变化、水稻产量和氮肥利用效率的影响

谢金兰等^[19]认为，土壤氮素、速效钾含量随着氮肥施用量增加而增加，但大量施用氮肥会引起土壤酸化；侯云鹏等^[20]研究发现施用氮肥明显增加了 0—100 cm 土壤残留的氮素含量，且明显造成了氮素损失。本研究结果与之相似，随着土层的加深，各处理碱解氮、速效磷、速效钾含量均明显下降；而随着施氮量增加，中、高密度处理 pH 下降，速

效钾含量升高，高密度处理碱解氮含量升高，有机质含量下降。究其原因，对于分层土壤而言，表层土壤受影响较大，土层越深影响越小^[21-22]。济宁水稻土呈碱性，土壤剖面越深 pH 越高，且各养分均在表层含量最高。施氮量增加是碱解氮含量升高的直接原因，且土壤 C/N 降低会加快稻田微生物分解土壤有机质，促进氮的矿化^[23]。另外，不同氮肥水平对氮肥农学利用效率和水稻产量有显著影响。本研究条件下，随施氮量增加，肥料偏生产力和氮肥农学利用效率降低。这与郑克武^[24-25]等的研究一致。晏娟等^[26]发现，当施氮量超过 150 kg/hm²时，水稻籽粒产量不再显著增加。与这些研究相似，本

研究中 288 kg/hm² 的中氮用量为最佳, 其中 D₂N₃ 处理产量最高, 为 14 615.3 kg/hm², 其次是 D₂N₂ 处理产量, 14 366.2 kg/hm²。究其原因, 适宜的施氮量可以提高幼穗分化期叶片和籽粒中氮代谢酶的活性, 增加抽穗前氮素和干物质的积累, 有利于产量形成^[27], 但氮肥施用仅在一定用量范围内具有增产作用, 过量施氮会导致水稻营养生长过度, 产量下降^[28]。综上所述, 本研究中 288 kg/hm² 的施氮量效果最佳。

3.2 不同栽植密度对植稻土壤养分含量、水稻产量和氮肥利用效率的影响

不同栽植密度对植稻土壤养分变化同样有明显的影响。除土壤有机质外, 栽植密度对其他养分指标影响均极显著。鲁叶江等^[29]发现, 土壤速效磷含量会随箭竹群落密度的增加而显著减少。本研究条件下, 随着栽植密度增大, 水稻土壤 pH 与速效磷含量逐渐降低, 0—20 cm 土层碱解氮含量略有升高, 有机质含量先升高后降低。证明了栽植密度的变化影响了水稻根系对土壤养分吸收以及土壤微生物的生命活动^[23]。不同栽植密度对水稻产量和氮肥农学利用效率有显著影响。赵双等^[30]研究表明水稻产量随栽培密度的增加而升高, 但超过适宜密度后会下降。本研究结果与之相似, 相同氮肥水平下, 水稻产量随着栽植密度的增加先升高后降低, 中密度下水稻产量最高。究其原因, 适宜的栽植密度增加了有效分蘖, 进而提高了有效穗数以及水稻对光照的吸收和对土壤养分的利用^[31]。随栽植密度升高, 肥料偏生产力先升高后降低。对于氮肥农学利用效率而言, 除 D₃N₄ 处理过高外, 其余各处理均随栽植密度的升高而降低, 中密度下水稻氮肥农学利用效率较高。故而本研究中 27 万穴/hm² 的栽植密度效果最佳。

3.3 土壤养分与水稻产量、氮肥利用效率之间的关系及氮肥水平与栽植密度的交互效应

相关性分析表明, 水稻产量与土壤速效磷、速效钾含量显著相关, 这与刘洁^[32]的研究结果基本一致。此外, 水稻产量与土壤 pH 和土壤碱解氮负相关。究其原因, 济宁水稻土为碱性土壤, pH 过高会影响水稻产量的形成, 所以偏中性的土壤更适合水稻的生长。而水稻成熟期土壤中碱解氮含量越多说明水稻生育期根系吸收氮素越少。氮肥利用效率与土壤碱解氮含量显著相关, 肥料偏生产力与土壤速效磷含量也显著相关。所以, 合理施肥以及平衡的土壤养分对提高作物产量和肥料利用率至关重要。

氮肥水平与栽植密度是影响作物生长和产量的重要指标, 且二者间存在显著的交互效应^[33-34]。本研究条件下, 氮肥水平与栽植密度对土壤各养分指标均表现出显著的交互效应。低密度增加施氮量, 土壤 pH 升高, 有机质含量先减少后增加; 表层速效磷先增加后减少; 高密度增加施氮量, 土壤 pH 和有机质含量降低。表层速效磷先减少后增加; 低氮增加栽植密度, 速效钾含量降低; 高氮增加栽植密度, 速效钾含量升高。另外, 氮肥水平与栽植密度对水稻产量也有极显著的交互效应, 且适宜的氮肥水平和种植密度组合有利于水稻获得高产^[12]。本研究条件下, 当氮肥按照 288 kg/hm² 施用, 栽植密度为 27 万穴/hm² 时产量最高; 从农学利用效率来看, 当氮肥按 360 kg/hm² 施用, 栽植密度为 30 万穴/hm² 时氮肥农学利用率最高, 但产量不是最高。因此, 在实际生产中应严格注意施肥量与栽植密度的合理搭配, 达到高产高效的生产目标。

4 结论

1) 在水稻成熟期的土壤剖面分布上, 随着土层加深, 各处理的氮、磷、钾、有机质含量均会明显下降, pH 值有所升高。其中 D₃N₄ 处理碱解氮含量下降了 60.8%, D₃N₃ 处理速效磷含量降低了 72.7%。

2) 随着施氮量增加, 土壤 pH 有所下降, 速效钾含量升高, 有机质含量下降。肥料偏生产力和氮肥农学利用效率降低; 随着栽植密度的增加, 土壤 pH 与速效磷含量有所下降, 表层土壤碱解氮含量略有升高, 有机质含量与肥料偏生产力先升高后降低。氮肥农学利用效率降低。

3) 结合高产高效, 当栽植密度为 27 万穴/hm² 时, 氮肥按照 288 kg/hm² 和 216 kg/hm² 施用, 水稻产量和氮肥农学效率均较高, 该组合在降低氮肥用量, 控制合理密度的同时, 实现了产量和效益的优化, 值得在山东济宁地区的水稻生产中推荐应用。

参考文献:

- [1] 邓明君, 邓俊杰, 刘佳宇. 中国粮食作物化肥施用的碳排放时空演变与减排潜力[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 534-544.
Deng M J, Deng J J, Liu J Y. On the space-time evolution of carbon emissions and reduction potential in Chinese grain crop fertilizer application[J]. *Resources Science*, 2016, 38(3): 534-544. (in Chinese with English abstract)

- [2] 刘书通, 李春生, 方福平, 张小惠, 毛一剑, 孔宪琴, 张克勤, 吴荣梁. 我国水稻生产区域变化及其比较优势分析[J]. 中国稻米, 2014, 20(4): 9-13.
Liu S T, Li C S, Fang F P, Zhang X H, Mao Y J, Kong X Q, Zhang K Q, Wu R L. Study on the variation and comparative advantage of regional rice production structure in China[J]. *China Rice*, 2014, 20(4): 9-13. (in Chinese with English abstract)
- [3] Ladha J K, Gjd K, Bennett J, Peng S, Reddy C K, Reddy P M, Singh U. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved lowland rice germplasm[J]. *Field Crops Research*, 1998, 56(1-2): 41-71.
- [4] Ju X T, Xing G X, Chen X P, Zhang S L, Zhang L J, Liu X J, Cui Z L, Yin B, Christie P, Zhu Z L, Zhang F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [5] Zheng X, Han S, Huang Y, Wang Y S, Wang M X. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N₂O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2), DOI: 10.1029/2003GB002167, 2004.
- [6] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 向镜, 张义凯. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414.
Zhu D F, Zhang Y P, Chen H Z, Xiang J, Zhang Y K. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3404-3414. (in Chinese with English abstract)
- [7] Huang M, Yang C L, Ji Q M, Jiang L G, Tan J L, Li Y Q. Tillering responses of rice to plant density and nitrogen rate in a subtropical environment of southern China. *Field Crops Research*, 2013, 149: 187-192.
- [8] 邓中华, 明日, 李小坤, 郑磊, 徐维明, 杨运清, 任涛, 丛日环, 鲁剑巍. 不同密度和氮肥用量对水稻产量、构成因子及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2015, 47(1): 20-25.
Deng Z H, Ming R, Li X K, Zheng L, Xu W M, Yang Y Q, Ren T, Cong R H, Lu J W. Effects of nitrogen application rate and planting density on grain yields, yield components and nitrogen use efficiencies of rice[J]. *Soils*, 2015, 47(1): 20-25. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈小荣, 肖自京, 孙嘉, 钟蕾, 朱昌兰, 彭小松, 贺晓鹏, 傅军如, 欧阳林娟. 不同产量晚稻品种分蘖期动态密度稀化下群体自动调节力的差异与生理机制. 中国水稻科学[J], 2013, 27(4): 405-412.
Chen X R, Xiao Z J, Sun J, Zhong L, Zhu C L, Peng X S, He X P, Fu J R, Ou-Yang L J. Discrepancy and its physiological mechanism of population self regulatory ability for late rice varieties under treatment of dynamic thinning of seedlings during tillering stage[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(4): 405-412. (in Chinese with English abstract)
- [10] 林洪鑫, 肖运萍, 袁展汽, 刘仁根, 汪瑞清. 水稻合理密植及其优质高产机理研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 1-4.
Lin H X, Xiao Y P, Yuan Z Q, Liu R Y, Wang R Q. Advance in rational colse planting and its mechanism of superior quality and high yield in rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(9): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王成瑗, 王伯伦, 张文香, 赵磊, 赵秀哲, 高连文. 栽培密度对水稻产量及品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(4): 318-322.
Wang C A, Wang B L, Zhang W X, Zhao L, Zhao X Z, Gao L W. Effect of planting density on grain yield and quality of rice[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(4): 318-322. (in Chinese with English abstract)
- [12] 周江明, 赵琳, 董越勇, 徐进, 边武英, 毛杨仓, 章秀福. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274-281.
Zhou J M, Zhao L, Dong Y Y, Xu J, Bian W Y, Mao Y C, Zhang X F. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 274-281. (in Chinese with English abstract)
- [13] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 孙静文, 王秀斌, 何萍, 徐芳森, 余喜初. 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): 1279-1286.
Xu X P, Zhou W, Liang G Q, Sun J W, Wang X B, He P, Xu F S, Yu X C. Effects of nitrogen and density interactions on grain yield and nitrogen use efficiency of double-rice systems[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(3): 1279-1286. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吴培, 陈天晔, 袁嘉琦, 黄恒, 邢志鹏, 胡雅杰, 朱明, 李德剑, 刘国林, 张洪程. 施氮量和直播密度互作对水稻产量形成特征的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(3): 269-281.
Wu P, Chen T Y, Yuan J Q, Huang H, Xing Z P, Hu Y J, Zhu M, Li D J, Liu G L, Zhang H C. Effects of interaction between nitrogen application rate and direct-sowing density on yield formation characteristics of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(3): 269-281. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈军, 黄珊珊, 刘冰, 吴林坤, 林文雄. 不同氮肥运筹对水稻根际土壤理化性质及代谢物质的影响[J]. 福建农业学报, 2015, 30(11): 1082-1089.
Chen J, Huang S Y, Liu B, Wu L K, Lin W X. Effects of

- different nitrogen regimes on soil physico-chemical properties and metabolites in rice rhizosphere[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 30(11): 1082-1089. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张玉, 秦华东, 黄敏, 江立庚, 徐世宏. 氮肥运筹对免耕水稻根系生长、根际土壤特性及产量的影响[J]. 广西植物, 2014(5): 681-685, 621.
Zhang Y, Qin H D, Huang M, Jiang L G, Xu S H. Effect of different nitrogen application modes on root growth, rhizosphere soil characteristics and rice yield under no-tillage[J]. *Guihaia*, 2014(5): 681-685, 621. (in Chinese with English abstract)
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil Agro-chemical Analysis[M]. 3rd. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] 吕丽华, 陶洪斌, 王璞, 赵明, 赵久然, 鲁来清. 施氮量对夏玉米碳、氮代谢和氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 630-637.
Lv L H, Tao H B, Wang P, Zhao M, Zhao J R, Lu L Q. The effect of nitrogen application rate on carbon and nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 630-637. (in Chinese with English abstract)
- [19] 谢金兰, 王维赞, 朱秋珍, 刘晓燕, 梁强, 李毅杰, 罗亚伟, 梁阗. 氮肥施用方式对甘蔗产量及土壤养分变化的影响[J]. 南方农业学报, 2013, 44(4): 607-610.
Xie J L, Wang W Z, Zhu Q Z, Liu X Y, Liang Q, Li Y J, Luo Y W, Liang T. Effects of nitrogen fertilizer application mode on sugarcane yield and soil nutrient change[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2013, 44(4): 607-610. (in Chinese with English abstract)
- [20] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 尹彩侠, 秦裕波, 李前, 谢佳贵. 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 Y P, Han L G, Kong L L, Yin C X, Qin Y B, Li Q, Xie J G. Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application doses[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*, 2015, 21(4): 836-845.
- [21] 姚小萌, 周正朝, 田霄鸿, 王淑娟, 党珍珍. 长期机械化秸秆全量还田对土壤养分分层的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 198-202.
Yao X M, Zhou Z C, Tian X H, Wang S J, Dang Z Z. Effects of long-term all straw return to field with machine on the stratifications of soil nutrients[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(1): 198-202. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王若水, 康跃虎, 万书勤, 孙甲霞. 水分调控对盐碱地土壤盐分与养分含量及分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 96-104.
Wang R S, Kang Y H, Wan S Q, Sun J X. Effects of water regulation methods on soil salt, nutrient content and its distribution in overlying saline wasteland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(14): 96-104. (in Chinese with English abstract)
- [23] 葛顺峰, 许海港, 季萌萌, 姜远茂. 土壤碳氮比对平邑甜茶幼苗生长和碳氮分配的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(10): 942-949.
Ge S F, Xu H G, Ji M M, Jiang Y M. Effects of soil C:N on growth and distribution of nitrogen and carbon of *Malus hupehensis* seedlings[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(10): 942-949. (in Chinese with English abstract)
- [24] 郑克武, 邹江石, 吕川根. 氮肥和栽插密度对杂交稻"两优培九"产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(6): 885-893.
Zheng K W, Zou J S, Lv C G. Effects of Transplanting Density and nitrogen fertilizer on yield formation and N absorption in a two-line intersubspecific hybrid rice "Liangyoupei9" [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(6): 885-893. (in Chinese with English abstract)
- [25] 曹胜彪, 张吉旺, 董树亭, 刘鹏, 赵斌, 杨今胜. 施氮量和种植密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1343-1353.
Cao S B, Zhang J W, Dong S T, Liu P, Zhao B, Yang J S. Effects of nitrogen rate and planting density on grain yield and nitrogen utilization efficiency of high yield summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*, 2012, 18(6): 1343-1353. (in Chinese with English abstract)
- [26] 晏娟, 尹斌, 张绍林, 沈其荣, 朱兆良. 不同施氮量对水稻氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 835-839.
Yan J, Yin B, Zhang S L, Shen Q R, Zhu Z L. Effect of nitrogen application rate on nitrogen uptake and distribution in rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 835-839. (in Chinese with English abstract)
- [27] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 郭翔, 马均. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J]. 作物学报, 2009, 35(11): 2055-2063.
Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y, Guo X, Ma J. Relationship of activities of key enzymes involved in nitrogen metabolism with nitrogen utilization in rice under water-nitrogen interaction[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(11): 2055-2063. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 刘敬然, 孙淼, 王国平, 刘绍东, 赵新华, 李亚兵. 种植密度氮肥互作对棉花产量及氮素利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 122-130.
Li P C, Dong H L, Liu A Z, Liu J R, Sun M, Wang G P,

- Liu S D, Zhao X H, Li Y B. Effects of planting density and nitrogen fertilizer interaction on yield and nitrogen use efficiency of cotton[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(23): 122-130. (in Chinese with English abstract)
- [29] 鲁叶江, 王开运, 杨万勤, 吴福忠. 缺苞箭竹群落密度对土壤养分库的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(6):996-1001.
- Lu Y J, Wang K Y, Yang W Q, Wu F Z. Effects of *Fargesia denudata* density on soil nutrient pool[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(6): 996-1001. (in Chinese with English abstract)
- [30] 赵双, 朱小荣. 不同栽培密度对水稻产量影响的研究[J]. *中国盐业*, 2016(15): 56-57.
- ZHAO S, ZHU X R. Study on the influence of different cultivation density on rice yield[J]. *China Salt Industry*, 2016(15): 56-57. (in Chinese with English abstract)
- [31] 何虎, 曾勇军, 贾维强, 潘晓华, 石庆华. 栽插密度对天优华占辐射利用及产量的影响[J]. *杂交水稻*, 2015, 30(4): 65-70.
- He H, Zeng Y J, Jia W Q, Pan X H, Shi Q H. Effects of planting density on radiation use and grain yield of tianyou huazhan[J]. *Hybrid Rice*, 2015, 30(4): 65-70. (in Chinese with English abstract)
- [32] 刘洁, 胡冬华. 水稻基础产量与土壤速效养分含量的相关性[J]. *作物研究*, 2015(3): 277-280.
- Liu J, Hu D H. Correlation between basic yield of rice and soil available nutrient content[J]. *Crop Research*, 2015(3): 277-280. (in Chinese with English abstract)
- [33] 曹倩, 贺明荣, 代兴龙, 门洪文, 王成雨. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 815-822.
- Cao Q, He M R, Dai X L, Men H W, Wang C Y. Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 815-822. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张娟, 武同华, 代兴龙, 王西芝, 李洪梅, 蒋明洋, 贺明荣. 种植密度和施氮水平对小麦吸收利用土壤氮素的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1727-1734.
- Zhang J, Wu T H, Dai X L, Wang X Z, Li H M, Jiang M Y, He M R. Effects of plant density and nitrogen level on nitrogen uptake and utilization of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1727-1734. (in Chinese with English abstract)