

DOI: 10.12357/cjea.20240531

CSTR: 32371.14.cjea.20240531

马纪龙, 姬丽, 马琨, 谢铁娜, 马建军, 李虹, 岳翔, 苏明, 贾彪. 有机肥等氮量替代化肥对玉米氮素吸收利用及土壤氮素淋失的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(2): 286–300

MA J L, JI L, MA K, XIE T N, MA J J, LI H, YUE X, SU M, JIA B. Effects of substituting chemical nitrogen by organic nitrogen on nitrogen uptake and utilization of maize and soil nitrogen leaching[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(2): 286–300

# 有机肥等氮量替代化肥对玉米氮素吸收利用及土壤氮素淋失的影响<sup>\*</sup>

马纪龙<sup>1</sup>, 姬丽<sup>1</sup>, 马琨<sup>2</sup>, 谢铁娜<sup>3</sup>, 马建军<sup>4</sup>, 李虹<sup>4</sup>, 岳翔<sup>4</sup>, 苏明<sup>1</sup>,  
贾彪<sup>1\*\*</sup>

(1. 宁夏大学农学院 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院 银川 750021; 3. 宁夏大学科学技术研究院 银川 750021;  
4. 宁夏回族自治区农业环境保护监测站 银川 750002)

**摘要:** 有机肥替代化肥是实现化肥减量增效与控制农田污染的一项重要措施。本文探究了玉米产量、氮素吸收利用效率和土壤氮素淋失对不同比例有机肥等氮替代化肥的响应, 以期宁夏引黄灌区玉米氮素高效利用及农业面源污染防治提供科学依据。于 2022—2023 年在宁夏永宁国家气象站开展大田试验, 采用完全随机区组试验设计, 以当地常规施氮量 ( $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 为基础, 布设 5 个施肥处理, 分别为 100% 化肥 (T1)、2/3 化肥+1/3 有机肥 (T2)、1/3 化肥+2/3 有机肥 (T3)、100% 有机肥 (T4) 和空白对照 (CK), 分析了玉米产量、氮素吸收量、氮素转运和利用效率及土壤氮素淋失量。结果表明: T2 处理玉米产量和成熟期植株地上部吸氮量均最高, 相较于 CK 和 T1, 玉米产量两年平均提高 73.42% 和 3.67%, 成熟期地上部吸氮量两年平均提高 97.09% 和 9.98%。其次, T2 处理玉米营养器官花前积累氮转运量、氮转运率、氮转运对籽粒贡献率及花后氮素同化量两年平均较 CK 分别显著提高 171.18%、19.67%、36.89% 和 72.17%, 较 T1 分别显著提高 24.36%、6.74%、12.94% 和 3.55%, T2 处理玉米氮素表观回收利用率、氮肥农学效率及氮肥偏生产力两年均值较 T1 处理分别显著提高 22.58%、9.17% 和 3.67%, 而各处理玉米氮素收获指数两年间无显著差异。此外, T2 处理淋失液中总氮、硝态氮和铵态氮浓度均相对较低, 两年玉米生长季内总氮、硝态氮和铵态氮淋失量和淋失系数均值较 T1 分别降低 24.56%、25.29%、23.70% 和 37.95%、39.44%、26.83%。相关性分析表明, 玉米氮素养分吸收、转运和利用等指标与产量呈正相关关系, 而氮素淋失量和氮素收获指数与产量间相关性较低。回归分析结果显示, 产量曲线最高点所对应的有机肥替代比例下, 玉米存在较高的氮素吸收、转运和利用效率及较低的氮素淋失量。因此, 宁夏引黄灌区玉米种植最佳有机肥替代量均值为  $98.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (36.53% 有机肥替代化肥), 可提高玉米氮素高效利用, 减少农业面源污染。

**关键词:** 有机肥; 化肥; 等氮量替代; 玉米; 氮素利用; 氮素淋失

**中图分类号:** S5

## Effects of substituting chemical nitrogen by organic nitrogen on nitrogen uptake and utilization of maize and soil nitrogen leaching<sup>\*</sup>

MA Jilong<sup>1</sup>, JI Li<sup>1</sup>, MA Kun<sup>2</sup>, XIE Tiena<sup>3</sup>, MA Jianjun<sup>4</sup>, LI Hong<sup>4</sup>, YUE Xiang<sup>4</sup>, SU Ming<sup>1</sup>, JIA Biao<sup>1\*\*</sup>

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目 (32360432) 和宁夏自然科学基金项目 (2023AAC03075, 2023AAC03151) 资助

<sup>\*\*</sup> 通信作者: 贾彪, 主要从事作物高产栽培研究。E-mail: [jiabiao2008@163.com](mailto:jiabiao2008@163.com)

马纪龙, 主要从事作物高产栽培及农田氮磷流失监测研究。E-mail: [majilong0910@163.com](mailto:majilong0910@163.com)

收稿日期: 2020-09-02 接受日期: 2024-11-13

<sup>\*</sup> This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (32360432) and the Natural Science Foundation of Ningxia (2023AAC03075, 2023AAC03151).

<sup>\*\*</sup> Corresponding author, E-mail: [jiabiao2008@163.com](mailto:jiabiao2008@163.com)

Received Sep. 2, 2020; accepted Nov. 13, 2024

<http://www.ecoagri.ac.cn>

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Institute of Science and Technology, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Agricultural Environmental Protection Monitoring Station of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750002, China)

**Abstract:** The replacement of chemical fertilizers with organic fertilizers is an important technical measure for achieving fertilizer reduction and efficiency and for controlling soil pollution. In this study, we aimed to investigate the responses of maize yield, maize nitrogen uptake and use efficiency, and soil nitrogen leaching to different substitution ratios of chemical fertilizer with organic fertilizer. The main objective was to provide a scientific basis for the efficient use of maize nitrogen resources and for the prevention and control of agricultural non-point source pollution in the Yellow River Water Irrigation Area of Ningxia. To this end, we conducted field experiments in 2022 and 2023 at the National Meteorological Station of Yongning County, Ningxia. A completely randomized block experimental design was adopted based on the local conventional nitrogen application rate of  $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . The fertilization treatments were as follows: 100% chemical fertilizer treatment (T1), 2/3 chemical fertilizer + 1/3 organic fertilizer treatment (T2), 1/3 chemical fertilizer + 2/3 organic fertilizer treatment (T3), 100% organic fertilizer treatment (T4), and the control treatment without fertilizer (CK). Soil nitrogen loss, maize yield, nitrogen uptake, nitrogen transport, and nitrogen use efficiency were analyzed. The results showed that maize yield and aboveground nitrogen uptake at maturity stage under T2 treatment were the highest. Based on 2-year average, maize yield under T2 treatment increased by 73.42% compared to that under CK treatment, while it increased by 3.67% compared to that under T1 treatment; aboveground nitrogen uptake at maturity stage under T2 treatment increased by 97.09% compared to that under CK treatment, and it increased by 9.98% compared to that under T1 treatment. Additionally, translocation amount, translocation rate, contribution rate to grain nitrogen of nitrogen accumulated in vegetative organs pre-flowering, as well as nitrogen assimilation after anthesis under T2 treatment increased by 171.18%, 19.67%, 36.89%, and 72.17% compared to that under CK treatment, respectively, and 24.36%, 6.74%, 12.94%, and 3.55% compared to that under T1 treatment, respectively. The mean values of apparent recovery efficiency of nitrogen, agronomic use efficiency of nitrogen fertilizer, and partial factor productivity of nitrogen fertilizer under T2 treatment increased by 22.58%, 9.17%, and 3.67%, respectively, compared to that under T1 treatment. However, there was no significant difference in nitrogen harvest index among different treatments in 2022 and 2023. In addition, the total nitrogen, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen concentrations in the leachate under T2 treatment were relatively low. The total nitrogen, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen leaching losses under T2 treatment decreased by 24.56%, 25.29%, and 23.70% compared to T1 treatment, respectively, and corresponding leaching coefficients decreased by 37.95%, 39.44%, and 26.83%, respectively. Indicators of maize nitrogen uptake, translocation, and utilization showed a significant positive correlation with maize yield. In the regression curves of maize yield versus organic fertilizer substitution ratio, maize yield with organic fertilizer substitution ratio at 36.53% was the highest, nitrogen uptake, translocation, and nitrogen use efficiency were also high, while nitrogen leaching was low. Therefore, the optimal organic fertilizer substitution ratio for maize production in the Yellow River Water Irrigation Area of Ningxia is 36.53% ( $98.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  organic fertilizer replacing chemical fertilizer), which supports the higher nitrogen use efficiency for maize and reduces agricultural non-point source pollution.

**Keywords:** organic fertilizer; chemical fertilizer; isonitrogen replacement; maize; nitrogen use; nitrogen leaching

氮素是影响作物产量和品质的主要因子<sup>[1]</sup>, 农田氮肥施用能够在保证土壤氮素充盈的同时, 将粮食作物单产提高 55%~57%<sup>[2]</sup>。据统计, 中国氮肥消耗量占全球总量的 33% 以上, 但氮肥利用率仅为 28%~41%, 远低于世界平均水平<sup>[3]</sup>。过量且无效的氮肥施用会导致土壤中氮素过剩, 作物因徒长和土壤结构遭到破坏而减产, 土壤和地下水中的硝酸盐含量增加, 致使土壤酸化板结、肥力下降及面源污染加剧<sup>[4-6]</sup>。因此, 探索合理的氮肥用量及施肥模式迫在眉睫。

有机肥是一种绿色肥料, 长期施用可改善土壤孔隙度, 增加土壤有机碳含量<sup>[7]</sup>, 相较于化肥, 其养分全面、肥效持久且污染少<sup>[8]</sup>, 符合农业可持续发展要求。大量研究表明, 化肥配施有机肥可实现速效养分和有机养分的优势互补, 满足作物整个生育期的

养分需求, 不仅可实现土壤肥力、作物产量和肥料利用率提升<sup>[9]</sup>, 还能缓解土壤氮素积累和淋失<sup>[10]</sup>。陈萍等<sup>[11]</sup>于宁夏石嘴山市进行有机肥替代试验发现, 潮土区种植玉米 (*Zea mays*) 在总施氮量为  $285 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 有机肥替代 10%~30% 的化学氮肥能显著促进玉米生长, 提高玉米产量、品质及氮肥利用效率; Hu 等<sup>[12]</sup>认为, 在中国北方冬小麦 (*Triticum aestivum*)-夏玉米轮作系统中, 玉米施氮量为  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 有机肥替代 75% 的化肥氮能够有效减少温室气体排放, 并确保作物高产; 李磊等<sup>[13]</sup>于宁夏银北灌区开展有机肥替代试验发现, 有机肥氮替代 20% 化肥氮对玉米产量及氮素利用率提升效果显著, 且对土壤理化性质改善也较为明显; 但费聪<sup>[14]</sup>通过在山西省旱作雨养区试验得出的最佳有机肥氮替代比例为 30%, 与 Hu 等<sup>[12]</sup>研究结果有所不同; 滕颖等<sup>[15]</sup>研究表明,

有机肥配施化肥的总施氮量较低时 ( $<200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 农田总氮和硝态氮淋失分别减少 36.77% 和 65.05%, 有机肥替代比例高于 70% 可减少总氮淋失, 但会增加溶解性有机氮的淋溶风险; 也有研究表明, 过量有机粪肥施用会导致氮素尤其是硝态氮的淋失<sup>[16]</sup>。当然, 大量研究认为, 有机氮替代部分化肥氮在提高氮素利用效率和缓解环境压力方面具有较大潜力<sup>[17-19]</sup>。然而, 研究区土壤类型和气候条件存在差异, 因此有机肥最佳替代比例研究结果不一<sup>[20-22]</sup>, 且目前宁夏引黄灌区有机肥替代化肥的玉米增产和农田氮素淋失阻控效果有待进一步研究。基于此, 本试验在等氮条件下以不同比例有机肥氮替代化肥氮, 设置 5 个施肥处理, 分析各处理下玉米籽粒产量, 氮素吸收、转运和利用效率及土壤中不同形态氮素淋失情况, 结合回归分析和《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017), 筛选出适宜宁夏引黄灌区玉米高产、氮素高效利用及环境效益最佳的有机肥替代比例, 以期宁夏引黄灌区玉米高产高效栽培和农田可持续发展提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

田间试验于 2022—2023 年在宁夏回族自治区永宁县农丰村国家气象站 ( $106^{\circ}19'80''\text{E}$ ,  $38^{\circ}21'81''\text{N}$ ) 开展。该试验区属于温带大陆性干旱气候, 多年平均气温  $8.9^{\circ}\text{C}$ , 年均降水量  $179.6 \text{ mm}$ , 年均蒸发量  $1684.3 \text{ mm}$ , 年均相对湿度 57%, 无霜期 162 d, 全年日照时数  $2927.2 \text{ h}$ , 占可照时数的 66%。玉米全生育

期内日降水量、日最高和最低气温见图 1。2022 年玉米播种日期为 4 月 26 日, 收获日期为 9 月 20 日, 生育期内降水量为  $191.0 \text{ mm}$ ; 2023 年玉米播种日期为 4 月 24 日, 收获日期为 9 月 17 日, 生育期内降水量为  $97.0 \text{ mm}$ 。玉米种植制度为一年一熟制。试验地土壤类型为灌淤土, 偏碱性, 肥力适中,  $0\sim100 \text{ cm}$  土壤基础理化性质见表 1。

### 1.2 试验设计

参考宁夏引黄灌区优化施氮量 ( $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>[23]</sup>, 本研究在等氮条件下分别设置 4 个有机肥替代化肥的施肥处理和 1 个不施肥空白对照 (CK), 4 个施肥处理分别为: 100% 化肥 (T1)、2/3 化肥+1/3 有机肥 (T2)、1/3 化肥+2/3 有机肥 (T3) 和 100% 有机肥 (T4)。各施肥处理施氮量为换算后的纯氮素量。所用肥料为尿素 ( $\text{N} \geq 46\%$ ) 和商品有机肥 ( $\text{N} \geq 1.58\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 \geq 0.75\%$ ,  $\text{K}_2\text{O} \geq 0.25\%$ )。各处理  $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{K}_2\text{O}$  的施用量分别为  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 计算各处理通过有机肥投入的  $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{K}_2\text{O}$ , 不足部分由过磷酸钙 ( $\text{P}_2\text{O}_5 \geq 16\%$ ) 和硫酸钾 ( $\text{K}_2\text{O} \geq 52\%$ ) 补充调平。试验所用玉米品种为‘新农 008’, 采用等行距种植, 株距和行距分别为 20 和 50 cm, 种植密度为  $10 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。每个处理重复 3 次, 共计 15 个小区, 完全随机区组排列, 每个小区面积为  $21.6 \text{ m}^2$  ( $3.6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ )。试验期间, 施肥按照氮肥基施 50%, 追肥 2 次进行, 其中第 1 次追施氮肥的 30% (拔节期), 第 2 次追施氮肥的 20% (大喇叭口期); 有机肥和磷钾肥于耕作前作为基肥一次性施入。各处理具体施肥情况见表 2。玉米全生育期共灌水 3 次, 总灌水量 360 mm, 分别于拔节期 (135 mm)、

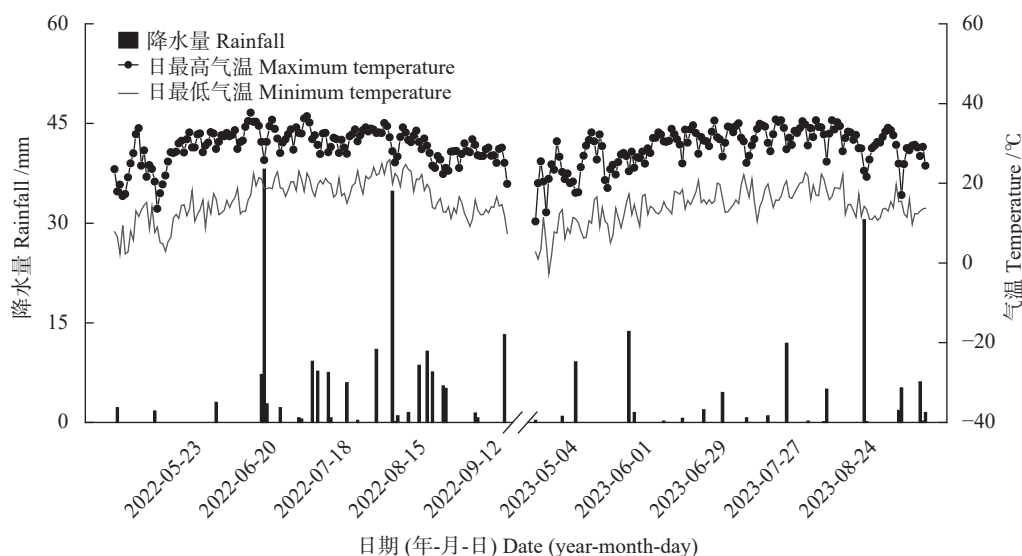


图 1 玉米生育期内日降水量、最高和最低气温

Fig. 1 Daily precipitation, maximum and minimum temperatures during the growth period of maize

表 1 试验地 0~100 cm 土壤基础理化性质  
Table 1 Soil physico-chemical properties of the 0~100 cm soil layer at the experiment site

| 年份<br>Year | 土层<br>Soil layer /cm | pH   | 有机质<br>Organic matter / $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 全氮<br>Total N / $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 全磷<br>Total P / $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 全钾<br>Total K / $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 碱解氮<br>Available N / $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 速效磷<br>Available P / $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 速效钾<br>Available K / $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 容重<br>Bulk density / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 砂粒<br>Sand /% | 粉粒<br>Silt /% | 黏粒<br>Clay /% |
|------------|----------------------|------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 2022       | 0~20                 | 8.14 | 12.63                                                   | 0.72                                            | 0.55                                            | 3.53                                            | 31.31                                                 | 18.32                                                 | 102.20                                                | 1.34                                                 | 25.81         | 40.85         | 33.34         |
|            | 20~40                | 8.23 | 6.84                                                    | 0.55                                            | 0.48                                            | 3.42                                            | 15.45                                                 | 13.24                                                 | 84.83                                                 | 1.42                                                 | 28.95         | 39.44         | 31.61         |
|            | 40~60                | 8.24 | 2.47                                                    | 0.43                                            | 0.36                                            | 3.37                                            | 9.52                                                  | 9.56                                                  | 43.92                                                 | 1.36                                                 | 18.37         | 45.69         | 35.94         |
|            | 60~80                | 8.21 | 1.96                                                    | 0.28                                            | 0.18                                            | 3.21                                            | 7.96                                                  | 7.66                                                  | 29.18                                                 | 1.33                                                 | 21.89         | 41.56         | 36.55         |
|            | 80~100               | 7.96 | 1.29                                                    | 0.13                                            | 0.16                                            | 3.19                                            | 4.86                                                  | 3.48                                                  | 12.89                                                 | 1.33                                                 | 21.18         | 34.69         | 44.13         |
| 2023       | 0~20                 | 8.06 | 14.76                                                   | 0.77                                            | 0.68                                            | 3.55                                            | 33.78                                                 | 19.70                                                 | 110.30                                                | 1.32                                                 | 22.11         | 42.95         | 34.94         |
|            | 20~40                | 8.23 | 7.83                                                    | 0.64                                            | 0.56                                            | 3.28                                            | 16.17                                                 | 16.30                                                 | 88.16                                                 | 1.40                                                 | 22.46         | 42.18         | 35.36         |
|            | 40~60                | 7.95 | 5.56                                                    | 0.49                                            | 0.43                                            | 3.34                                            | 11.29                                                 | 10.35                                                 | 49.91                                                 | 1.35                                                 | 24.39         | 37.37         | 38.24         |
|            | 60~80                | 7.94 | 2.49                                                    | 0.25                                            | 0.21                                            | 3.11                                            | 8.65                                                  | 8.27                                                  | 31.65                                                 | 1.33                                                 | 24.94         | 34.79         | 40.27         |
|            | 80~100               | 7.86 | 1.17                                                    | 0.24                                            | 0.17                                            | 3.17                                            | 4.14                                                  | 4.08                                                  | 14.33                                                 | 1.32                                                 | 16.67         | 31.25         | 52.08         |

表 2 各处理施肥种类和施肥量  
Table 2 Fertilizer type and fertilization rate of each treatment  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

| 处理<br>Treatment | 基肥 Base fertilizer        |            |                                |                          | 第1次追施尿素<br>The first top dressing of urea | 第2次追肥尿素<br>The second top dressing of urea |
|-----------------|---------------------------|------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                 | 有机肥<br>Organic fertilizer | 尿素<br>Urea | 过磷酸钙<br>Calcium superphosphate | 硫酸钾<br>Potassium sulfate |                                           |                                            |
| CK              | 0                         | 0          | 0                              | 0                        | 0                                         | 0                                          |
| T1              | 0                         | 293.48     | 937.50                         | 86.54                    | 176.09                                    | 117.39                                     |
| T2              | 5 696.20                  | 195.65     | 670.50                         | 59.15                    | 117.39                                    | 78.26                                      |
| T3              | 11 392.41                 | 97.83      | 403.50                         | 31.77                    | 58.70                                     | 39.13                                      |
| T4              | 17 088.61                 | 0          | 136.50                         | 4.38                     | 0                                         | 0                                          |

大喇叭口期 (135 mm) 和灌浆期 (90 mm) 进行, 灌溉方式为漫灌。

### 1.3 测定指标及方法

#### 1.3.1 玉米产量测定

于玉米成熟期在各小区选取 2 m×2 m 样方, 统计收获穗数, 并将果穗风干后脱粒, 测定穗粒重和百粒重, 随后称重测产 (玉米籽粒含水率按 14% 计算)。

#### 1.3.2 植株氮含量测定

于玉米吐丝期和成熟期在各小区随机选取 3 株代表性植株进行破坏性取样, 带回后按照茎、叶、苞叶、穗轴和籽粒等器官, 将植株样品分成 5 部分, 装入样品袋, 105 ℃ 杀青 30 min 后 80 ℃ 烘至恒重, 取出后用电子天平称重。随后, 将样品研磨粉碎后过 0.25 mm 筛, 采用浓  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  对植株各器官进行消煮, 用凯氏定氮法测定植株氮含量。参考戴明等<sup>[24]</sup> 方法, 计算各相关指标。

$$\text{NU} = \sum (\text{NC}_i \times \text{AGB}_i \times 10^{-3}) \quad (1)$$

$$\text{TA} = \text{NU}_{\text{R1}} - \text{NU}_{\text{R6N}} \quad (2)$$

$$\text{TR} = \text{TA} / \text{NU}_{\text{R1}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{TC} = \text{TA} / \text{NU}_{\text{R6S}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{NA} = \text{NU}_{\text{R6S}} - \text{TA} \quad (5)$$

$$\text{NHI} = \text{NU}_{\text{R6S}} / \text{NU}_{\text{R6}} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{REN} = (\text{NU}_{\text{F}} - \text{NU}_{\text{CK}}) / N \times 100 \quad (7)$$

$$\text{AEN} = (\text{Y}_{\text{F}} - \text{Y}_{\text{CK}}) / N \quad (8)$$

$$\text{PFPN} = \text{Y}_{\text{F}} / N \quad (9)$$

式中:  $\text{NU}$  为植株地上部吸氮量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $\text{NC}_i$  为植株某一器官氮含量,  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\text{AGB}_i$  为植株某一器官生物量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $\text{TA}$  为营养器官花前积累氮转运量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $\text{NU}_{\text{R1}}$  为吐丝期地上部吸氮量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $\text{NU}_{\text{R6N}}$  为成熟期营养器官吸氮量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $\text{TR}$  为营养器官氮转运效率, %;  $\text{TC}$  为营养器官花前积累氮对籽粒氮的贡献率, %;  $\text{NU}_{\text{R6S}}$  为成熟期籽粒吸氮量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $\text{NA}$  为花后氮同化量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $\text{NHI}$  为氮收获指数, %;  $\text{NU}_{\text{R6}}$  为成熟期地上部吸氮量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $\text{REN}$  为氮素表观回收利用率, %;  $\text{NU}_{\text{F}}$  为施肥处理地上部吸氮量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $\text{NU}_{\text{CK}}$  为对照处理地上部吸氮量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $N$  为施氮量, 本研究中各施肥处理施氮量均为  $270 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $\text{AEN}$  为氮肥农学效率,  $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $\text{Y}_{\text{F}}$  为施肥处理产量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $\text{Y}_{\text{CK}}$  为对照处理产量,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;

PFPN 为氮肥偏生产力,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.3.3 淋失液采集与测定

采用地下淋溶原位检测装置收集淋失液。在试验小区修建渗滤池, 安装集水桶, 每个处理安装 1 套淋溶检测装置。渗滤池长 2 m、宽 1 m、深 1 m, 挖出的土壤按原土层回填。图 2 为安装示意图。为保证试验结果的可靠性, 田间淋溶装置布设于 2021 年, 种植 1 a 玉米后, 土壤结构逐渐稳定, 2022 年开始进行有机肥替代试验。

玉米生育期内, 每次灌水后隔 5~7 d 进行一次淋失液采集, 利用量杯测量淋溶液体积后取部分混匀水样带回, 置于  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  冰箱内保存, 于 7 d 内完成指标测定。本研究中铵态氮 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) 和硝态氮 ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) 浓度采用流动注射分析仪测定, 总氮 (TN) 用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定。氮素淋失量和淋失系数计算参考王英等<sup>[25]</sup>的方法, 公式如下:

$$\text{NL} = \sum_{i=1}^n [(\text{NC}_i \times V_i) / S] \times 10^{-2} \quad (10)$$

$$K = (\text{NL}_F - \text{NL}_{\text{CK}}) / N \times 100 \quad (11)$$

式中: NL 为不同形态氮素淋失量,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; NC 为水

样中不同形态氮素浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $V$  为淋失液体积, L;  $i$  为淋溶液采样次数,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;  $S$  为淋溶液收集面积,  $\text{m}^2$ , 本研究中收集面积均为  $2\text{ m}^2$  (长 2 m, 宽 1 m);  $K$  为淋失系数, %;  $\text{NL}_F$  为施肥处理不同形态氮素淋失量,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $\text{NL}_{\text{CK}}$  为对照不同形态氮素淋失量,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $N$  为氮素施入量, 本研究中为等氮处理, 氮素施入量均为  $270\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

### 1.4 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理, 利用 IBM SPSS Statistics 26 进行方差分析和多重比较, 利用 Origin 2021 进行绘图和回归拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 有机肥等氮替代化肥对玉米氮素利用和产量的影响

#### 2.1.1 玉米成熟期植株地上部吸氮量和产量

由图 3 可知, 有机肥等氮替代化肥对玉米产量及成熟期植株地上部吸氮量 ( $\text{NU}_{\text{R}_6}$ ) 影响显著。等氮条件下玉米产量及  $\text{NU}_{\text{R}_6}$  随有机肥替代比例的增加呈先升后降趋势, 且在 T2 处理下获得最高产量和最大  $\text{NU}_{\text{R}_6}$ , 2022 年和 2023 年均值分别为  $13\ 932.96\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

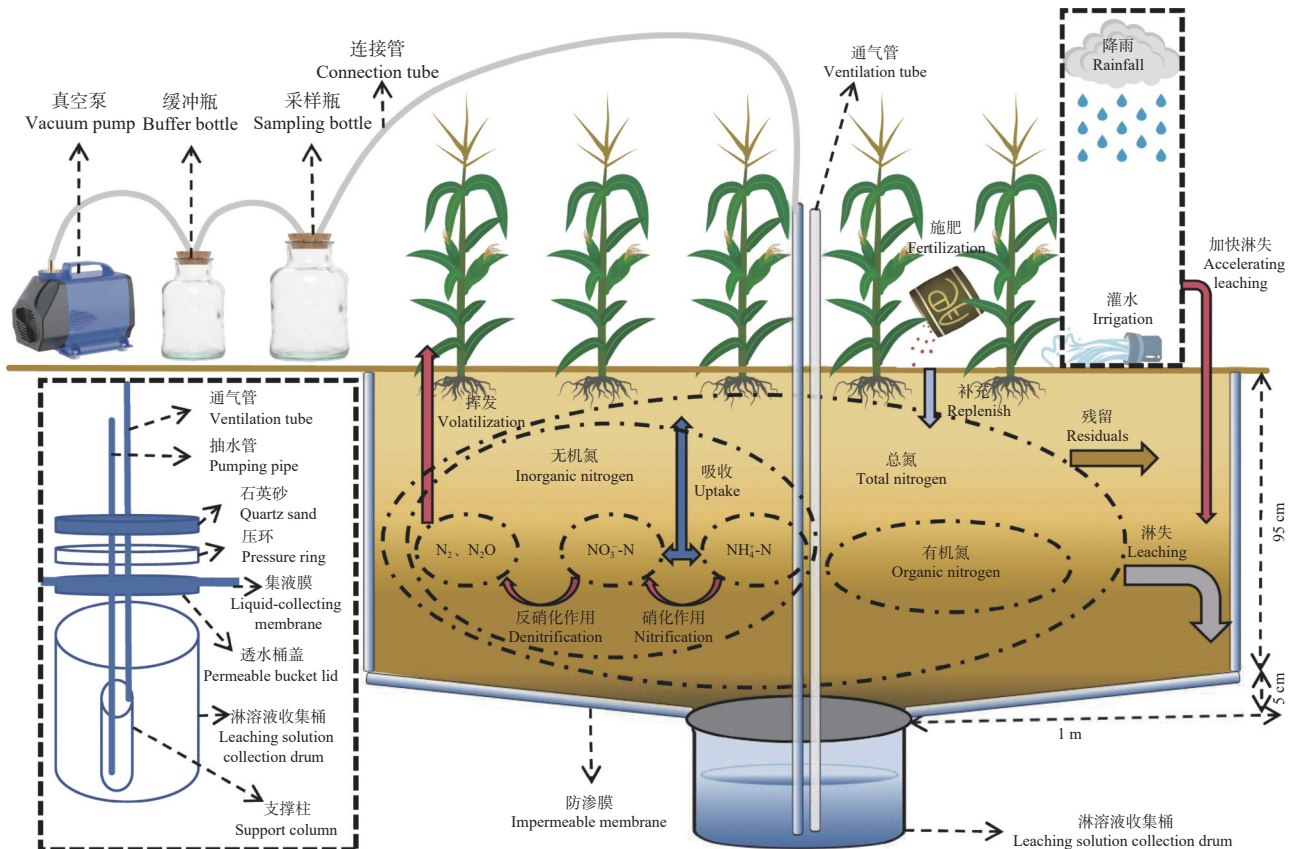
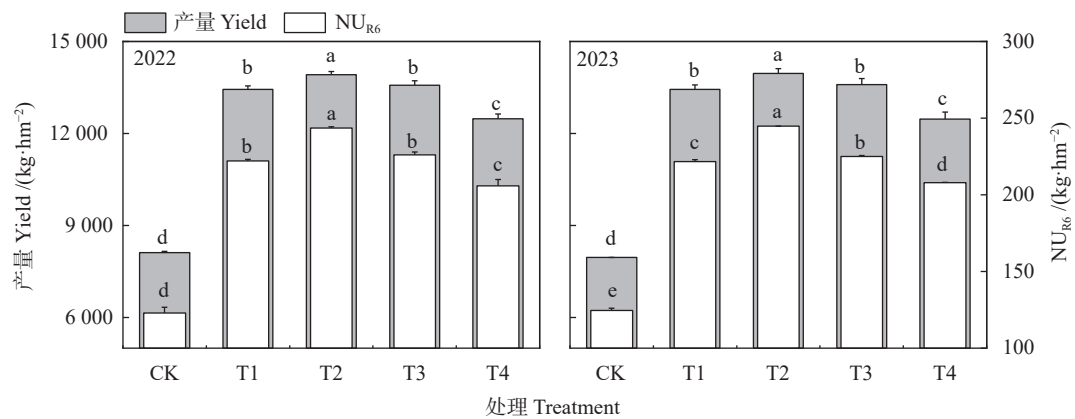


图 2 地下原位淋溶监测装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the subsurface *in situ* leaching detection device



CK 为不施肥对照; T1 为 100% 化肥处理; T2 为 2/3 化肥+1/3 有机肥处理; T3 为 1/3 化肥+2/3 有机肥处理; T4 为 100% 有机肥处理。不同小写字母表示相同指标不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。CK: the control treatment without fertilizer; T1: 100% chemical fertilizer treatment; T2: 2/3 chemical fertilizer + 1/3 organic fertilizer treatment; T3: 1/3 chemical fertilizer + 2/3 organic fertilizer treatment; T4: 100% organic fertilizer treatment. Different lower-case letters indicate significant differences among different treatments of the same indicator ( $P<0.05$ ).

图3 2022年和2023年不同施肥处理下玉米产量和成熟期植株地上部吸氮量 ( $NU_{R6}$ ) 的变化

Fig. 3 Changes in yield and aboveground nitrogen uptake at maturity stage ( $NU_{R6}$ ) of maize under different fertilization treatments in 2022 and 2023

和  $244.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与 CK 相比, T1-T4 处理两年分别平均增产 67.28%、73.42%、69.11% 和 55.27%,  $NU_{R6}$  分别提高 79.20%、97.09%、82.04% 和 67.02%。与 T1 处理相比, T2 和 T3 处理两年分别平均增产 3.67% 和 1.09%, T4 减产 7.18%; T2 和 T3 的两年平均  $NU_{R6}$  分别提高 9.98% 和 1.58%, T4 的  $NU_{R6}$  降低 6.80%; 而与 T4 处理相比, T1、T2 和 T3 处理两年分别平均增产 7.73%、11.69% 和 8.91%,  $NU_{R6}$  分别平均提高 7.29%、18.00% 和 8.99%。说明等氮条件下有机肥替代部分化肥能够提高玉米  $NU_{R6}$ , 进而获得高产。

### 2.1.2 玉米氮转运和氮素利用效率

通过分析各处理玉米营养器官花前积累氮素转运、对籽粒贡献率及花后氮素同化量 (表3) 发现, 两年间玉米花前营养器官积累氮素转运量 (TA) 变化规律基本一致, 均表现为  $T2>T3>T1>T4>CK$ , 且除 T1 和 T3 处理间差异不显著外, 其余处理间差异均显著 ( $P<0.05$ ), T1-T4 处理较 CK 处理分别提高 118.06%、171.18%、126.48% 和 91.07%, T2 处理较 T1、T3 和 T4 处理分别提高 24.36%、19.74% 和 41.92%。两年间营养器官花前积累氮素转运率 (TR) 依旧为 T2 处理最高, 两年转运率均值为 49.74%, 较 CK、T1、T3 和 T4 处理分别提高 19.67%、6.74%、5.23% 和 12.13%; 各处理间表现为 T1-T4 处理显著 (2022 年 T4 处理除外) 高于 CK ( $P<0.05$ ), T2 处理显著高于 T4 处理 ( $P<0.05$ ), 且 T1、T3 和 T4 处理间差异不显著。营养器官花前积累氮对籽粒氮贡献率 (TC) 两年间均表现为  $T2>T3>T1>T4>CK$ ; T2 处理最高, 两年间

贡献率均值为 35.62%, 比 CK、T1、T3 和 T4 处理分别显著提高 36.89%、12.94%、10.64% 和 18.85% ( $P<0.05$ ), 其余 3 组施肥处理 (T1、T3 和 T4) 显著高于 CK ( $P<0.05$ ), 但三者间差异不显著。两年间 T1-T4 处理花后氮素同化量 (NA) 均显著高于 CK ( $P<0.05$ ); 各施肥处理间也存在差异: 2022 年, 表现为 T1、T2 和 T3 处理间差异不显著, 但三者均显著高于 T4 处理 ( $P<0.05$ ); 2023 年, 表现为 T2 处理最高, 为  $116.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 同时 T1 和 T3、T1 和 T4 处理间差异不显著, T3 处理又显著高于 T4 处理 ( $P<0.05$ ); 而取两年均值发现, T2 处理分别比 CK、T1、T3 和 T4 处理显著提高 72.17%、3.55%、2.74% 和 9.74% ( $P<0.05$ ), 说明 T2 处理下成熟期玉米籽粒有着较高的氮积累量。由此可见, T2 处理 (2/3 化肥+1/3 有机肥) 提高了玉米营养器官花前积累氮素转运量、转运率及对籽粒氮的贡献率, 进而促进了籽粒中氮素的积累。

此外, 由表3可知, 2022—2023 年玉米氮素收获指数 (NHI) 为 72.60%~73.99%, 各处理间均无显著差异 (2023 年 T4 处理除外)。此外, 玉米氮素表观回收利用率 (REN)、氮肥农学效率 (AEN) 和氮肥偏生产力 (PFPN) 均以 T2 处理最高, 两年均值分别为 44.54%、 $21.85 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $51.60 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 较 T1、T3 和 T4 处理分别显著提高 18.35%~44.88% (REN)、9.17%~32.87% (AEN) 和 2.54%~11.68% (PFPN) ( $P<0.05$ ); 其次为 T1 和 T3 处理, 两者间无显著差异; T4 处理最低。表明 T2 (2/3 化肥+1/3 有机肥) 处理下玉米具有较高的氮素利用效率。

表 3 不同施肥处理下玉米营养器官花前积累氮素转运和对籽粒氮素贡献率及氮素和氮肥利用效率

Table 3 Translocation amount and contribution to grain nitrogen of nitrogen accumulated in vegetative organs pre-flowering, nitrogen and nitrogen fertilizer use efficiencies of maize under different fertilization treatments

| 年份<br>Year       | 处理<br>Treatment | TA<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | TR<br>/%     | TC<br>/%    | NA<br>(kg·hm <sup>-2</sup> ) | NHI<br>/%    | REN<br>/%   | AEN<br>(kg·kg <sup>-1</sup> ) | PFPN<br>(kg·kg <sup>-1</sup> ) |
|------------------|-----------------|------------------------------|--------------|-------------|------------------------------|--------------|-------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 2022             | CK              | 24.14±0.91d                  | 42.44±1.55c  | 26.77±1.85c | 66.13±3.76c                  | 73.38±0.11a  |             |                               |                                |
|                  | T1              | 52.16±0.38b                  | 47.44±0.73ab | 31.73±0.21b | 112.21±1.92a                 | 73.98±0.69a  | 36.72±1.75b | 19.72±0.31b                   | 49.77±0.42b                    |
|                  | T2              | 63.44±1.10a                  | 49.19±0.79a  | 35.66±0.60a | 114.47±0.99a                 | 73.08±0.29a  | 44.60±1.06a | 21.48±0.28a                   | 51.52±0.40a                    |
|                  | T3              | 53.64±2.25b                  | 47.53±2.05ab | 32.17±1.26b | 113.09±1.75a                 | 73.80±0.84a  | 38.12±0.67b | 20.24±0.56b                   | 50.28±0.54b                    |
|                  | T4              | 45.42±0.90c                  | 44.62±1.08bc | 30.39±0.50b | 104.07±4.52b                 | 72.60±1.19a  | 30.68±2.88c | 16.17±0.63c                   | 46.22±0.57c                    |
| 2023             | CK              | 23.02±0.62d                  | 40.69±0.44c  | 25.27±1.13c | 68.11±2.25d                  | 73.09±0.52ab |             |                               |                                |
|                  | T1              | 50.68±1.34b                  | 45.76±0.91b  | 31.35±0.47b | 110.98±0.50bc                | 72.91±0.43ab | 35.94±0.95b | 20.31±0.53b                   | 49.78±0.53b                    |
|                  | T2              | 64.45±3.42a                  | 50.29±1.74a  | 35.58±1.67a | 116.65±2.33a                 | 73.99±0.43a  | 44.47±0.48a | 22.22±0.63a                   | 51.68±0.60a                    |
|                  | T3              | 53.17±0.38b                  | 47.01±0.05b  | 32.22±0.46b | 111.85±1.52b                 | 73.35±0.31ab | 37.14±0.28b | 20.89±0.70b                   | 50.36±0.73b                    |
|                  | T4              | 44.69±2.61c                  | 44.10±1.88b  | 29.55±1.57b | 106.53±1.79c                 | 72.76±0.46b  | 30.80±0.56c | 16.72±0.83c                   | 46.19±0.83c                    |
| 方差分析 ANOVA       |                 |                              |              |             |                              |              |             |                               |                                |
| 年份 Year (Y)      |                 | ns                           | ns           | ns          | ns                           | ns           | ns          | *                             | ns                             |
| 处理 Treatment (T) |                 | **                           | **           | **          | **                           | **           | **          | **                            | **                             |
| Y×T              |                 | ns                           | ns           | ns          | ns                           | ns           | ns          | ns                            | ns                             |

CK: 不施肥对照; T1: 100%化肥处理; T2: 2/3化肥+1/3有机肥处理; T3: 1/3化肥+2/3有机肥处理; T4: 100%有机肥处理; TA: 营养器官花前积累氮素转运量; TR: 营养器官花前积累氮素转运率; TC: 营养器官花前积累氮素对籽粒氮贡献率; NA: 花后氮素同化量; NHI: 氮素收获指数; REN: 氮素表观回收利用率; AEN: 氮肥农学效率; PFPN: 氮肥偏生产力。同列同一年份不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ ), \*\*、\*和ns分别表示效应极显著( $P<0.01$ )、显著( $P<0.05$ )和不显著。CK: the control treatment without fertilizer; T1: 100% chemical fertilizer treatment; T2: 2/3 chemical fertilizer + 1/3 organic fertilizer treatment; T3: 1/3 chemical fertilizer + 2/3 organic fertilizer treatment; T4: 100% organic fertilizer treatment; TA: translocation amount of nitrogen accumulated in vegetative organs pre-flowering; TR: translocation rate of nitrogen accumulated in vegetative organs pre-flowering; TC: contribution rate to grain nitrogen of nitrogen accumulated in vegetative organs pre-flowering; NA: nitrogen assimilation after anthesis; NHI: nitrogen harvest index; REN: apparent recovery efficiency of nitrogen; AEN: agronomic use efficiency of nitrogen fertilizer; PFPN: partial factor productivity of nitrogen fertilizer. Different lowercase letters in the same column for the same year indicate significant differences among different treatments ( $P<0.05$ ). \*\* and \* indicate significant effects at  $P<0.01$  and  $P<0.05$  levels, respectively, and ns indicates no significant effect.

## 2.2 有机肥等氮替代化肥对土壤氮素淋失的影响

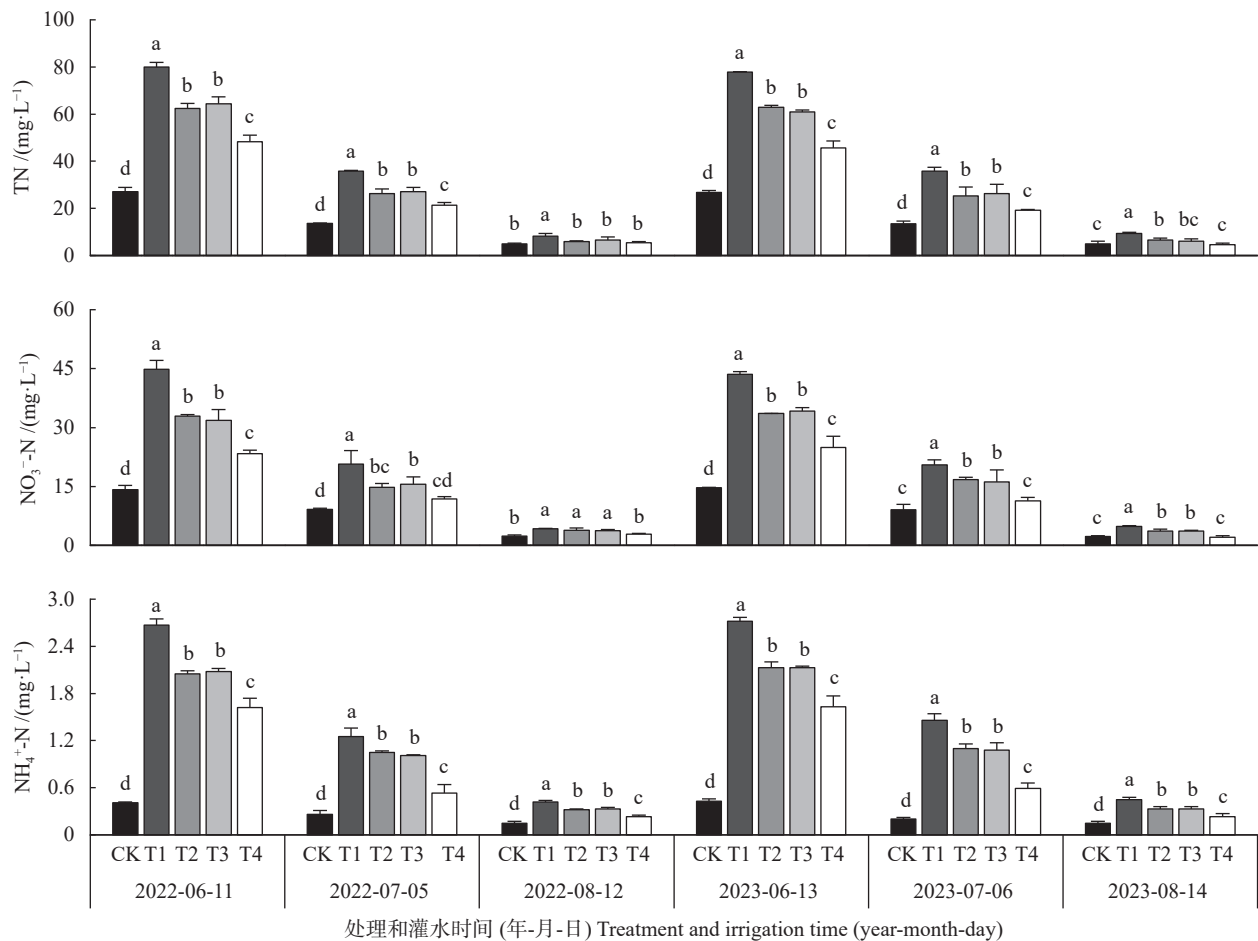
### 2.2.1 淋失液中不同形态氮素浓度

由图 4 可知, 两年间 CK 处理灌水后淋失液中 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度大部分时间显著低于其余施肥处理 ( $P<0.05$ ), T1 处理淋失液中 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度 (2022 年 8 月 12 日的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 除外) 显著高于其余有机肥替代处理 ( $P<0.05$ )。各施肥处理下, 淋失液中不同形态氮素浓度总体随有机肥替代量的增加而降低, 且在单个玉米生长季内, 各形态氮素浓度均随灌水次数的增加而降低。相较于 T1 处理, 两年间 T2、T3 和 T4 处理淋失液中 TN 浓度 (图 4) 在每次灌水后分别平均降低 16.18、16.17 和 31.83 mg·L<sup>-1</sup> (第一次灌水), 10.01、9.10 和 15.48 mg·L<sup>-1</sup> (第二次灌水), 2.51、2.46 和 3.77 mg·L<sup>-1</sup> (第三次灌水); NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度 (图 4) 分别平均降低 10.95、11.20 和 20.08 mg·L<sup>-1</sup> (第一次灌水), 4.87、4.78 和 9.08 mg·L<sup>-1</sup> (第二次灌水), 0.79、0.85 和 2.10 mg·L<sup>-1</sup> (第三次灌水); NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度 (图 4) 分别平均降低 0.60、0.59 和 1.07 mg·L<sup>-1</sup> (第一次灌水), 0.28、0.31 和 0.79 mg·L<sup>-1</sup> (第二次灌水), 0.11、0.11 和 0.20 mg·L<sup>-1</sup> (第三次灌水)。

各处理 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度占 TN 浓度的比例为 47.56%~67.20%, 且仅第一次灌水后 T1-T4 处理淋失液中的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度高于《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017) 规定的地下水硝酸盐安全值 20 mg·L<sup>-1</sup>; 各处理 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度占 TN 浓度的比例为 1.57%~5.25%, 最高浓度为 2.72 mg·L<sup>-1</sup>。前两次淋失液中各形态氮素浓度较高且各处理间变幅较大, 这可能是因为追肥间时间间隔较短, 第三次灌水 (灌浆期灌水) 结束后, 淋失液中除 T1 处理外, 其余各处理氮素浓度差异较小。说明有机肥的施入可以显著降低淋失液中各形态氮素浓度, 在供氮充足的同时, 有效降低了氮素淋失。

### 2.2.2 不同形态氮素淋失量及淋失系数

由表 4 可知, 两年间各处理不同形态氮素淋失量变化规律基本一致, 均表现为 T1>T2~T3>T4>CK, 其中 CK 处理年均 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 淋失量均值分别为 6.54 kg·hm<sup>-2</sup>、3.74 kg·hm<sup>-2</sup> 和 0.12 kg·hm<sup>-2</sup>, 2022—2023 年各施肥处理 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 淋失量分别为 10.81~18.77 kg·hm<sup>-2</sup>、5.54~10.59 kg·hm<sup>-2</sup> 和 0.35~0.69 kg·hm<sup>-2</sup>。不同形态氮素淋失量两年均值以 T1 处理最高, T2-T4 处理比 T1 处理 TN 淋失量分别降低 24.56%、23.75% 和 41.27%, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量



2022-06-11 和 2023-06-13 分别为 2022 年和 2023 年第一次灌水后采集淋失液的时间, 同理 2022-07-05 和 2023-07-06 为第二次, 2022-08-12 和 2023-08-14 为第三次。CK: 不施肥对照; T1: 100% 化肥处理; T2: 2/3 化肥+1/3 有机肥处理; T3: 1/3 化肥+2/3 有机肥处理; T4: 100% 有机肥处理。不同小写字母表示同一灌水时间不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。2022-06-11 和 2023-06-13 are the specific times of leachate collection after the first irrigation in 2022 and 2023, respectively, 2022-07-05 and 2023-07-06 are the second irrigations, and 2022-08-12 and 2023-08-14 are the third irrigations. CK: the control treatment without fertilizer; T1: 100% chemical fertilizer treatment; T2: 2/3 chemical fertilizer + 1/3 organic fertilizer treatment; T3: 1/3 chemical fertilizer + 2/3 organic fertilizer treatment; T4: 100% organic fertilizer treatment. Different lowercase letters in the same irrigation time indicate significant differences among different treatments ( $P < 0.05$ ).

图4 不同施肥处理下玉米田灌水后淋失液中不同形态氮素浓度变化

Fig. 4 Changes in concentrations of nitrogen in different forms in leachate in maize field after irrigation under different fertilization treatments

分别降低 25.29%、25.72% 和 45.02%,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  淋失量分别降低 23.70%、23.70% 和 45.93%。各处理氮素淋失量中,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  淋失量占 TN 淋失量的 50.59%~57.76%, 是氮素淋失的主要形式; 而  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  淋失量较低, 不及 TN 淋失量的 5%, 且年际间存在明显差异。

各施肥处理氮素淋失系数变化规律与淋失量基本相同, 总体随有机肥替代量的增加而降低。2022—2023 年, TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  淋失系数分别为 1.57%~4.54%、0.69%~2.56% 和 0.08%~0.21%。T1 处理氮素淋失系数最高, T2-T4 处理 TN 淋失系数较 T1 处理年均降低 37.95%、36.71% 和 63.74%,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  淋失系数年均降低 39.44%、40.04% 和 70.02%,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  淋失系数年均降低 26.83%、29.27% 和 56.10%。

### 2.3 有机肥等氮替代化肥处理下玉米产量与氮吸收利用和淋失等指标的相关性

通过 Pearson 相关分析可知 (图 5), 玉米产量与成熟期地上部吸氮量、营养器官花前积累氮素转运量和转运率及其对籽粒氮素贡献率、花后氮素同化量、氮素表观回收利用率、氮肥农学效率及氮肥偏生产力均呈极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 相关系数均  $\geq 0.86$ ; 与氮素收获指数、总氮淋失量、硝态氮淋失量和氨态氮淋失量相关性未达显著水平, 相关系数均  $\leq 0.68$ 。这充分说明玉米氮素养分的吸收、转运和利用相关指标与产量间存在较高的同源性, 决定着产量的形成, 而氮素淋失量和氮素收获指数受灌水施肥和玉米品种影响, 因此与产量间关联性较低。此

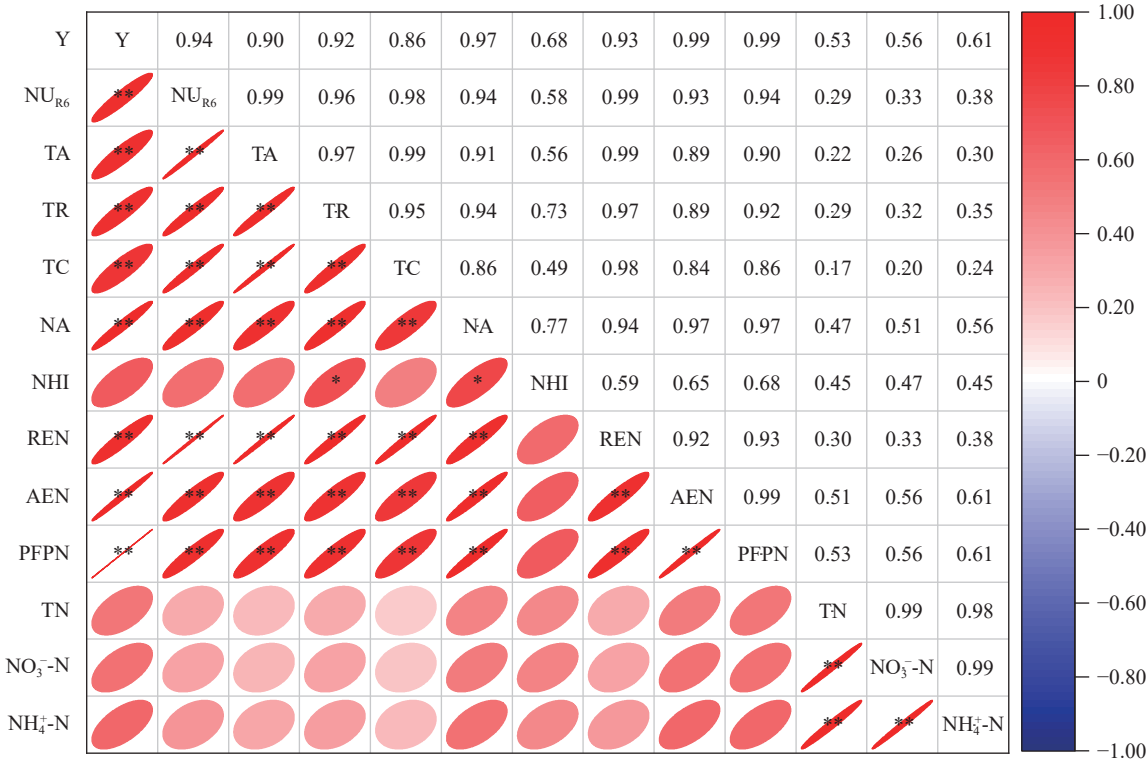
表 4 不同施肥处理下玉米田不同形态氮素淋失量与淋失系数

Table 4 Leaching losses and coefficients of nitrogen in different forms in maize field under different fertilization treatments

| 年份<br>Year | 处理<br>Treatment | 总氮 Total nitrogen                               |                                    | 硝态氮 Nitrate nitrogen                            |                                    | 铵态氮 Ammonium nitrogen                           |                                    |
|------------|-----------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|
|            |                 | 淋失量<br>Leaching loss<br>(/kg·hm <sup>-2</sup> ) | 淋失系数<br>Leaching coefficient<br>/% | 淋失量<br>Leaching loss<br>(/kg·hm <sup>-2</sup> ) | 淋失系数<br>Leaching coefficient<br>/% | 淋失量<br>Leaching loss<br>(/kg·hm <sup>-2</sup> ) | 淋失系数<br>Leaching coefficient<br>/% |
|            |                 |                                                 |                                    |                                                 |                                    |                                                 |                                    |
| 2022       | CK              | 6.50±0.32d                                      |                                    | 3.68±0.13d                                      |                                    | 0.12±0.00e                                      |                                    |
|            | T1              | 18.77±0.24a                                     | 4.54±0.12a                         | 10.59±0.89a                                     | 2.56±0.35a                         | 0.66±0.01a                                      | 0.20±0.00a                         |
|            | T2              | 14.41±0.56b                                     | 2.93±0.31b                         | 7.86±0.17b                                      | 1.55±0.01b                         | 0.52±0.00b                                      | 0.15±0.00b                         |
|            | T3              | 14.26±0.61b                                     | 2.87±0.11b                         | 7.43±0.55b                                      | 1.39±0.17b                         | 0.50±0.01c                                      | 0.14±0.00c                         |
|            | T4              | 10.95±0.58c                                     | 1.65±0.19c                         | 5.54±0.08c                                      | 0.69±0.06c                         | 0.35±0.02d                                      | 0.08±0.01d                         |
| 2023       | CK              | 6.57±0.26d                                      |                                    | 3.79±0.17d                                      |                                    | 0.11±0.01d                                      |                                    |
|            | T1              | 18.28±0.24a                                     | 4.34±0.18a                         | 10.29±0.29a                                     | 2.41±0.17a                         | 0.69±0.01a                                      | 0.21±0.00a                         |
|            | T2              | 13.54±0.59b                                     | 2.58±0.30b                         | 7.74±0.16b                                      | 1.46±0.08b                         | 0.51±0.02b                                      | 0.15±0.00b                         |
|            | T3              | 13.99±0.50b                                     | 2.75±0.26b                         | 8.08±0.39b                                      | 1.59±0.20b                         | 0.53±0.01b                                      | 0.15±0.01b                         |
|            | T4              | 10.81±0.47c                                     | 1.57±0.27c                         | 5.94±0.43c                                      | 0.80±0.18c                         | 0.38±0.01c                                      | 0.10±0.01c                         |

| 方差分析 ANOVA       |    |    |    |    |    |    |
|------------------|----|----|----|----|----|----|
| 年份 Year (Y)      | ns | ns | ns | ns | ** | ** |
| 处理 Treatment (T) | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| Y×T              | ns | ns | ns | ns | ** | *  |

CK: 不施肥对照; T1: 100%化肥处理; T2: 2/3化肥+1/3有机肥处理; T3: 1/3化肥+2/3有机肥处理; T4: 100%有机肥处理。同列同一年份不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ ), \*\*、\*和ns分别表示效应极显著( $P<0.01$ )、显著( $P<0.05$ )和不显著。CK: the control treatment without fertilizer; T1: 100% chemical fertilizer treatment; T2: 2/3 chemical fertilizer + 1/3 organic fertilizer treatment; T3: 1/3 chemical fertilizer + 2/3 organic fertilizer treatment; T4: 100% organic fertilizer treatment. Different lowercase letters in the same column of the same year indicate significant differences among different treatments ( $P<0.05$ ). \*\* and \* indicate significant effects at  $P<0.01$  and  $P<0.05$  levels, respectively, and ns indicates no significant effect.



Y: 玉米产量; NU<sub>R6</sub>: 成熟期地上部吸氮量; TA: 营养器官花前积累氮素转运量; TR: 营养器官花前积累氮素转运率; TC: 营养器官花前积累氮素对籽粒氮贡献率; NA: 花后氮素同化量; NHI: 氮素收获指数; REN: 氮素表观回收利用率; AEN: 氮肥农学效率; PFPN: 氮肥偏生产力; TN: 总氮淋失量; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: 硝态氮淋失量; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 铵态氮淋失量。\*和\*\*分别表示在  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平显著相关。Y: maize yield; NU<sub>R6</sub>: aboveground nitrogen uptake at maturity stage; TA: translocation amount of nitrogen accumulated in vegetative organs pre-flowering; TR: translocation rate of nitrogen accumulated in vegetative organs pre-flowering; TC: contribution rate to grain nitrogen of nitrogen accumulated in vegetative organs pre-flowering; NA: nitrogen assimilation after anthesis; NHI: nitrogen harvest index; REN: apparent recovery efficiency of nitrogen; AEN: agronomic use efficiency of nitrogen fertilizer; PFPN: partial factor productivity of nitrogen fertilizer; TN: total nitrogen leaching loss; NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: nitrate nitrogen leaching loss; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: ammonium nitrogen leaching loss. \* and \*\* indicate significant correlations at  $P<0.05$  and  $P<0.01$  levels, respectively.

图 5 玉米产量、氮吸收利用和淋失等指标间的相关性

Fig. 5 Correlations between indicators of maize yield, nitrogen uptake and utilization, and leaching

外, 氮素收获指数与营养器官花前积累氮转运率和花后氮素同化量呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 相关系数分别为 0.73 和 0.77, 说明 3 项指标同源性较强; 而玉米氮素养分的吸收 (成熟期地上部吸氮量)、转运和利用相关指标与氮素淋失量间并无显著相关性。

#### 2.4 有机肥最佳替代比例推荐

由产量拟合曲线 (图 6) 可以得出, 2022 年有机肥氮替代  $98.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  化肥氮时, 玉米产量最高, 可达  $13\,908.38 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 此时, 玉米成熟期植株地上部吸氮量、营养器官花前积累氮转运量和转运率、营养器官花前积累氮转运对籽粒氮贡献率、花后氮素同化量、氮素收获指数、氮素表观回收利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力分别为  $237.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $60.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、50.79%、33.84%、 $116.82 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、73.50%、42.02%、 $20.94 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $50.95 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 表明该有机肥替代比例下, 玉米对氮素养分的吸收、转运和利用都较为充分, 在此期间, 玉米生长季内  $\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  淋失量分别为  $15.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $8.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $0.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 氮素淋失量相对较低, 且  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  淋失量未超过《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)规定的满足人类健康的硝态氮淋失量限值 ( $18.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。2023 年有机肥氮替代  $99.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  化肥氮时, 玉米产量最高可达  $13\,942.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 此时玉米成熟期地上部吸氮量、营养器官花前积累氮转运量和转运率、营养器官花前积累氮对籽粒氮贡献率、花后氮素同化量、氮素收获指数、氮素表观回收利用率、氮肥农学效率、氮肥偏生产力和玉米生长季内  $\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  淋失量分别为  $239.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $60.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、50.03%、34.78%、 $116.45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、73.29%、41.09%、 $21.84 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $51.29 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $15.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $8.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $0.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 结果与 2022 年基本一致。因此, 综合玉米产量、氮素吸收利用效率和环境效益等因素, 推荐以两年有机肥替代量均值  $98.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (36.53% 有机肥替代化肥) 为宁夏引黄灌区玉米种植时有机肥等氮替代化肥的比例。

### 3 讨论

#### 3.1 有机肥等氮替代化肥对玉米产量和成熟期植株地上部吸氮量的影响

合适的有机肥替代化肥比例对玉米氮素吸收和产量形成至关重要<sup>[13,26]</sup>。本研究结果显示, 等氮条件下玉米产量和成熟期地上部吸氮量随有机肥替代比例的增加呈先上升后下降的趋势, 且玉米在 2/3 化

肥+1/3 有机肥 (T2) 处理下获得最高产量和最大吸氮量, 2022—2023 年均值分别为  $13\,932.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $244.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 这与娄菲等<sup>[27]</sup>和高洪军等<sup>[28]</sup>等研究结果相近。这是因为 2/3 化肥+1/3 有机肥的比例较为合适, 其中化肥氮保障了玉米前期的氮素需求, 而有机肥氮的缓慢释放, 延长了供氮周期, 使玉米在整个生育期内具有持续的氮源供应<sup>[29]</sup>, 促进了玉米对氮素的吸收, 进而提高了产量<sup>[30]</sup>。因此, 合适的有机肥替代比例是玉米高产稳产的关键与保障。此外, 本研究还发现 2022 年和 2023 年玉米生育期内降水量分别为 191.0 和 97.0 mm, 但玉米产量与成熟期地上部吸氮量在两年间却无明显差异, 这是因为两年间降水量虽相差较大, 但降水年型均属于枯水年<sup>[23]</sup>, 单次降水少且较为分散, 因此, 玉米产量和成熟期地上部吸氮量受降水影响较小, 年际间无明显差异。

#### 3.2 有机肥等氮替代化肥对玉米氮素转运及利用效率的影响

玉米氮素转运及利用效率与有机肥替代比例关系密切<sup>[31]</sup>。刘晓明等<sup>[32]</sup>认为玉米籽粒中的养分来源于根系吸收和花前营养器官养分再转运及花后吸收, 施用有机肥有利于营养器官养分向籽粒转移, 提高籽粒中养分吸收比例, 增加成熟期养分吸收总量, 实现作物增产; 而欧杨虹<sup>[33]</sup>认为, 有机肥氮部分替代化肥氮施用, 化肥可以促进有机肥分解, 同时有机肥对化肥具有吸附和活化等作用, 能使化肥氮稳定地被作物吸收, 并促进其在作物体内运输。本研究表明, 玉米营养器官花前积累氮素转运量、转运率及其对籽粒贡献率以及花后氮素同化量均表现为 2/3 化肥+1/3 有机肥 (T2) 处理最高, 这与李卓然<sup>[34]</sup>研究结果基本一致。究其原因, 合适比例的有机肥替代化肥能够改善土壤结构, 促进玉米根系生长, 增强根系对氮素的吸收能力, 使玉米营养器官在生长前期积累更多氮素<sup>[34]</sup>, 为花后氮素同化量的提高奠定基础; 同时, 合适的有机肥替代比例可以优化玉米氮素营养状况, 使玉米在生长过程中更加合理地分配氮素营养, 最终营养器官在花后会将更多氮素转运到籽粒中<sup>[35]</sup>, 提高玉米营养器官花前积累氮素转运量和转运率, 进而增大其对籽粒的贡献率。同时, 本研究发现, 各处理间玉米氮素收获指数 (NHI) 均无显著性差异 (2023 年 T4 处理除外), 这主要是因为, 虽然各处理有机肥替代比例有所不同, 但是均未改变玉米整个生育期内氮素供需平衡状态, 且各处理间氮素分配模式基本一致<sup>[36]</sup>, 因此 NHI 差异不大。此外, 本研究还发现, 2/3 化肥氮+1/3 有机肥氮 (T2) 处理玉米

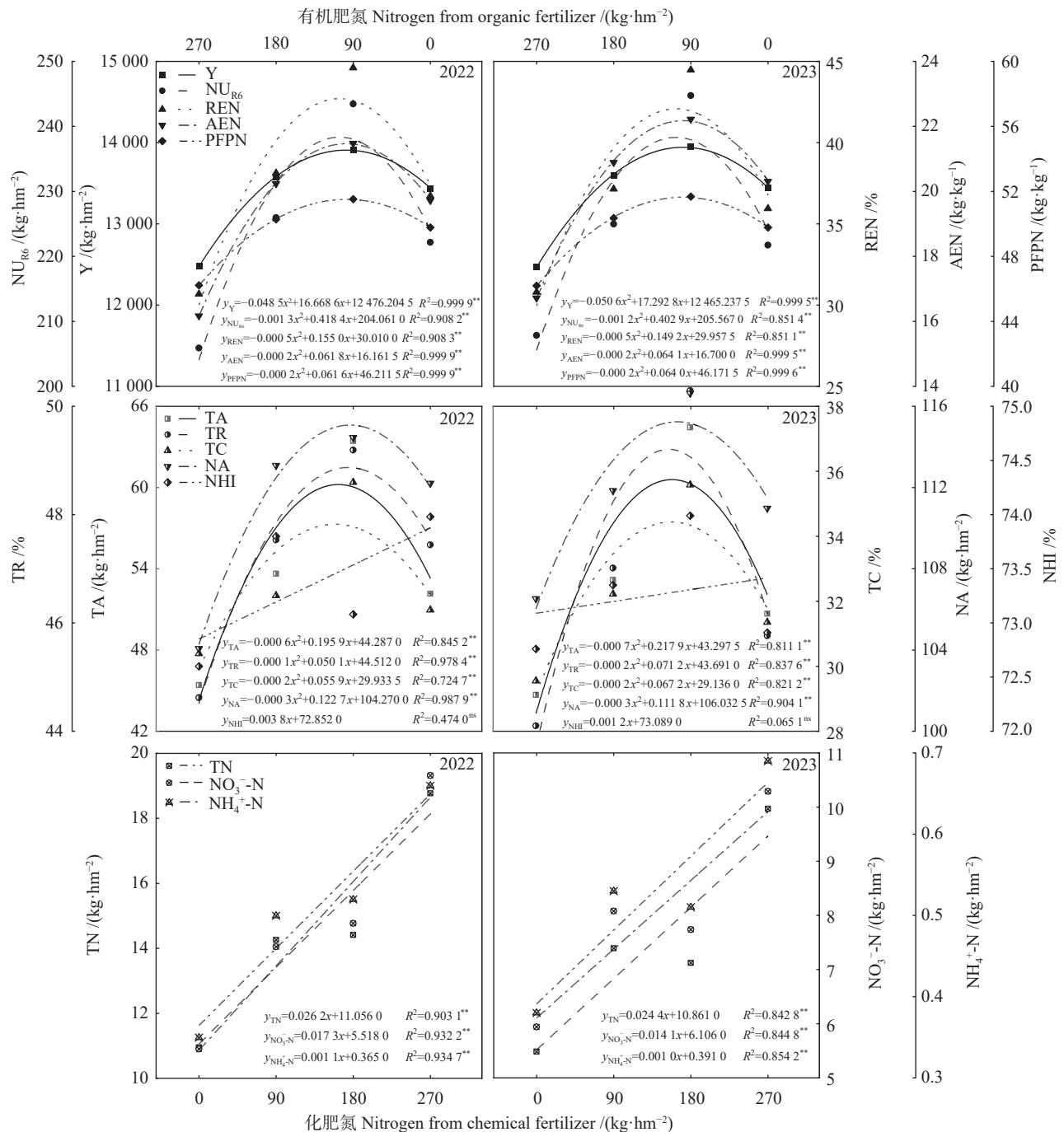


图 6 玉米产量、氮素吸收利用和氮素淋失量与施氮量的回归分析

Fig. 6 Regression analysis of maize yield, nitrogen uptake and utilization and nitrogen leaching in relation to nitrogen application

氮素表观回收利用率 (REN)、氮肥农学效率 (AEN) 和氮肥偏生产力 (PFPN) 均最高, 且洪瑜等<sup>[37]</sup> 在宁夏青铜峡市的玉米研究中也得出了相似结论。这是因

为合适的有机肥氮替代化肥氮比例能够促进化肥氮在土壤中的保存, 以满足玉米整个生育期特别是中后期对氮素的需求, 提高作物对肥料氮的吸收利用,

进而提高其利用效率。另外, 本研究结果已证实, 合适的有机肥氮替代化肥氮比例能够显著提高玉米成熟期地上部吸氮量和产量, 而根据 REN、AEN 和 PFPN 计算公式可知, 吸氮量的上升间接导致了 REN 的提高; 而等氮条件下, 玉米产量的增加, 势必决定了 AEN 和 PFPN 的提高。

### 3.3 有机肥等氮替代化肥对不同形态氮素淋失的影响

农田氮素淋失是引起农业面源污染的主要因素之一, 而有机肥替代化肥是降低农田氮素淋失的有效措施<sup>[38]</sup>。前人研究表明, 有机肥替代化肥能够改善土壤结构, 增加土壤孔隙度和团聚体稳定性, 且有机肥中的腐殖质等有机物质能够与氮素结合, 形成较为稳定的有机氮复合物, 从而降低农田氮素的淋失量<sup>[39]</sup>。本研究结果显示, 各施肥处理下氮素淋失量和淋失系数均随有机肥替代量的增加而降低, 且在玉米生长过程中, 淋失液中各形态氮素浓度均随灌水次数的增加而降低。这是因为有机肥替代化肥增加了土壤团聚体数量和有机碳组分, 加强了土壤对氮素的固持能力<sup>[40]</sup>, 从而降低了氮素淋失风险。在同一个生长季内, 随着灌水次数的增加, 土壤中氮素含量在一定程度上被稀释, 淋失概率逐渐降低, 且水分的补充增强了土壤微生物和作物对氮素的吸收能力, 更多氮素被固定和利用<sup>[41]</sup>, 因此淋失液中氮素浓度进一步降低。此外, 虽然 2022 年和 2023 年玉米生育期内降水量相差较大, 但各处理 2022 年的氮素淋失量与 2023 年极为接近, 甚至 2023 年部分灌水次数下 T3 和 T4 处理氮素淋失量略高于 2022 年。这是因为两年间玉米整个生育期内降水总量虽差异较大, 但单次降水量低且较为分散 (图 1), 2022 年能够引起土壤氮素淋失的有效降水<sup>[42]</sup>有 2 次, 2023 年仅 1 次, 且均未发生在施肥后一周内 (图 1), 因此, 氮素淋失的主要影响因素依旧为灌水, 在灌水一致的情况下, 各处理两年间的氮素淋失量无明显差异; T3 和 T4 处理由于有较多有机肥施入, 且两年间小区分布一致, 因此 2022 年土壤中所残留的有机肥在 2023 年分解释放, 补充了部分氮素, 导致土壤中氮素积累增大, 淋失量有所提高。

根据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017), 满足人类健康的  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量应低于  $18.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[23]</sup>。而本研究发现,  $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  施氮量下, 各有机肥替代比例处理的  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量均未超过该限值。因此, 2022—2023 年玉米产量与有机肥替代量回归方程趋势线 (图 6) 最高点所对应的有机肥替代量均值

$98.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (36.53% 有机肥氮替代化肥氮) 为最适有机肥替代量, 但此结果与陈萍等<sup>[11]</sup> 和吴霞玉等<sup>[43]</sup> 的结果存在一定差异。这是因为吴霞玉等<sup>[43]</sup> 研究采用节水灌溉处理, 灌水量的减少使土壤中微生物活性降低, 进而减缓了有机肥分解, 氮素供应不足, 玉米对化肥氮需求量提高, 因此, 吴霞玉等<sup>[43]</sup> 研究得出有机肥氮替代 25% 的化肥氮为其最佳配比; 而陈萍等<sup>[11]</sup> 研究在潮土区开展, 潮土的通气透水性差, 且肥力偏低, 有机肥替代化肥比例偏高时, 玉米前期氮素养分供应不足, 此时便需要较多的化肥氮来保障玉米前期的生长需求, 所以 30% 有机肥替代是其研究中的最佳配比。由此可见, 灌水量和土壤质地差异也是导致有机肥最佳替代比例结果不同的重要因素。未来还需开展多年试验以确定不同施氮量下的替代比例是否一致, 进一步完善有机肥等氮替代化肥后农田氮等量与限量投入指标体系及农业面源污染防治技术体系, 为宁夏引黄灌区玉米高产种植及面源污染防治提供科学依据。

## 4 结论

1) 有机肥等氮替代 1/3 化肥处理下玉米产量和成熟期地上部吸氮量最高, 2022 年和 2023 年均值分别为  $13\,932.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $244.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。该处理下玉米氮素利用效率最大, 且该处理能显著提高玉米营养器官花前积累氮素转运量、转运率及其对籽粒氮贡献率, 加快籽粒中氮素的积累, 促进产量形成。

2) 与 100% 化肥处理相比, 有机肥等氮替代 1/3 化肥处理能显著降低淋失液中  $\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^-$ -N (2022 年第 3 次灌溉除外) 和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度, 且在单个生长季内 3 种形态氮素淋失量分别平均降低 24.56%、25.29% 和 23.70%, 淋失系数分别降低 37.95%、39.44%、26.83%。

3) 2022 年和 2023 年玉米产量与有机肥替代量回归方程趋势线最高点所对应的有机肥替代比例下, 玉米吸氮量、氮素转运和利用效率均较高, 玉米生长季内  $\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 淋失量相对较低, 且  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量未超过《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017) 规定的满足人类健康的  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量限值 ( $18.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

综上, 本试验条件下有机肥等氮替代 1/3 化肥时, 玉米产量、氮素吸收、转运和利用效率均维持在较高水平, 且各形态氮素淋失量也相对较低。结合回归分析, 在保障环境效益的同时, 玉米产量与有机肥替代量回归方程趋势线最高点所对应的有机肥替代

量两年均值为  $98.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (36.53% 有机肥替代化肥), 该点即为宁夏引黄灌区玉米种植的最佳有机肥替代量, 可达到玉米氮素资源高效利用和农业面源污染防控双赢。

## 参考文献 References

- [1] 陆景陵. 植物营养学-上册[M]. 2 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003  
LU J L. Plant Nutrition-Volume 1[M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2003
- [2] 张福锁, 张卫峰, 马文奇, 等. 中国化肥产业技术与展望[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 32–33  
ZHANG F S, ZHANG W F, MA W Q. Fertilizer Technology and Development in China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 32–33
- [3] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941–1959  
LI S K, ZHAO J R, DONG S T, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1941–1959
- [4] 张君, 赵沛义, 潘志华, 等. 基于产量及环境友好的玉米氮肥投入阈值确定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 136–143  
ZHANG J, ZHAO P Y, PAN Z H, et al. Determination of input threshold of nitrogen fertilizer based on environment-friendly agriculture and maize yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 136–143
- [5] 李援农, 张利, 谷晓博, 等. 缓释氮肥减施对夏玉米产量与氮肥利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 285–294  
LI Y N, ZHANG L, GU X B, et al. Effect of reduced application of slow release nitrogen fertilizer on yield and nitrogen utilization efficiency of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 285–294
- [6] 潘晨, 吴倩, 杨宇, 等. 拔节期淹水条件下施氮量对玉米干物质积累和氮素吸收利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(2): 68–74  
PAN C, WU Q, YANG Y, et al. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation in maize waterlogged at jointing stage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(2): 68–74
- [7] EDMEADES D C. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: A review[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 66(2): 165–180
- [8] LI R, TAO R, LING N, et al. Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physicochemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field: Implications for soil biological quality[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 167: 30–38
- [9] DUAN Y H, XU M G, GAO S D, et al. Nitrogen use efficiency in a wheat-corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications[J]. Field Crops Research, 2014, 157: 47–56
- [10] SEBILO M, MAYER B, NICOLARDOT B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(45): 18185–18189
- [11] 陈萍, 李惠霞, 马玲芳, 等. 宁夏潮土区有机肥替代化学氮肥对玉米产量及氮素利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(9): 136–142  
CHEN P, LI H X, MA L F, et al. Effect of organic fertilizer replacing chemical nitrogen fertilizer on maize yield and nitrogen use efficiency by maize in fluvo-aquic soil of Ningxia[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(9): 136–142
- [12] HU Y J, LI D H, WU Y, et al. Mitigating greenhouse gas emissions by replacing inorganic fertilizer with organic fertilizer in wheat-maize rotation systems in China[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 344: 118494
- [13] 李磊, 司海丽, 朱志明, 等. 有机肥氮替代化肥氮对盐碱地玉米氮素利用率及土壤理化指标的影响[J]. 西北农业学报, 2023, 32(7): 1068–1077  
LI L, SI H L, ZHU Z M, et al. Effect of substitute of chemical fertilizer N with organic manure N on N utilization efficiency in maize and soil physicochemical indexes in saline-alkali land[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2023, 32(7): 1068–1077
- [14] 费聪. 有机肥替代化肥对旱区雨养玉米养分吸收利用及产量的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(7): 1355–1364  
FEI C. Effects of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on nutrient absorption-utilization and yield of rain-fed maize in arid region[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(7): 1355–1364
- [15] 滕颖, 孔凡靖, 陈玉成, 等. 有机无机肥配施模式对氮素淋失的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(22): 81–88  
TENG Y, KONG F J, CHEN Y C, et al. Meta-analysis of the effects of combined application of organic and chemical fertilizers on soil nitrogen leaching[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(22): 81–88
- [16] NIKIÈMA P, BUCKLEY K E, ENNS J M, et al. Effects of liquid hog manure on soil available nitrogen status, nitrogen leaching losses and wheat yield on a sandy loam soil of western Canada[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2013, 93(5): 573–584
- [17] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3934–3943  
XIE J, ZHAO Y N, CHEN X J, et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(20): 3934–3943
- [18] XIA L L, LAM S K, YAN X Y, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance?[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(13): 7450–7457
- [19] WYSOKINSKI A, KOŻUCHOWSKA M. Increasing silage maize yield and nitrogen use efficiency as a result of combined rabbit manure and mineral nitrogen fertilization[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 5856

- [20] 鲁伟丹, 李俊华, 罗彤, 等. 连续三年不同有机肥替代率对小麦产量及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2021, 27(8): 1330–1338  
LU W D, LI J H, LUO T, et al. Effects of different organic fertilizer replacement rates on wheat yield and soil nutrients over three consecutive years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(8): 1330–1338
- [21] 季佳鹏, 赵欣宇, 吴景贵, 等. 有机肥替代 20% 化肥提高黑钙土养分有效性及玉米产量[J]. *植物营养与肥科学报*, 2021, 27(3): 491–499  
JI J P, ZHAO X Y, WU J G, et al. Replacing 20% of chemical nitrogen with manures to increase soil nutrient availability and maize yield in a chernozem soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(3): 491–499
- [22] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 等. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(11): 2136–2142  
WEN Y C, ZHANG Y D, YUAN L, et al. Crop yield and soil fertility response to commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2136–2142
- [23] 翟勇全, 马琨, 贾彪, 等. 不同降水年型滴灌玉米土壤硝态氮分布、淋失量及氮素吸收利用特征[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(5): 765–775  
ZHAI Y Q, MA K, JIA B, et al. Soil nitrate-N distribution, leaching loss and nitrogen uptake and utilization of maize under drip irrigation in different precipitation years[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(5): 765–775
- [24] 戴明, 冯鹏羽, 郭海滨, 等. 氮肥运筹对东北寒区春玉米氮素吸收、利用及淀粉合成的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(7): 101–109  
DAI M, FENG P Y, GUO H B, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen uptake, utilization and starch synthesis of spring maize in cold region of northeastern China[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(7): 101–109
- [25] 王英, 刘汝亮, 王芳, 等. 减氮对引黄灌区春玉米氮素吸收利用和淋失的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(3): 576–584  
WANG Y, LIU R L, WANG F, et al. Effect of nitrogen reduction on nitrogen uptake and leaching of spring maize in the Yellow River irrigation area[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(3): 576–584
- [26] 杨旸, 崔超, 马广全, 等. 有机肥氮替代化肥氮对河套灌区春玉米生长发育、氮素效率及产量的影响[J]. *河南农业科学*, 2020, 49(2): 9–16  
YANG Y, CUI C, MA G Q, et al. Effect of nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer on growth, nitrogen use efficiency and yield of maize in Hetao Irrigation Area[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(2): 9–16
- [27] 娄菲, 左恽平, 李萌, 等. 有机肥替代部分化肥氮对糯玉米产量、品质及氮素利用的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(4): 1053–1064  
LOU F, ZUO Y P, LI M, et al. Effects of organic fertilizer substituting chemical fertilizer nitrogen on yield, quality, and nitrogen efficiency of waxy maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(4): 1053–1064
- [28] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 等氮条件下长期有机无机肥施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2015, 21(2): 318–325  
GAO H J, ZHU P, PENG C, et al. Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on nitrogen efficiency of spring maize and soil inorganic nitrogen content under the same N input[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 318–325
- [29] 陆强, 王继琛, 李静, 等. 秸秆还田与有机无机肥配施在稻麦轮作体系下对籽粒产量及氮素利用的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2014, 37(6): 66–74  
LU Q, WANG J C, LI J, et al. Effect of straw returning and combined applications of organic fertilizer and inorganic fertilizer on grain yield and nitrogen utilization under rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2014, 37(6): 66–74
- [30] 黄苗, 刘蓉, 张敏, 等. 有机无机氮配施对高芥酸油菜绵油 309 产量及品质的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2024, 46(2): 351–358  
HUANG M, LIU R, ZHANG M, et al. Effect of organic and inorganic nitrogen combined application on yield and quality of high erucic acid rapeseed cv Mianyou 309[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2024, 46(2): 351–358
- [31] 王帅兵. 固氮解磷菌配施对复垦土壤氮素转化及吸收利用的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2023  
WANG S B. Effects of combined application of nitrogen fixing and phosphorus dissolving bacteria on nitrogen transformation, absorption and utilization in reclaimed soil[D]. Tai'gu: Shanxi Agricultural University, 2023
- [32] 刘晓明, 王艳群, 马阳, 等. 机械化有机无机肥一体施用模式对玉米干物质和氮素积累及转运的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2021, 44(6): 17–23, 44  
LIU X M, WANG Y Q, MA Y, et al. Effects of integrated application with mechanized organic-inorganic fertilizer on accumulation and transportation of dry matter and nitrogen in maize[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2021, 44(6): 17–23, 44
- [33] 欧杨虹. 有机肥氮部分替代化肥氮对稻麦产量及土壤供氮特性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2008  
OU Y H. Effects of partial substitution of organic fertilizer nitrogen for chemical fertilizer nitrogen on rice and wheat yield and soil nitrogen supply characteristics[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008
- [34] 李卓然. 不同氮肥处理对夏玉米产量及氮素利用率的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015  
LI Z R. Effects of different nitrogen fertilizer treatments on yield and nitrogen use efficiency of summer maize[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2015
- [35] 王鸣腾, 曾冲, 杨东霞, 等. 不同发酵方式有机肥配施化肥对夏玉米产量、光温及养分吸收积累特性的影响[J/OL]. *农业资源与环境学报*, 1–17 [2024-11-15]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0342>  
WANG M T, ZENG C, YANG D X, et al. Effects of various

- fermentation methods for organic fertilizer combined with chemical fertilizer on the yield, light-temperature, and nutrient absorption and accumulation characteristics of summer maize[J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 1–17 [2024-11-15]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0342>
- [36] 李长青, 纪萌, 马萌萌, 等. 天然增效剂与化学抑制剂复配对小麦/玉米轮作体系产量、氮素利用及氮平衡的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(9): 2391–2397
- LI C Q, JI M, MA M M, et al. Effects of combined natural synergists and chemical inhibitors on yield, nitrogen utilization and balance in wheat/maize rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(9): 2391–2397
- [37] 洪瑜, 王芳, 刘汝亮, 等. 长期配施有机肥对灌淤土春玉米产量及氮素利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 248–252, 261
- HONG Y, WANG F, LIU R L, et al. Effects of long-term fertilization on yield and nitrogen utilization of spring maize in irrigation silting soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 248–252, 261
- [38] 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 等. 减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5405–5413
- JIANG H B, ZHANG K Q, ZOU H T, et al. Effects of different fertilization patterns on nitrogen leaching loss from paddy fields under reduced nitrogen[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11): 5405–5413
- [39] 孙莹, 侯玮, 迟美静, 等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤腐殖质组分的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4): 940–952
- SUN Y, HOU W, CHI M J, et al. Effect of combined application of nitrogen fertilizer and organic manure on soil humus composition in greenhouse[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 940–952
- [40] 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 等. 有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4691–4699
- SHAO H Y, LI Z Y, LIU D, et al. Effects of manure application rates on the soil carbon fractions and aggregate stability[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4691–4699
- [41] 艾伟伟, 魏淑红. 小麦氮素吸收利用的调控机制研究进展[J]. *植物生理学报*, 2024, 60(5): 784–798
- AI W W, WEI S H. Research advance on the regulation mechanisms of nitrogen uptake and utilization in wheat[J]. *Plant Physiology Journal*, 2024, 60(5): 784–798
- [42] 焉莉, 冯国忠, 卢文喜, 等. 干旱年际施肥方式对径流淋溶氮磷流失的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2017(9): 32–35
- YAN L, FENG G Z, LU W X, et al. The effect of fertilization method on nitrogen and phosphorus loss by runoff and leaching in dry years[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(9): 32–35
- [43] 吴霞玉, 李盼, 韦金贵, 等. 减量灌水及有机无机肥配施对西北灌区玉米光合生理、籽粒产量及品质的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(4): 1065–1079
- WU X Y, LI P, WEI J G, et al. Effect of reduced irrigation and combined application of organic and chemical fertilizers on photosynthetic physiology, grain yield and quality of maize in northwestern irrigation areas[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(4): 1065–1079