

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.24511

优化施氮对西南地区露地辣椒氮素利用率及土壤矿质氮残留的影响

杨文康^{1,2}, 曹海霖^{1,2}, 杨云飞^{1,2}, 刘发波^{1,2}, 田一鸣^{1,2}, 方伊曼^{1,2},
梁涛^{1,2,3}, 王帅⁴, 赵敬坤⁴, 王孝忠^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 西南大学长江经济带农业绿色发展研究中心, 重庆 400715; 3. 重庆市农业科学院, 重庆 401329; 4. 重庆市农技推广总站, 重庆 401120)

摘要: 为探明氮肥投入量对辣椒产量、氮素利用率和土壤矿质氮 (N_{min}) 残留量的影响, 进一步确定临界植株氮浓度和根层土壤 N_{min} 残留量, 最终筛选出西南地区露地辣椒生产的最优施氮量。2023 年在西南地区露地开展田间试验, 以辣椒为试验材料, 设置 5 个处理, 分别为 N 0 kg/hm² (N0)、优化下调 30% (N 175 kg/hm², N175)、优化施氮 (N 250 kg/hm², N250)、优化上调 30% (N 325 kg/hm², N325) 和农民施肥习惯 (N 400 kg/hm², N400)。结果表明: 辣椒的产量与施氮量呈现线性-平台关系, 与 N400 处理相比, N250 处理的辣椒产量、地上部干物质和氮素积累量差异不显著, 但显著增加了辣椒果实中 10.3% 的干物质分配比例和 9.6% 的氮素分配比例, 氮肥回收利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力分别显著提高了 45.0%、55.1% 和 56.1%。此外, 辣椒地上部干物质积累量与地上部植株氮浓度和根层土壤 N_{min} 残留量之间呈现线性-平台关系, 辣椒开花坐果期、结果中期、盛期和结果末期达到最大地上部干物质积累量所需的地上部临界植株氮浓度分别为 30.0、26.3、24.2 和 26.5 g/kg, 临界根层土壤 N_{min} 残留量分别为 77.7、67.2、56.9 和 48.2 kg/hm²。研究表明, 当施氮量为 250 kg/hm² 时, 能够保证适宜的根层土壤 N_{min} 和植株氮浓度, 同时维持辣椒产量, 增加辣椒果实中的氮素和干物质分配比例, 显著提高氮素利用率, 该结果对指导西南地区露地蔬菜生产具有重要的意义。

关键词: 优化施氮量; 露地辣椒; 产量; 氮素利用率; 临界植株氮浓度; 临界土壤 N_{min} 残留量

辣椒富含人体所需的多种维生素、类胡萝卜素、矿物质、辣椒素等营养物质, 是最常食用的蔬菜之一^[1]。2022 年我国辣椒的种植面积约为 223 万 hm², 占我国蔬菜种植面积的 10% 左右, 总产量约为 6400 万 t, 年产值在 2700 亿元以上^[2]。西南地区是我国最大的辣椒产区, 种植面积大约占全国辣椒种植面积的 30%^[3]。氮素作为辣椒最重要的营养元素之一, 对辣椒的产量和品质改善有至关重要的作用^[4], 但西南地区普遍存在氮肥施用过量的问题, 先前课题组大样本调查结果显示, 西南地区辣椒平均施氮量为 N 400 kg/hm², 远超辣椒自身养分需求。氮肥过量施用和西南地区高温多雨的区域

特性导致该地区氮肥利用率低、环境代价高等问题突出^[5]。因此, 急需优化西南地区露地辣椒系统的氮肥管理, 以实现在维持辣椒的高产和高氮肥利用率的同时降低土壤环境风险。

优化氮肥用量能够显著减少土壤氮素残留和活性氮损失^[6-7], 是农业生产中氮肥管理实践的重要举措。“根层氮管理”策略通过考虑作物不同生长阶段土壤 N_{min} 含量和作物目标氮需求量来确定最优施氮量^[8], 实现土壤供应与作物氮需求在时间、空间和速率相协调^[9-11], 在不牺牲产量的情况下降低氮肥施用量。在黄瓜^[7]、番茄^[12]、苦瓜^[13]的研究中发现, “根层氮管理”策略在维持产量的情况下减少了 18.8%~73.0% 的氮肥投入。然而, 受到区域气候条件、土壤和蔬菜类型以及田间管理实践等因素的影响, 不同蔬菜最优施氮量差异较大。例如, 以最大产量和最小氮损失为目标, 宁夏设施番茄-黄瓜轮作系统中, 番茄季和黄瓜季的优化施氮量分别为 525 和 450 kg/hm²^[14]; 而天津地区温室番茄最佳氮肥施用范围在冬春季节为 350 ~ 400

收稿日期: 2024-09-11; 录用日期: 2024-11-24

基金项目: 国家自然科学基金 (U20A2047); 西南大学创新研究 2035 试点计划基金 (SWU-XDZD22001)。

作者简介: 杨文康 (2000-), 硕士, 研究方向为农业资源与环境。
E-mail: ywk001015@163.com。

通讯作者: 王孝忠, E-mail: wxz20181707@swu.edu.cn。

kg/hm², 秋冬季节为 150 ~ 200 kg/hm² [15]。

临界氮浓度是指获得作物最大生物量所需的最小氮浓度值 [16]。明确作物最大地上部干物质量所需的临界植株氮浓度和土壤 N_{min} 残留量, 对于优化作物各关键生育期的推荐施氮量至关重要 [17]。Zhang 等 [18] 在华北平原的研究发现, 拔节期和扬花期达到高产小麦最优群体数量所需的临界植株氮浓度分别为 28.1 和 19.5 g/kg, 临界根层土壤 N_{min} 含量分别为 74 和 129 kg/hm²。Cao 等 [19] 在露地白菜田间原位监测发现, 获得最大干物质累积量的生长不同时期植株氮浓度临界浓度为 33.2 ~ 31.3 g/kg, 临界根层土壤 N_{min} 残留量临界浓度为 N 41.4 ~ 62.0 kg/hm²。由于蔬菜对养分的生理需求特性与粮食作物不同, 蔬菜根系较浅, 养分吸收能力较弱, 养分需求量大 [11], 导致粮食作物与蔬菜的临界植株氮浓度和土壤 N_{min} 残留量有较大的差异。然而, 目前关于临界土壤 N_{min} 残留量和植株氮浓度的研究主要聚焦于我国华北平原和西北地区的谷类作物, 如小麦和玉米等 [18, 20-21]。当前对于西南地区露地蔬菜系统的临界植株氮浓度和根层土壤 N_{min} 含量的研究还较少, 且受当地气候条件、土壤类型和田间氮肥管理措施等因素的影响而有所差异。

本研究以西南地区露地辣椒为研究对象, 探究不同施氮量对辣椒产量、干物质积累与分配、氮素的积累量与分配比例、氮肥利用率和根层土壤 N_{min} 残留量的影响, 并明确辣椒各关键生育期所需的临界植株氮浓度和根层土壤 N_{min} 残留量, 最终明确我国西南地区露地辣椒的施氮量, 降低环境风险, 为

西南地区蔬菜产业的绿色发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于 2023 年 4—8 月在重庆市合川区渭沱镇西南大学实验农场合川基地 (30° 0' N, 106° 7' E) 进行。该区域属于典型的亚热带季风气候, 夏季炎热多雨, 冬季温和少雨。种植方式是该地区典型的大白菜-辣椒轮作系统。2023 年辣椒全生育期 (4 月 20 日到 8 月 3 日) 的总降水量为 223.8 mm。根据中国土壤分类系统, 试验土壤属于紫色土。试验开始前 0 ~ 20 cm 表层土壤的性质为 pH 5.65 (土:水 = 1:2.5); 总氮 0.50 g/kg; 土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量分别为 4.89 和 2.06 mg/kg; 有效磷 19.5 mg/kg; 交换性钾 56.0 mg/kg; 有机质 9.19 g/kg。

1.2 试验设计

田间试验小区分组采用完全随机设计, 共设置 5 个施氮量处理: 不施氮肥 (N0); 优化施氮量下调 30%, 施氮 175 kg/hm² (N175); 优化施氮量处理, 施氮 250 kg/hm² (N250), 基于文献分析和专家推荐南方露地蔬菜的最佳施氮量; 优化施氮量上调 30%, 施氮 325 kg/hm² (N325); 农户常规处理, 施氮 400 kg/hm² (N400), 基于西南地区 314 份辣椒种植户的调查问卷汇总的农民施氮量。每个处理 4 次重复, 共计 20 个小区。本试验所使用的氮、磷、钾肥分别为尿素 (N 46.2%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 12.0%) 和硫酸钾 (K₂O 52.0%)。各处理在辣椒不同生育期的施肥量如表 1 所示。

表 1 各处理在辣椒不同生育期的施肥量 (kg/hm²)

处理	施肥量 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)				
	苗期	开花坐果期	结果中期	结果盛期	总计
N0	0-70-60	0-70-80	0-0-80	0-0-80	0-140-300
N175	70-70-60	35-70-80	35-0-80	35-0-80	175-140-300
N250	100-70-60	50-70-80	50-0-80	50-0-80	250-140-300
N325	130-70-60	65-70-80	65-0-80	65-0-80	325-140-300
N400	280-145-115	120-145-115	0-0-0	0-0-0	400-290-230

辣椒品种为适宜我国西南地区气候条件、栽培最广泛的‘辛香 8 号’, 在 2023 年的大田试验中, 辣椒于 4 月 20 日移栽, 栽培行距为 60 cm, 行内株距为 40 cm, 每个小区面积 46.5 m² (5.6 m × 8.3 m)。在辣椒移栽后第 12 d 追施一次基肥, 第 43、62、82 d 的开花坐果期、结果中期和盛果期分别进

行 3 次肥料追施。氮素基肥和 3 次追肥所占比例为 2:1:1:1。所有肥料均在辣椒植株附近土壤表面以下 8 ~ 12 cm 处穴施后覆土。辣椒果实于 2023 年 7 月 11 日和 8 月 3 日收获两次。辣椒生育期内铲除杂草, 喷洒杀菌剂和杀虫剂控制病虫害。

1.3 样品采集与分析

采用“对角线”五点取样法,在辣椒各关键生育期用土钻在距离辣椒植株约 20 cm 处钻取 0 ~ 60 cm 深度的土壤,分为 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 3 个土层。一部分土壤样品过筛(2.00 mm)风干后用于基本理化指标的测定,另一部分土壤样品过筛后带回实验室,用 0.01 mol/L 氯化钙溶液提取铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)。浸提液用全自动连续流动分析仪 AA3 (SEAL Analytical GmbH) 进行测定。

土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积量 (N_{min} , kg/hm^2) 按下式计算:

$$N_{\text{min}} = d \times P_B \times C \times 0.1 \quad (1)$$

式中, d 为土层厚度 (20 cm); P_B 为土壤容重 (g/cm^3); C 为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量 (mg/kg); 0.1 为换算系数。土壤矿质氮累积量为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积量之和。0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层容重分别为 1.42、1.74、1.71 g/cm^3 。

在每个处理小区的中间两垄中选择长势均匀的 16 株辣椒标记,分两次进行产量测定。同时,收集辣椒植株样品,洗净后置于烘箱 105 °C 杀青 30 min, 75 °C 烘干至恒重后称量干重。不同部位(茎、叶和果实)样品干燥后被磨成粉末,用于测定氮浓度(凯氏定氮法)。

各部位的氮累积量为氮浓度与干物质累积量的乘积;辣椒地上部植株的氮浓度为茎、叶、果氮累积量之和与茎、叶、果干物质累积量之和的比值。

氮素利用率指数由氮素回收效率 (REN)、氮肥农学效率 (AEN) 和氮肥偏生产力 (PFPN) 表示,计算公式如下^[22]:

$$\text{REN} (\%) = (U_a - U_{0a}) / N_{\text{rate}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{AEN} (\text{kg}/\text{kg}) = (Y_a - Y_{0a}) / N_{\text{rate}} \quad (3)$$

$$\text{PFPN} (\text{kg}/\text{kg}) = Y_a / N_{\text{rate}} \quad (4)$$

式中, U_a 和 U_{0a} 分别表示施氮和不施氮处理的辣椒地上部植株的氮素积累量(植株各部位器官的干物质积累量 \times 相应部位的植株氮浓度); N_{rate} 表示不同处理的施氮量; Y_a 和 Y_{0a} 分别表示各施氮处理和不施氮处理的辣椒产量。

1.4 数据处理统计分析

采用 Excel 2019 进行基础数据处理,用 Origin 2024 pro 进行制图;通过 SPSS 26.0 进行回归分析,采用最小显著性 (LSD) 进行显著性检验,显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 氮肥施用量对辣椒产量的影响

辣椒产量随施氮量增加而增加,当施氮量达到优化用量 ($\text{N } 250 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 后保持稳定(图 1)。N0、N175、N250、N325 和 N400 处理的辣椒总产量分别为 8.3、29.6、37.2、37.0 和 38.1 t/hm^2 (图 1)。就辣椒总产量而言,与 N250 处理相比,N175 处理产量降低了 20.4%,而 N250、N325 和 N400 处理间产量均无显著性差异(图 1, $P < 0.05$),不同处理间在结果盛期与结果末期的辣椒产量与总产量趋势相同。此外,辣椒产量与施氮量之间呈现线性-平台关系,其临界施氮量(达到最大辣椒果实产量所需的最小施氮量)为 $\text{N } 240.4 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (图 2)。

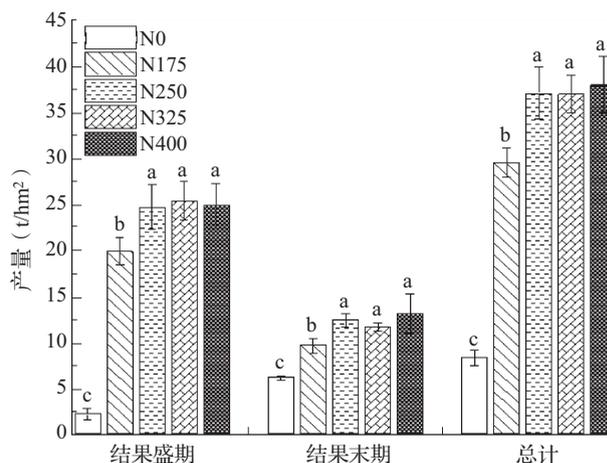


图 1 不同施氮处理对辣椒果实产量的影响

注: $n = 4$; 不同小写字母表示同一生育时期辣椒果实产量差异显著 ($P < 0.05$)。

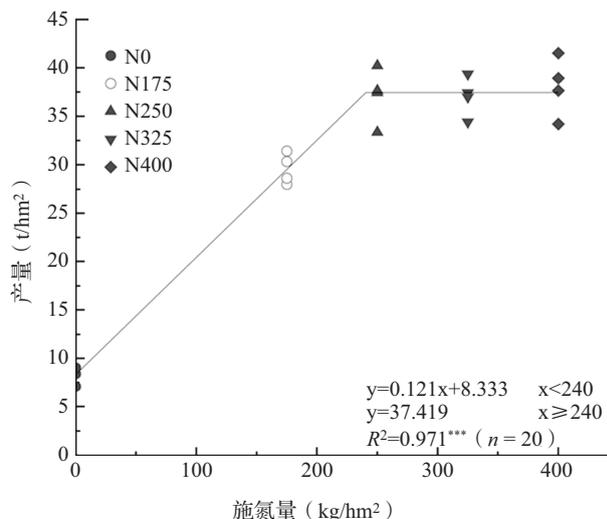


图 2 辣椒果实产量与施氮量之间的关系

注: *** 表示在 $P < 0.001$ 水平差异显著。

2.2 干物质积累量与分配比例

随着辣椒生育期延长，其干物质积累量呈现“慢-快-慢”的增长趋势（图3）。与N0处理相比，施氮显著提高了辣椒地上部干物质积累量（图3， $P < 0.05$ ）。与N250处理相比，N175处理在辣椒开花坐果期、结果中期、结果盛期和结果末期的地上部植株干物质积累量分别下降了30.6%、19.5%、17.9%和16.0%；N325、N400处理在辣椒开花坐果期的地上部植株干物质积累量较N250处理分别下降了11.2%、17.0%，而结果中期、结果盛期和结果末期无显著性差异。

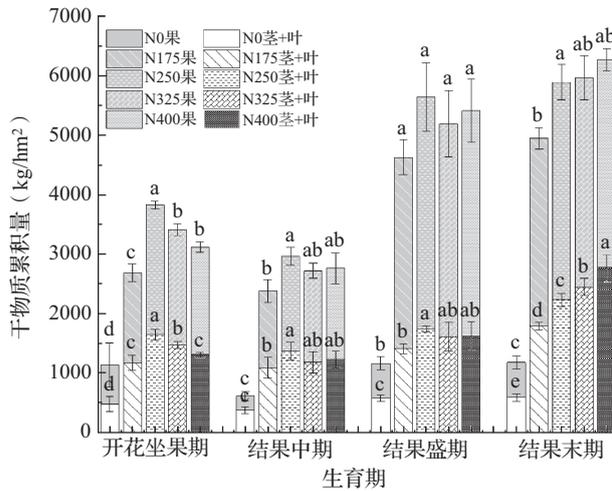


图3 不同施氮处理对辣椒各关键生育期地上部干物质积累量的影响

注：柱上不同小写字母表示同一部位处理间差异达到0.05显著水平。下同。

在结果末期，与N250处理相比，N175处理的辣椒营养器官（茎+叶）干物质积累量显著降低了19.7%，N325处理较N250处理的辣椒营养器官

干物质积累量无显著性差异，N400处理的辣椒营养器官干物质积累量显著提高了19.8%；而N250、N325和N400处理的辣椒果实干物质积累量之间无显著性差异。此外，施肥处理中N400处理的辣椒地上部总干物质在果实中的分配比例最低，而在营养器官中的分配比例最高；N250较N400处理显著增加了10.3%的干物质在果实中的分配比例，减少了14.5%的干物质营养器官分配比例（图4）。

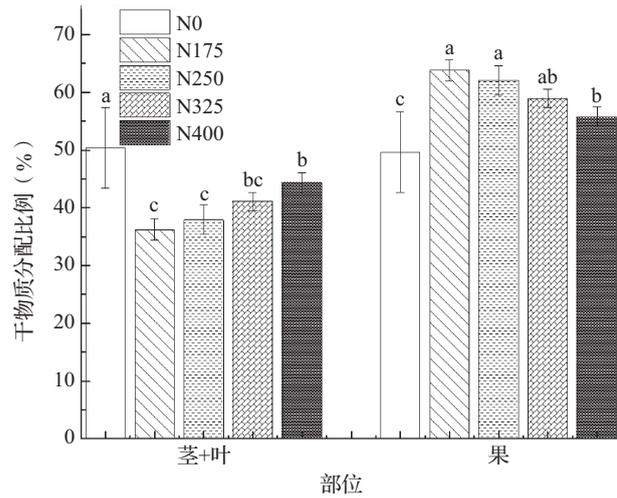


图4 辣椒结果末期地上部营养器官（茎+叶）和果实中的干物质分配比例

2.3 氮肥施用量对植株氮素吸收、积累量与分配的影响

各供氮水平的辣椒在开花坐果期地上部植株氮浓度显著高于后3个时期（表2）。与N0处理相比，氮肥投入显著提高了辣椒地上部植株氮浓度；N250、N325和N400处理的辣椒地上部植株氮浓度在各关键生育期均无显著性差异（表2， $P < 0.05$ ）。

表2 不同施氮量下辣椒地上部植株氮浓度的动态变化

(g/kg)

关键生育期	部位	施氮处理				
		N0	N175	N250	N325	N400
开花坐果期	茎	12.8 ± 4.7b	15.8 ± 4.6ab	18.1 ± 0.8a	17.0 ± 0.9ab	17.8 ± 1.9ab
	叶	33.9 ± 4.3c	48.6 ± 2.1a	45.8 ± 4.6a	46.3 ± 2.7a	40.1 ± 2.9b
	果	26.3 ± 1.5b	34.9 ± 0.9a	32.3 ± 0.4a	35.7 ± 7.0a	32.7 ± 2.7a
	地上部整体	23.4 ± 2.7b	31.7 ± 2.8a	32.8 ± 1.6a	33.6 ± 2.2a	30.1 ± 1.7a
结果中期	茎	7.9 ± 0.4a	11.4 ± 0.6b	12.0 ± 0.4ab	12.2 ± 0.7ab	12.6 ± 0.7a
	叶	31.4 ± 2.2b	37.9 ± 7.0b	47.6 ± 4.6a	46.1 ± 4.0a	48.8 ± 2.9a
	果	20.0 ± 1.3b	24.8 ± 0.3a	23.7 ± 1.7a	24.8 ± 0.8a	24.7 ± 0.9a
	地上部整体	20.4 ± 2.5c	24.3 ± 1.4b	26.2 ± 0.4ab	26.6 ± 1.7ab	27.3 ± 0.6a

续表

关键生育期	部位	施氮处理				
		N0	N175	N250	N325	N400
结果盛期	茎	7.3 ± 1.0b	12.0 ± 2.5a	11.4 ± 0.9a	12.5 ± 1.0a	12.5 ± 1.0a
	叶	24.0 ± 3.2b	38.9 ± 3.2a	41.8 ± 1.9a	40.3 ± 3.4a	43.2 ± 2.7a
	果	20.4 ± 3.0a	22.2 ± 1.2a	22.4 ± 0.8a	22.6 ± 0.9a	22.0 ± 1.5a
	地上部整体	18.3 ± 1.9b	23.3 ± 0.7a	23.7 ± 0.6a	24.0 ± 0.6a	23.6 ± 1.1a
结果末期	茎	7.9 ± 0.6b	15.5 ± 0.7a	15.4 ± 1.2a	16.3 ± 0.4a	15.7 ± 1.7a
	叶	27.8 ± 1.3c	35.5 ± 1.2b	40.4 ± 1.4a	39.5 ± 1.1a	36.8 ± 2.7b
	果	23.0 ± 0.5c	26.6 ± 0.3b	27.7 ± 1.2ab	26.3 ± 1.6b	28.6 ± 0.6a
	地上部整体	20.6 ± 0.9c	25.4 ± 0.5b	26.9 ± 0.5a	26.7 ± 1.4ab	27.6 ± 0.7a

注：表中数据为4个重复的平均值 ± 标准误差。经多重比较检验，不同小写字母表示在同一生育期不同施肥处理的显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

与干物质积累量的动态变化趋势相同，辣椒地上部植株氮素积累量也呈现“慢-快-慢”的增长趋势（图5）。在辣椒结果末期，N250处理的辣椒茎和叶的氮素积累量较N325和N400处理分别显著减少了14.8%和21.4%，而辣椒果实的氮素积累量则无显著性差异。N250处理的辣椒地上部植株总氮积累量在营养器官和果实中的分配比例与N175处理相比均无显著性差异，较N325和N400处理在营养器官中的分配比例分别显著减少了14.3%和14.5%，在果实中的分配比例分别显著提高了9.4%和9.6%（图6， $P < 0.05$ ）。

2.4 氮肥施用量对辣椒氮肥利用率的影响

各施氮处理的氮素回收率（REN）、氮肥农学效率（AEN）和氮肥偏生产力（PFPN）均随施氮量的增加而逐渐降低。N250处理的REN、AEN、PFPN分别为53.8%、115.3 kg/kg、148.6 kg/kg。与N325处

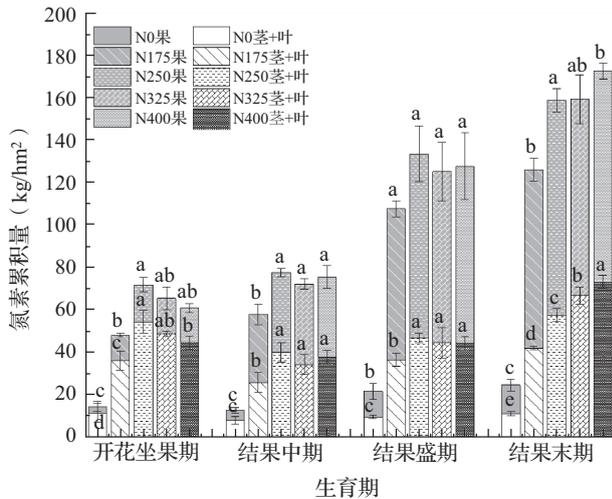


图5 不同施氮处理的辣椒各关键生育期地上部氮素积累量

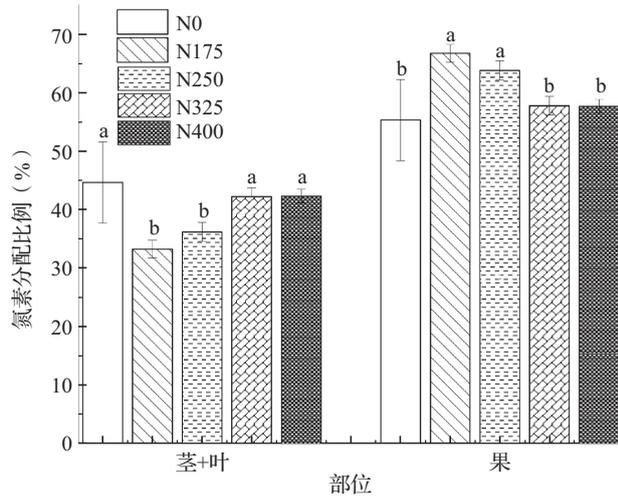


图6 辣椒结果末期地上部营养器官（茎+叶）和果实氮素分配比例

理相比，N250处理的REN、AEN和PFPN分别显著提高了29.3%、30.5%和30.4%；与N400处理相比，N250处理的REN、AEN和PFPN分别显著提高了45.0%、55.1%和56.1%（表3， $P < 0.05$ ）。N250与N175处理REN和AEN间差异不显著。

表3 不同施氮量对辣椒氮素回收率、农学效率和氮肥偏生产力的影响

处理	氮素回收率 (%)	氮肥农学效率 (kg/kg)	氮肥偏生产力 (kg/kg)
N175	58.1 ± 2.0a	121.4 ± 10.8a	169.0 ± 9.0a
N250	53.8 ± 2.9a	115.3 ± 13.0a	148.6 ± 11.4b
N325	41.6 ± 4.7b	88.3 ± 4.8b	114.0 ± 6.3c
N400	37.1 ± 1.8b	74.3 ± 7.7b	95.2 ± 7.6d

2.5 氮肥施用量对土壤矿质氮 (N_{min}) 残留量的影响

土壤 N_{min} (NH_4^+-N , $NO_3^- -N$) 残留量在不同深度的土层 (0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm) 内均随着施氮量的增加而增加, 随着深度增加而降低 (表 4)。此外, 在根层土壤 (0 ~ 60 cm) 范围内, 各处理的 N_{min} 残留量随着辣椒的生长发育整体呈现下降趋势。其中, N250 处理在辣椒开花坐果

期、结果中期、结果盛期和结果末期的 0 ~ 60 cm 根层土壤范围内 N_{min} 残留量分别为 134.1、126.1、80.0 和 78.5 kg/hm^2 , 较 N325 处理在辣椒开花坐果期、结果中期、结果盛期和结果末期分别显著降低了 26.9%、37.4%、35.3% 和 34.5%, 较 N400 处理分别显著降低了 61.0%、52.7%、58.0% 和 60.0%。

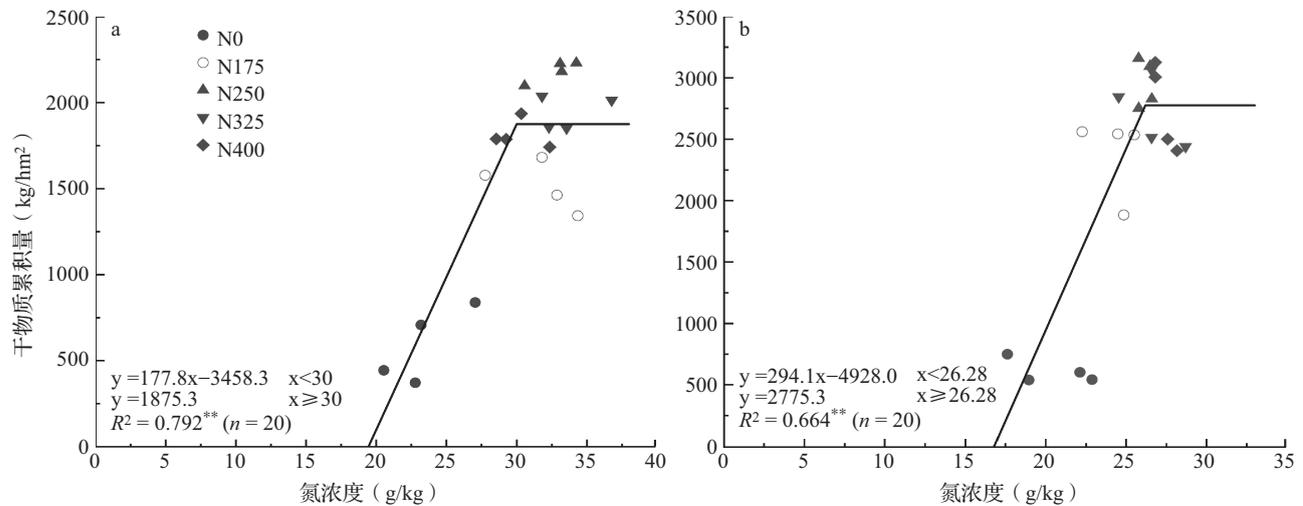
表 4 施氮对辣椒不同生育期土壤 N_{min} 残留的影响 (kg/hm^2)

关键生育期	土层 (cm)	施氮处理				
		N0	N175	N250	N325	N400
开花坐果期	0 ~ 20	14.8 ± 3.5e	31.0 ± 3.0d	61.2 ± 5.1c	79.9 ± 6.4b	171.5 ± 9.5a
	20 ~ 40	14.1 ± 1.2c	21.5 ± 3.0c	51.6 ± 9.8b	61.4 ± 7.4b	119.9 ± 21.1a
	40 ~ 60	13.2 ± 0.7c	16.8 ± 2.8c	21.3 ± 2.8c	42.3 ± 10.8b	52.8 ± 5.4a
结果中期	0 ~ 20	10.0 ± 0.9d	21.3 ± 0.6d	68.0 ± 9.8c	94.4 ± 21.9b	160.1 ± 12.1a
	20 ~ 40	11.8 ± 0.8c	19.3 ± 6.0bc	32.7 ± 7.2b	80.5 ± 15.8a	72.8 ± 12.9a
	40 ~ 60	11.3 ± 0.3c	16.9 ± 3.0bc	25.4 ± 8.8ab	26.6 ± 7.4ab	33.7 ± 7.2a
结果盛期	0 ~ 20	10.1 ± 0.5c	23.1 ± 2.7bc	40.3 ± 7.1bc	63.7 ± 29.0a	73.4 ± 5.4a
	20 ~ 40	12.1 ± 0.4d	19.7 ± 2.2c	22.0 ± 3.7c	34.9 ± 5.3b	63.2 ± 7.8a
	40 ~ 60	11.7 ± 0.5c	15.3 ± 2.0bc	17.7 ± 2.1bc	25.0 ± 8.5bc	54.1 ± 10.5a
结果末期	0 ~ 20	9.4 ± 0.6d	13.8 ± 1.5d	35.6 ± 12.4c	65.9 ± 3.8b	83.9 ± 11.3a
	20 ~ 40	10.8 ± 0.3c	14.2 ± 2.0c	27.2 ± 4.9b	33.1 ± 2.7b	70.1 ± 11.8a
	40 ~ 60	10.4 ± 0.9c	14.0 ± 1.9bc	15.7 ± 1.1bc	20.7 ± 4.9bc	42.1 ± 9.1a

2.6 辣椒各生育期的临界干物质累积量、植株氮浓度和根层土壤 N_{min} 残留量

在 2023 年辣椒季, 干物质累积量与植株氮浓度和根层土壤 N_{min} 残留量之间呈线性-平台关系 (图 7、8、9)。其中, 在辣椒开花坐果期、结果中期、盛期和末期达到最大地上部干物质累积量所需的临界植株氮浓度分别为 30.0、26.3、24.2 和 26.5 g/kg , 相对应的最大地上部干物质累积量分别为 1875、2775、

5526 和 6061 kg/hm^2 (图 7); 达到最大地上部植株氮浓度所需的临界根层土壤 N_{min} 残留量分别为 61.6、49.0、56.1 和 40.4 kg/hm^2 , 相对应的地上部植株氮浓度的最大值分别为 32.1、26.1、23.7 和 26.8 g/kg (图 8); 达到最大地上部干物质累积量所需的临界根层土壤 N_{min} 残留量分别为 77.7、67.2、56.9 和 48.2 kg/hm^2 , 相对应的辣椒地上部干物质累积量的最大值分别为 1948、2811、5257 和 6045 kg/hm^2 (图 9)。



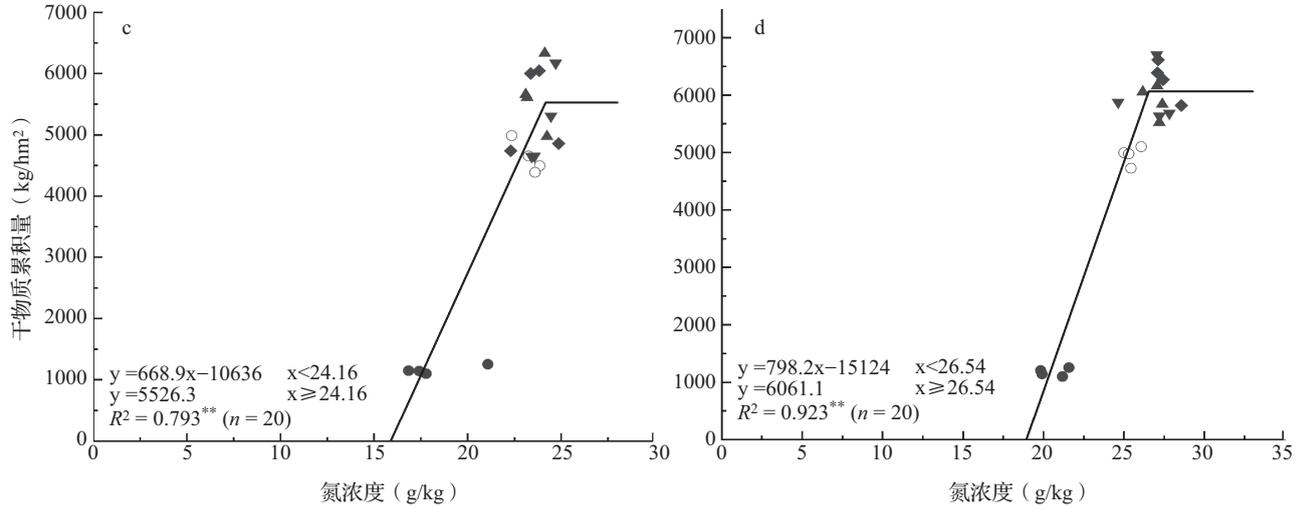


图7 辣椒开花坐果期、结果中期、结果盛期和结果末期地上部干物质积累量与植株氮浓度之间的关系

注: a 为开花坐果期, b 为结果中期, c 为结果盛期, d 为结果末期; 每个数据点代表每次重复中的值; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平相关性显著。下同。

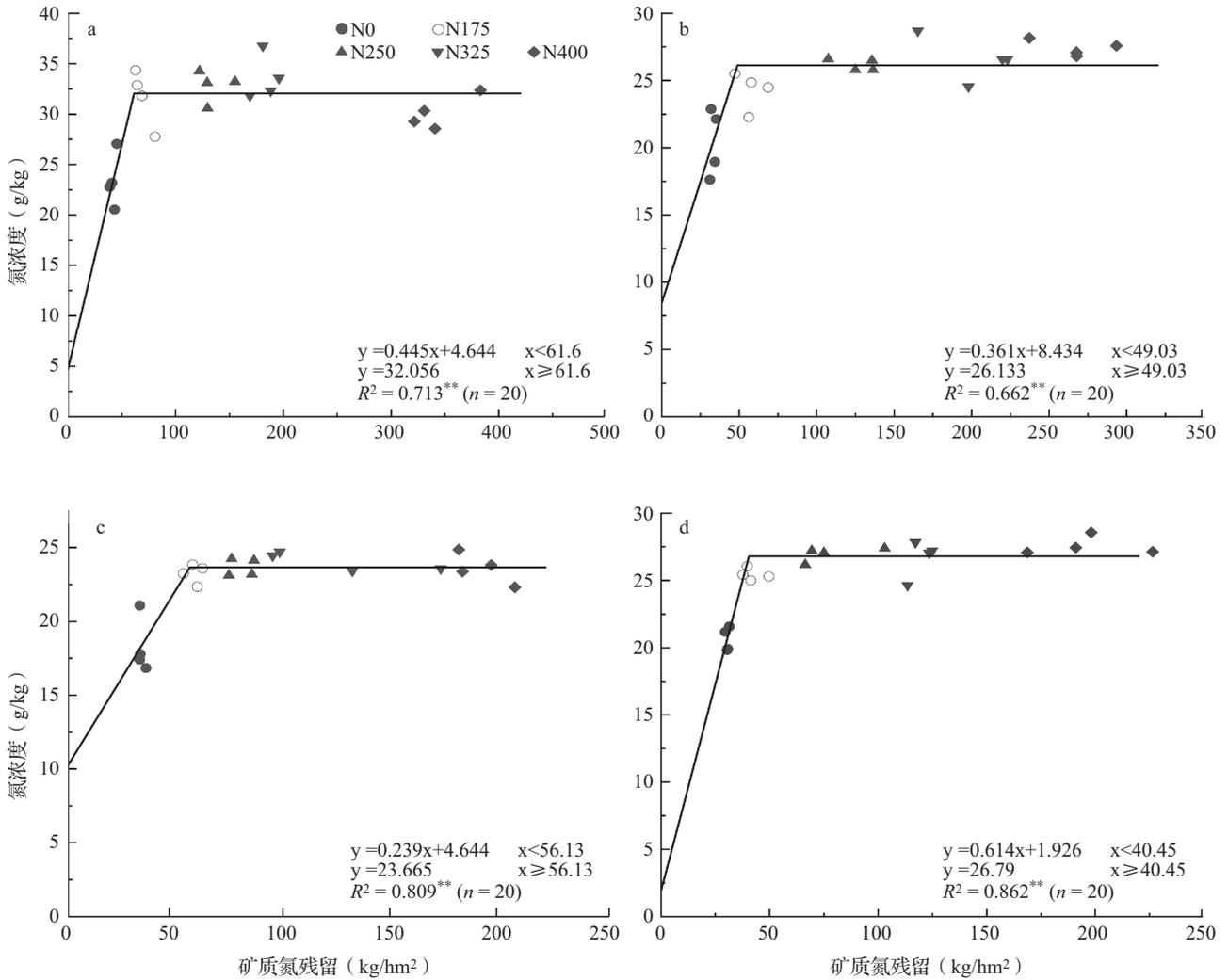


图8 辣椒开花坐果期、结果中期、结果盛期和结果末期地上部植株氮浓度与根层(0~60 cm)土壤 N_{min} 残留量之间的关系

注: a 为开花坐果期, b 为结果中期, c 为结果盛期, d 为结果末期。

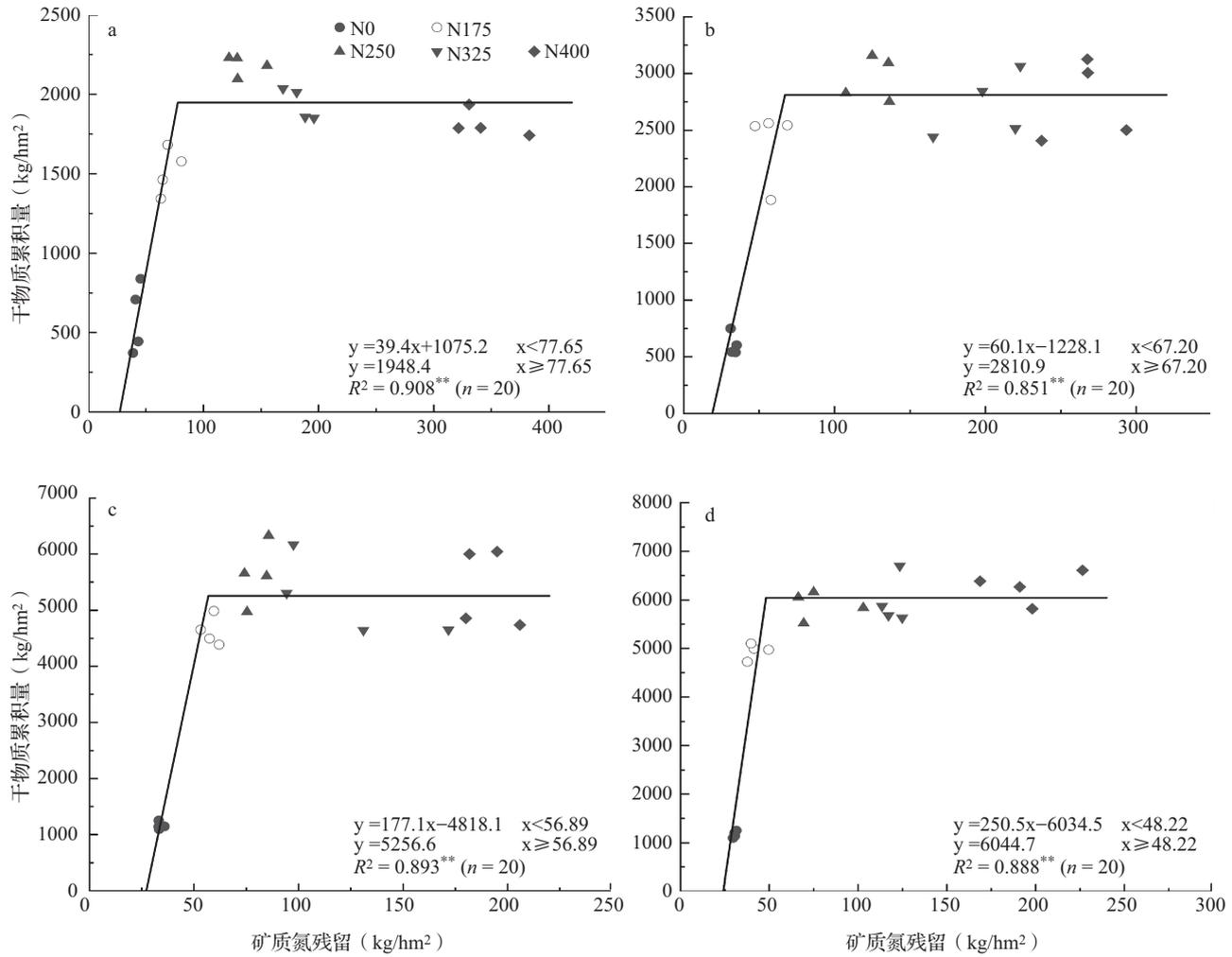


图9 辣椒开花坐果期、结果中期、结果盛期和结果末期地上部干物质积累量与根层(0~60 cm)土壤 N_{min} 残留量之间的关系
注: a 为开花坐果期, b 为结果中期, c 为结果盛期, d 为结果末期。

3 讨论

3.1 施氮量对辣椒产量、氮肥利用率、干物质积累和氮吸收的影响

适当的氮肥投入可以提高作物生产力, 促进植株氮素吸收^[23-24], 进一步提高蔬菜产量^[25-27]。本研究表明, 辣椒产量与施氮量呈现线性-平台关系, 并明确临界施氮量为 $N 240.4 \text{ kg/hm}^2$ 。在本研究中, 与农民施肥习惯相比, 优化施氮处理 ($N250$) 在维持辣椒产量的同时显著提高了氮肥利用率。导致其差异的原因为首先, 农民常规施肥重基肥轻追肥, 超过一半的氮肥投入到基肥中, 高氮肥投入容易造成土壤酸化和板结^[28], 抑制辣椒植株根系的生长, 影响辣椒对养分的吸收利用。其次, 由表2和图5可知, $N250$ 处理与农户常规施肥处理相比, 辣椒果实的氮浓度以及氮素累积量在

各生育期均无显著性差异, 表明施氮量 250 kg/hm^2 已经满足了辣椒果实对氮素的需求, 过量的氮肥投入对辣椒没有增产效应。此外, $N250$ 处理依据辣椒不同生长阶段对养分的特异性需求, 调整了氮肥追施比例, 增加了追肥次数, 各生育期 $0 \sim 60 \text{ cm}$ 土层的土壤 N_{min} 分别为 134.1 、 126.1 、 80.0 、 78.5 kg/hm^2 , 辣椒地上部各生育期氮素吸收量分别为 71.7 、 5.7 、 56.1 、 25.3 kg/hm^2 , 虽然 N_{min} 含量处于较低水平, 但是维持了辣椒各生育期对氮素的需求量, 保证了辣椒整个生育期内的土壤氮素供应量与实际氮素吸收量达到动态平衡, 促进养分向辣椒果实转移, 从而维持了辣椒的高产。本研究表明, 在结果末期, $N250$ 处理下, 果实中累积了高达 62.1% 的总氮, 而营养组织仅占 37.9% ; 而 $N400$ 处理下, 氮素在果实的分配比例为 55.7% , 而营养组织的分配比例高达 44.3% , 相较于 $N250$ 处理, 明显提高

了氮素在营养组织中的分配比例,不利于氮素向果实中分配。这一发现与前人研究一致^[13, 29-31],当氮肥投入过量,果实中的氮累积和干物质累积的分配比例下降。以上结果表明,优化施氮策略有利于促进辣椒生长,氮肥供需匹配,组织间营养平衡。

3.2 施氮量对辣椒地上部植株氮浓度的影响

临界氮浓度已成为评估作物所需氮状况的关键指标,用于反馈氮管理效果,表明植株在获得最大生物量时所需的最低氮浓度水平^[16]。本研究中辣椒开花坐果期、结果中期、盛期和末期达到最大地上部干物质积累量所需的临界植株氮浓度分别为30.0、26.3、24.2和26.5 g/kg(图8),高于小麦扬花期的19.5 g/kg^[18]、玉米灌浆期的15.1 g/kg^[20]等谷类作物的临界植株氮浓度值。一方面,辣椒与小麦、玉米等谷类作物相比,根系浅,养分和水分吸收能力弱,导致氮肥投入高于谷类作物^[11, 30];另一方面,辣椒与谷类作物对氮素吸收、转运、同化以及再分配能力不同,辣椒可能具有更高的硝酸还原酶活性,有助于NO₃⁻-N的转化吸收,促进氮素的同化能力^[32-33]。此外,实现最大生物量的临界植株氮浓度与氮肥用量、品种、区域气候、栽培条件等密切相关,西北地区温室甜椒临界氮浓度为47.2 g/kg^[34],远高于本研究中辣椒的临界氮浓度,且其获得的最大生物量也远高于本研究结果,临界氮浓度对于监测辣椒氮素状况、指导施肥及预测产量具有重要的指导意义。

3.3 施氮量对土壤N_{min}残留量的影响

施氮会显著提高土壤N_{min}含量,增强土壤的氮素供应能力,而当施氮量超过作物生长的实际需求,土壤N_{min}会出现净积累现象^[35]。在本研究中,辣椒干物质积累量与土壤N_{min}呈现线性-平台关系,在辣椒开花坐果期、结果中期、盛期和末期,达到最大地上部干物质积累量所需的根层临界土壤N_{min}残留量分别为77.7、67.2、56.9和48.2 kg/hm²,均低于N250处理的实测值,表明施氮量N 250 kg/hm²条件下的土壤氮素供应已能满足辣椒生长需求,进一步投入氮肥将会导致氮素损失^[18-20]。而农户的高氮肥投入导致辣椒收获后根层N_{min}残留量高达N 196.1 kg/hm²,是德国KNS(Kulturbegleitende-N_{min}-Sollwerte)系统^[36]蔬菜收获后土壤N_{min}含量阈值(100 kg/hm²)的1.96倍。这主要是因为氮肥投入超过辣椒生长的氮素需求量,而辣椒根系捕获的土壤氮素有限,导致土壤

N_{min}不断累积,而这些残留的矿质氮不会完全被下一季的作物利用,在大量灌溉或强降水后容易渗透到更深的土层中造成氮素的损失^[37-38]。因此,优化施氮量是降低土壤N_{min}残留并维持辣椒高产的关键举措。

4 结论

辣椒的产量、氮素和干物质积累量随供氮水平的提高先增加后保持稳定。相较于当地农民的传统氮肥管理实践,N250处理在显著减少37.5%氮肥投入量的同时,显著增加了辣椒果实中10.3%的干物质分配比例和9.6%的氮素分配比例,有效抑制了非必要营养器官的生长,进而在不降低辣椒产量的前提下,显著提高了氮肥利用率。此外,本研究还明确了西南地区辣椒在开花坐果期、结果中期、盛期和末期达到最大地上部干物质积累量所需的临界植株氮浓度分别为30.0、26.3、24.2和26.5 g/kg,临界根层土壤N_{min}残留量分别为77.7、67.2、56.9和48.2 kg/hm²,这一临界氮浓度不仅为辣椒生长的氮素管理提供了重要参考,而且为农业生产者提供了监测辣椒生长状态的有效指标。综合考虑区域气候、栽培条件、品种,施氮量250 kg/hm²可作为西南地区露地线椒的推荐施氮量。

参考文献:

- [1] 王楠艺,付文婷,吴迪,等. 辣椒品质研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(16): 21-27.
- [2] 乔立娟,赵帮宏,宗义湘,等. 我国辣椒产业发展现状、趋势及对策[J]. 中国蔬菜, 2023(11): 9-15.
- [3] 张绍刚,张太平,龙明树,等. 贵州辣椒产业及优势区域布局[J]. 中国蔬菜, 2008(11): 5-7.
- [4] 吴玥. 氮肥供应对辣椒品质的影响及机制[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [5] Zhang F, Ma X, Gao X, et al. Innovative nitrogen management strategy reduced N₂O emission while maintaining high pepper yield in subtropical condition[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 354: 108565.
- [6] 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.
- [7] Guo R, Li X, Christie P, et al. Influence of root zone N management and a summer catch crop on cucumber yield and soil mineral N dynamics in intensive production systems[J]. Plant and Soil, 2008, 313(1-2): 55-70.
- [8] Chen X F, Zhang V, Römheld D, et al. Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an

- improved N_{min} method [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74: 91–98.
- [9] He F, Jiang R, Chen Q, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157 (5): 1666–1672.
- [10] Zhang F S, Cui Z L, Chen X P, et al. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China [J]. *Advances in Agronomy*, 2012, 116: 1–40.
- [11] Wang X, Dou Z, Shi X, et al. Innovative management programme reduces environmental impacts in Chinese vegetable production [J]. *Nature Food*, 2021, 2 (1): 47–53.
- [12] Ren T, Christie P, Wang J, et al. Root-zone soil N management to maintain high tomato yields and minimum N losses to the environment [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125 (1): 25–33.
- [13] Zhang B, Li M, Li Q, et al. Accumulation and distribution characteristics of biomass and N in bitter melon (*Momordica charantia* L.) under different fertilization strategies [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98 (7): 2681–2688.
- [14] Zhao Y, Luo J H, Chen X Q, et al. Greenhouse tomato-cucumber yield and soil N leaching as affected by reducing N rate and adding manure: A case study in the Yellow River Irrigation Region China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 94: 221–235.
- [15] Liang H, Lv H, Batchelor, et al. Simulating nitrate and DON leaching to optimize water and N management practices for greenhouse vegetable production systems [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 241: 106377.
- [16] Lemaire G, Gastal F. Relationships between plant-N, plant mass and relative growth rate for C3 and C4 crops [C]. *Proceedings of the Proceedings first ESA Congress, Paris, France, 1990*.
- [17] Cui Z, Yue S, Wang G, et al. In-season root-zone N management for mitigating greenhouse gas emission and reactive N losses in intensive wheat production [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47 (11): 6015–6022.
- [18] Zhang L, He X, Liang Z, et al. Tiller development affected by N fertilization in a high-yielding wheat production system [J]. *Crop Science*, 2020, 60 (2): 1034–1047.
- [19] Cao H, Zhang F, Fu J, et al. Optimized nitrogen fertilizer rate can increase yield and nitrogen use efficiency for open-field chinese cabbage in Southwest China [J]. *Agronomy*, 2023, 13 (6): 1578.
- [20] 刘丹, 安雨丽, 陶笑笑, 等. 西北地区制种玉米产量及氮素吸收对供氮水平的响应 [J]. *中国农业科学*, 2023, 56 (3): 441–452.
- [21] 卢殿君. 华北平原冬小麦高产高效群体动态特征与氮营养调控 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [22] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响 [J]. *中国农业科学*, 2003 (12): 1456–1461.
- [23] Zhao H, Xie T, Xiao H, et al. Biochar-based fertilizer improved crop yields and n utilization efficiency in a maize-chinese cabbage rotation system [J]. *Agriculture*, 2022, 12 (7): 1030.
- [24] Gao W, Shou N, Jiang C, et al. Optimizing N application for forage sorghum to maximize yield, quality, and N use efficiency while reducing environmental costs [J]. *Agronomy*, 2022, 12 (12): 2969.
- [25] 罗付香, 林超文, 刘海涛, 等. 不同施氮量对紫色土大白菜季产量和氨挥发的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (3): 685–692.
- [26] Rodríguez A, Peña-Fleitas M T, Gallardo M, et al. Sweet pepper and nitrogen supply in greenhouse production: Critical nitrogen curve, agronomic responses and risk of nitrogen loss [J]. *European Journal of Agronomy*, 2020, 117: 126046.
- [27] Zhang J, He P, Ding W, et al. Identifying the critical nitrogen fertilizer rate for optimum yield and minimum nitrate leaching in a typical field radish cropping system in China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115004.
- [28] Li B, Fan C H, Zhang H, et al. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar on the net global warming potential, greenhouse gas intensity and net ecosystem economic budget in intensive vegetable agriculture in southeastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 100: 10–19.
- [29] Van Den Boogaard R, Thorup-Kristensen K. Effects of nitrogen fertilization on growth and soil nitrogen depletion in cauliflower [J]. *Acta Agriculture Scandinavica*, 1997, 47 (3): 149–155.
- [30] 吴红艳, 于淼, 高晓梅. 玉米秸秆添加量对温室土壤氨挥发及辣椒氮素吸收的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41 (10): 2307–2314.
- [31] Elia A, Conversa G. Agronomic and physiological responses of a tomato crop to nitrogen input [J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 40: 64–74.
- [32] 安志超, 黄玉芳, 汪洋, 等. 不同氮效率夏玉米临界氮浓度稀释模型与氮营养诊断 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (1): 123–133.
- [33] 刘敏娜. 不同菠菜基因型氮素吸收与利用效率的差异及机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [34] 向友珍, 张富仓, 范军亮, 等. 基于临界氮浓度模型的日光温室甜椒氮营养诊断 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (17): 89–97.
- [35] Liu X, Ju X, Zhang F, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain [J]. *Field Crops Research*, 2003, 83 (2): 111–124.
- [36] Joachim Z, Strohemmer K. Nitrogen supply of vegetables based on the “KNS-system” [J]. *Acta Horticulturae*, 1996, 428: 223.
- [37] Yang X, Lu Y, Tong Y, et al. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat-maize rotation system: Comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N

- fertilization [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 199: 34–42.
- [38] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106 (9) 3041–3046.

Effects of optimised nitrogen application on nitrogen use efficiency and soil mineral nitrogen residues of open field pepper in Southwest China

YANG Wen-kang^{1, 2}, CAO Hai-lin^{1, 2}, YANG Yun-fei^{1, 2}, LIU Fa-bo^{1, 2}, TIAN Yi-ming^{1, 2}, FANG Yi-man^{1, 2}, LIANG Tao^{1, 2, 3}, WANG Shuai⁴, ZHAO Jing-kun⁴, WANG Xiao-zhong^{1, 2*} (1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715; 2. Center for Agriculture Green Development in Yangtze River Economic Belt, Southwest University, Chongqing 400715; 3. Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329; 4. Chongqing General Station of Agricultural Extension, Chongqing 401120)

Abstract: In order to investigate the effects of nitrogen fertilizer input on pepper yield, nitrogen use efficiency (NUE) and residual amount of mineral nitrogen (N_{\min}) in soil, this study aimed to determine the critical plant nitrogen concentration and residual amount of N_{\min} in root-zone soil, and make clear the optimal nitrogen application rate for pepper production in Southwest China. A field trial with pepper was conducted in Southwest China in 2023. Five treatments were set up: 0 kg/hm² (N0), 30% reduction of optimal nitrogen fertilizer rate (175 kg/hm², N175), optimal nitrogen application of 250 kg/hm² (N250), 30% increase of optimal nitrogen fertilizer rate (325 kg/hm², N325) and farmer's nitrogen application practice of 400 kg/hm² (N400). The results showed that there was a linear-platform relationship between pepper yield and nitrogen application rate. There was no significant difference in pepper yield, above-ground dry matter and nitrogen accumulation in the N250 treatment, compared to the N400 treatment. However, the proportion of dry matter distribution and nitrogen distribution in pepper fruit were significantly increased by 10.3% and 9.6%, respectively. Nitrogen recovery efficiency, nitrogen agronomic efficiency and nitrogen partial productivity were significantly increased by 45.0%, 55.1% and 56.1%, respectively. In addition, there was a linear-plateau relationship between above-ground dry matter accumulation of pepper and above-ground plant nitrogen concentration as well as N_{\min} residue in root-zone soil. The above-ground critical plant nitrogen concentrations required for maximum upper dry matter accumulation at flowering and fruit-setting stage, middle-fruiting stage, peak-bearing stage and end fruiting stage of pepper were 30.0, 26.3, 24.2 and 26.5 g/kg, respectively. The residual N_{\min} in critical root layer soil was 77.7, 67.2, 56.9 and 48.2 kg/hm², respectively. The study showed that the application rate of 250 kg/hm² could ensure the appropriate root-zone soil N_{\min} and plant nitrogen concentration, maintain high pepper yield, increase the ratio of nitrogen and dry matter distribution in pepper fruits, and significantly improve nitrogen use efficiency. The results are of great significance in guiding the vegetable production in Southwest China.

Key words: nitrogen application optimization; open-field pepper; yield; nitrogen use efficiency; critical plant nitrogen concentration; critical soil N_{\min} residue