

洱海流域甜玉米基于光照强度自动控制的 连续滴灌施肥技术研究

周伟伟¹, 付一凡¹, 方大伟¹, 吕昊峰¹, 丛汶峰², 梁斌^{1*}

(1 青岛农业大学资源与环境学院, 山东青岛 266109; 2 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100091)

摘要:【目的】针对云南洱海流域玉米生育期与雨季高度重叠, 传统施肥方式导致氮素大量淋失、面源污染问题严重的现状。本研究依托现有滴灌设备, 探索在降雨集中季节实施高频次、低剂量的每日水肥一体化管理模式, 为该区域玉米智慧肥水管理体系的构建提供依据。【方法】2023—2024 年, 在洱海流域连续开展了 3 季甜玉米水肥管理田间试验。第 1、2 季以传统施氮量 400 kg/hm² 为对照, 开展不同幅度的氮肥减施研究, 施肥频次分别为 17、30 次, 以此探究最优施氮量范围。第 3 季在最优施氮量范围内, 以光照强度>1 万 lux (视为晴天) 为基准, 建立了晴天条件下自动施肥模式, 记录施肥频次, 并调查了甜玉米产量、氮吸收动态、氮肥利用效率及 0—60 cm 土壤矿质态氮残留量。【结果】第 1 季, 施氮量为 200~400 kg/hm² 时, 玉米产量无显著差异; 甜玉米氮素吸收过程符合 Logistic 模型, 氮吸收高峰出现在出苗后 35~53 天, 日吸收量为 3.38~4.03 kg/(hm²·d), 全生育期的氮携出量为 142~152 kg/hm²。第 2 季, 施氮量由传统的 400 kg/hm² 降至 180 kg/hm², 并将施肥频次增加到 30 次, 玉米产量与氮施用量 400 kg/hm² 时无显著差异, 而氮素损失减少了 60%, 氮肥表观利用率提高了 1.2 倍。第 3 季, 在施氮量 180 kg/hm² 条件下, 将氮肥按日需肥量均分, 除降雨天外, 每日以 4.5 m³/hm² 的最小水量随水施入, 总施肥频次约 35 次。该施肥方式显著提高了干物质积累量、产量及氮肥利用效率, 同时降低了氮素损失。综合效应分析表明, 在产量与环境权重比为 1:1 的情景下, 施氮量为 120 kg/hm² 时综合得分最高。【结论】洱海流域雨季期间, 甜玉米的适宜施氮量为 120~180 kg/hm², 其氮吸收呈明显的 Logistic 累积特征, 吸收高峰集中在出苗后 35~53 天, 吸收速率达 3.38~4.03 kg/(hm²·d), 占全生育期吸氮量的 70% 以上。将施氮量由传统的 400 kg/hm² 降低到 120~180 kg/hm², 并借助光照辐射强度自动引发小剂量高频次的滴灌施肥, 在保证产量的同时, 可显著提高 0—20 cm 表层土壤的无机氮含量及氮肥利用效率, 降低氮肥表观损失, 是云南甜玉米兼顾产量与环境效益的最优氮肥管理方案。

关键词: 洱海流域; 高频施肥; 施氮量; 氮利用率; 甜玉米

Continuous fertigation technology automatically controlled by light intensity for sweet maize production in Erhai Lake Basin

ZHOU Wei-wei¹, FU Yi-fan¹, FANG Da-wei¹, LÜ Hao-feng¹, CONG Wen-feng², LIANG Bin^{1*}

(1 College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China; 2 College of Resource and Environment, China Agricultural University, Beijing 100091, China)

Abstract: 【Objectives】In Yunnan's Erhai Lake Basin, maize growing season coincides with the rainy season, conventional fertilization leads to heavy nitrogen leaching and causes serious non-point source pollution. By means of the existing drip irrigation infrastructure, we tried daily fertigation scheme characterized by low-dose water and fertilizer amount during the heavy rainfall period. 【Methods】Field experiments were conducted over three consecutive seasons in the Erhai Lake Basin from 2023 to 2024, using sweet maize as the test material. In the first and second seasons, the controls were set at the traditional nitrogen (N) application rate of 400 kg/hm². The treatments involved reduced nitrogen fertilizer rates under 17 and 30 fertilization practices, respectively, and

收稿日期: 2025-08-24 接受日期: 2026-01-19

基金项目: 云南省重大科技专项 (202202AE090034)

联系方式: 周伟伟 E-mail: qnzhouww@qau.edu.cn; * 通信作者 梁斌 E-mail: liangbin306@163.com

the optimal nitrogen application rate range was proposed. In the third season, the optimal nitrogen application rate range was further refined according to the daily N absorption of maize, and fertigation was automatically triggered when the light intensity was greater than 10000 lux. The fertilization frequency was recorded, and investigations were carried out on sweet maize yield, nitrogen uptake dynamics, nitrogen use efficiency, and residual mineral nitrogen in the 0–60 cm soil layer. **【 Results 】** In the first season, there were no significant differences in maize yield under nitrogen application rates ranging from 200 to 400 kg/hm². The nitrogen uptake process of sweet maize conformed to the Logistic model, with a peak nitrogen uptake occurring 35–53 days after emergence, a daily uptake rate of 3.38–4.03 kg/(hm²·d), and a total nitrogen removal of 142–152 kg/hm² over the entire growth period. In the second season, the N application rate was reduced to 180 kg/hm², and the fertilization frequency was increased to 30 times, resulting in a comparable maize yield to the controls, but a 60% reduction in N losses and a 1.2-fold increase in the apparent nitrogen use efficiency. In the third season, the 180 kg/hm² of N rate was evenly divided into the daily requirement and applied with a minimum water volume of 4.5 m³/hm² every day, except on rainy days, and a total of 35 fertigation events were recorded. The scheme significantly enhanced maize dry matter accumulation, yield, and N use efficiency while reducing nitrogen losses. Comprehensive effect analysis revealed that the highest comprehensive score was achieved at a nitrogen application rate of 120 kg/hm² under a scenario where the weights of yield and environment were at 1 : 1. **【 Conclusions 】** The optimal nitrogen application rate for sweet maize in the Erhai Lake rainy season is 120–180 kg/hm². Sweet maize exhibits a distinct Logistic cumulative pattern of nitrogen absorption, with the peak absorption period concentrated between 35 and 53 days after emergence, reaching a rate of 3.38–4.03 kg/(hm²·d), accounting for over 70% of the total nitrogen uptake during the entire growth period. By reducing the nitrogen application rate from the traditional 400 kg/hm² to 120–180 kg/hm² and utilizing automatic, small-dose, high-frequency drip irrigation triggered by light radiation intensity, the inorganic nitrogen content in the 0–20 cm surface soil can be significantly increased while maintaining yield. This approach notably improves nitrogen use efficiency, reduces apparent nitrogen loss, and represents the optimal nitrogen management technique for sweet maize in Yunnan, balancing both yield and environmental benefits.

Keywords: Erhai Basin; high-frequency fertigation; nitrogen application rate; nitrogen use efficiency; sweet maize

洱海流域位于我国西南高原,是典型的湖泊农业生态系统,兼具重要的农业生产与生态保护功能。鲜食玉米是该流域雨季(6—9月)主要种植的经济作物之一,具有生育期短、经济效益高等特点,对农民增收具有重要意义。然而,当地普遍采用的粗放水肥管理模式导致氮肥施用过量与利用率偏低,不仅增加了生产成本,也加剧了氮径流与淋失,成为洱海水体富营养化的主要农业污染源之一^[1]。据统计,洱海中 68%~75% 溶解性无机氮来源于农田施用的肥料^[2]。洱海流域蔬菜、玉米与豆类种植占据了 53% 的种植业氮环境排放^[3]。在农业绿色高质量发展与流域生态保护双重目标下,如何在保障鲜食玉米高产优质的同时减少氮素流失,已成为该地区可持续农业发展的关键问题。

智慧水肥管控系统可通过“灌溉量和时间”“施肥量、种类和时间”两个核心决策维度,实现水肥资

源的精准协同管理。在雨季条件下,洱海流域土壤含水量长期高于作物适宜水平,甚至接近饱和,作物对灌溉的需求较低。此时,滴灌施肥的主要目的在于施肥而非供水,应以最少的灌水量将肥料精准输送至作物根区。降雨过程是氮流失与农田污染物浓度增加的主要驱动因素,因此在雨季土壤氮流失导致氮含量降低的风险显著增加^[4]。在此背景下,合理确定氮肥用量与施肥频次,减少氮素径流与淋溶,是实现控肥减排与提效增产的关键途径。国内外研究表明,水肥一体化是提高玉米产量与养分利用效率的有效技术路径。Li 等^[5]基于全国数据的统计分析指出,与传统沟灌与撒施方式相比,滴灌施肥可使玉米产量平均提高 12.7%,并显著提升水分与氮肥利用效率。在全球范围内滴灌施肥的增产效应约为 20%,氮肥利用效率提高 26%^[6]。在滴灌施肥模式下,施肥次数成为调控产量与氮素利用效率的关键

因素^[7]。研究表明, 在砂质土壤上, 2~3 次分施氮肥可使玉米产量提高 20%~40%, 显著提升氮肥利用率^[7-8]。高频施肥 (≥ 5 次) 可更好地匹配作物生育期氮素需求, 提高光合效率与籽粒灌浆速率^[9-10]。例如, 在内蒙古通辽地区, 6 次追氮延长叶片功能期并显著提高产量与水肥利用率^[9]; 在土默特左旗、右旗及科左中旗, 6 次追肥处理获得最高产量与经济效益^[10]。气候条件亦显著影响水肥一体化的增产效应^[11]。Li 等^[5]的研究表明, 与传统灌溉施肥相比, 滴灌施肥在半干旱区的增产幅度最高 (31%), 湿润区 (18%) 次之, 而干旱区 (8%) 最小, 这反映了不同气候带水分与养分限制机制的差异。对洱海流域而言, 频繁降雨加剧氮素流失风险, 高频、小剂量的施肥策略一方面有助于降低氮肥的淋溶损失, 另一方面及时弥补降雨造成的氮亏缺, 从而提高氮素利用效率并稳定产量。

在高频施肥管理中, 施肥时间是一个重要的策略参数。Rubio-Asensio 等^[12]在露地菊苣的研究结果表明, 中频 (每日 1 次) 和 高频 (每日 3 次) 施肥灌溉显著降低了根区硝酸盐浓度, 从而减少了在强降雨情况下发生氮素淋失的风险。Farneselli 等^[13]在番茄上的研究结果也表明, 提高灌溉施肥频率是一种有效提高氮素吸收效率的策略。在一定范围内, 作物的生长速率随太阳有效辐射的增加而增加^[14]。一方面, 太阳辐射的增强会提高作物对氮素的需求速率和需求量; 另一方面, 氮素供应水平又会影响作物的光合速率^[15]。因此, 作物生长受太阳辐射与土壤氮素供应强度的共同调节, 两者需协同作用才能实现作物高效生长。依据光照强度调节营养液中氮浓度, 有助于实现植物的最佳生长和产量^[16-17]。由于晴天时太阳日辐射量远高于阴天, 作物的生长速率和吸氮量也显著提高。因此, 在晴朗天气条件下, 应该及时、足量地补充氮素, 以满足作物进入旺盛生长期后显著提高的养分需求。此外, 在降水事件结束后天气转晴时, 需特别关注前期降雨引发的氮素淋溶与径流迁移损失, 此时适量补充氮肥同样十分必要。

因此, 甜玉米的氮肥管理应充分结合品种特性、

气候条件和土壤环境, 采取分阶段、小剂量、高频次的精准施肥策略, 以实现高产、高效和绿色生产。然而, 目前国内外相关研究主要集中在干旱和半干旱地区, 对于湿润高原湖泊流域雨季条件下的玉米水肥耦合管理研究仍较为缺乏。针对洱海流域降雨过程复杂、氮素迁移特征显著的特点, 本研究依托智慧水肥一体化管控平台, 系统分析了不同氮肥施用水平和施肥频次对甜玉米产量、氮素利用效率及土壤氮残留的影响, 提出适宜该流域的氮肥管理策略, 以期为我国多雨地区的甜玉米智慧水肥管理提供理论依据和技术参考, 为洱海流域绿色高效农业发展及农业面源污染防治提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023—2024 年在云南省大理白族自治州湾桥镇古生村试验地 (25°48'N, 100°8'E) 进行。该地区年平均降雨量为 1000~1200 mm, 主要集中在 6—10 月, 年平均气温 15.7℃, 海拔 1921 m。气候类型属于典型的低纬度高原季风气候, 干湿季明显。试验开始前土壤基本化学性质见表 1。

1.2 试验设计

本试验开展了连续 3 季的甜玉米种植研究。前两季通过氮肥施用量梯度试验, 明确了甜玉米的适宜施氮量范围; 第 3 季则在确定适宜氮肥用量的基础上, 进一步探究不同施肥频次对甜玉米生长及产量的影响。3 季玉米在移栽、收获及生长期间的降雨与灌溉情况见表 2。为明确甜玉米合适的施氮量, 第 1 季在传统施用量 400 kg/hm² (N₄₀₀) 的基础上, 降低施氮量分别为 300 kg/hm² (N₃₀₀)、250 kg/hm² (N₂₅₀)、200 kg/hm² (N₂₀₀)。根据第 1 季的结果, 第 2 季将氮肥施用量降低至 270 kg/hm² (N₂₇₀)、180 kg/hm² (N₁₈₀)、120 kg/hm² (N₁₂₀)。第 3 季将前两季确定的氮肥施用量分 2 次 (T2)、5 次 (T5)、8 次 (T8)、n 次 (Tn) 追施, 探索施肥频次对玉米生长及养分利用的影响, 其中 T5 处理为农户传统施肥处理。T2 处理的施肥

表 1 土壤基础理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

土层 (cm) Soil depth	有机质 (g/kg) Organic matter	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K	硝态氮 (mg/kg) Nitrate-N	铵态氮 (mg/kg) Ammonium-N	pH
0—20	57.3	65.2	175.4	67.4	13.5	6.1
20—40	28.4	25.4	82.3	22.3	11.7	6.5
40—60	17.1	8.5	43.7	14.2	8.6	6.7

时间为苗期 (施氮量 72 kg/hm²) 和喇叭口期 (施氮量 108 kg/hm²), T5 和 T8 处理的施肥时间为苗期 (施氮量 21 kg/hm²)、拔节期 (施氮量 30 kg/hm²)、喇叭口期 (施氮量 42 kg/hm²)、吐丝期 (施氮量 48 kg/hm²) 和灌浆期 (施氮量 39 kg/hm²), 其中 T8 处理的氮肥在拔节期、喇叭口期和吐丝期开始和中期分两次平均施用。针对 6—10 月研究区域降雨频发的特点, 设置了基于光照判别的自动化滴灌施肥模式 (Tn)。该模式以每日上午 8—10 点的光照度为阈值: 大于 1 万 lux 时认定为晴天, 进行施肥; 反之判断为阴天, 不施肥。为实现少量多次的施肥目标, 3 季试验采用了递进式的施肥策略。第 1 和 2 季依据经验, 将目标氮肥总量分别平均分配至 17 和 30 次进行施用。在第 3 季试验的 Tn 处理中, 基于前两季的甜玉米氮素吸收规律计算每日供肥量, 如遇阴天则在后续首个晴天时将阴天期间未施用的肥料一次性补施, 每次施肥以 4.5 m³/hm² 的最小水量将所需肥料精准输送至根区。3 季试验在同一试验田进行, 不同季试验处理的小区设置情况见表 3。3 季试验均设置不施肥对照处理 (CK)。

3 季试验每个处理均重复 3 次, 共 15 个小区, 每个小区长 8 m、宽 9 m (面积 72 m²), 采用随机区组排列。供试玉米品种为 ‘花超 SBS902’, 种植密度为 61500 株/hm², 垄宽 90 cm, 沟宽 40 cm, 垄面覆

膜, 一垄两行, 株距和行距为 25 cm×40 cm。每行玉米铺设一条滴灌带, 滴灌带直径 16 mm, 滴孔流量为 1.38 L/h, 滴孔间距为 20 cm。FDR 温湿度传感器埋设于距土壤表层 15 cm 处的根区附近, 用于监测表层土壤温度和含水量的变化。施用氮肥为硝酸钙, 磷肥为磷酸二氢钾, 钾肥为硫酸钾, 上述 3 种肥料在不同的储肥桶溶解后通过各自对应的施肥通道进行施用, 所有肥料以追肥的方式施用。3 季玉米生育时期当季温度、降雨量以及土壤体积含水量见图 1。

1.3 样品采集与测定

试验第 1 季分别在定植时、拔节期、大喇叭口期与吐丝期, 每小区选取 5 株完整植株进行生物量与含氮量测定。各季玉米收获期在各小区随机采取 5 株样品, 将样品分为果穗与茎叶两部分, 称取鲜重后置于烘箱 105℃ 杀青 30 min, 然后在 80℃ 下烘至恒重, 称干重, 根据种植密度, 计算地上部干物质质量。果穗与茎叶样品经烘干粉碎后, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 采用半微量凯氏法测定植株全氮含量, 采用钒钼酸铵比色法测定全磷含量, 采用火焰光度计法测定全钾含量^[18]。每小区采集 120 株玉米的果穗, 称重, 根据种植密度, 计算果穗产量。

玉米收获后, 使用土钻分别采集 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层的土壤样品。新鲜土壤样品分为

表 2 3 个玉米季试验基本情况
Table 2 Some information for the three maize growing seasons

试验季 Season	移栽日期 Transplanting date (y/m/d)	收获日期 Harvest date (y/m/d)	生长期 Duration of growth (d)	降雨量 Rainfall (mm)	灌溉量 Irrigation (mm)	施肥次数 Number of fertilization
第1季 1st (2023年春季 Spring of 2023)	2023/05/27	2023/08/05	69	284	37.5	17
第2季 2nd (2024年春季 Spring of 2024)	2024/04/09	2024/06/025	76	126	65.5	30
第3季 3rd (2024年夏季 Summer of 2024)	2024/07/10	2024/09/22	74	437	15.0	35

表 3 不同季试验具体处理
Table 3 Treatment details of the trials in different seasons

试验季 Season	施氮量处理 N rate treatment (kg/hm ²)				
	传统模式 Conventional rate	减肥处理1 Reduced fertilizer 1	减肥处理2* Reduced fertilizer 2*	减肥处理3 Reduced fertilizer 3	对照处理 Control
第1季 1st	400	300	250	200	0
第2季 2nd	400	270	180	120	0
第3季 3rd	施肥频次 Fertigation frequency				
	5	2	n	8	0

注: *表示减肥处理2为优化氮肥量。
Note: * indicates that the reduced fertilizer treatment 2 was the optimized N rate treatment.

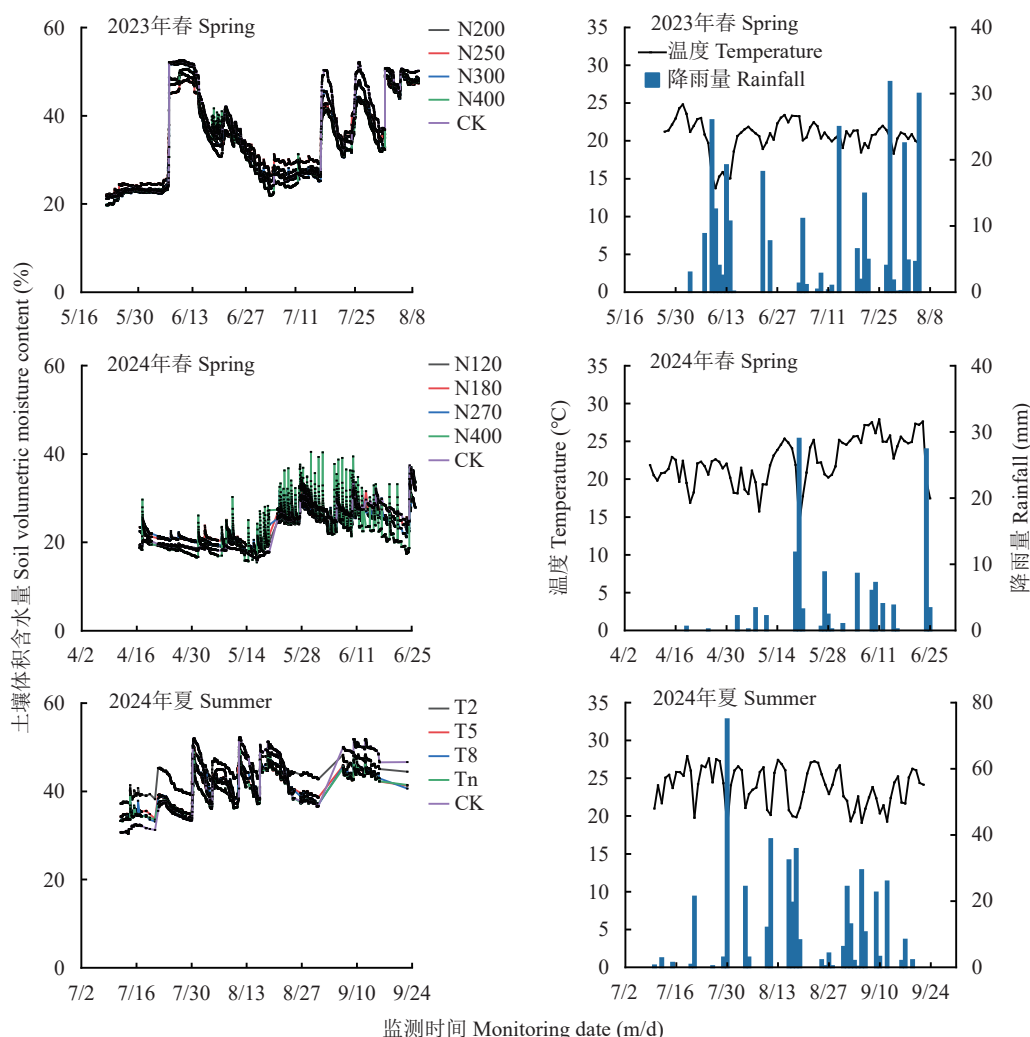


图1 试验期间气温、降雨量和土壤体积含水量

Fig. 1 The temperature, rainfall, and test soil volumetric water content during growing season of maize

两部分,一部分用 2 mol/L KCl 浸提(水土比为 5 : 1), C 采用 AA3 型连续流动分析仪(SEAL Analytical)测定土壤硝态氮和铵态氮含量^[19];另一部分采用烘干法测定土壤含水量,用于计算硝态氮和铵态氮含量。矿质态氮含量为硝态氮和铵态氮含量之和。

地上部干物质质量、氮累积携出量、氮利用率、矿质态氮累积量、氮素表观损失等指标计算见公式(1)~(7)。利用综合效益评价方法开展产量与氮表观损失的权衡分析,评价指标包括氮表观损失与产量,在兼顾环境效益时,将产量指标与氮表观损失的指标权重按 1 : 1 分配,计算见公式(8)^[20]。

$$M = (M_{\text{car}} + M_{\text{sto}}) \times D \quad (1)$$

$$U = (C_{\text{car}} \times M_{\text{car}} + C_{\text{sto}} \times M_{\text{sto}}) \times D \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$\text{NUE}_{\text{AE}} = (Y_{\text{N}} - Y_0) \times 10^3 / F_{\text{N}} \quad (3)$$

$$\text{NUE}_{\text{RE}} = (U_{\text{N}} - U_0) \times 100\% / F_{\text{N}} \quad (4)$$

$$\text{NUE}_{\text{PE}} = U / F_{\text{N}} \quad (5)$$

$$N_{\text{ac}} = \Sigma T(m) \times R \times C_{\text{min}} \times 10^{-2} \quad (6)$$

$$N_{\text{lo}} = F_{\text{N}} + N_{\text{ac,pre}} - U - N_{\text{ac,post}} \quad (7)$$

$$f(N) = W_1 \times Y_{\text{N}} / Y_{\text{max}} - W_2 \times L_{\text{lo}} / L_{\text{max}} \quad (8)$$

式中, M 为地上部干物质质量 (t/hm^2); M_{car} 为果穗干物质质量 (kg/plant); M_{sto} 为茎叶干物质质量 (kg/plant); D 为定植密度 ($\text{plants}/\text{hm}^2$); U 为植株氮累积携出量 (kg/hm^2); C_{car} 为果穗氮含量 (mg/kg); C_{sto} 为茎叶氮含量 (mg/kg); NUE_{AE} 为氮肥农学效率 (kg/kg); Y_{N} 为施氮区果穗产量 (t/hm^2); Y_0 为不施氮区果穗产量 (t/hm^2); F_{N} 为施氮量 (kg/hm^2); NUE_{RE} 为氮肥利用率 (%); U_{N} 为施氮区植株氮累积携出量 (kg/hm^2); U_0 为不施氮区植株氮累积携出量 (kg/hm^2); NUE_{PE} 为氮肥表观利用率 (%); N_{ac} 为矿质态氮累积量 (kg/hm^2); T 为土层厚度 (m); R 为土壤容重 (kg/m^3); C_{min} 为对

应土层矿质态氮含量 (mg/kg); N_{lo} 为氮素表观损失量 (kg/hm²); $N_{ac, pre}$ 为种植前 0—60 cm 土壤剖面矿质态氮累积量 (kg/hm²); $N_{ac, post}$ 为收获时 0—60 cm 土壤剖面矿质态氮累积量 (kg/hm²); $f(N)$ 为综合效益评价得分; W_1 为产量权重 (50%); W_2 为表观损失权重 (50%); Y_{max} 为各处理最高产量; L_{lo} 为各处理的氮素损失量; L_{max} 为各处理最高氮素损失量。

1.4 数据处理

试验数据采用 DPS 统计分析软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 不同处理间的差异显著性采用 Duncan 法检验 ($P < 0.05$), 并利用 Excel 或 Origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 玉米生物量与氮素吸收

在第 1 季试验中, 施氮量 200、250、300 kg/hm²

处理的玉米生物量与传统施氮量 400 kg/hm² 处理无显著差异 (图 2)。在第 2 季试验中, 氮施用量由传统的 400 kg/hm² 减施至 180 kg/hm² 对玉米生物量无显著影响, 进一步降低氮肥至 120 kg/hm² 使生物量显著降低 10.1%。在第 3 季 180 kg/hm² 施氮量下的施肥频率试验中, 随施肥频次的增加, 玉米生物量逐渐显著提升, 与传统 5 次施肥相比, Tn 处理使生物量显著提高 16.3%。

第 1 季试验结果发现, Logistic 生长模型高精度模拟了甜玉米生育期氮素吸收的时间动态过程 (图 3)。在定植前 16 天 (缓苗期), 氮肥吸收速率较慢, 平均为 0.66 kg/(hm²·d); 16 天之后, 氮吸收速率快速上升, 第 17~34 天 (拔节期) 氮日均吸收速率为 2.12 kg/(hm²·d); 在 41~47 天, 氮素吸收速率达到最大, 为 3.38~4.03 kg/(hm²·d), 占全生育期施氮量的 70% 以上; 在 35~53 天 (孕穗—抽穗—吐丝—授粉) 平均吸收速率为 3.34 kg/(hm²·d); 在 53 天之后的灌浆

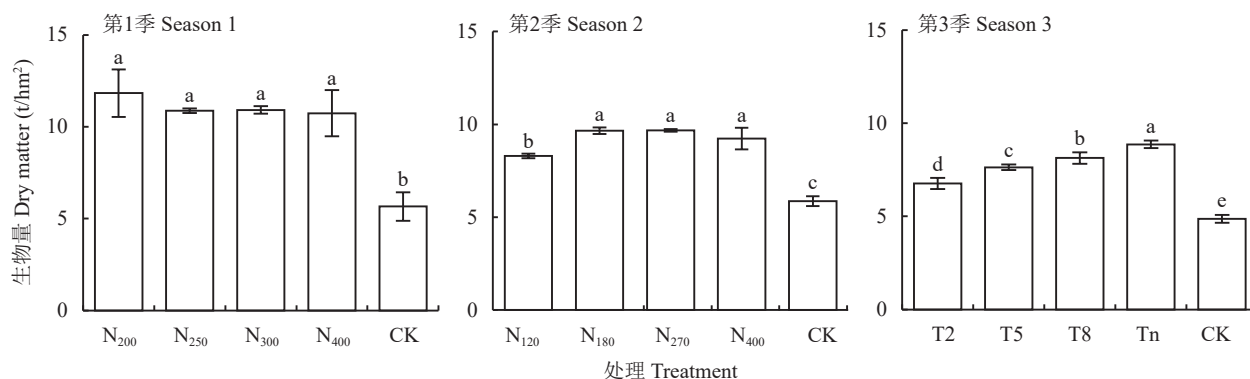


图 2 氮肥施用量和施肥频次对甜玉米生物量的影响

Fig. 2 Effects of different nitrogen fertilization rates and frequency on dry weight of fresh maize

注: CK—不施肥; T2、T5、T8、Tn 分别表示氮肥分 2、5、8、n 次追施。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: CK—No fertilization; T2, T5, T8, and Tn denote N top-dressing treatments with 2, 5, 8, and n split applications, respectively. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

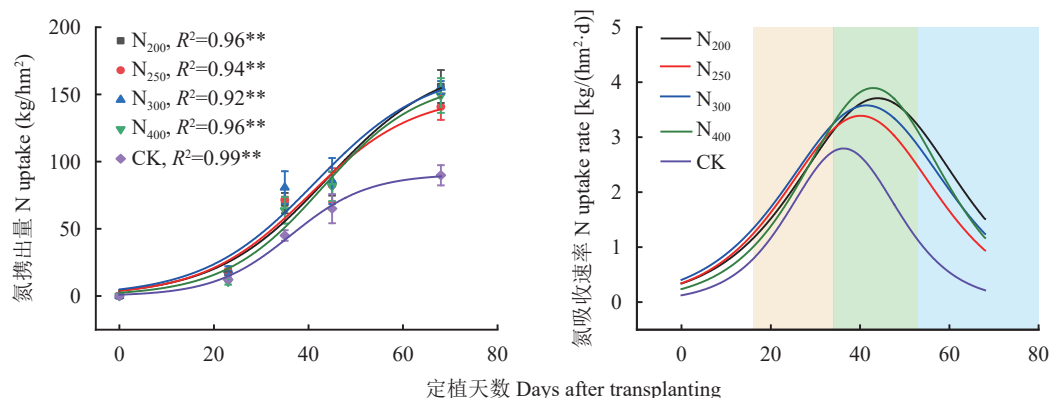


图 3 第 1 季甜玉米氮素携出量和吸收速率的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes in nitrogen uptake amount and absorption rate of sweet maize in the first season

期, 吸收平均速率为 $1.98 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$; 在甜玉米穗收获时, 氮素的日平均速率仍然达到了 $1.2 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。除 CK 与 N120 处理外, 其他处理的甜玉米氮素携出量为 $142 \sim 152 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (图 4)。在施氮量不低于 $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, 各施氮量处理的氮携出量无显著差异, 氮肥施用量的增加并不会提高作物氮素携出量。在相同的施肥总量下, 随着施肥频次的增加, 作物氮携出量显著增加, 与传统 T5 处理相比, T8 与 Tn 处理分别显著提高 18.1% 与 35.6%。

2.2 甜玉米氮肥利用效率

第 1 季和第 2 季传统施氮处理的氮肥利用率仅分别为 14.6% 和 14.3%, 氮表观利用率仅分别为 37.3% 和 35.7%, 氮肥农学效率分别为 23.7 和 23.1 kg/kg (表 4)。随施氮量的降低, 氮肥农学效率、氮肥利用率、氮肥表观利用率呈增加趋势。与传统施氮量 $400 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 处理相比, 第 1 季施氮量 $200 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 处理的氮肥农学效率、氮肥利用率、氮肥表观利用率分别显著提高 1.03、1.23、1.09 倍, 第 2 季施氮量 $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 处理的氮肥农学效率、氮肥利用率、氮肥表观利用率分别显著提高 1.61、1.21、1.22 倍。第 2 季中 N120 处理的氮肥农学效率与氮肥利用率与 N180 处理无显著差异, 但是氮肥表观利用率显著提高, 增幅达 103.3%。

在第 3 季施氮量同为 $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 的情况下, 随着施肥频次的增加, 氮肥农学效率、氮肥利用率、氮肥表观利用率均呈显著增加的趋势。与传统的 T5 处理相比, T8 处理的氮肥农学效率、氮肥利用率、氮肥表观利用率分别提高 63.9%、52.9%、18.0%, Tn 处理 (施肥频次约 30~35 次) 的上述指标分别增

加 108.8%、104.2%、35.6%, 表观利用率提高了 1.2 倍。

2.3 0—60 cm 土层矿质态氮累积

随着施氮量和施肥频次的增加, 土壤矿质态氮在 0—60 cm 土层总累积量和 0—20 cm 表层累积量均呈逐渐上升趋势, 而在 20—40 和 40—60 cm 土层无显著差异 (图 5)。与传统 $400 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 氮处理相比, 120 和 $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 氮处理的矿质态氮累积量分别显著降低 21.1% 和 25.5% (0—20 cm 土层)、32.9% 和 28.3% (0—60 cm 土层)。与传统 T5 处理相比, T8 和 Tn 处理的矿质态氮累积量分别显著增加 69.0% 和 101.9% (0—20 cm 土层)、33.9% 和 48.2% (0—60 cm 土层)。

2.4 基于产量与环境效益的适宜施氮量评价

在第 1 季试验中, 施氮量降至 $200 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, 甜玉米产量与传统处理无显著差异 (表 5), 表明氮肥用量仍具有下调空间。第 2 季试验结果显示, 将施氮量由 $400 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 减至 $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时不影响产量, 而进一步降至 $120 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, 产量较 N180 处理显著降低 9.6%。第 3 季施肥频率试验表明, 随施肥频次增加, 产量显著提高; 与常规 5 次施肥处理 (N5) 相比, 高频处理 (Tn) 使产量提高了 31.7%。

第 1 季和第 2 季试验中, 传统施氮量处理氮素表观损失量分别为 94.0 和 $231.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。在第 2 季试验中, 施氮量 $180 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 处理的氮素表观损失量为 $92.2 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 较传统施氮量处理显著降低 60.1%。在相同施氮水平 ($180 \text{ kg}/\text{hm}^2$) 下, 随着施肥频次的增加, 氮素表观损失呈显著下降趋势。T2、T5、T8、Tn 处理的氮素表观损失量分别为 269.6、200.2、

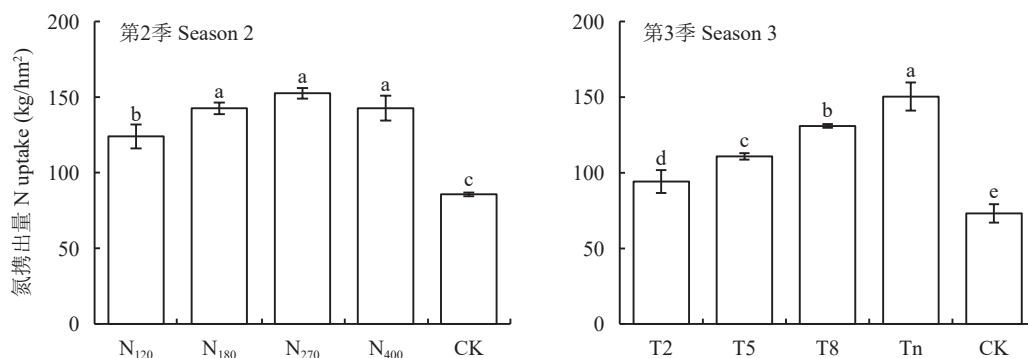


图 4 第 2 季不同施氮量和第 3 季施肥频次对甜玉米氮携出量的影响

Fig. 4 Effects of nitrogen application rate in the second season and fertilization frequency in the third season on nitrogen uptake by sweet maize

注: CK—不施肥; T2、T5、T8、Tn 分别表示氮肥分 2、5、8、n 次追施。柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: CK—No fertilization; T2, T5, T8, and Tn denote N top-dressing treatments with 2, 5, 8, and n split applications, respectively. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 4 不同施氮量和施肥频次对甜玉米氮肥利用效率的影响

Table 4 Effects of different nitrogen fertilization rate and frequency on nitrogen use efficiency of sweet maize

试验季 Season	处理 Treatment	氮肥农学效率 (kg/kg)	氮肥利用率 (%)	氮表观利用率 (%)
第1季 Season 1	N ₂₀₀	48.1±2.5 a	32.5±6.1 a	77.9±6.1 a
	N ₂₅₀	42.5±5.1 b	19.4±3.9 b	56.3±3.9 b
	N ₃₀₀	35.6±1.2 c	21.4±1.6 b	51.7±1.6 b
	N ₄₀₀	23.7±1.6 d	14.6±3.2 c	37.3±3.2 c
第2季 Season 2	N ₁₂₀	69.2±9.2 a	32.0±6.6 a	103.3±6.6 a
	N ₁₈₀	60.4±6.9 a	31.6±2.1 ab	79.2±2.1 b
	N ₂₇₀	39.1±2.4 b	24.8±1.3 b	56.5±1.3 c
	N ₄₀₀	23.1±1.5 c	14.3±2.1 c	35.7±2.1 d
第3季 Season 3	T2	16.0±3.4 d	11.7±4.2 d	52.4±4.2 d
	T5	28.5±7.1 c	21.0±1.2 c	61.6±1.2 c
	T8	46.7±6.8 b	32.1±0.7 b	72.7±0.7 b
	Tn	59.5±4.8 a	42.9±5.2 a	83.5±5.2 a

注: T2、T5、T8、Tn分别表示氮肥分2、5、8、n次追施。同列数据后不同小写字母表示同一季处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: T2, T5, T8, and Tn denote N top-dressing treatments with 2, 5, 8, and n split applications, respectively. Different lowercase letters after the data in a column indicate significant difference among treatments in the same season ($P<0.05$).

154.8 和 141.6 kg/hm², 其中高频施肥处理 Tn 较传统处理 T5 显著降低 29.3%。

综合评价结果显示, 施氮量 120 kg/hm² 处理得分最高, 显著高于传统处理 (表 5); 施氮量 180 kg/hm² 处理综合得分与 N120 处理无显著差异, 同样显著高

于传统施肥量处理。在第 3 季试验中, 高频施肥 (Tn) 处理显著提高产量、降低氮表观损失, 综合得分最高, 与传统施肥 5 次处理差异显著。

3 讨论

3.1 甜玉米合适的氮肥施用量

确定作物合理的施氮量是实现农业高产与环友好双重目标的核心问题。施入土壤的氮肥除被作物吸收外, 还会通过淋溶、径流、挥发及反硝化等途径发生损失^[21]。因此, 合理施氮量应综合考虑作物氮吸收需求、不可避免损失量以及区域环境承载能力。现有研究表明, 玉米的最佳施氮量因品种类型、生态条件及生产目标而异。Chen 等^[22]的研究显示, 在我国饲用玉米生产中, 当施氮量为 256 kg/hm² 时, 产量可达 14.2 t/hm², 而氮盈余仅为 8 kg/hm², 继续提高施氮量至 400 kg/hm² 时产量提升有限, 却导致氮盈余增至 140 kg/hm², 环境风险显著上升。与饲用玉米相比, 甜玉米通常在较短的生育期 (约 70~80 天) 内完成鲜穗收获, 其养分吸收需求较为集中、吸收速率较快^[23], 因此不宜直接套用饲用玉米的施氮推荐值。Zucareli 等^[24]研究发现, 在甜玉米种子生产中, 于拔节期 (V6) 期追施氮 120 kg/hm² 可获得最高产量并维持籽粒蛋白含量。Woodruff 等^[25]的研究表明, 施氮 112 kg/hm² 可实现甜玉米的最优或接近最优产量, 而继续提高至施氮 224 kg/hm² 并未显著增产, 反而增加土壤硝态氮残留与流失风险。然而, 该研究中 11.2~12.0 t/hm² 的产量水平显著低于

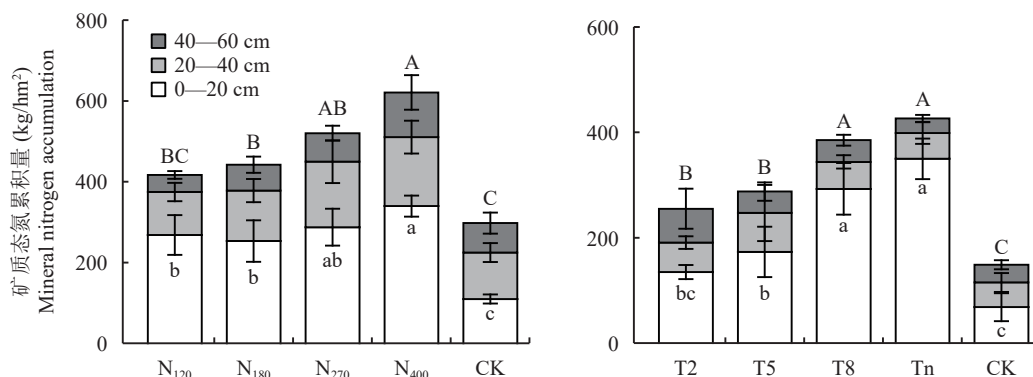


图 5 不同施氮量和频次处理下不同土层土壤矿质态氮的累积量

Fig. 5 Mineral nitrogen accumulation in soil layers under different nitrogen application amount and fertigation frequencies

注: CK—不施肥; T2、T5、T8、Tn 分别表示氮肥分 2、5、8、n 次追施。图中不同小写和大写字母分别表示 0—20 和 0—60 cm 土层处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: CK—No fertilization; T2, T5, T8, and Tn denote N top-dressing treatments with 2, 5, 8, and n split applications, respectively. Different lowercase and uppercase letters in the Fig. indicate significant difference among treatments under 0—20 cm and 0—60 cm soil layers, respectively ($P<0.05$).

表 5 施肥量与施肥频率对甜玉米产量、氮表观损失影响及综合评价

Table 5 Effects of nitrogen application rate and fertigation frequency on sweet maize yield, apparent nitrogen loss, and comprehensive evaluation

试验季 Season	处理 Treatment	果穗产量 Ear yield (t/hm ²)	氮表观损失量 Apparent N loss (kg/hm ²)	综合评价得分 Comprehensive score
第1季 Season 1	N ₂₀₀	25.8±0.5 a	30.3±12.2 b	0.32±0.04 a
	N ₂₅₀	26.8±1.3 a	21.4±9.7 b	0.37±0.07 a
	N ₃₀₀	26.8±0.4 a	33.1±4.8 b	0.32±0.02 a
	N ₄₀₀	25.6±0.6 a	94.0±13.0 a	0.01±0.01 b
第2季 Season 2	N ₁₂₀	24.3±1.1 b	12.9±3.7 d	0.42±0.04 a
	N ₁₈₀	26.7±1.2 a	92.2±37.7 c	0.29±0.09 a
	N ₂₇₀	26.6±0.6 a	161.0±48.2 b	0.14±0.10 b
	N ₄₀₀	25.2±0.6 ab	231.0±15.1 a	-0.03±0.02 c
第3季 Season 3	T2	15.4±0.6 d	269.6±51.6 a	-0.17±0.02 b
	T5	17.6±1.3 c	200.2±63.4 ab	0.01±0.10 b
	T8	20.9±1.2 b	154.8±36.3 b	0.16±0.13 a
	Tn	23.2±0.9 a	141.6±29.3 b	0.22±0.11 a

注: T2、T5、T8、Tn分别表示氮肥分2、5、8、n次追施。同列数据后不同小写字母表示同季处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: T2, T5, T8, and Tn denote N top-dressing treatments with 2, 5, 8, and n split applications, respectively. Different small letters after data in the same column indicate significant difference among treatments in the same season ($P<0.05$).

本研究的 26.9 t/hm², 这意味着在更高产量目标下, 适宜的施氮量可能需要相应提升。洱海流域相关试验也表明, 甜玉米最适施氮量为 120~180 kg/hm² [26]。因此, 为保障高产, 建议在氮淋溶风险高的洱海流域采用 180 kg/hm² 的施氮量。反之, 若以同等权重兼顾产量与环境, 根据效益函数分析, 120 kg/hm² 施氮量则是更优的选择。该研究结果与全球氮肥优化共识一致, 进一步表明基于具体生产情景和作物生长阶段进行施氮调控, 是实现玉米系统高产高效与环境友好协同发展的有效策略。

3.2 降雨条件下的氮肥智慧管控策略

农田氮素的淋溶与径流损失与水分输入量直接相关[27-28]。在降雨主导的露地系统中, 当降雨超过土壤持水能力时, 硝态氮会通过渗漏和径流大量流失, 成为农业面源污染的重要来源[29-31]。研究表明, 雨季时洱海水质综合营养指数高于旱季[32], 且洱海径流中总氮浓度可达无雨期的 2 倍[33], 显示出强烈的降雨驱动型流失特征。此外, 甜玉米生育期短 (70~80 天), 养分需求强度大且集中, 根系相对较浅, 对土

壤养分波动敏感。在此背景下, 施肥管理成为减少氮损失的关键可控环节[34]。传统缓释肥料虽能调节氮素释放[35], 但其释放节律难以与甜玉米短生育期、高强度的需求动态精准匹配, 存在前期供应不足或后期残留的风险[36]。本研究提出的高频次智慧施肥策略, 在第 1、2、3 季实现了 17、30、35 次的自动高频施肥, 这不仅显著提高了甜玉米产量, 而且显著降低了矿质态氮在土壤中的向下迁移。本研究采用的智慧滴灌系统本质上是一种“动态人工控释”, 将总氮量分解为数十次小剂量供应, 实现了氮素供应曲线与甜玉米短期、高强度吸收曲线的动态拟合。尤其是结合“晴天施肥”策略, 利用晴日较高光合有效辐射促进氮同化酶活性、提升氮吸收效率的生理机制, 使每次施肥都能在最佳气候窗口被高效利用。这与国内外相关的研究共识一致, 即分次施肥是应对不可控降雨、实现养分供应与作物吸收同步的关键策略。

在雨季或土壤含水量接近饱和的条件下, 灌溉对作物养分吸收的直接贡献较小, 反而可能增加氮素淋失和径流风险[29-30]。此时灌溉的主要功能是作为肥料输送的载体, 因此应控制灌水量, 通过提高肥液浓度、优化水肥配比, 以减少因过量灌水导致的氮素损失。在降雨频繁区域, 人工动态调控施肥虽成本较高, 但随着智慧水肥一体化技术的发展, 基于实时气象与土壤墒情数据的高频、小剂量、按需精准施肥已成为可能[37]。本研究表明, 在雨季条件下, 智能灌溉系统累计灌水量可控制在 15 mm 左右, 既可满足肥料输送需求, 又能显著降低因灌水增加而引发的额外淋溶风险。研究采用的“晴天施肥”策略, 有助于缓解雨后土壤氮素浓度下降与晴天作物光合作用强、需肥量大的矛盾。然而, 该策略仍存在以下局限: 首先, 施肥过程伴随的水分输入会提高土壤含水量, 可能影响土壤通气性与根系呼吸, 尤其在连片灌溉区, 为保障肥液输送至管网末端, 往往需预先注入清水填充管道, 并将肥液完全推送至根区, 这一过程可能导致实际灌水量偏高; 同时, 本研究以上午 8:00—9:00 的光照强度作为“晴天”判定依据, 施肥量则基于间隔天数计算, 该方法在实际应用中可能存在偏差。未来研究可结合累积太阳总辐射或光合有效辐射数据, 构建施肥时机与用量的定量模型, 从而提升施肥策略的准确性与适用性。此外, 未来也需开展多季连续试验, 以验证该施肥策略的长期效应, 并以此为基础建立一套动态优化的智慧水肥管控参数体系, 实现参数的

动态优化。

4 结论

甜玉米氮素吸收呈明显的 Logistic 累积特征, 吸收高峰集中在生长的 35~53 天, 吸收速率达 3.38~4.03 kg/(hm²·d), 占全生育期吸氮量的 70% 以上。将施氮量由传统的 400 kg/hm² 降低到 120~180 kg/hm², 并借助光照辐射强度自动引发小剂量高频次滴灌施肥, 在保证产量的同时可显著提高 0—20 cm 表层土壤无机氮含量, 显著提高氮肥效率, 降低氮肥表观损失, 是云南甜玉米兼顾产量与环境效益的最优氮肥管理措施。

参 考 文 献:

- [1] Yao C, Feng S, Meng F, *et al.* Farmer survey-based agricultural non-point source pollution assessment in the typical regions of the Erhai Lake Basin, China[J]. *Frontiers of Agricultural Science & Engineering*, 2025, 12(3): 571–582.
- [2] Li X, Janssen A B, Strokal M, *et al.* Assessing nitrogen sources in Lake Erhai: A spatially explicit modelling approach[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 289: 108549.
- [3] Zou T T, Meng F, Zhou J, *et al.* Quantifying nitrogen and phosphorus losses from crop and livestock production and mitigation potentials in Erhai Lake Basin, China[J]. *Agricultural Systems*, 2023, 211: 103745.
- [4] Xu T, Ma W, Chen J, *et al.* Water quality of Lake Erhai in Southwest China and its projected status in the near future[J]. *Water*, 2024, 16: 972.
- [5] Li H, Mei X, Wang J, *et al.* Drip fertigation significantly increased crop yield, water productivity and nitrogen use efficiency with respect to traditional irrigation and fertilization practices: A meta-analysis in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 244: 106534.
- [6] Delbaz R, Ebrahimian H, Abbasi F, *et al.* A global meta-analysis on surface and drip fertigation for annual crops under different fertilization levels[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 289: 108504.
- [7] Davies B, Coulter J A, Pagliari P H. Timing and rate of nitrogen fertilization influence maize yield and nitrogen use efficiency[J]. *PLoS ONE*, 2020, 15(5): e0233674.
- [8] Ojeniyi K, Ngonidzashe C, Devkota K, *et al.* Optimizing split-fertilizer applications for enhanced maize yield and nutrient use efficiency in Nigeria's Middle-belt[J]. *Heliyon*, 2024, 10(19): e37747.
- [9] Shen D, Zhou L, Wang K, *et al.* Optimizing nitrogen application frequency to enhance post-flowering matter accumulation, yield and water/nitrogen use efficiency of densely planted and drip-irrigated maize[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2025, 105(13): 7073–7084.
- [10] 董宇恒, 王富贵, 王永强, 等. 氮磷钾肥分次滴施提高春玉米经济效益和肥料利用率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(5): 926–942.
- [11] Dong Y H, Wang F G, Wang Y Q, *et al.* Split application of NPK fertigation improve the economic benefits and fertilizer use efficiency in spring maize production[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(5): 926–942.
- [12] 毛圆圆. 追氮次数对膜下滴灌高产(≥15000kg/hm²)玉米生长发育及产量的影响[D]. 新疆石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2022.
- [13] Mao Y Y. Effects of nitrogen fertilization frequency on growth and yield of maize with high yield (≥15000kg/hm²) under drip irrigation [D]. Shihezi, Xinjiang: MS Thesis of Shihezi University, 2022.
- [14] Rubio-Asensio J S, Intrigliolo D S. Fertigation frequency is a useful tool for nitrate management in intensive open-field agriculture[J]. *Irrigation Science*, 2024, 42: 353–365.
- [15] Farneselli M, Benincasa P, Tosti G, *et al.* High fertigation frequency improves nitrogen uptake and crop performance in processing tomato grown with high nitrogen and water supply[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 154: 52–58.
- [16] Punia H, Tokas J, Malik A, *et al.* Solar radiation and nitrogen use efficiency for sustainable agriculture[A]. Kumar S, Meena R S, Jhariya M K. Resources use efficiency in agriculture[M]. Singapore, Springer, 2020.
- [17] Liu C, Gong X, Dang K, *et al.* The efficient use of radiation, water, and nitrogen uptake by low-nitrogen-tolerant broomcorn millet increased grain yield[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 308–309: 108616.
- [18] Esmaeili S, Aliniaiefard S, Dianati Daylami S, *et al.* Elevated light intensity compensates for nitrogen deficiency during chrysanthemum growth by improving water and nitrogen use efficiency[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 10002.
- [19] Xu J, Guo Z, Jiang X, *et al.* Light regulation of horticultural crop nutrient uptake and utilization[J]. *Horticultural Plant Journal*, 2021, 7: 367–379.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [22] Maynard D G, Kalra Y P. Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen [A]. Carter M R. Soil sampling and methods of analysis [M]. Boca Raton: Canadian Society of Soil Science, 1993.
- [23] Mandrini G, Pittelkow C M, Archontoulis S, *et al.* Exploring trade-offs between profit, yield, and the environmental footprint of potential nitrogen fertilizer regulations in the US Midwest[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 852116.
- [24] Govindasamy P, Muthusamy S K, Bagavathiannan M, *et al.* Nitrogen use efficiency—a key to enhance crop productivity under a changing climate[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1121073.
- [25] Chen X, Cui Z, Fan M, *et al.* Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514: 486–489.
- [26] Gao L, Li W, Ashraf U, *et al.* Nitrogen fertilizer management and maize straw return modulate yield and nitrogen balance in sweet corn[J]. *Agronomy*, 2020, 10(3): 362.
- [27] Zucareli C, Bazzo J H B, Silva J B, *et al.* Nitrogen rates and side-dressing timing on sweet corn seed production[J]. *Revista Caatinga*,

- 2018, 31: 344–351.
- [25] Woodruff L K, Habteselassie M Y, Norton J M, *et al.* Yield and nutrient dynamics in conventional and organic sweet corn production systems[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111: 2395–2403.
- [26] 周也富. 基于群体密度优化的洱海流域甜玉米产量潜力与氮高效利用研究[D]. 云南大理: 大理大学硕士学位论文, 2024.
- Zhou Y F. Yield potential and nitrogen efficiency of sweet maize in the Erhai Lake Basin based on population density optimization[D]. Dali, Yunnan: MS Thesis of Dali University, 2024.
- [27] Rowlings D W, Lester D W, Grace P R, *et al.* Seasonal rainfall distribution drives nitrogen use efficiency and losses in dryland summer sorghum[J]. *Field Crops Research*, 2022, 283: 108527.
- [28] Raij-Hoffman I, Dahan O, Dahlke H E, *et al.* Assessing nitrate leaching during drought and extreme precipitation: Exploring deep vadose-zone monitoring, groundwater observations, and field mass balance[J]. *Water Resources Research*, 2024, 60: e2024WR037973.
- [29] Lv H F, Zhou W W, Dong J, *et al.* Irrigation amount dominates soil mineral nitrogen leaching in plastic-shed vegetable production systems [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 317: 107474.
- [30] Zhou W W, Wang Q Y, Chen S, *et al.* Nitrate leaching drives calcium and magnesium loss in intensive plastic-shed vegetable production systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 293: 108708.
- [31] Wei Q, Xu J, Liu Y, *et al.* Nitrogen losses from soil as affected by water and fertilizer management under drip irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 296: 108791.
- [32] 杨进腊, 温雯雯, 胡潇芮, 等. 云南九大高原湖泊2013—2022年水质变化趋势及其成因分析[J]. *环境科学研究*, 2025, 38(6): 1300–1310.
- Yang J L, Wen W W, Hu X R, *et al.* Spatio-temporal variations and driving mechanisms of water quality in Nine Plateau Lakes of Yunnan from 2013 to 2022[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2025, 38(6): 1300–1310.
- [33] He D, Liu X, Fu Y, *et al.* Field baseflow eluting SOM-rich sandy soil to exacerbate non-point source pollution of Lake Erhai[J]. *Horticulturae*, 2023, 9(8): 898.
- [34] Wang Z H, Li S X. Nitrate N loss by leaching and surface runoff in agricultural land: A global issue (a review) [J]. *Advances in Agronomy*, 2019, 156: 159–217.
- [35] Zhang Y, Ren W, Zhu K, *et al.* Substituting readily available nitrogen fertilizer with controlled-release nitrogen fertilizer improves crop yield and nitrogen uptake[J]. *Field Crops Research*, 2024, 306: 109221.
- [36] Naz M Y, Sulaiman S A, Ariwahjoedi B, *et al.* Controlled-release fertilizer mechanism and application in agriculture[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 350: 131465.
- [37] Wang Q Y, Jia Y F, Pang Z J, *et al.* Intelligent fertigation improves tomato yield and quality and water and nutrient use efficiency in solar greenhouse production[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 298: 108873.