

X 射线 CT 揭示缓控释肥调控玉米根系三维空间分布特性

赵鹤翔^{1,2}, 辛 雨^{1,2}, 周永刚³, 阮云泽³, 高 伟^{1,2*}

(1 海南大学三亚南繁研究院, 海南三亚 572025; 2 海南大学热带农林学院, 海南儋州 571737;
3 海南大学南繁学院, 海南三亚 572025)

摘要:【目的】探究局部施用缓释尿素对玉米根系三维空间分布特征及氮素吸收利用的影响, 明确其相较于传统均匀施肥和局部施用速效肥在实现养分持续供应与根系生长动态匹配方面的优势, 为缓释氮肥的高效利用提供理论依据。【方法】以玉米为供试材料, 设置不施氮 (CK)、均匀施尿素 (UU)、局部施尿素 (LU) 和局部施缓释尿素 (SU) 4 个处理, 采用土柱试验, 利用 X 射线计算机断层扫描 (X-ray CT) 技术对根系进行原位扫描并三维重建, 结合植株生物量、氮吸收量及土壤氮含量的测定, 分析不同施肥方式下玉米根系形态特征、空间分布及其与养分吸收的关系。【结果】与 UU 和 LU 处理相比, SU 显著促进了玉米的氮素吸收, 其地上部氮吸收分别提高 43.8% 和 36.9%。SU 处理还显著提高了土壤硝态氮含量, 在局部施肥区 (2—6 cm 土层), 其硝态氮含量较 CK、UU 和 LU 处理分别显著提高 200%、80% 和 103%。X-ray CT 三维重建结果显示, SU 处理显著促进了根系生长, 尤其在局部施肥区 (2—6 cm 土层) 根长密度最高, 达 7.3 cm/cm³, 比 UU 和 LU 处理分别显著提高 182% 和 101%。施肥微区 (肥料颗粒周围 50 cm³ 区域) 内, SU 处理的根长是 LU 处理的 3.3 倍。相关性分析表明, 根长、根表面积和根长密度与土壤硝态氮含量及地上部氮吸收量呈显著正相关, 而平均距离与氮吸收量呈显著负相关。【结论】局部施用缓释尿素可通过持续供应氮素, 促进玉米根系在施肥区的持续增生, 增强根系与养分的空间耦合, 显著提高玉米氮营养水平。X-ray CT 技术能够有效揭示根-肥互作的三维空间特征, 为研究“根-肥”相互作用提供重要技术支撑。

关键词: X 射线 CT; 氮; 缓释尿素; 局部施肥; 根系三维结构

X-ray CT reveals how slow-release fertilizers regulate the spatial distribution of maize root systems

ZHAO He-xiang^{1,2}, XIN Yu^{1,2}, ZHOU Yong-gang³, RUAN Yun-ze³, GAO Wei^{1,2*}

(1 Sanya South Breeding Research Institute, Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China; 2 College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China; 3 South Breeding College, Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China)

Abstract: 【Objectives】 This study aimed to investigate the effects of localized application of controlled-release urea on the three-dimensional spatial distribution of maize root systems and nitrogen uptake and utilization. Specifically, it sought to clarify the advantages of slow-release urea over traditional uniform fertilization and localized quick-release fertilization in maintaining a sustained nutrient supply and matching with root growth, thereby providing a theoretical basis for the efficient utilization of slow-release nitrogen fertilizers. 【Methods】 A soil column experiment was conducted using maize and nitrogen fertilizer as the experimental subjects. Four treatments were established: no nitrogen application (CK), uniform urea application (UU), localized urea application (LU), and localized slow-release urea application (SU). X-ray computed tomography (X-ray CT) was employed for in situ scanning and three-dimensional reconstruction of root systems. Measurements of plant biomass, nitrogen uptake, and soil nitrogen content were integrated to analyze the relationships among root

收稿日期: 2025-09-17 接受日期: 2025-11-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1901400); 国家自然科学基金项目 (32202586)。

联系方式: 赵鹤翔 E-mail: 2417700437@qq.com; * 通信作者 高伟 E-mail: wei.gao@hainanu.edu.cn

morphological traits, spatial distribution pattern, and nutrient uptake under different fertilization regimes.

【 Results 】 Compared with UU and LU, SU increased above-ground nitrogen uptake by 43.8% and 36.9%, respectively, thereby significantly enhancing total maize nitrogen uptake. The SU treatment also substantially increased soil nitrate nitrogen content. Within the localized fertilization zone (2–6 cm soil layer), nitrate nitrogen concentrations in SU treatment were significantly higher than those in the CK, UU, and LU treatments by 200%, 80%, and 103%, respectively. The three-dimensional reconstruction based on X-ray CT revealed that the SU treatment significantly promoted root growth. Particularly in the localized fertilization zone (2–6 cm soil layer), root length density reached 7.3 cm/cm³, representing increases of 182% and 101% relative to the UU and LU treatments, respectively. Moreover, within the fertilization microzone (a 50 cm³ volume surrounding the fertilizer granules), root length under the SU treatment was 3.3 times of that under the LU treatment. Furthermore, correlation analysis indicated that root morphological parameters (root length, root surface area, and root length density) were significantly and positively correlated with soil nitrate nitrogen content and above-ground nitrogen uptake, whereas mean distance exhibited a significant negative correlation with nitrogen uptake. **【 Conclusions 】** Localized application of slow-release urea promotes sustained root proliferation in fertilized zones by providing a continuous supply of nitrogen, enhances the spatial coupling between roots and nutrients, and significantly improves maize nitrogen nutrition. X-ray CT technology effectively reveals the spatial characteristics of root-fertilizer interactions and provides crucial technical support for studying root-fertilizer interactions.

Keywords: X-ray CT; nitrogen; slow-release urea; localized fertilization; three-dimensional root structure

氮是植物生长发育必需的营养元素, 直接参与蛋白质、叶绿素及核酸的合成, 并在能量代谢和养分运输中起关键作用, 是限制作物产量的核心营养元素^[1]。农业生产中通过施用氮肥提高土壤氮含量, 进而保证植物生长中充足的氮营养供应^[2]。

传统氮肥施用方式以撒施为主, 即通过撒施和耕作使肥料均匀地分布在耕作层土壤中。然而, 作物根系在土壤中的生长分布具有明显的空间异质性, 撒施可能导致部分肥料无法被根系接触和吸收, 造成肥料的浪费^[3–4]。局部施肥(条施肥)是通过将肥料养分集中供应到根区, 根系在养分富集区大量生长, 实现根系生长和养分分布的空间耦合, 能够有效提高肥料利用率, 也是国际倡导的主要施肥技术(“4R”施肥理论中的 right place)^[5–7]。传统氮肥(如尿素)施入土壤后养分快速释放, 仅能保证植物短期的养分供应, 随着时间推移, 土壤中氮素易通过挥发、淋失等途径流失到环境中^[8]。因此, 尽管局部施肥在植物生长前期在空间上实现了养分和根系的空间耦合, 但是生长后期可能养分不足, 造成前期根系生长优势难以维持, 进而出现根系分布和养分分布再次不匹配。已有研究表明, 在玉米生长后期, 局部施肥区养分浓度下降会限制新生根系生长, 造成产量下降^[9]。

缓控释肥料是近年来迅速发展的新型肥料, 通过物理、化学或物理化学方法改变速效性化肥的养

分释放速率, 使养分供应能够满足植物生长后期需求, 被认为是提高氮肥利用效率的重要途径^[10–11]。然而, 肥料养分的有效性与其利用效率, 不仅取决于其在土壤中的释放过程, 还依赖于作物根系对养分的及时和高效吸收^[11–12]。缓控释肥在局部施用条件下, 能否缓解后期养分浓度下降, 能否促进根系在养分富集区持续大量生长, 以及能否最终改善植物氮营养状况, 目前尚不清楚。

根系是植物养分吸收的主要器官, 也是“根—土—肥”相互作用研究的核心对象, 因此如何准确定量表征根系的生长特性至关重要^[13]。由于根系生长在不透明的土壤介质中, 传统针对根系形态的定量研究往往采用破坏性取样方法, 无法反映根系的完整结构特征, 尤其缺乏对根系三维空间分布特征的精确认知^[14–15]。例如, 根系通常对局部养分供应的响应非常强烈, 出现根系局部增生, 而这种空间异质响应过去需要破坏性分层取样才能间接获取, 而且根系三维结构与肥料颗粒具体位置间的关系也无法准确获取^[15]。X 射线断层扫描技术(X-ray CT)是一种新兴的根系原位研究技术, 能够在不破坏土壤结构的条件下, 高分辨率获取根系真实的三维空间结构特征, 是探究根—土、根—肥相互作用的重要手段, 已成为近年来国际根系研究的热点^[16–17]。因此, 基于 X-ray CT 技术探究根系对缓控释肥的响应, 有助于定量解析缓控释肥促进根系生长的潜在机理, 对于

深入理解根-肥相互作用具有重要意义。

基于上述背景,本研究以玉米为研究对象,通过盆栽试验,设不施氮、均匀施氮、局部施氮和局部施缓释氮 4 个处理,创新性地采用 X-ray CT 原位三维成像技术,定量分析根系三维空间生长特性,旨在揭示根系生长与缓释氮肥相互作用关系,探明缓控释肥与传统局部施肥相比在促进玉米根系后期生长和提高玉米氮吸收方面的潜在优势,为生产中如何施用缓释氮肥提高氮肥利用率提供重要科学支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

盆栽培养试验在海南大学三亚南繁研究院恒温培养室中进行。培养室温度为 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $(75\pm 5)\%$,光周期设置为 12 h/12 h (光照/黑暗),光照强度设置为 50000 lx。

供试材料为玉米 (*Zea mays* L.), 品种为“郑单 958”。肥料颗粒使用尿素和包膜缓释尿素,均购自河北德沃多肥料有限公司,包膜缓释尿素养分释放情况为:施肥后 7 天释放总养分的 8.5%,施肥后 28 天释放总养分的 21.8%,施肥后 75 天释放总养分的 80.5%。试验土壤为砖红壤,取自海南省澄迈县大吉村 (19.83°N , 109.94°E),为构建低氮土壤条件,将 16.7% 的土壤与 83.3% 的石英砂混合^[18],石英砂预先过 70~110 目筛 (孔径 0.125~0.212 mm)。混合基质的基本理化性质为 pH 5.65、有机质 2.38 g/kg、碱解氮 14.57 mg/kg、速效磷 0.05 mg/kg、速效钾 21.32 mg/kg、土壤容重 1.40 g/cm³,砂粒、粉粒、粘粒含量比例为 83:3:14。盆栽使用透明亚克力空心圆柱体,规格为直径 10 cm、高度 20 cm,装填土壤重量 2.5 kg/盆,底部钻孔设排水口,直径为 3.5 mm,各盆栽排水孔数量保持一致,同时底部放置 3 层纱布以防止基质流失。

采用分析纯试剂配制基础营养溶液,以液体形式添加到土壤中并充分混匀。各元素在土壤中的添加量设定如下: P 100 mg/kg, K 100 mg/kg, Mg 50 mg/kg, Ca 100 mg/kg, Mn 3.25 mg/kg, Cu 0.5 mg/kg, Zn 0.79 mg/kg, B 0.17 mg/kg, Fe 3.25 mg/kg, Mo 0.1 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用完全随机区组设计,设 4 个施氮处理:不施氮 (CK)、均匀施用尿素 (UU)、局部施用尿素 (LU) 和局部施用包膜缓释尿素 (SU),总氮用量均

为 50 mg/kg,每处理 4 个生物学重复,共计 16 盆。均匀施用尿素处理将尿素颗粒磨碎后均匀混入土壤,用于模拟实际生产中撒施肥方式;局部施用尿素处理与包膜缓释尿素处理将肥料颗粒以环形聚集的形式,一次性局部施于土壤表层以下 4 cm 深处,用于模拟生产中条施肥或穴施肥方式。

挑选籽粒饱满、大小一致的健康玉米种子,放入 3% 过氧化氢溶液里进行表面消毒,随后用去离子水冲洗,再浸泡至 2 mmol/L 硫酸钙溶液中 2 h。每盆播 2 粒种子,播深为距土壤表面 2 cm。出苗后留壮苗 1 株。盆栽表层覆 1 cm 珍珠岩以减少水分蒸发并防止土壤板结,盆栽侧面用锡箔纸包裹以遮光防止藻类滋生。试验期间根据作物需水状况每 1~2 天补充去离子水,采用称重法控制土壤含水量维持在田间持水量的 75%~85%。

1.3 测定项目及方法

玉米生长 75 天后收获,收获时使用剪刀将地上部与根系分离。称量地上部鲜重后,于 105°C 杀青 30 min,后保持 75°C 烘至恒重测干重。植株和根系样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解后,采用凯氏定氮法测定氮含量^[19]。玉米收获时,取 0~2 cm、2~6 cm、6~10 cm 和 10~18 cm 土层土样,通过靛酚蓝比色法测定土壤铵态氮含量,采用紫外分光光度法测定土壤硝态氮含量^[20]。

玉米根系原位观测在海南大学“无损 3D 根系表型分析平台”进行。采用 X 射线计算机断层扫描 (X-ray CT) 设备 (Phoenix Vtometlx S),扫描分辨率 60 μm ,电压 140 kV、电流 280 μA 、功率 39.2 W。探测器尺寸为 2006×2016 像素,重建图像为 2006×2006×2016 体素,采用多层扫描模式,将样品分为上下两层扫描并合并生成完整的 3D 扫描数据体。扫描过程中样品旋转 360° ,获取 2500 张投影图 (曝光时长 250 ms),使用 0.5 mm Cu 滤片以减弱束硬化效应。

利用 Phoenix Datoslx 2 Reconstruction 软件进行滤波反投影重建,输出 16-bit 灰度 3D 影像数据,并通过 VGStudio Max 3.3 (Volume Graphics, Germany) 进行阈值分割,提取根系与肥料颗粒的体积、表面积等参数。根据 Gao 等^[21]提出的“Routine”方法,在 ImageJ 软件中对根系三维结构进行进一步分割。具体流程为:首先使用 Image J 软件中的 Gaussian Blur 3D 工具过滤 CT 切片,然后应用 Unsharp Mask 工具提高局部对比度。接下来使用 Tubeness 和 3D Hysteresis Thresholding 工具检测根系结构。最后,在去除噪点后完成根系架构的分割。

使用 ImageJ 软件中的 Particle Analyser 工具测量根体积和表面积。利用 Skeletonise 3D 和 Analyze Skeleton 工具定量不同土壤层次的根系长度, 并计算总根长。根长密度 (root length density, RLD) 为根长除以根系所分布区域的体积, 本研究定量并统计了 0—2、2—6、6—10、10—16 cm 土层内的根长, 并以各层总根长除以相应土壤体积计算根长密度。根系平均直径采用 ImageJ 中的 “pore size distribution” 工具进行定量分析^[22]。“mean distance” 参考 Schlüter 等^[23]的方法进行计算, 该指标是土壤空间内任意体素到最近根系体素的平均距离, 反映了根系在土壤中的空间占据程度, 数值越小, 表明根系分布越密集, 养分通过质流或扩散到达根系表面的距离更近, 反之, 则表明根系分布较为稀疏, 养分不容易被吸收利用。

为进一步定量分析根-肥相互作用并揭示根系对局部肥源的微观响应, 在 2—6 cm 土层, 以肥料颗粒为中心, 截取 614×614×614 体素的感兴趣区 (region of interest, 50 cm³), 分别定量分析局部施用尿素和局部施用缓释尿素处理下肥料颗粒周围的根系生长特征; 对于均匀施肥和不施氮肥处理, 则选取相同空间尺度的对应区域分析根系生长状况。上述过程中从 X-ray CT 图像中提取的 3D 根系信息采用 VGSTUDIO MAX (v. 3.4, Volume Graphics GmbH) 进行可视化。

1.4 数据处理与统计分析

所有数据采用 Excel 2021 进行整理, 使用 SPSS 26.0 对不同施氮处理进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 并采用 Duncan's 新复极差法检验处理间差异 ($P<0.05$)。不同施肥处理下地上部、地下部及土壤指标间的相关性采用 Spearman 相关性分析进行检验。图形绘制采用 Origin 2022 软件 (Origin Lab, Northampton, USA)。

2 结果与分析

2.1 不同施氮处理对玉米生物量的影响

不同施氮处理对玉米植株生长具有显著影响 (图 1)。与不施氮处理 (CK) 相比, 3 种施氮处理 (UU、LU、SU) 均显著提高了玉米地上部干物质量 ($P<0.05$), 增幅达 7~9 倍, 表明氮素供应是限制植株生长的关键因子之一。其中, 局部施用缓释尿素 (SU) 处理的地上部干重最高, 但与局部施用尿素 (LU) 和均匀施用尿素 (UU) 处理未达到统计学显著水平 ($P>0.05$)。

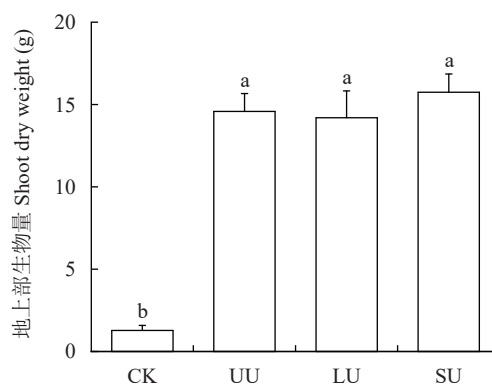


图 1 不同施氮处理对玉米地上部干重的影响

Fig. 1 Effects of different nitrogen application treatments on maize shoot dry weight

注: CK—不施氮; UU—均匀施尿素; LU—局部施尿素; SU—局部施缓释尿素。柱上不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。
Note: CK—No nitrogen application; UU—Uniform urea application; LU—Localized urea application; SU—Localized slow-release urea application. Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments at the 0.05 level.

2.2 不同施氮处理对玉米植株氮营养的影响

不同施氮处理显著影响玉米植株的氮素营养状况 (图 2)。地上部植株氮含量在不同处理间差异显著。与不施氮处理 (CK) 相比, 局部施氮处理 (LU、SU) 均显著提高了玉米植株氮浓度 ($P<0.05$), 而 UU 处理与 CK 差异不显著。SU 处理的玉米地上部氮含量显著高于 UU 处理, 但与 LU 处理差异不显著 ($P>0.05$)。

地上部氮吸收量结果显示, 不施氮处理氮吸收量最低, UU 和 LU 处理间氮吸收量差异不明显, 表明局部施用尿素并未显著提高玉米氮吸收量。SU 处理玉米地上部氮吸收量最高, 显著高于 UU 和 LU 处理, 分别提高 43.8% 和 36.9%, 说明局部施用缓释肥进一步提高了玉米氮吸收。

2.3 不同施氮处理对土壤铵态氮和硝态氮分布的影响

各层土壤铵态氮和硝态氮含量在不同施氮处理下呈现明显差异 (图 3)。不同施氮处理下各层次土壤的铵态氮含量均无显著差异。土壤硝态氮的分层分布特征清晰地显示了不同施肥处理下土壤硝态氮含量有显著差异。在表土层 (0—2 cm) 和土壤中下层 (6—10 和 10—18 cm), 施氮肥处理 (UU、LU、SU) 土壤硝态氮含量均显著高于不施氮肥处理 (CK), 而不同施氮肥处理间差异不显著。在 2—6 cm 土层, SU 处理的硝态氮含量最高, 且显著高于其他处理 ($P<0.05$), 比 CK、UU 和 LU 处理分别显著高出

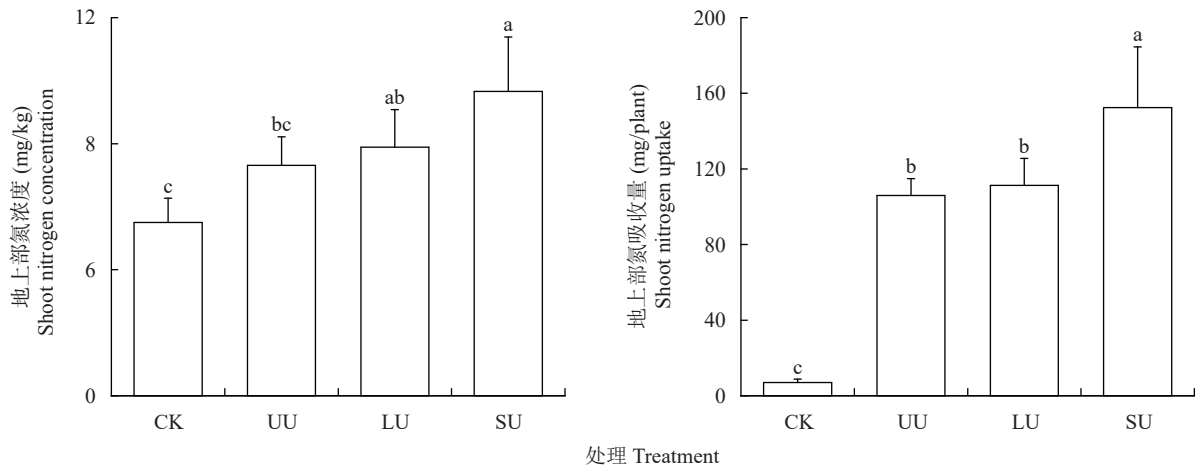


图 2 不同施氮处理对玉米地上部氮含量及氮吸收量的影响

Fig. 2 Effects of different nitrogen application treatments on maize shoot nitrogen content and nitrogen uptake

注: CK—不施氮; UU—均匀施尿素; LU—局部施尿素; SU—局部施缓释尿素。不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: CK—No nitrogen application; UU—Uniform urea application; LU—Localized urea application; SU—Localized slow-release urea application. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.

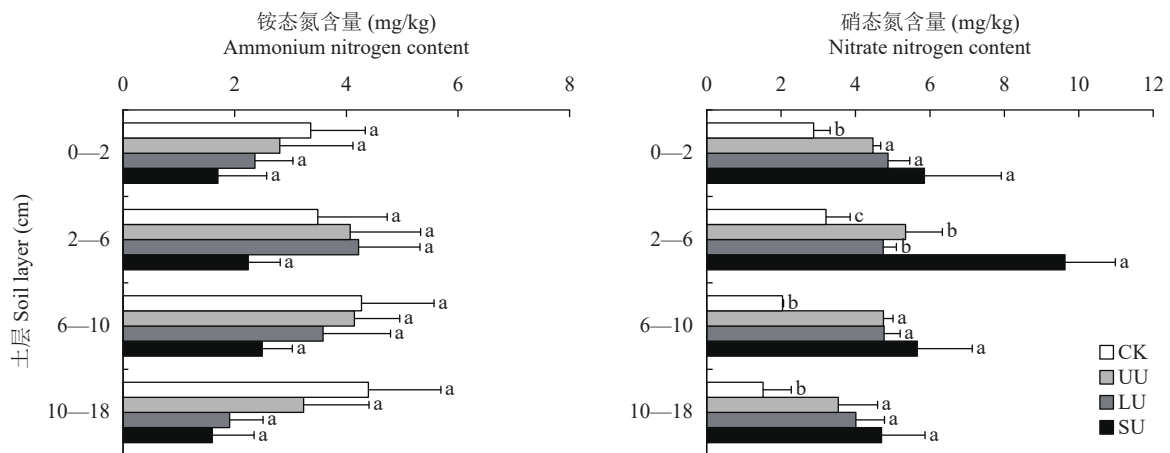


图 3 不同施氮处理下土壤铵态氮与硝态氮的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen under different nitrogen application treatments

注: CK—不施氮; UU—均匀施尿素; LU—局部施尿素; SU—局部施缓释尿素。柱旁不同小写字母表示同一土层处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: CK—No nitrogen application; UU—Uniform urea application; LU—Localized urea application; SU—Localized slow-release urea application. Different lowercase letters beside the bars indicate significant difference among treatments in the same soil layer at the 0.05 level.

200%、80% 和 103%, UU 和 LU 处理在该土层的硝态氮含量也显著高于 CK 处理。

2.4 不同供氮处理对根系生长和分布的影响

通过 X-ray CT 技术对根系进行原位扫描并开展三维重建, 获得了不同处理下玉米根系的三维空间结构特征 (图 4)。根系 3D 分析结果表明, 处理间根系发育存在显著差异: CK 处理根系系统最为稀疏, UU 处理根系总量增加且在空间中分布均匀, LU 处理在施肥点附近表现出一定的根系聚集, 而 SU 处理根系系统最为发达, 大量根系紧密环绕并包裹在缓释肥料颗粒周围。整体根系生长的定量分析结果 (表 1)

与图像观察结果一致。SU 处理的根长、根表面积与根体积均显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 其总根长分别是 CK、UU 和 LU 处理的 3.5、1.8 和 1.7 倍, 在肥料供应区 (2—6 cm 土层) SU 处理时根长是 LU 的 2—3 倍, 表明 SU 处理极大地促进了根系的整体发育。LU 和 UU 处理间上述根系参数虽无显著差异, 但均显著优于 CK 处理, 表明施氮能有效刺激根系生长。

不同施氮处理的根系平均直径差异显著 (表 1), CK 和 SU 处理的根系直径显著小于 UU 和 LU, 说明不施氮和缓释氮肥处理下根系相对较细。Mean distance 结果显示, SU 处理的平均距离最低, 显著

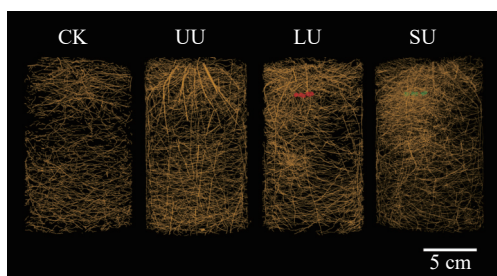


图 4 基于 X-ray CT 技术重建的不同施氮处理下玉米根系三维结构

Fig. 4 Three-dimensional reconstructed architecture of maize root systems under different nitrogen application treatments based on X-ray CT technology

注: CK—不施氮; UU—均匀施尿素; LU—局部施尿素; SU—局部施缓释尿素。LU 处理中的红色球体表示尿素颗粒, SU 处理中的绿色球体表示缓释尿素肥料颗粒。土柱尺寸为直径 10 cm、高度 20 cm。

Note: CK—No nitrogen application; UU—Uniform urea application; LU—Localized urea application; SU—Localized slow-release urea application. The red sphere in the LU treatment represents the urea fertilizer granule, and the green sphere in the SU treatment represents the slow-release urea fertilizer granule. The soil columns dimension are 10 cm in diameter and 20 cm in height.

低于 CK、UU 和 LU 处理, 说明其根系在土壤中分布最为密集。

通过 X-ray CT 技术定量了根系在垂直方向的分布(图 5)。结果显示, 不同施氮处理下根系生长在不同土壤层次呈现显著差异。CK 处理在各土壤层次中根长密度均表现为最低, SU 处理根长密度在各土壤层均表现为最高。LU 处理在局部供氮层(2—6 cm)的根长密度显著高于 UU 处理, 表明局部供氮促进了根系的局部增生, 而 SU 处理在 2—6 cm 土层的根长密度达到 7.3 cm/cm³, 比 UU 和 LU 分别显著高出 182% 和 101%。不同土层根长占比的分析结果表明, SU 处理在 2—6 cm 的施肥层中根系分布比例显著高于 UU 和 LU 处理, 说明缓释肥颗粒能够有效促

进根系在养分富集区域的生长。

2.5 局部施肥区的根系生长

局部施肥区(614×614×614 体素感兴趣区)根系分析结果表明, 与均质施用尿素相比, 局部施用尿素显著促进了根系生长, 局部施用缓释尿素的促根生长效果更为明显(图 6)。SU 处理在肥料颗粒周围的根长、根表面积和根体积均显著高于其他处理($P<0.05$), 其中 SU 处理的根长分别是 UU 和 LU 处理的 8.99 和 3.29 倍(表 2)。根系平均直径和 Mean distance 在 SU 处理下均最小, 表明 SU 处理的细根数量较高。

2.6 相关性分析

地上部生物量与玉米地上部氮浓度和氮吸收量均呈显著正相关, 同时与根长、根表面积等根系形态参数显著正相关($P<0.05$)。地上部氮吸收量与根系形态参数显著正相关, 特别与 2—6 cm 土层的根长密度呈正相关, 与 Mean distance 呈显著负相关。氮吸收和生物量积累与土壤硝态氮含量正相关, 而与铵态氮含量无显著相关性(图 7)。

3 讨论

3.1 缓控释尿素促进氮素供应与吸收

局部施用缓释尿素(SU)能够有效提高玉米氮营养, 促进玉米氮吸收和生物量积累。植物在不同生育期均需要从土壤中获取充足的氮素, 苗期需求量较低, 后期旺盛生长期以及在生殖生长期均需要较高的氮供应^[24]。大量研究表明, 生产中常见的撒施肥, 将肥料均匀地混入土壤, 会出现肥料释放的养分不易进入根区, 从而造成肥料浪费^[25-26]。局部施肥能够将养分供应到根区, 由传统的施肥到土壤(撒施肥)转变为施肥到根区, 从而有效提高植物氮营养, 提高氮利用效率^[27-28]。有研究表明, 局部施用尿素等

表 1 基于 CT 扫描的玉米根系形态参数

Table 1 Maize root morphology parameters measured by X-ray CT scanning

处理 Treatment	总根长 (m) Total root length	根表面积 (cm ²) Root surface area	根体积 (cm ³) Root volume	平均根直径 (mm) Mean root diameter	平均距离 (mm) Mean distance
CK	28.71±3.07 c	250.65±43.69 c	2.30±0.41 c	0.17±0.02 b	21.13±1.16 a
UU	54.11±3.52 b	531.96±34.55 b	5.81±0.67 b	0.24±0.03 a	19.31±0.55 b
LU	58.15±7.38 b	576.91±78.99 b	6.25±0.90 b	0.22±0.04 a	20.79±0.25 a
SU	99.12±9.55 a	949.68±90.91 a	9.68±0.78 a	0.17±0.03 b	17.21±0.73 c

注: CK—不施氮; UU—均匀施尿素; LU—局部施尿素; SU—局部施缓释尿素。数据为平均值±标准差, $n=4$ 。同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: CK—No nitrogen application; UU—Uniform urea application; LU—Localized urea application; SU—Localized slow-release urea application. Values are shown as means ± SD ($n=4$). Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.

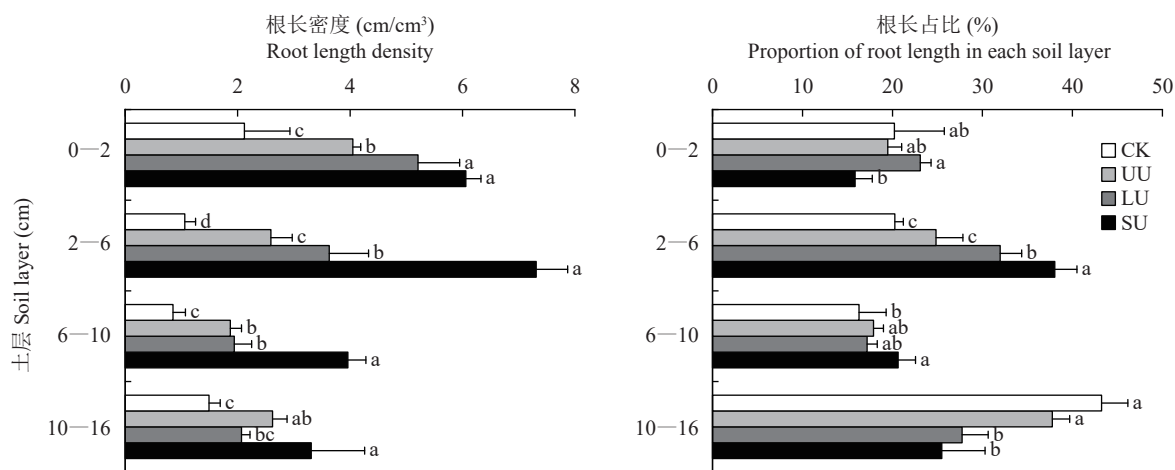


图5 不同施氮处理下根长密度的垂直分布及各土层根长占总根长比例

Fig. 5 Vertical distribution of root length density and proportion of total root length in each soil layer under different nitrogen application treatments

注: CK—不施氮; UU—均匀施尿素; LU—局部施尿素; SU—局部施缓释尿素。柱旁不同小写字母表示同一土层处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: CK—No nitrogen application; UU—Uniform urea application; LU—Localized urea application; SU—Localized slow-release urea application. Different lowercase letters beside the bars indicate significant difference among treatments in the same soil layer at the 0.05 level.

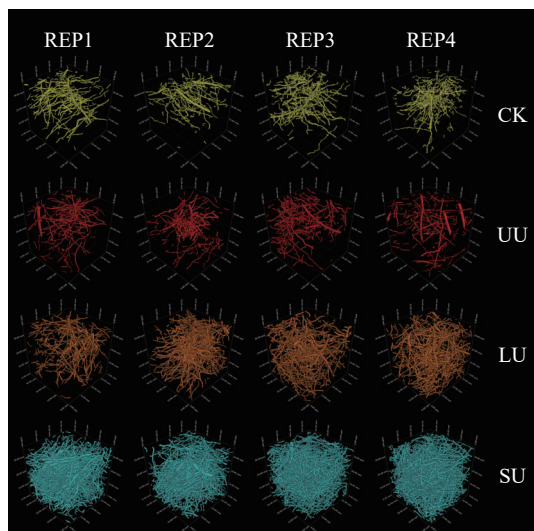


图6 感兴趣区根系三维结构

Fig. 6 Three-dimensional architecture of maize root system within the region of interest (ROI)

注: 图示为以肥料颗粒为中心截取的 $614 \times 614 \times 614$ 体素 (50 cm^3) 感兴趣区 (ROI) 的三维重建结果。CK—不施氮; UU—均匀施尿素; LU—局部施尿素; SU—局部施缓释尿素。REP 代表生物学重复, 每个处理设置 4 个重复。

Note: The figure illustrates the three-dimensional reconstruction of the region of interest (ROI)—a $614 \times 614 \times 614$ voxel (50 cm^3) volume centered on the fertilizer granule. CK—No nitrogen application; UU—Uniform urea application; LU—Localized urea application; SU—Localized slow-release urea application. REP represents biological replicates, with four replicates per treatment.

速效氮肥, 虽然在植物生长前期能够在土壤中形成养分富集区, 促进植物养分吸收, 但在后期养分富

集区浓度下降, 同样会出现根系生长和养分分布的不匹配, 无法为植株提供充足的氮营养^[29]。本研究中, 局部施用尿素处理 (LU) 玉米地上部氮浓度和氮吸收与均质供应尿素 (UU) 处理无显著差异, 生物量也无明显差异 (图 1, 图 2), 这表明局部供氮可能存在后期氮素供应不足。局部缓释尿素能够缓慢释放养分, 实现肥料养分释放与作物氮吸收匹配, 持续为作物生长提供充足的氮营养^[30]。本研究中, 局部施用缓释尿素有效提高了收获期土壤硝态氮含量 (图 3), 从而显著提高了玉米地上部氮浓度和氮吸收 (图 2, 图 7)。

3.2 缓控释尿素促进玉米根系生长

局部施用缓释尿素能够促进根系在养分富集区的生长。局部供氮促进氮吸收主要的原因是肥料颗粒在释放养分后, 形成高浓度的养分富集区, 根系在养分富集区感受到信号, 从而大量生长, 实现根系生长和养分空间分布高度匹配^[31]。本研究中, 局部施用尿素处理 (LU) 与均匀施用尿素处理 (UU) 相比, 尽管二者总根长和根表面积差异不显著 (表 1), 但 LU 处理显著促进了根系在养分富集区的生长 (图 4, 图 5, 图 6, 表 2)。然而, 研究表明, 随着养分富集区氮浓度逐渐下降, 前期大量生长的根系, 由于养分不足, 出现根系间的强烈竞争, 根系分布和氮素空间分布再次出现不匹配, 不利于氮吸收, 根系这种现象被称为“奢侈生长”^[32-33]。局部施用缓释尿素

表 2 肥料层 (2—6 cm) 感兴趣区的根系形态参数

Table 2 Root morphology parameters in the local region of interest (ROI) within the fertilizer layer (2—6 cm)

处理 Treatment	根长 (m) Root length	根表面积 (cm ²) Root surface area	根体积 (cm ³) Root volume	平均根直径 (mm) Mean root diameter	平均距离 (mm) Mean distance
CK	3.85±0.90 c	72.35±15.76 c	1.24±0.28 c	0.56±0.08 ab	46.88±7.70 a
UU	3.75±0.53 c	75.96±3.90 c	1.66±0.24 c	0.94±0.31 a	44.71±3.81 a
LU	10.24±2.74 b	184.45±48.49 b	3.40±0.88 b	0.67±0.22 ab	25.16±4.70 b
SU	33.70±4.17 a	545.97±61.99 a	9.08±0.91 a	0.46±0.06 b	12.38±1.17 c

注: CK—不施氮; UU—均匀施尿素; LU—局部施尿素; SU—局部施缓释尿素。数据为平均值±标准差, $n=4$ 。同列数据后不同小写字母表示处理间在0.05 水平差异显著。

Note: CK—No nitrogen application; UU—Uniform urea application; LU—Localized urea application; SU—Localized slow-release urea application. Values are shown as means ± SD ($n=4$). Different lowercase letters after data in a column indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.

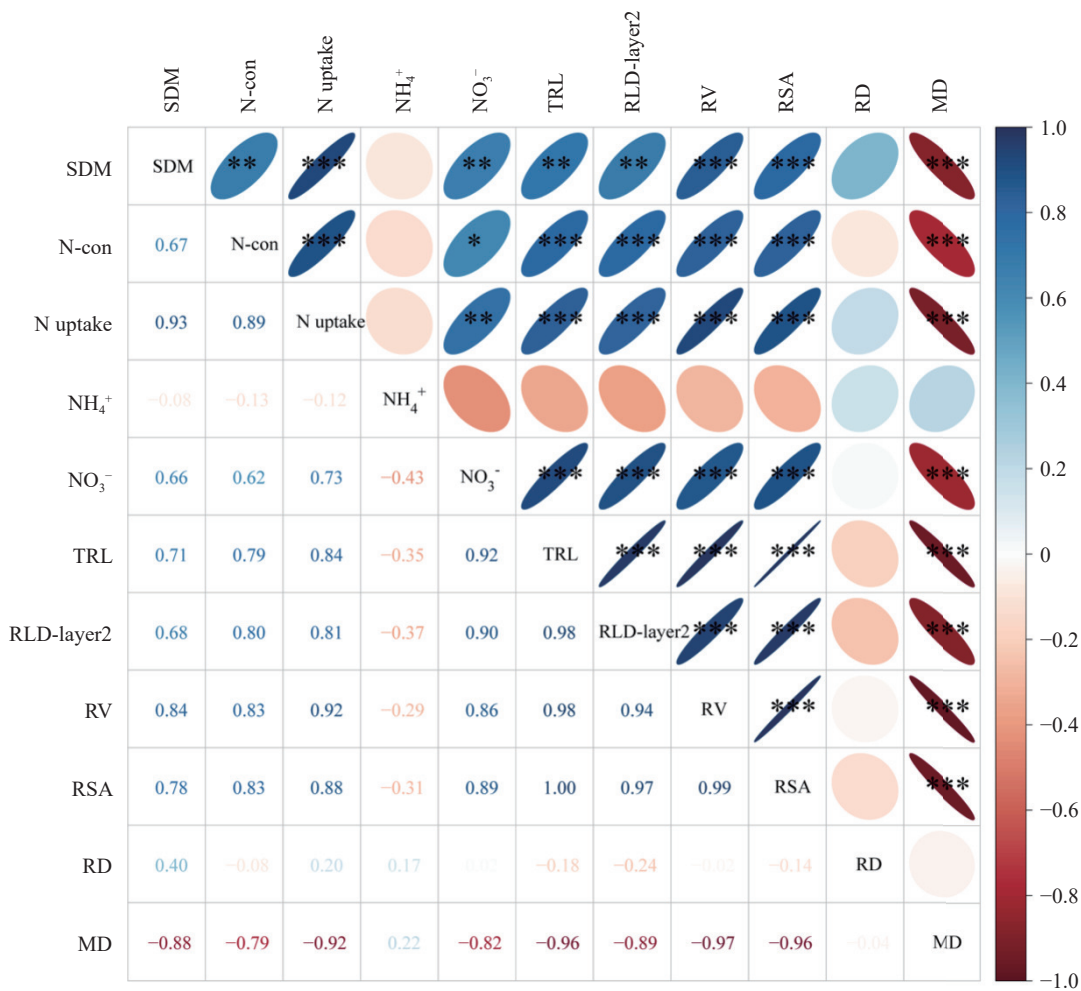


图 7 相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis

注: SDM—地上部干重; N-con—地上部氮浓度; N uptake—氮吸收量; NH_4^+ —肥料层 (2—6 cm) 铵态氮浓度; NO_3^- —肥料层 (2—6 cm) 硝态氮浓度; TRL—总根长; RLD-layer2—肥料层 (2—6 cm) 根长密度; RV—总根体积; RSA—总根表面积; RD—根直径; MD—平均距离。*— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ***— $P<0.001$ 。

Note: SDM—Shoot dry mass; N-con—Aboveground nitrogen concentration; N uptake—Nitrogen uptake; NH_4^+ —Ammonium nitrogen concentration in the fertilizer layer (2—6 cm); NO_3^- —Nitrate nitrogen concentration in the fertilizer layer (2—6 cm); TRL—Total root length; RLD-layer2—Root length density in the fertilizer layer (2—6 cm); RV—Total root volume; RSA—Total root surface area; RD—Root diameter; MD—Mean distance. *— $P<0.05$; **— $P<0.01$; ***— $P<0.001$.

能够通过土壤中局部氮素持续补充,持续促进根系生长^[34]。本研究中局部缓释尿素(SU)施用后局部养分供应区(2—6 cm)根系长度是局部速效尿素(LU)处理根长的2倍(表1),肥料周围614×614×614体素范围(50 cm³)内,SU处理的根长是LU处理的3.3倍,表明局部施用缓释尿素能够持续促进根系生长,为植株氮吸收提供坚实的保障。

3.3 缓控释尿素对土壤氮含量的影响

局部施用缓释尿素能够有效调控土壤中的氮含量。研究表明,局部施用尿素会在肥料颗粒周围形成高铵与高pH区域^[35]。这种高铵环境不仅加剧氨挥发,也可能对幼根产生毒害或抑制硝化作用^[36]。相比之下,局部施用缓释尿素有效避免了铵态氮的瞬时释放与局部累积,同时有效提高了收获期土壤硝态氮含量(图3),从而显著提高了玉米地上部的氮浓度和氮吸收(图2,图7)。缓释尿素的核心在于养分的缓慢释放,尽管本研究观测到收获期缓释尿素处理土壤硝态氮含量显著高于其他施肥处理,但缓释尿素的养分释放过程未动态监控,因此,未来通过原位土壤溶液提取,动态监测氮素释放,进一步探究氮素释放对根系生长的影响,是研究“根-肥”相互作用的重点。

土壤质地对养分的转化与迁移具有重要影响,不同质地土壤中肥料的分解速率以及氮素不同形态间的转化和迁移不同^[37]。砂质土壤透水透气性好,可能对缓释肥颗粒释放养分有一定促进作用,而黏质土则相反^[38-39]。本研究采用的土壤和石英砂混合物,其性质近似于海南沿海地区广泛分布的砂质土壤,砂质土壤中缓释肥缓慢释放的特性相较于速效尿素,可能更加凸显其保肥的优势,而粘土中缓控释肥相较于速效氮肥是否仍然存在明显优势,以及根系在黏土中如何响应缓控释肥,目前尚不清楚。因此,本研究结论在黏质等高保肥力土壤中的适用性有待进一步验证。

3.4 X-ray CT技术在根-肥互作研究中的应用

本研究成功应用X-ray CT技术克服了传统破坏性取样的局限,实现了对土壤中肥料与根系三维构型的无损、原位观测,能够有效探索根系对土壤中养分以及肥料的响应,探明“根-土-肥”相互作用。土壤是不透明的,对于生长在土壤中的根系,传统经典的根系研究方法往往采用破坏性取样结合洗根和平板扫描,定量根系生长^[40]。然而,上述方法缺失了根系的三维空间分布特征,无法准确评估根系对土壤

养分或肥料颗粒的响应。X-ray CT技术能够在高空间分辨率下实现根系无损检测,透过土壤观测根系生长,以及根系生长对土壤中肥料颗粒的响应,因此在研究“根-土-肥”相互作用中呈现巨大优势。Flavel等^[41]首次通过CT技术探究了根系对局部施肥的响应,发现根系能够在局部磷富集区大量生长。Ahmed等^[42]采用CT技术探究了鸟粪石(struvite)施用对根系生长的影响,定量了根系的动态生长过程。Gao等^[43]也采用CT技术探究了玉米和蚕豆根系对局部供应过磷酸钙的差异性响应。本研究通过X-ray CT扫描技术获取了根系的三维空间分布(图4,表1),基于根系空间数据,定量了根系在土壤剖面范围内的分布(图5)。与此同时,X-ray CT技术获取根系三维信息不仅包括剖面范围内的分布,空间任意区域的信息均可获取并定量,针对根系对肥料的响应,本研究能够自由截取肥料周围的根系生长数据,更好地呈现根系对肥料的响应(图6,表2)。然而,X-ray CT技术在探究根系生长过程中,其优势除了对根系空间三维(3D)特征的定量,还包括对根系生长的动态记录。因此,将X-ray CT从三维静态观测拓展至4D(3D+时间)动态分析,通过时间序列扫描捕捉肥料释放与根系生长的时空耦合过程,将有望深入揭示缓控释肥“控释-促根-吸肥”的动态机制,为不同土壤环境下根-肥界面过程研究开辟新路径。

X-ray CT技术应用于植物根-肥研究也存在一定的限制,如根系生长容器的限制^[17,44]。基于X-ray CT技术的原理,扫描物体的尺寸和图像的分辨率之间存在不可避免的反比关系(trade-off),即盆栽尺寸越大,图像分辨率越低,对于根系的提取难度则会增加,而盆栽直径太小,会限制根系的生长^[45-46]。Flavel等^[41]的研究中使用了直径3 cm的土柱,Gao等^[43]将盆栽尺寸提高到了7 cm。本研究进一步将土柱直径扩大至10 cm,在确保能够准确提取根系信息的前提下,尽管从重建图像中仍可观察到所有处理均出现部分根系生长至容器边缘(图4),但可视化结果显示主要根系仍集中在容器内部。因此,采用10 cm直径的土柱在平衡图像分辨率与容器尺寸方面可能更具适用性。

4 结论

局部施用缓控释尿素(SU)显著促进根系生长,其总根长分别是均匀施用尿素(UU)和局部施用尿素(LU)处理的1.8和1.7倍,在肥料供应区(2—6 cm土层),SU处理的根长是LU的2.3倍。肥料颗粒周

围 $614 \times 614 \times 614$ 体素范围内 (50 cm^3), SU 处理的根长是 LU 的 3.3 倍, 表明 SU 处理比 LU 处理能持续促进根系生长。这种显著的促根效果最终体现在地上部氮营养上, SU 处理的玉米地上部氮吸收显著高于 UU 和 LU。未来可进一步采用 X-ray CT 技术, 从空间和时间尺度深入探究根系生长和肥料释放间的耦合作用, 为缓控释尿素等新型肥料在生产中合理施用和高效利用提供理论和技术支撑。

参 考 文 献:

- [1] Ali A, Jabeen N, Farruhbek R, *et al.* Enhancing nitrogen use efficiency in agriculture by integrating agronomic practices and genetic advances[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1543714.
- [2] Conant R T, Berdanier A B, Grace P R. Patterns and trends in nitrogen use and nitrogen recovery efficiency in world agriculture[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, 27(2): 558–566.
- [3] Banger K, Wagner-Riddle C, Grant B B, *et al.* Modifying fertilizer rate and application method reduces environmental nitrogen losses and increases corn yield in Ontario[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 722: 137851.
- [4] Griesheim K L, Mulvaney R L, Smith T J, *et al.* Nitrogen-15 evaluation of fertilizer placement at planting for corn production[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2023, 87(2): 309–323.
- [5] Chen Z, Wang H, Liu X, *et al.* The effect of N fertilizer placement on the fate of urea- ^{15}N and yield of winter wheat in southeast China[J]. *PLoS ONE*, 2016, 11(4): e0153701.
- [6] Jiang C, Lu D, Zu C, *et al.* Root-zone fertilization improves crop yields and minimizes nitrogen loss in summer maize in China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 15139.
- [7] 刘一田, 郝小雨, 孟鑫, 等. 控释氮肥与稳定性氮肥一次性施用实现大豆“4R”施肥效益[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(9): 1892–1900.
Liu Y T, Hao X Y, Meng X, *et al.* One-time application of controlled-release and stabilized nitrogen fertilizers achieves the “4R” fertilization benefits in soybean[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(9): 1892–1900.
- [8] Coskun D, Britto D T, Shi W, *et al.* Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition [J]. *Nature Plants*, 2017, 3(6): 1–10.
- [9] Li H, Wang X, Brooker R W, *et al.* Root competition resulting from spatial variation in nutrient distribution elicits decreasing maize yield at high planting density[J]. *Plant and Soil*, 2019, 439(1): 219–232.
- [10] Anas M, Liao F, Verma K K, *et al.* Fate of nitrogen in agriculture and environment: Agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency[J]. *Biological Research*, 2020, 53(1): 47.
- [11] 韩晓日. 新型缓/控释肥料研究现状与展望[J]. *沈阳农业大学学报*, 2006, 37(1): 3–8.
Han X R. Current status and prospects of new slow/controlled-release fertilizers[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(1): 3–8.
- [12] 程冬冬. 高分子缓/控释肥的养分释放特征及应用效果研究[D]. 山西太原: 中北大学博士学位论文, 2015.
Cheng D D. Study on nutrient release characteristics and application effects of polymer slow/controlled-release fertilizers[D]. Taiyuan Shanxi: PhD Dissertation of North University of China, 2015.
- [13] Sultan S, Snider J, Conn A, *et al.* A statistical growth property of plant root architectures[J]. *Plant Phenomics*, 2020, 2020: 2073723.
- [14] Pflugfelder D, Metzner R, Van D D, *et al.* Non-invasive imaging of plant roots in different soils using magnetic resonance imaging (MRI)[J]. *Plant Methods*, 2017, 13: 1–9.
- [15] Fiorani F, Schurr U. Future scenarios for plant phenotyping[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2013, 64(1): 267–291.
- [16] Hou L H, Gao W, Weng Z H, *et al.* Use of X-ray tomography for examining root architecture in soils[J]. *Geoderma*, 2022, 405: 115405.
- [17] Mooney S J, Pridmore T P, Helliwell J, *et al.* Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 352(1): 1–22.
- [18] Lippold E, Phalempin M, Schlüter S, *et al.* Does the lack of root hairs alter root system architecture of *Zea mays*?[J]. *Plant and Soil*, 2021, 467(1): 267–286.
- [19] GB/T 20803—2006, 植物体氮、磷、钾的测定 分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
GB/T 20803—2006. Determination of nitrogen, phosphorus and potassium in plant tissues-spectrophotometric methods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [20] GB/T 17139—1997, 土壤氮、磷、钾测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
GB/T 17139—1997. Methods for determination of nitrogen, phosphorus and potassium in soils[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [21] Gao W, Schlüter S, Blaser S R G A, *et al.* A shape-based method for automatic and rapid segmentation of roots in soil from X-ray computed tomography images: Rootline[J]. *Plant and Soil*, 2019, 441(1): 643–655.
- [22] Koebernick N, Weller U, Huber K, *et al.* In situ visualization and quantification of three-dimensional root system architecture and growth using X-ray computed tomography[J]. *Vadose Zone Journal*, 2014, 13(8): vzj2014. 03.0024.
- [23] Schlüter S, Blaser S R G A, Weber M, *et al.* Quantification of root growth patterns from the soil perspective via root distance models[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1084.
- [24] Adriaanse F G, Human J J. Effect of time of application and nitrate: Ammonium ratio on maize grain yield, grain N concentration and soil mineral N concentration in a semi-arid region[J]. *Field Crops Research*, 1993, 34(1): 57–70.
- [25] Ma X, Li F, Chen Y, *et al.* Effects of fertilization approaches on plant development and fertilizer use of citrus[J]. *Plants*, 2022, 11(19): 2547.
- [26] Nwinyi S C O, Enwezor W O. Evaluation of fertilizer placement methods for white yam (*Dioscorea rotundata*)[J]. *Experimental Agriculture*, 1985, 21(1): 73–78.
- [27] Chen Y, Tu P, Yang Y, *et al.* Diversity of rice rhizosphere

- microorganisms under different fertilization modes of slow-release fertilizer[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 2694.
- [28] Szulc P, Ambroży-Deręgowska K, Mejza I, *et al.* The role of agrotechnical factors in shaping the protein yield of maize (*Zea mays* L.)[J]. *Sustainability*, 2020, 12(17): 6833.
- [29] Yadav M R, Kumar S, Lal M K, *et al.* Mechanistic understanding of leakage and consequences and recent technological advances in improving nitrogen use efficiency in cereals[J]. *Agronomy*, 2023, 13(2): 527.
- [30] Wu P, Yu J, Wang Q, *et al.* Deep placement of controlled-release and common urea achieves the win-win of enhancing maize productivity and decreasing environmental pollution[J]. *European Journal of Agronomy*, 2025, 164: 127484.
- [31] Hodge A. The plastic plant: Root responses to heterogeneous supplies of nutrients[J]. *New Phytologist*, 2004, 162(1): 9–24.
- [32] Weiser M, Koubek T, Herben T. Root foraging performance and life-history traits[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 779.
- [33] Jia Z, von Wirén N. Signaling pathways underlying nitrogen-dependent changes in root system architecture: From model to crop species[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2020, 71(15): 4393–4404.
- [34] 杨俊刚, 倪小会, 徐凯, 等. 接触施用包膜控释肥对玉米产量、根系分布和土壤残留无机氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(4): 924–930.
- Yang J G, Ni X H, Xu K, *et al.* Effects of contact application of polymer-coated controlled-release fertilizer on maize yield, root distribution, and residual inorganic nitrogen in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(4): 924–930.
- [35] Merl T, Sedlacek C J, Pjevac P, *et al.* Visualizing small-scale subsurface NH_3 and pH dynamics surrounding nitrogen fertilizer granules and impacts on nitrification activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 189: 109273.
- [36] Britto D T, Kronzucker H J. NH_4^+ toxicity in higher plants: A critical review[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2002, 159(6): 567–584.
- [37] Barłóg P, Grzebisz W, Łukowiak R. Fertilizers and fertilization strategies mitigating soil factors constraining efficiency of nitrogen in plant production[J]. *Plants*, 2022, 11(14): 1855.
- [38] Podlasek A, Koda E, Vavřková M D. The variability of nitrogen forms in soils due to traditional and precision agriculture: Case studies in Poland[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(2): 465.
- [39] Li X, Wang Y, Feng G, *et al.* Differential fertilizer nitrogen fates in maize cropping system among three soil textures based on ^{15}N [J]. *Field Crops Research*, 2023, 291: 108780.
- [40] Teramoto S, Uga Y. Improving the efficiency of plant root system phenotyping through digitization and automation[J]. *Breeding Science*, 2022, 72(1): 48–55.
- [41] Flavel R J, Guppy C N, Tighe M, *et al.* Non-destructive quantification of cereal roots in soil using high-resolution X-ray tomography[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(7): 2503–2511.
- [42] Ahmed S, Klassen T N, Keyes S, *et al.* Imaging the interaction of roots and phosphate fertiliser granules using 4D X-ray tomography [J]. *Plant and Soil*, 2016, 401(1): 125–134.
- [43] Gao W, Blaser S R G A, Schlüter S, *et al.* Effect of localised phosphorus application on root growth and soil nutrient dynamics *in situ*—comparison of maize (*Zea mays*) and faba bean (*Vicia faba*) at the seedling stage[J]. *Plant and Soil*, 2019, 441(1): 469–483.
- [44] Blaser S R G A, Schlüter S, Vetterlein D. How much is too much?—Influence of X-ray dose on root growth of faba bean (*Vicia faba*) and barley (*Hordeum vulgare*)[J]. *PLoS ONE*, 2018, 13(3): e0193669.
- [45] Mairhofer S, Zappala S, Tracy S R, *et al.* RooTrak: Automated recovery of three-dimensional plant root architecture in soil from X-ray microcomputed tomography images using visual tracking[J]. *Plant Physiology*, 2012, 158(2): 561–569.
- [46] Tracy S R, Black C R, Roberts J A, *et al.* Using X-ray computed tomography to explore the role of abscisic acid in moderating the impact of soil compaction on root system architecture[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 110: 11–18.