

双氰胺对肥料氮去向的影响依赖于土壤类型

肖 珣^{1,2}, 王玥凯³, 代文台^{1,2}, 沈仁芳^{1,2}, 赵学强^{1,2*}

(1 中国科学院南京土壤研究所 / 土壤与农业可持续发展重点实验室 (中国科学院), 江苏南京 210008;

2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 南京农业大学农学院, 江苏南京 210095)

摘要:【目的】不同类型土壤硝化作用存在差异, 研究硝化抑制剂双氰胺 (DCD) 对不同类型土壤中肥料氮去向和作物氮肥利用率的影响, 以期 DCD 在玉米氮肥管理中的应用提供理论依据。【方法】土柱淋溶试验选择了 3 种典型土壤: 红壤、黑土、潮土, 以¹⁵N 标记尿素为供试肥料, 设计施用 DCD 和不施用 DCD (施用量为尿素氮用量的 10%) 两个处理。在玉米播种后的第 10、17、22、26、31、36、46 天进行淋溶试验, 收集淋溶液, 用重量法测量其体积, 测定淋溶液中的铵态氮和硝态氮含量。玉米在播种后 57 天收获, 分为地上部和根部, 分别测定生物量和氮含量; 将土柱中的土壤混匀后, 测定铵态氮和硝态氮含量, 以及¹⁵N 同位素丰度。【结果】不论是否添加 DCD, 3 种土壤的氮素淋溶随时间的动态变化趋势基本一致, 铵态氮、硝态氮和全氮的淋溶主要集中在前 3 次, 且均在第一次淋溶最高, 随后快速下降至较低水平, 而尿素态氮主要集中在第一次淋溶。DCD 降低了 3 种土壤硝态氮淋溶 (N 0.74~5.76 mg/kg 土), 对红壤的降低效果最小; 增加了红壤和潮土的铵态氮淋溶, 增量以潮土最多 (N 2.99 mg/kg 土)。DCD 减少氮淋溶的效果与 3 种土壤的硝化作用强弱一致, 即黑土>潮土>红壤。DCD 降低了黑土和潮土中肥料氮的淋失率, 提高了肥料氮的土壤残留率, 但 DCD 增加了红壤的肥料氮淋失率。DCD 抑制了红壤和黑土的气态氮损失, 增加了潮土的气态氮损失, 这可能是因为 DCD 导致铵态氮在潮土积累, 潮土 pH (8.18) 较高, 易产生氨挥发损失。DCD 显著提高了 3 种土壤上玉米的氮肥利用率 (增幅为 3.90%~5.77%), 其中以黑土提升幅度最高, 但仅提高了潮土上玉米生物量。与潮土和红壤相比, 黑土具有较高的玉米氮肥利用率、较低的氮淋失率和气态氮损失率。【结论】施用 DCD 对玉米生长、氮肥利用率和肥料氮去向的作用效果因土壤类型而异, 主要与土壤性质有关。黑土和潮土硝化作用强, 施用 DCD 降低肥料氮的淋失率, 提高肥料氮土壤残留率的效果较好, 而在红壤上效果较差。施用 DCD 显著抑制了红壤和黑土的气态氮损失, 但是却增加了潮土的气态氮损失, 这可能因为潮土 pH 较高, DCD 导致铵态氮在潮土积累而引起更多的氨挥发。

关键词: 玉米; 氮肥利用率; 氮淋溶; ¹⁵N 同位素示踪; 肥料氮去向

The influence of dicyandiamide on the fate of fertilizer nitrogen depends on soil types

XIAO Xun^{1,2}, WANG Yue-kai³, DAI Wen-tai^{1,2}, SHEN Ren-fang^{1,2}, ZHAO Xue-qiang^{1,2*}

(1 Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture / Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: 【Objectives】 Given that the efficacy of DCD varies in different soils, we studied the precise efficacy of nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on maize growth, fertilizer nitrogen (N) recovery efficiency, and the N fate in different soil types, to establish a theoretical foundation for the scientific application of DCD in maize N management. 【Methods】 A soil column leaching experiment was carried out using ¹⁵N-labeled urea. The columns were filled with one of the three soil types (red soil, black soil, and fluvo-aquic soil), and DCD was applied at 10% of the urea N application rate or omitted as a control. Water (100 mL) was added to the soil at the

收稿日期: 2024-06-28 接受日期: 2024-10-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42077101, 31672229)。

联系方式: 肖珣 E-mail: xunxiao@issas.ac.cn; * 通信作者 赵学强 E-mail: xqzhao@issas.ac.cn

10, 17, 22, 26, 31, 36, and 46 days post-sowing of maize to collect leachate for the measurement of ammonium and nitrate N. After 57 days, the maize plants were harvested to determine their yield and N content in both the aboveground parts and roots. Additionally, the ammonium- and nitrate-N content in the residual soil was measured. **【 Results 】** Regardless of DCD application, the N leaching patterns in all three soils exhibited similar temporal trends. The majority of ammonium N, nitrate N, and total N leaching occurred during the initial three leaching events, peaking during the first event and then declining rapidly thereafter. Urea N leaching was primarily concentrated in the first leaching event. DCD reduced nitrate leaching by N 0.74 to N 5.76 mg/kg soil across all three soils, with the smallest reduction observed in red soil. While DCD had no significant effect on urea leaching, it increased ammonium leaching in red and fluvo-aquic soils, with the highest increment in fluvo-aquic soil (N 2.99 mg/kg soil). The effectiveness of DCD in reducing N leaching was correlated with the soil's nitrification capacity, following the order black soil>fluvo-aquic soil>red soil. DCD effectively minimized fertilizer N leaching and enhanced soil N retention in black and fluvo-aquic soils, but had no significant impact on red soil and even increased the fertilizer N leaching rate therein. DCD significantly inhibited gaseous N loss in red and black soils but increased it in fluvo-aquic soil. Across all three soils, DCD improved fertilizer N recovery efficiency for maize, with the greatest improvement observed in black soil. However, DCD only increased maize biomass in fluvo-aquic soil. Compared to fluvo-aquic and red soils, black soil exhibited higher maize fertilizer N recovery efficiency, lower N leaching, and lower gaseous N losses, attributed to its favorable soil conditions for optimal maize growth and minimal fertilizer N loss. **【 Conclusion 】** The effects of applying DCD on maize growth, N fertilizer use efficiency, and the fate of fertilizer N vary among soil types, primarily due to soil properties. Black soil and fluvo-aquic soil exhibit strong nitrification, so the application of DCD is more effective in reducing the leaching loss rate of fertilizer N and increasing the soil residual rate of fertilizer N, whereas its effectiveness is poorer in red soil. The application of DCD significantly inhibits gaseous N losses in red soil and black soil but increases gaseous N losses in fluvo-aquic soil. This may be attributed to the higher pH of fluvo-aquic soil, where DCD leads to the accumulation of ammonium-N, potentially causing increased ammonia volatilization.

Key words: maize; fertilizer nitrogen recovery efficiency; nitrogen leaching; ^{15}N isotope tracing; fertilizer nitrogen fate

作物的高产与氮肥的施用密不可分。玉米是我国的三大粮食作物之一，种植范围广、产量高、氮肥用量大，但氮肥利用率低。通常，施入氮肥的1/3左右被作物吸收利用，剩余的2/3残留在土壤或通过挥发、淋溶、径流等途径进入大气和水体环境，导致大气 $\text{PM}_{2.5}$ 含量增加、温室气体排放增多和水体污染加重等环境问题^[1-3]。淋溶是肥料氮在土壤中损失的主要途径之一，约占施氮量的8%~19%^[4-5]，也是地下水污染的主要原因之一^[6]。因此，探究有效阻控氮淋溶措施，对于降低玉米种植中氮肥损失非常关键。

尿素是农业生产中常见的化学氮肥，约占氮肥消耗总量的55%^[7]。施入土壤的尿素首先水解为铵态氮，继而在硝化作用下转化为硝态氮。 NH_4^+ 带正电荷，易被土壤颗粒吸附固定，不易淋失，而 NO_3^- 带负电荷，在土壤中移动性较强，在灌溉或降水作用

下易向土壤深层迁移，造成氮淋溶损失^[8]。硝化抑制剂可有效抑制铵态氮向硝态氮转化，使铵态氮在土壤中以较高水平保持较长时间^[9]，可减少土壤硝态氮的淋溶^[10]，还可降低硝化/反硝化导致的气态氮损失^[11-12]。氮肥中添加硝化抑制剂是提高作物氮肥利用率、减少氮损失的有效手段之一^[13]。

双氰胺(dicyandiamide, DCD)具有价格低廉、挥发性小、易溶于水等特点，是当前农业生产中广泛使用的硝化抑制剂^[14]。已有研究表明，DCD能有效抑制土壤的硝化作用^[15-16]，降低氮的淋溶损失^[17]，延长氮肥有效期，从而提高作物氮肥利用率^[10]。然而，由于土壤环境的差异，同一种硝化抑制剂在不同土壤中的作用效果存在显著差别^[17-19]。例如，在培养试验中，DCD在黑土和潮土中的硝化作用抑制效果要强于在红壤^[15, 17]，主要归因于不同土壤pH和硝化速率的差异。此外，硝化抑制剂的作用效果需要

综合考虑不同土壤-作物系统中氮的各个去向。例如, DCD 在碱性土壤中能够有效提高作物产量和氮肥利用率, 而在酸性土壤的作用效果不明显^[17]。但也有研究表明, 在石灰性土壤上施用 DCD 容易增加氨挥发^[20], 从而导致石灰性土壤上 DCD 的施用效果较差^[21], 甚至产生负效应^[22]。可见, DCD 对不同类型土壤中氮不同去向的影响存在较大差异, 需进一步明确 DCD 在不同类型土壤中对肥料氮去向的综合效应。以往研究主要关注 DCD 对同一类型土壤中氮不同去向的影响^[10, 12-13, 23], 或 DCD 对不同类型土壤中氮单一去向的影响^[9, 10, 15], 但缺乏 DCD 对不同类型土壤中氮不同去向影响的比较研究。本研究以玉米为研究对象, 对我国 3 种典型土壤(红壤、黑土和潮土)进行土柱淋溶试验, 利用肥料¹⁵N 标记方法, 探讨了

DCD 对不同类型土壤上玉米生长和肥料氮去向的影响, 以为 DCD 在玉米氮肥管理中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与淋溶装置

本研究采集我国 3 种典型土壤(红壤、黑土和潮土)耕作层(0—20 cm), 红壤采自湖南祁阳(26°45'N, 111°52'E), 黑土采自黑龙江海伦(47°43'N, 126°79'E), 潮土采自河南封丘(35°00'N, 114°24'E)。3 个采集地点的土壤多年种植玉米, 供试土壤基础理化性质见表 1。土柱淋溶试验装置见图 1, 由有机玻璃柱体、底座、量杯、微型抽水蠕动泵和淋溶液收集瓶组成。柱体和底座分别高 26 和 15 cm, 内径均为 10 cm。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of experimental soils

土壤指标 Soil properties	红壤 Red soil	黑土 Black soil	潮土 Fluvo-aquic soil
砂粒 Sand (%)	10.30	15.90	42.20
粉粒 Silt (%)	30.20	48.20	38.50
黏粒 Clay (%)	59.50	35.90	19.30
pH	5.29	6.00	8.18
有机质 Organic matter (g/kg)	14.07	44.28	20.77
全氮 Total nitrogen (g/kg)	1.13	2.24	1.36
铵态氮 Ammonium-nitrogen (mg/kg)	22.34	15.61	19.46
硝态氮 Nitrate-nitrogen (mg/kg)	7.71	32.64	8.20
有效磷 Available phosphorus (mg/kg)	7.51	20.01	14.72
速效钾 Available potassium (mg/kg)	165.64	182.54	286.23
表观硝化速率 Apparent nitrification rate (%)	13.42	51.08	40.80
反硝化潜势 Denitrification potential (mg/d)	1.141	3.127	13.976

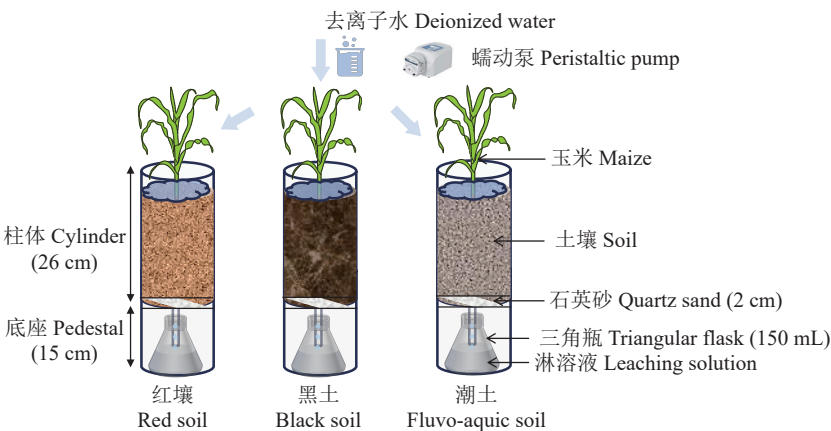


图 1 淋溶装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the leaching apparatus

淋溶液收集器为 150 mL 带刻度的三角瓶。试验用水为去离子水。每个土柱的底部铺设 2 cm 厚的石英砂(粒径 2 mm),并在石英砂层表面用双层无纺纱布隔离土壤层,以保证水分的均匀渗透。微型抽水蠕动泵通过硅胶软管将去离子水缓慢输送到土柱表层,去离子水自然下渗淋溶。

1.2 淋溶试验

淋溶试验在中国科学院南京土壤研究所日光温室(32°03'N, 118°47'E)进行。试验设置 3 个因素:土壤类型为黑土、潮土和红壤;氮肥为不施氮肥(-N)和施氮肥(+N);硝化抑制剂为不施用 DCD(-DCD)和施用 DCD(+DCD)。氮肥使用¹⁵N 标记的尿素,¹⁵N 丰度为 20.12%,由上海化工研究院提供。氮肥施用量为 N 150 mg/kg(相当于田间施 N 量 195 kg/hm²)。每个处理均施入 P₂O₅ 60 mg/kg(过磷酸钙,相当于田间施 P₂O₅ 量 78 kg/hm²)和 K₂O 180 mg/kg(氯化钾,相当于田间施 K₂O 量 234 kg/hm²)。DCD 由上海麦克林生化科技有限公司提供,用量为施氮量的 10%(以 N 计)。每个处理设置 3 个重复,共计 36 个土柱(3 种土×2 种氮肥用量×2 种 DCD 用量×3 个重复)。

称取 2 kg 过 2 mm 筛的风干土壤,加入肥料或 DCD,充分混合均匀,小心倒入土柱。土柱中的土壤在重力作用下自然落实,并将土柱边缘土壤小心压实,以防在淋溶过程中发生管壁效应。因为不同土壤容重存在差异,所以不同类型土壤土柱高度存在轻微差异,高度介于 19.5~21.0 cm。所有土柱填充完成后,立即用蠕动泵通过硅胶软管,以恒定速率 20 mL/min 从土柱上方添加 50 mL 去离子水,以待玉米播种。

玉米品种选取中国玉米种植区常用品种‘裕丰 303’。播种前将玉米种子在 10% 的过氧化氢溶液中浸泡消毒 30 min,用去离子水冲洗 3 次后,置于湿润滤纸上,放入 30℃ 恒温箱内进行催芽。玉米种子发芽后,每个土柱播种 5 粒玉米种子,5 天后间苗,只留 1 株玉米进行淋溶试验。在玉米播种后的第 10、17、22、26、31、36、46 天进行淋溶试验,共计淋溶 7 次。每次淋溶前,先逐次加入 50 mL 去离子水至土柱,每次加水间隔 30 min,观察土柱水分下渗情况,直至将土柱中土壤完全润湿,但不产生淋溶液。随后继续用蠕动泵逐次向土柱中加入 50、30、20 mL 水,收集淋溶液。淋溶试验期间,根据淋溶间隔时间,定量浇水以维持玉米正常生长需求。在第 7 次(46 天)淋溶结束后,不再进行淋溶。每次淋溶前后记录三角瓶(收集淋溶液)的重量,根据称重

法计算淋溶液体积。氮淋溶量为淋溶液氮浓度与体积的乘积,氮累计淋溶量为 7 次氮淋溶量之和。

玉米生长 53 天后,将玉米分为地上部和根部进行收获。用去离子水将玉米地上部和根部洗净,置于 105℃ 烘箱杀青 30 min,70℃ 烘干至恒重。同时,将每个土柱中的土壤混合均匀:一份保存于 4℃ 冰箱,用于土壤铵态氮和硝态氮的测定;另一份自然风干后分别过 2 和 0.149 mm 筛,用于土壤理化性质和¹⁵N 同位素的测定。

1.3 淋溶液、植物和土壤样品分析

根据《土壤农化分析》^[24]描述的方法测定淋溶液、植物、土壤样品营养元素浓度。收集的淋溶液采用双层滤纸过滤,分别采用靛酚蓝比色法和分光光度法测定淋溶液中铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)浓度。采用流动分析仪(San++ System, SAKLAR, 荷兰)测定淋溶液中的全氮浓度。参照二乙酰一肟比色法测定淋溶液中的尿素态氮浓度。

将烘干的植物样品称重后,用粉碎机将其磨碎过 0.149 mm 孔径筛,用于植物全氮和¹⁵N 丰度测定。植株全氮和¹⁵N 丰度采用元素分析-质谱联用仪(IsoPrime 100, Elementar, 德国)测定。

采用新鲜土壤样品测定土壤铵态氮和硝态氮含量。风干过 2 mm 孔径筛的土壤用于测定土壤 pH、有效磷、速效钾。过 0.149 mm 孔径筛的土壤用于测定土壤全氮和有机质含量。采用靛酚蓝比色法测定土壤铵态氮含量;参照国标 GB/T 32737—2016,采用紫外分光光度法测定硝态氮含量。土壤 pH(土水比 1:2.5)采用 pH 计(PB-21, Sartorius, 德国)测定。土壤有效磷采用钼锑抗比色法测定。土壤速效钾采用火焰光度计测定(FP640, 上海傲谱, 中国)。土壤有机质含量采用低温外加热重铬酸钾氧化法测定。土壤全氮和¹⁵N 丰度测定方法与植物样品分析方法一致。土壤质地采用激光粒度分析仪测定(LS13320, Beckman Coulter, 美国)。

土壤表观硝化速率和反硝化潜势分别参照 Gu 等^[25]和 Dai 等^[26]描述的方法测定。准确称取 50 g 风干土壤,置入 100 mL 黑色塑料培养瓶,加入一定量的去离子水湿润土壤,将培养瓶放置室温条件下预培养 1 周,以活化土壤微生物。土壤预培养完成后,向每个培养瓶中分别添加 N 150 mg/kg 的尿素和硝酸钾(KNO₃),将土壤的质量含水量调至 40%。随后,分别使用透气膜和不透气膜封培养瓶口,将其置于 25℃ 的恒温人工生长室中进行黑暗培养。每个处理设置 3 次重复,以确保试验数据的可靠性。在培养

期间, 采用称重法将土壤质量含水量保持在 40%。在培养的第 0 天和第 7 天测定土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量, 计算土壤表观硝化率和反硝化潜势。土壤表观硝化率以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量占土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量之和的百分数表征, 即 $\text{NO}_3^-\text{-N}/(\text{NO}_3^-\text{-N} + \text{NH}_4^+\text{-N}) \times 100\%$ 。土壤反硝化潜势以单位时间内 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的净消耗量表征 (mg/d), 即 $(\text{NO}_3^-\text{-N}_{t_0} - \text{NO}_3^-\text{-N}_{t_7})/t$, t 为培养时间, $\text{NO}_3^-\text{-N}_{t_0}$ 为 0 天时土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的量, $\text{NO}_3^-\text{-N}_{t_7}$ 为培养 7 天时土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的量。

1.4 植物和土壤中 ^{15}N 回收率计算

参照 Zhang 等^[27]和 Wang 等^[28]的公式, 计算了植物和土壤中 ^{15}N 的回收率, 具体公式如下:

玉米地上部 (玉米根部、土壤) 来自肥料的 ^{15}N 丰度 (%) = 玉米地上部 (玉米根部、土壤) 样品的 ^{15}N 丰度 (%) - ^{15}N 自然丰度 (0.376%)

玉米地上部 (玉米根部、土壤) 中的氮来自 ^{15}N 标记肥料的百分比 (Nf , %) = 玉米地上部 (玉米根部、土壤) 样品来自肥料的 ^{15}N 丰度 (%) / 肥料中的 ^{15}N 丰度 (%) $\times 100$

玉米总吸氮量 (mg/column) = 地上部生物量 $\times$ 地上部含氮量 + 根部生物量 $\times$ 根部含氮量

玉米吸收来自肥料的氮 (mg/column) = (地上部吸氮量 $\times \text{Nf}_{\text{地上部}}$ + 根部吸氮量 $\times \text{Nf}_{\text{根部}}$) / 100

氮肥利用率 (%) = 玉米吸收的肥料氮 / 施用的肥料氮 $\times 100$

氮肥残留率 (%) = $\text{Nf}_{\text{土壤}} \times \text{土壤重量} \times \text{土壤全氮含量} / \text{施用的肥料氮} \times 100$

氮肥损失率 (%) = $100 - \text{氮肥残留率} - \text{氮肥利用率}$

氮肥淋失率 (%) = (施氮处理全氮累积淋溶量 - 不施氮处理全氮累积淋溶量) / 施用的肥料氮 $\times 100$

气态氮损失率 (%) = 氮肥损失率 - 氮肥淋失率

1.5 数据处理和统计分析

采用 Microsoft Excel 2019 处理数据, 应用 IBM SPSS 22.0 软件对数据进行正态性检验和方差齐性检验, 再通过独立样本 t -检验, 分析同一土壤类型下, 施用 DCD 和不施用 DCD 处理之间氮素累积淋溶量、玉米氮含量和吸氮量、氮去向的差异显著性 ($P < 0.05$)。采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤氮淋溶特征

3 种土壤氮素淋溶随时间的动态变化趋势基本一致, 铵态氮、硝态氮和全氮的淋溶主要集中在前 3

次, 且均在第 1 次淋溶最高, 随后快速下降至较低水平 (图 2)。由图 2 可知, 全氮的淋溶量峰值潮土 (43.31 mg/kg) 高于红壤 (28.87 mg/kg) 和黑土 (26.08 mg/kg)。潮土和黑土主要以硝态氮淋溶为主, 硝态氮动态淋溶量远高于铵态氮, 而红壤铵态氮和硝态氮淋溶量差异较小, 且均处于较低水平。尿素态氮主要集中在第 1 次 (10 天) 淋溶, 红壤 (13.04 mg/kg) 高于潮土 (8.49 mg/kg) 和黑土 (5.47 mg/kg)。后续淋溶液尿素态氮含量低于检测限, 无尿素态氮淋溶。

除红壤硝态氮淋溶外, 不同类型土壤的全氮、铵态氮、硝态氮前 3 次 (10、17、22 天) 淋溶量均是 +N 处理高于 -N 处理, 第 4 次 (26 天) 之后各种形态氮淋溶量急剧降低且不同处理之间无显著差异 (图 2)。红壤硝态氮淋溶量低且整个淋溶期间不同处理之间差异很小。施用 DCD 增加了红壤的全氮淋溶量峰值, 而降低了潮土和黑土的全氮淋溶量峰值。施用 DCD 增加了潮土和红壤铵态氮的动态淋溶量, 但对黑土无显著影响。施用 DCD 降低了黑土和潮土的硝态氮淋溶量, 但对红壤影响较小。施用 DCD 对 3 种土壤的尿素态氮淋溶无显著影响 (图 3)。

不同类型土壤氮淋溶的主要形态不同。红壤主要以尿素态氮淋溶为主, 占全氮累积淋溶量 (7 次淋溶量的加和) 的 33.69%, 铵态氮和硝态氮淋溶相对较少。黑土和潮土主要以硝态氮淋溶为主, 分别占全氮累积淋溶量的 82.27% 和 57.74%, 而尿素态氮和铵态氮淋溶占比很低。在不施用 DCD 的条件下, 红壤的铵态氮和尿素态氮累积淋溶量高于黑土和潮土, 而硝态氮累积淋溶量则相反 (潮土 > 黑土 > 红壤)。

相对于 -N 处理, +N 处理提高了 3 种类型土壤全氮、铵态氮、硝态氮和尿素态氮的累积淋溶量 (图 3)。施用 DCD 在不同类型土壤中对氮淋溶的作用效果存在较大的变异性。施用 DCD 显著增加了红壤的全氮累积淋溶量, 而降低了潮土的全氮累积淋溶量, 但对黑土无显著影响。施用 DCD 显著降低了 3 种类型土壤的硝态氮累积淋溶量, 潮土的降幅 (5.76 mg/kg) 大于黑土 (3.18 mg/kg)、红壤 (0.74 mg/kg)。同时, 施用 DCD 显著增加了红壤和潮土的铵态氮累积淋溶量, 以潮土增量最多 (2.99 mg/kg), 而对黑土无显著影响。

2.2 玉米生物量和氮吸收

施用 DCD 对玉米生物量和氮吸收的影响因土壤类型而异。施用 DCD 显著增加了潮土上玉米地上部和根部生物量, 但对红壤和黑土上玉米地上部和根

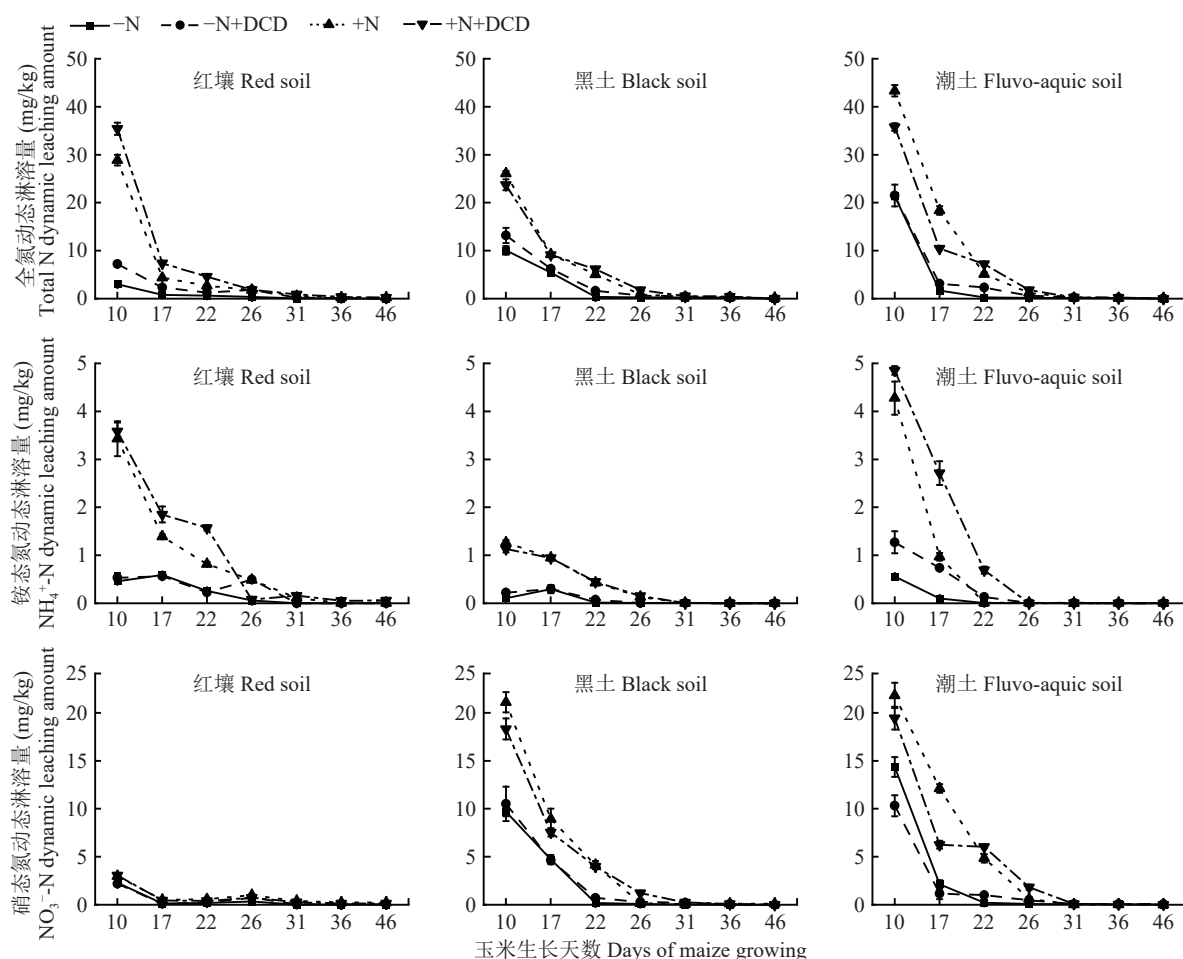


图2 施用 DCD 对不同类型土壤全氮、铵态氮、硝态氮淋溶动态特征的影响
Fig. 2 Effects of DCD on leaching dynamics of total N, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in different soil types

部生物量无显著影响(图4)。从玉米氮吸收看,施用 DCD 显著提高施氮条件下红壤和黑土上玉米地上部氮含量,但对潮土上玉米地上部氮含量无显著影响(图5)。此外,施用 DCD 能够显著增加 3 种土壤上玉米地上部吸氮量以及黑土和潮土上根部吸氮量,而对红壤上玉米根部吸氮量无显著影响。

2.3 肥料氮去向

玉米收获后土壤铵态氮含量以红壤最高,黑土和潮土中剩余的铵态氮较低,施用 DCD 显著增加了红壤铵态氮含量,而对黑土和潮土无显著影响(图6)。3 种土壤剩余的硝态氮含量均处于较低水平($<2.5 \text{ mg/kg}$),施用 DCD 对土壤剩余的硝态氮含量无显著影响。

由图7可知,不同类型土壤在不施用 DCD 的条件下玉米氮肥利用率黑土(38.3%)显著高于红壤(29.4%)和潮土(8.1%)。不同类型土壤肥料氮残留率差异较小,黑土(20.40%)和红壤(20.32%)肥料氮残留率略高于潮土(16.86%)。从氮损失来看,玉米氮肥利用

率越高,氮损失越少。氮肥淋失率潮土(29.66%)高于红壤(22.56%)和黑土(16.97%)。同样,气态氮损失率也是潮土(45.40%)高于红壤(27.73%)和黑土(24.33%)。

施用 DCD 均显著增加了 3 种土壤的玉米氮肥利用率,其中以黑土增幅最多(5.77%),红壤和潮土增幅相当,分别为 3.93% 和 3.90%(图7)。施用 DCD 显著提升了黑土和潮土的肥料氮残留率($P<0.05$),而对红壤无显著影响。从氮损失来看,施用 DCD 显著降低了潮土和黑土的肥料氮淋失率,降幅分别为 11.26% 和 4.12%,但增加了红壤的氮肥淋失率。施用 DCD 能够显著降低红壤和黑土的气态氮损失率,但增加了潮土的气态氮损失率。综合来看,施用 DCD 对氮肥去向的作用效果因土壤类型而异,其中在黑土上施用效果综合最好,既提升了玉米氮肥利用率和氮肥残留率,也降低了氮肥淋失率和气态氮损失率。DCD 减少氮淋溶的效果与 3 种土壤的硝化作用强弱一致,即黑土>潮土>红壤。

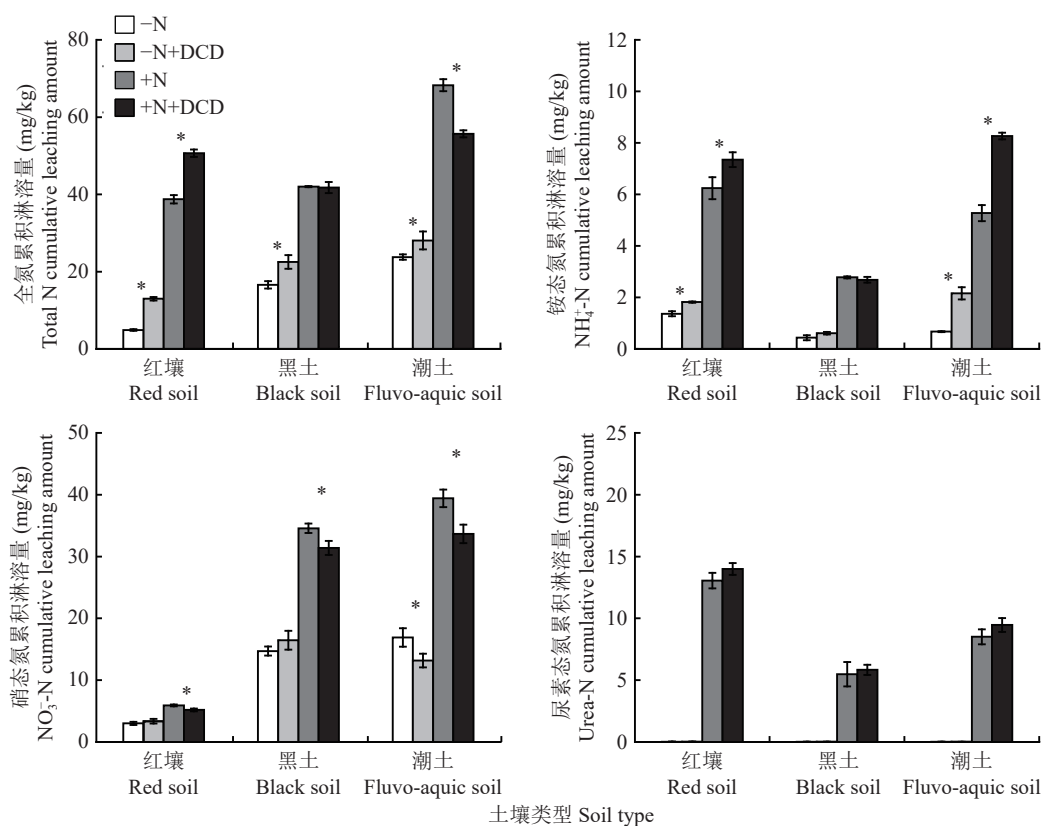


图 3 施用 DCD 对不同类型土壤氮累积淋溶量的影响

Fig. 3 Effects of DCD on cumulative nitrogen leaching in different soil types

注: *表示+DCD 与 -DCD 处理间在 0.05 水平差异显著。
Note: * indicates significant difference between +DCD and -DCD at the 0.05 level.

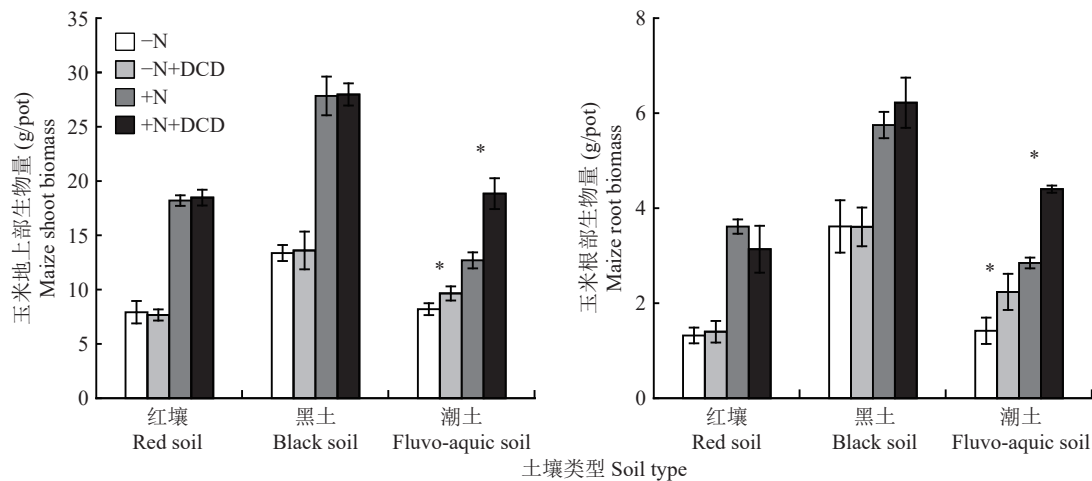


图 4 施用 DCD 对不同类型土壤上玉米生物量的影响

Fig. 4 Effects of DCD on maize biomass in different soil types

注: *表示+DCD 与 -DCD 处理间在 0.05 水平差异显著。
Note: * indicates significant difference between +DCD and -DCD at the 0.05 level.

3 讨论

3.1 不同类型土壤氮素淋溶特征、玉米生长和肥料氮去向的差异比较

本研究中红壤氮素淋溶主要以尿素态氮为主,

铵态氮和硝态氮的淋溶量相对较低;而潮土和黑土则以硝态氮淋溶为主,尿素态氮和铵态氮的淋溶量较低。这表明不同类型土壤氮素淋溶特征存在显著差异,这种差异主要与土壤的尿素水解和硝化能力有关。由于酸性红壤的脲酶活性通常较低^[29],尿素在

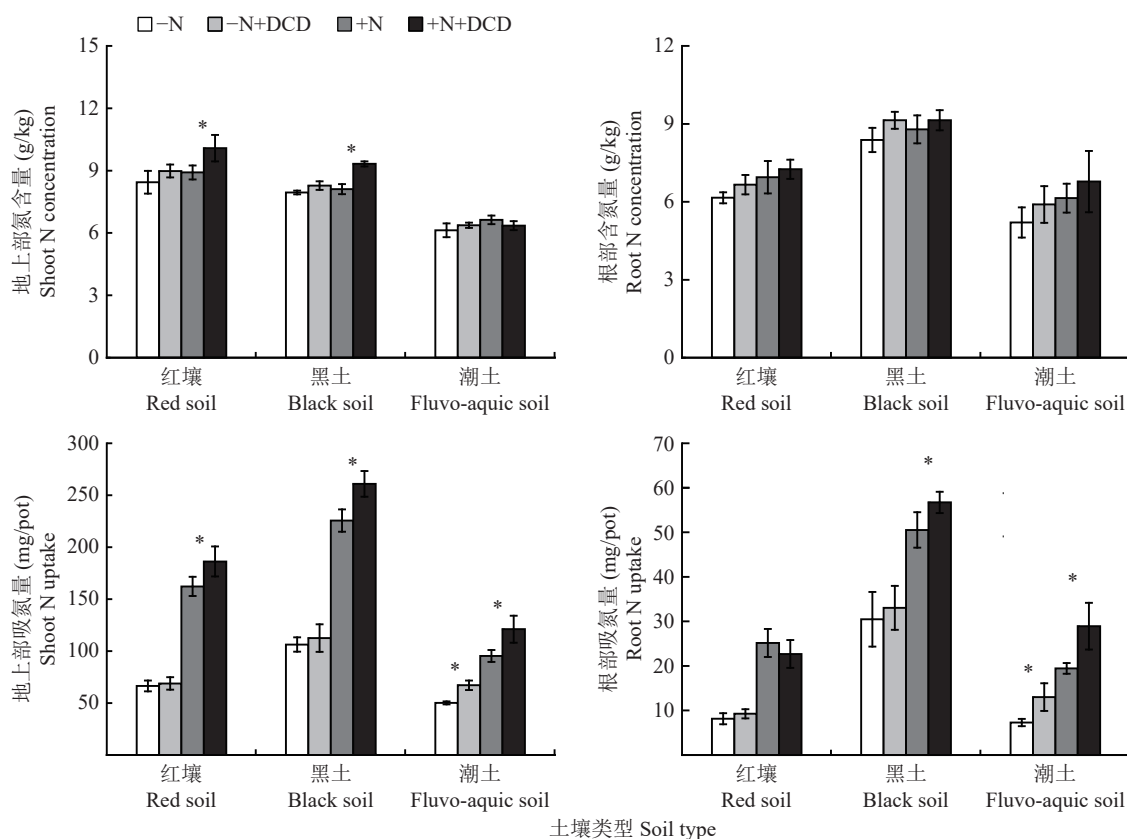


图 5 施用 DCD 对不同土壤类型上玉米氮含量和吸氮量的影响

Fig. 5 Effects of DCD on maize N concentration and N uptake in different soil types

注: *表示+DCD 与 -DCD 处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: * indicates significant difference between +DCD and -DCD at the 0.05 level.

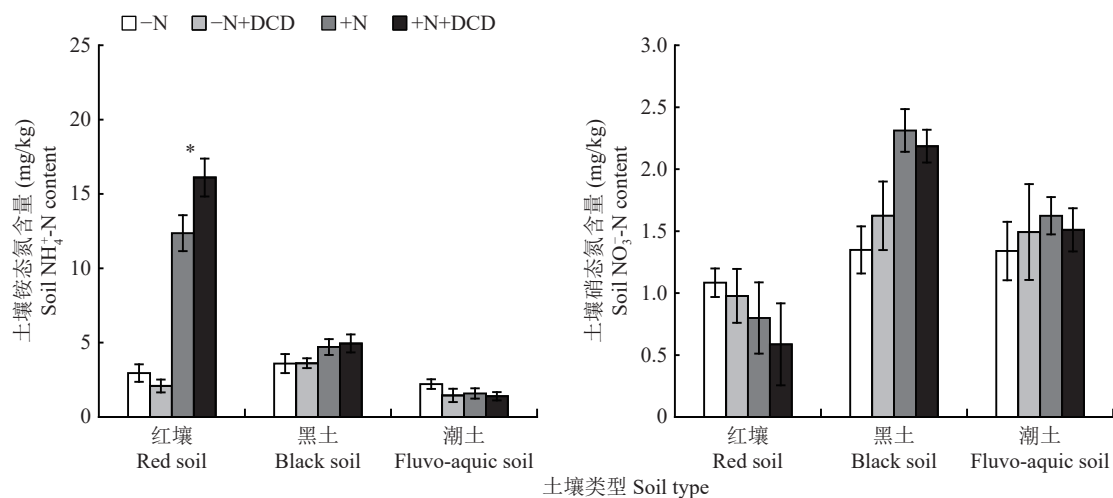


图 6 施用 DCD 对不同土壤类型铵态氮和硝态氮含量的影响

Fig. 6 Effects of DCD on soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ contents in different soil types

注: *表示+DCD 与 -DCD 处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: * indicates significant difference between +DCD and -DCD at the 0.05 level.

红壤中的分解速率较慢, 玉米生长初期未分解的尿素易被雨水冲刷下渗至深层土壤, 导致红壤大量尿素态氮淋失。同时, 低 pH 红壤硝化速率较低(表 1), 使得尿素水解产生的铵态氮难以迅速转化为硝态氮,

土壤中硝态氮累积较少, 而铵态氮在土壤中易被胶体和矿物晶格吸附, 不易随水分淋溶下渗^[8]。因此, 红壤氮素淋溶形态以尿素态氮为主, 铵态氮和硝态氮的淋溶量均处于较低水平。本研究也表明, 玉米

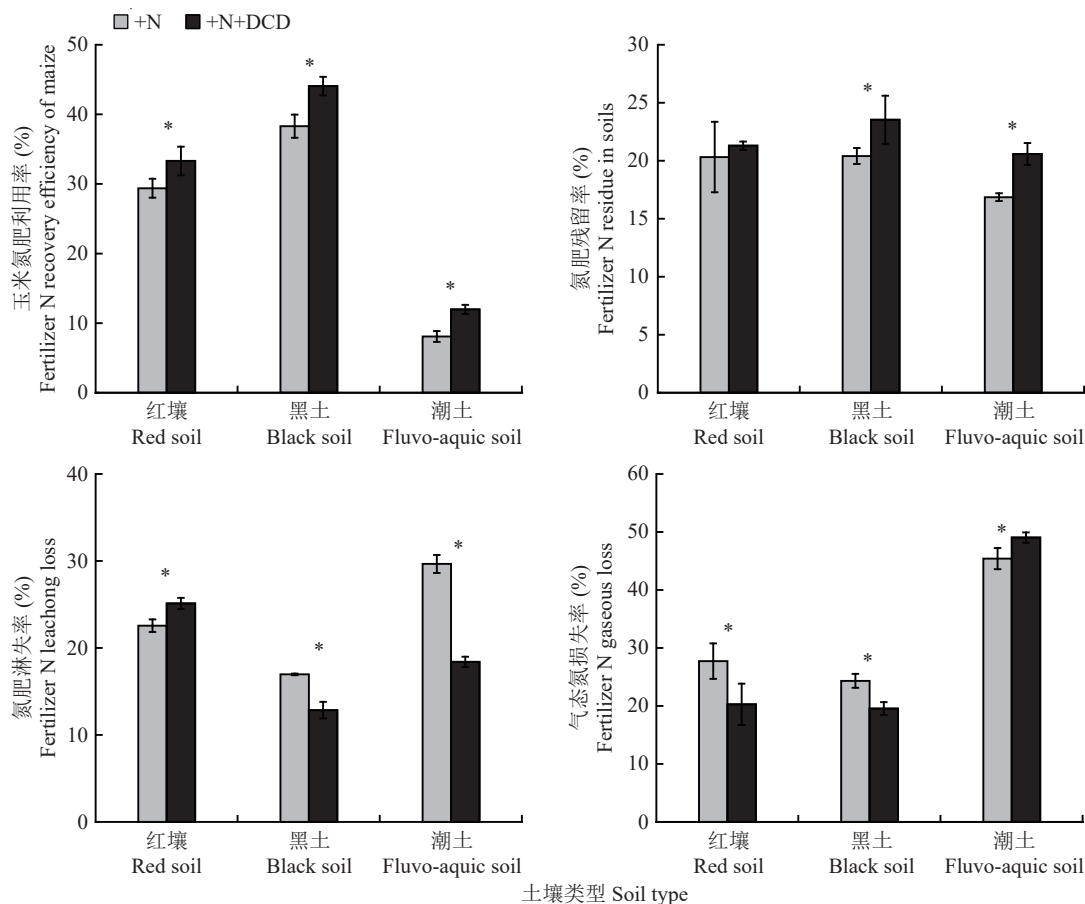


图 7 施用 DCD 对不同类型土壤肥料氮去向的影响

Fig. 7 Effects of DCD on fertilizer N fate in different soil types

注: *表示+DCD 与 -DCD 处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: * indicates significant difference between +DCD and -DCD at the 0.05 level.

收获后, 红壤中的铵态氮含量显著高于黑土和潮土, 表明在酸性红壤中, 由于硝化能力较弱, 大部分氮肥以铵态氮形式存在, 硝酸盐短期内淋失风险较低。Dai 等^[26]通过比较土壤中不同氮形态下的氮素淋溶也发现, 在酸性红壤中施用铵态氮肥 (氯化铵), 铵态氮和硝态氮的淋溶均可保持较低水平, 说明在红壤中施用铵态氮肥能够减少氮淋溶。黑土和潮土的脲酶活性一般相对较高^[29], 且硝化能力较强 (表 1), 尿素水解的铵态氮能够快速转化为移动性较强的硝态氮, 故黑土和潮土淋溶液氮形态主要以硝态氮为主。Zhou 等^[30]发现北方半湿润地区经过长期集约化种植的玉米旱作潮土, 0—4 m 土层土壤硝酸盐累积量高达 $N\ 749\ kg/hm^2$, 硝态氮的淋失风险不容忽视。

本研究中, 黑土上玉米生物量、吸氮量以及氮肥利用率高于红壤和潮土, 而肥料氮淋失率和气态氮损失率低于红壤和潮土。这主要归因于黑土的弱酸性, 既避免了因 pH 过低造成的有毒金属活化

(Al、Mn) 和作物生长受抑, 也满足了适当的土壤硝化速率与玉米铵硝偏好之间的匹配^[31-34], 还避免了 pH 过高造成土壤氨挥发和反硝化损失增加^[35-37], 最终有利于玉米生长和氮吸收。另外, 黑土有机质含量丰富、肥力高, 为玉米快速生长创造了优良土壤条件, 快速的玉米生长反过来可促进玉米吸收更多的养分包括氮, 这是黑土上玉米氮肥利用率高的另外一个原因。

3.2 DCD 对不同类型土壤氮素淋溶特征、玉米生长和肥料氮去向的影响

本研究中, 施用 DCD 能够显著降低 3 种土壤的硝态氮累积淋溶量, 但降低效果以潮土和黑土较为显著, 红壤降低效果较差, 说明 DCD 的作用效果因土壤类型而异。这主要归因于不同土壤硝化能力的差异, 红壤本身硝化作用较弱, 施用 DCD 对土壤硝化作用的抑制空间不大, 所以 DCD 对红壤硝态氮淋溶影响较小。先前的研究也发现, 由于红壤硝化

作用较弱, DCD 在黑土和潮土中的抑制效果要比在红壤更显著^[15, 18-19]。潮土和黑土硝化作用较强, 施用 DCD 能够有效降低硝态氮的累积, 从而降低硝态氮的淋溶。值得注意的是, 施用 DCD 增加了红壤和潮土的铵态氮累积淋溶量。这可能是由于土壤胶体吸附阳离子的能力有限, 当土壤铵态氮含量超过吸附容量时, 铵态氮也存在明显的淋溶损失^[38]。此外, 潮土属于砂质土壤, 土壤吸附能力较差, 氮在砂质土壤更容易淋失^[8, 17], 施用 DCD 对潮土铵态氮淋溶的促进作用要强于红壤。因此, 施用 DCD 导致大量铵态氮在土壤中积累, 可能会增加铵态氮淋溶的风险, 尤其是砂质土壤。本研究中黑土有机质含量较高, 相较于红壤和潮土, 黑土对铵态氮肥具有较强的吸附能力, 施用 DCD 对黑土铵态氮累积淋溶量无显著影响。

本研究表明, DCD 显著提升了潮土上玉米生物量, 而对潮土上玉米地上部氮含量无显著影响, 这可能是由于氮的稀释作用所致。虽然 DCD 对红壤和黑土上玉米生物量没有显著影响, 但是 DCD 显著提升了红壤和黑土上玉米地上部氮含量。综合生物量和氮含量的结果, 施用 DCD 显著提升了 3 种土壤上玉米地上部吸氮量。先前的研究也发现, 与质地较粗的土壤相比, 硝化抑制剂在质地较细的土壤中对作物增产的效果不明显, 但均能显著提升作物吸氮量^[17]。这主要归因于 DCD 在粗质土壤(潮土)中对硝态氮淋溶的抑制效果更强, 而在细质土壤(红壤和黑土)中的抑制效果相对较弱。结合¹⁵N 回收结果, 进一步比较了施用 DCD 对 3 种土壤中肥料氮去向的影响, 发现施用 DCD 均能提升 3 种土壤上玉米氮肥利用率, 这与以前的研究^[10, 12, 14]结果一致。但施用 DCD 对 3 种土壤氮损失的作用存在较大的变异性。施用 DCD 能够有效降低潮土和黑土的肥料氮淋失率, 但增加了红壤中的肥料氮淋失率。黑土和潮土的硝化作用较强, 主要以硝态氮淋溶为主, 施用 DCD 大幅降低了土壤硝态氮的积累, 从而降低黑土和潮土氮肥淋失率, 但红壤硝化作用弱, 硝态氮本身淋溶量低, 施用 DCD 在一定程度上还增加了铵态氮的淋溶, 导致 DCD 对氮素淋失率的作用效果在不同类型土壤上表现不同。施用 DCD 能够有效降低红壤和黑土的气态氮损失率, 却增加了潮土的气态氮损失率。潮土 pH 为 8.18, 施用 DCD 虽然能够有效减少土壤硝态氮的含量, 但也促进了大量铵态氮在土壤中积累, 氨挥发损失风险较高, 且潮土砂粒含量较高(42.20%), 更有利于氨的挥发损失。而红壤和黑

土 pH 分别为 5.29 和 6.00, 氨挥发强度较弱, 施用 DCD 不会明显促进红壤和黑土氨挥发损失, 故而 DCD 降低红壤和黑土气态氮损失的效果优于潮土。由此可见, 施用 DCD 对肥料氮去向的影响因土壤类型而异, 受到土壤 pH、硝化速率、质地、有机质含量等多方面因素的影响。在实际生产过程中, 硝化抑制剂的施用应遵循“因土制宜”的原则, 根据土壤自身性质, 决定施用硝化抑制剂的合理性与科学性。

4 结论

施用 DCD 对玉米生长、氮肥利用率和肥料氮去向的作用效果因土壤类型而异, 主要与土壤性质有关。黑土和潮土硝化作用强, 施用 DCD 降低肥料氮的淋失率及提高肥料氮土壤残留率的效果较好, 而在红壤上效果较差。施用 DCD 显著抑制了红壤和黑土的气态氮损失, 但是却增加了潮土的气态氮损失, 这可能因为潮土 pH 较高, DCD 导致铵态氮在潮土积累, 进而引发更多氨挥发。

参 考 文 献:

- [1] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [2] Liu L, Yao S, Zhang H T, *et al.* Soil nitrate nitrogen buffer capacity and environmentally safe nitrogen rate for winter wheat-summer maize cropping in Northern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 445-453.
- [3] Dong N Q, Lin H X. Higher yield with less nitrogen fertilizer[J]. *Nature Plants*, 2020, 6(9): 1078-1079.
- [4] Lin B L, Sakoda A, Shibasaki R, Suzuki M. A modelling approach to global nitrate leaching caused by anthropogenic fertilisation[J]. *Water Research*, 2001, 35(8): 1961-1968.
- [5] Sebilio M, Mayer B, Nicolardot B, *et al.* Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(45): 18185-18189.
- [6] Liu J T, Peng Y M, Li C S, *et al.* Characterization of the hydrochemistry of water resources of the Weibei Plain, Northern China, as well as an assessment of the risk of high groundwater nitrate levels to human health[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115947.
- [7] Heffer P, Prud'homme M. Fertilizer outlook 2015-2019[C]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2015.
- [8] Vinten A J A, Vivian B J, Wright F, Howard R S. A comparative study of nitrate leaching from soils of differing textures under similar climatic and cropping conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 159(1/4): 197-213.

- [9] 油伦成, 李东坡, 崔磊, 等. 不同硝化抑制剂组合对铵态氮在黑土和褐土中转化的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(12): 2113–2121.
You L C, Li D P, Cui L, *et al.* Effects of different nitrification inhibitor combinations on the transformation of ammonium nitrogen in black soil and cinnamon soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(12): 2113–2121.
- [10] Raza S, Chen Z, Ahmed M, *et al.* Dicyandiamide application improved nitrogen use efficiency and decreased nitrogen losses in wheat-maize crop rotation in Loess Plateau[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2019, 65(4): 450–464.
- [11] 刘玉莲, 陈增明, 张楠, 等. 不同硝化抑制剂对黑土 N_2O 的减排效果[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(6): 991–1001.
Liu Y L, Chen Z M, Zhang N, *et al.* Mitigation of N_2O emissions by different nitrification inhibitors in Mollisols of Northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(6): 991–1001.
- [12] Ren B Z, Huang Z Y, Liu P, *et al.* Urea ammonium nitrate solution combined with urease and nitrification inhibitors jointly mitigate NH_3 and N_2O emissions and improves nitrogen efficiency of summer maize under fertigation[J]. *Field Crops Research*, 2023, 296: 108909.
- [13] 崔磊, 李东坡, 武志杰, 等. 不同硝化抑制剂对红壤氮素硝化作用及玉米产量和氮素利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3953–3960.
Cui L, Li D P, Wu Z J, *et al.* Effects of different nitrification inhibitors on nitrification, maize yield, and nitrogen use efficiency in red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3953–3960.
- [14] Giltrap D L, Singh J, Sagar S, Zama M. A preliminary study to model the effects of a nitrification inhibitor on nitrous oxide emissions from urine-amended pasture[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 136(3/4): 310–317.
- [15] 杨剑波, 李学超, 徐晶晶, 等. 两种硝化抑制剂在不同土壤中的效果比较[J]. *土壤*, 2014, 46(2): 319–324.
Yang J B, Li X C, Xu J J, *et al.* Effects of nitrification inhibitors on nitrogen transformation in different soils[J]. *Soils*, 2014, 46(2): 319–324.
- [16] 张昊青, 赵学强, 张玲玉, 沈仁芳. 石灰和双氰胺对红壤酸化和硝化作用的影响及其机制[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 169–179.
Zhang H Q, Zhao X Q, Zhang L Y, Shen R F. Effects of liming and dicyandiamide (DCD) application on soil pH and nitrification of acidic red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 169–179.
- [17] Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, *et al.* Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 189: 136–144.
- [18] Lu Y F, Zhang X N, Jiang J F, *et al.* Effects of the biological nitrification inhibitor 1, 9-decanediol on nitrification and ammonia oxidizers in three agricultural soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 129: 48–59.
- [19] 刘发波, 郎明, 马笑, 等. 硝化抑制剂类型和剂量对不同类型土壤硝化抑制作用机理的研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (8): 66–75.
Liu F B, Lang M, Ma X, *et al.* Study on the mechanism of nitrification inhibitor type and dosage in different soils[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022, (8): 66–75.
- [20] Wu D, Zhang Y X, Dong G, *et al.* The importance of ammonia volatilization in estimating the efficacy of nitrification inhibitors to reduce N_2O emissions: A global meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 271: 116365.
- [21] 李婷玉. 增效氮肥综合效应及影响因素研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2018.
Li T Y. Evaluation of integrated effectiveness of enhanced efficiency fertilizers and influencing factors[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2018.
- [22] Soares J R, Cantarella H, de Campos Menegale M L. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 52: 82–89.
- [23] 崔磊, 李东坡, 武志杰, 等. 用于黑土的稳定性氯化铵的适宜硝化抑制剂和氮肥增效剂组合[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(12): 2178–2188.
Cui L, Li D P, Wu Z J, *et al.* Suitable combination of nitrogen-inhibitors and nitrogen synergist for production of stable ammonium chloride applied to black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(12): 2178–2188.
- [24] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Lu R K. Soil and agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [25] Gu Y, Wu L H, Hu Z P. Inhibitory effect of soil pH value and moisture on soil nitrification by nitrapyrin application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(8): 132–138.
- [26] Dai X J, Xiao X, Dai W T, *et al.* Comparison of nitrate and ammonium leaching of soils collected from different regions of China: A soil column experiment[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(4): 6059–6070.
- [27] Zhang H Q, Zhao X Q, Chen Y L, *et al.* Improved root growth by liming aluminum-sensitive rice cultivar or cultivating an aluminum-tolerant one does not enhance fertilizer nitrogen recovery efficiency in an acid paddy soil[J]. *Plants*, 2020, 9(6): 765.
- [28] Wang J L, Zhao X Q, Zhang H Q, Shen R F. The preference of maize plants for nitrate improves fertilizer N recovery efficiency in an acid soil partially because of alleviated Al toxicity[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(9): 3019–3033.
- [29] 万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(6): 87–92.
Wan Z M, Wu J G. Study progress on factors affecting soil enzyme activity[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2005, 33(6): 87–92.
- [30] Zhou J, Gu B, Schlesinger W H, Ju X T. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 25088.
- [31] Che J, Zhao X Q, Zhou X, *et al.* High pH-enhanced soil nitrification was associated with ammonia-oxidizing bacteria rather than archaea in acidic soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 85: 21–29.
- [32] Zhao X Q, Shen R F. Aluminum-nitrogen interactions in the soil-plant system[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 361007.

- [33] Zhang H Q, Shen R F, Zhao X Q. Nitrogen source preference in maize at seedling stage is mainly dependent on growth medium pH[J]. *Agronomy*, 2022, 12(9): 2149.
- [34] Zhang H Q, Zhao X Q, Chen Y L, *et al.* Case of a stronger capability of maize seedlings to use ammonium being responsible for the higher ^{15}N recovery efficiency of ammonium compared with nitrate[J]. *Plant and Soil*, 2021, 440: 293–309.
- [35] 李欠欠, 李雨繁, 高强, 等. 传统和优化施氮对春玉米产量、氨挥发及氮平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 571–579.
- Li Q Q, Li Y F, Gao Q, *et al.* Effect of conventional and optimized nitrogen fertilization on spring maize yield, ammonia volatilization and nitrogen balance in soil-maize system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(3): 571–579.
- [36] Fan D J, He W T, Smith W N, *et al.* Global evaluation of inhibitor impacts on ammonia and nitrous oxide emissions from agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(17): 5121–5141.
- [37] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 等. 农田土壤 N_2O 排放的关键过程及影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(10): 1781–1798.
- Cao W C, Song H, Wang Y J, *et al.* Key production processes and influencing factors of nitrous oxide emissions from agricultural soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10): 1781–1798.
- [38] 邢承华, 章永松, 林咸永, 等. 饱和铵贮库施肥法对降低土壤氮素挥发和淋失的作用研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2006, 32(2): 155–161.
- Xing C H, Zhang Y S, Lin X Y, *et al.* Study on decreasing ammonia volatilization and leaching rates by NDSA fertilization method[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2006, 32(2): 155–161.