

文章编号: 1672-3317(2024)04-0015-07

# 黑土机械压实对玉米生长、产量及氮利用效率的影响

刘天宇<sup>1,2</sup>, 周统<sup>1,2</sup>, 杨乐<sup>1,2</sup>, 马守田<sup>1</sup>, 刘战东<sup>1</sup>, 高阳<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南新乡 453002;

2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

**摘要:**【目的】阐明黑土机械压实对玉米生长、产量及氮利用效率的影响。【方法】设置压实程度和施氮量 2 个试验因素, 其中压实程度设置轻度压实 (C1)、中度压实 (C2)、重度压实 (C3) 3 个水平; 施氮量设置施用氮肥 (F) 和不施用氮肥 (F0) 2 个水平; 共计 6 个处理, 每个处理重复 3 次。【结果】压实程度对玉米叶面积指数 (LAI) 和株高均有显著影响, 重度压实处理下的玉米 LAI 和株高显著减小, 施用氮肥显著影响株高, 但对 LAI 的影响不显著。压实程度和施用氮肥对玉米产量均有极显著影响, 重度压实和中度压实相比轻度压实减产 24% 和 10%。压实程度和施用氮肥对土壤硝态氮量有极显著影响。重度压实抑制玉米生长, 减少氮吸收, 进而导致土壤硝态氮量增加。压实程度对玉米地上部吸氮量和总氮素积累量有极显著影响, 施用氮肥条件下, 3 个压实处理下的玉米氮吸收量明显增加, 但氮利用效率均有所下降。【结论】黑土机械重度压实严重抑制了玉米的生长, 减少了作物对土壤氮素的吸收和利用, 进而导致土壤硝态氮残留量增加。

**关键词:** 机械压实; 黑土; 玉米; 产量; 氮利用效率

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023212

刘天宇, 周统, 杨乐, 等. 黑土机械压实对玉米生长、产量及氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 15-21.

LIU Tianyu, ZHOU Tong, YANG Le, et al. The effect of soil compaction on growth, yield and nitrogen use efficiency of maize in black soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 15-21.

## 0 引言

【研究意义】黑土区是我国重要的粮食生产基地, 粮食产量约占全国的 1/4, 粮食出口量约占全国的 1/3, 在保障国家粮食安全中具有至关重要的地位。土壤机械压实已成为导致土壤退化、土壤环境破坏的重要因素之一<sup>[1]</sup>。黑土区的土壤压实严重限制了我国东北地区农田的可持续发展。由于土壤紧实度的增加, 土壤结构遭到破坏, 使根际土壤含水率和养分涵养能力下降; 压实后的土体孔隙减少、连通性下降、渗水速度减慢、下渗深度减小<sup>[2-3]</sup>, 增大地面径流, 进而引起水土流失<sup>[4]</sup>。土壤机械压实会显著降低作物成活率, 影响作物根系生长, 减少地上及地下部生物量, 最终导致作物产量下降。

【研究进展】土壤压实是通过对土层施加压力, 造成土壤中的孔隙率减小, 使得土层中的土粒紧密地排布在一起, 从而引起土层体积质量增大的过程。在全球范围内, 由于世界各地农业的集约化

发展, 土壤压实及其土壤结构破坏效应正在蔓延。自 21 世纪以来, 欧洲、非洲、亚洲、澳大利亚、北美的农业发展由于土壤压实而受到的制约日益加剧<sup>[5]</sup>。耕作区土壤压实现象普遍<sup>[6]</sup>。土壤压实已被公认为对农作物生产和食品安全构成了严重威胁<sup>[7]</sup>, 特别是对于我国东北的黑土区, 由于其体积质量较小, 压实风险更高。

土壤压实会影响土壤物理、化学和生物特征。研究表明, 由农业机械造成的土壤压实会导致表土贯穿阻力增加, 土壤通气性降低<sup>[8]</sup>。压实可以通过改变土壤物理性状来调节土壤养分供应能力。Pupin 等<sup>[9]</sup>研究表明, 压实后, 土壤硝化菌数量明显下降, 而反硝化菌数量和真菌数量明显上升。土壤压实导致浅层土壤有机质量和 pH 值较深层土壤降低幅度更大, 从而导致除反硝化细菌外的土壤微生物数量减少<sup>[10]</sup>。同时, 土壤压实会使土壤中的动物多样性和生物量降低。研究表明, 土壤压实降低了土壤中蚯蚓数量, 也使土壤中节肢动物的种类减少<sup>[11]</sup>。

压实会影响作物地上及地下部生物量。研究表明, 土壤压实会使作物根系长度下降, 当贯穿阻力从 0.92 MPa 上升到 1.06 MPa 时, 棉花根系生物量会下降 50%<sup>[12]</sup>。随着压实程度的增大, 土壤贯穿阻力也随之增大, 根系无法穿透到较深的土层中, 以获取底层土壤水分和养分。Buttrey 等<sup>[13]</sup>研究表明, 由

收稿日期: 2023-05-13 修回日期: 2024-01-09

基金项目: 中国农业科学院创新工程联合攻关重大科研任务 (CAAS-ZDRW202202); 国家“十四五”重点研发项目 (2021YFD1500700); 现代玉米产业技术体系项目 (CARS-02)

作者简介: 刘天宇 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事作物高效用水理论与技术研究方向。E-mail: 18763948216@163.com

通信作者: 高阳 (1978-), 男, 研究员, 主要从事农田生态系统水碳氮循环过程研究方向。E-mail: gaoyang@caas.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

于大豆根系不能通过紧实的土壤获取营养,造成产量下降。在根系生物量受到土壤压实的影响而下降的同时,大豆地上部生物量也会随着压实程度的提高而下降,大豆生长受到抑制,其间接原因是深层土壤中的养分不能被充分利用<sup>[4]</sup>。

【切入点】综上所述,土壤机械压实对土壤物理、化学、生物特性以及作物生长发育均有显著影响,但黑土机械压实对作物生长及水氮利用的影响机制尚不明晰。【拟解决的关键问题】为了明确机械压实对玉米生长和产量的限制作用,本研究通过分析不同压实处理对玉米生长、产量和氮利用效率的影响,为黑土区的农业生产管理提供理论依据和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2022 年 5—9 月在哈尔滨闫家岗农场(北纬 45°34′~45°39′,东经 126°17′~126°21′)进行。试验区属中温带大陆季风性气候区,年平均气温为 5.6℃,年平均降水量为 569.1 mm,年积温 2 851℃,初霜期一般在 10 月上旬,无霜期为 160 d。2022 年夏玉米生育期内逐日气象数据如图 1 所示。农场地处松花江南岸的二级阶地,其土壤为受冲击作用的黄土母质,沉积于第四系沉积物之上,其下层为砂土。试验地的土壤参数如表 1 所示。

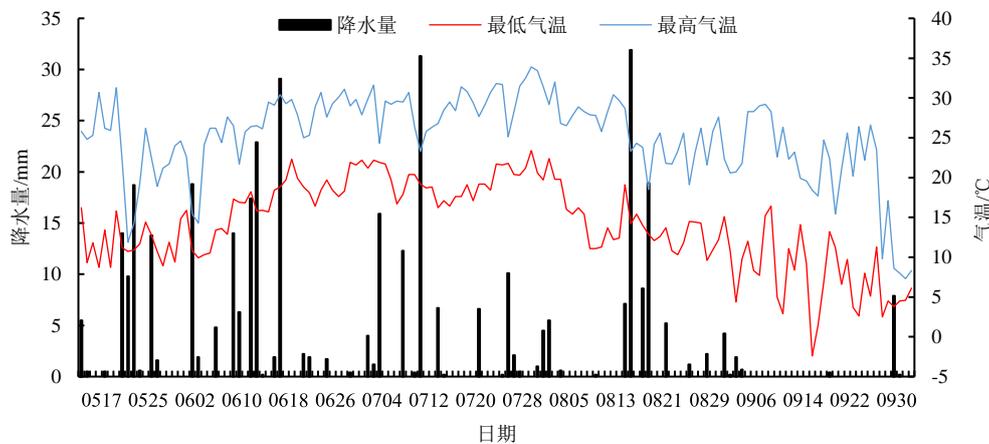


图 1 2022 年夏玉米生育期内逐日气象变化

Fig.1 Daily meteorological change during the growth period of summer maize in 2022

表 1 试验区土壤参数

Tab.1 Soil parameters at the test point

| 压实度 | 土层深度/cm | 体积质量<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 毛管<br>孔隙度/% | 饱和<br>含水率/% | 田间<br>持水率/% |
|-----|---------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 轻度  | 0~20    | 1.59                          | 32.56       | 24.55       | 20.2        |
|     | 20~40   | 1.58                          | 37.05       | 28.26       | 21.42       |
|     | 40~60   | 1.33                          | 43.12       | 39.07       | 25.58       |
|     | 60~80   | 1.34                          | 44.13       | 38.9        | 26.53       |
|     | 80~100  | 1.34                          | 46.56       | 41.13       | 25.11       |
| 中度  | 0~20    | 1.58                          | 31.84       | 25.88       | 20.08       |
|     | 20~40   | 1.5                           | 39.52       | 2.32        | 23.49       |
|     | 40~60   | 1.42                          | 41.5        | 34.87       | 24.02       |
|     | 60~80   | 1.33                          | 44.94       | 39.75       | 26.41       |
|     | 80~100  | 1.36                          | 42.98       | 38.42       | 24.32       |
| 重度  | 0~20    | 1.6                           | 33.27       | 23.21       | 20.32       |
|     | 20~40   | 1.65                          | 34.58       | 24.2        | 19.35       |
|     | 40~60   | 1.23                          | 44.74       | 43.27       | 27.14       |
|     | 60~80   | 1.34                          | 43.31       | 38.05       | 26.65       |
|     | 80~100  | 1.32                          | 50.13       | 43.84       | 25.9        |

### 1.2 试验设计

供试玉米品种为“天农 9”,播种日期为 5 月 7 日,收获日期为 10 月 24 日。试验设置压实程度和施氮量 2 个因素,其中压实程度设置轻度压实(C1)、中度压实(C2)、重度压实(C3) 3 个水平;施氮量设施用氮肥(F)和不施用氮肥(F0) 2 个水平。试

验共计 6 个处理,每个处理重复 3 次。小区面积为 46.8 m<sup>2</sup> (5.2 m×9 m),玉米行距 65 cm,株距 35 cm。C2、C3 水平下的压实分别用 1.9、9.5 t 拖拉机行进式全面积压实,C1 水平主要模拟大部分农户的耕作模式,C2 水平主要模拟当地大规模农场中普遍使用大型机械耕作的农场耕作模式,C3 水平则模拟缺乏耕作管理、过度机械压实的情境。F 水平下的尿素施用量为 340 kg/hm<sup>2</sup>,F、F0 水平下的磷、钾肥施用量均为二铵 130 kg/hm<sup>2</sup>、硫酸钾 180 kg/hm<sup>2</sup>。

### 1.3 观测项目与方法

#### 1.3.1 玉米生长指标

于 7 月 1 日和 7 月 20 日在每个小区取 3 株植株样,测定其叶面积和株高。单叶叶面积(cm<sup>2</sup>)=叶长(cm)×叶宽(cm)×0.75;LAI=(单株叶面积×每个小区的植株数)/小区面积。分别在 7 月 10 日、7 月 20 日、7 月 31 日、8 月 9 日及 9 月 26 日取样,每个小区取 3 株玉米植株,分解为茎、叶、穗 3 个部分,在烘箱内于 105℃条件下杀青 30 min,再于 75℃条件下烘干至恒质量,分别测定茎、叶、穗干质量。

1.3.2 玉米产量

收获时，在每个小区取具有代表性的 2 垄玉米，测定 2 垄玉米的质量、株数、穗数，取代表性 10 穗测得质量、出籽率和含水率，计算每个小区的玉米产量。

1.3.3 土壤和作物氮量测定

1) 土壤氮量

于 9 月 26 日采集土样，每个处理取 3 个点，取样深度为 100 cm，分 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层采集。样品冷藏后，经烘干称质量后，磨碎过 0.5 mm 筛，采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮，用 AA3 流动分析仪 (Seal Analytical Inc.AA3-HR USA) 测定土壤总氮量。

于 10 月 1 日采集土壤样品，每个处理取 3 个点，取样深度为 120 cm，分 0~10、10~20、20~30、30~30、40~60、60~80、80~100、100~120 cm 土层采集。样品冷藏后，用 AA3 流动分析仪 (Seal Analytical Inc.AA3-HR USA) 测定土壤硝态氮量。

2) 作物氮量

于 9 月 26 日取植株样，每个处理取 3 个代表性植株，把植株的茎、叶、穗部分烘干后称质量，分别装袋，测定植株全氮量。将玉米各部分干物质研磨粉碎，过 0.5 mm 筛，用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮，总氮量通过 AA3 流动分析器 (美国 AA3-HR 公司) 测定。通过干质量与各器官中的总氮量相乘来计算各器官氮素吸收量，单株吸收量是各器官吸收量之和，群体氮素积累量则是通过平均单株吸收量乘以各时期的群体密度来计算。

3) 氮利用效率指标

氮素吸收效率 (NUPE, kg/kg) = 植株总氮积累量/施氮量<sup>[15]</sup>。

氮素利用效率 (NUTE, kg/kg) = 产量/植株总氮积累量<sup>[16]</sup>。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2021 进行数据整理和作图，用 SPSS 26 软件进行统计分析，采用最小显著差数法 (LSD 法) 进行多重比较，显著性水平为  $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 黑土机械压实对玉米生长的影响

图 2 和表 2 为机械压实对玉米株高和叶面积指数 (LAI) 的影响。在玉米抽雄期，叶面积和株高会达到最大值，此时期最具代表性。因此，本研究取玉

米抽雄期的取样数据对玉米株高和 LAI 进行分析。压实程度对 LAI 有显著影响，重度压实处理下的 LAI 较其他处理降低了约 15%；压实程度对株高有极显著影响，重度压实处理下的玉米株高减少 17%。氮肥施用显著影响株高，但对 LAI 的影响不显著；压实和氮肥施用的交互作用对株高和 LAI 均无显著影响。不施氮肥和施用氮肥情况下，重度压实均导致株高和 LAI 减小。

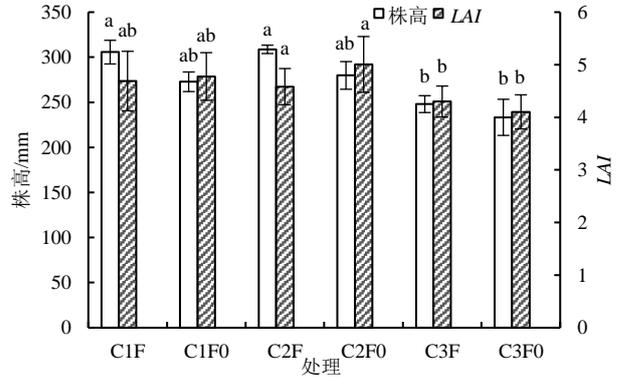


图 2 机械压实对玉米株高和 LAI 的影响

Fig.2 The effect of mechanical compaction on maize plant height and LAI

表 2 不同因素对玉米株高和 LAI 影响的显著性分析

Tab.2 Significant analysis of the effects of different factors on maize plant height and LAI

| 因素     | LAI    | 株高      |
|--------|--------|---------|
| 压实度    | 0.046* | 0.000** |
| 施肥     | 0.618  | 0.001** |
| 压实度×施肥 | 0.483  | 0.473   |

注 \*\*表示  $P<0.01$ ，\*表示  $P<0.05$ ，下同。

图 3 为 7 月 10 日 (a)、7 月 20 日 (b)、8 月 9 日 (c)、9 月 26 日 (d) 不同处理玉米干物质积累量。压实程度对玉米茎部干物质积累量有极显著影响，重度压实处理的玉米茎部干物质积累量较其他 2 个处理减少了 45% 和 36%；压实对玉米叶部干物质积累量无显著影响，而对玉米穗部干物质积累量有极显著影响，尤其是在 8 月，重压处理的玉米穗质量减少约 30%。从整体趋势上看，重度压实处理的玉米地上干物质质量有明显减少，中度压实处理较轻度压实处理植株各器官的生物量无明显差异。从生长前中期结果来看，氮肥施用对玉米干物质积累量的影响不显著；但生育后期结果显示，氮肥施用对玉米茎、穗部干物质积累量有极显著影响。压实和氮肥施用的交互作用对玉米干物质积累量无显著影响。

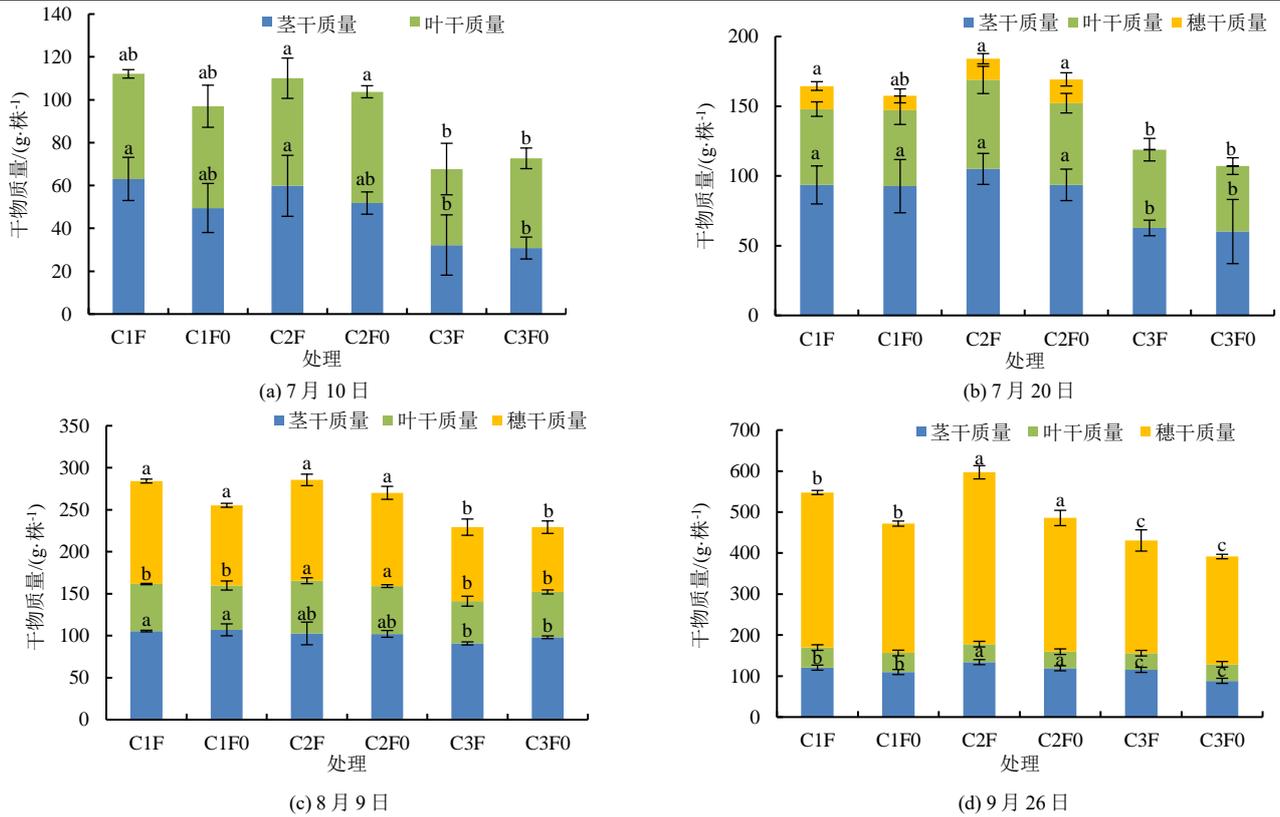


图 3 不同处理下玉米干物质量的变化

Fig.3 Changes in dry matter of maize under different treatments

图 4 为不同处理下的玉米产量。压实程度对玉米产量有极显著影响，重度压实处理的玉米产量较轻度压实处理降低了 24%，中度压实也有大约 10% 的减产。氮肥施用显著影响玉米产量，未施肥处理较施肥处理减产约 13%。压实和氮肥施用的交互作用对玉米产量无显著影响。

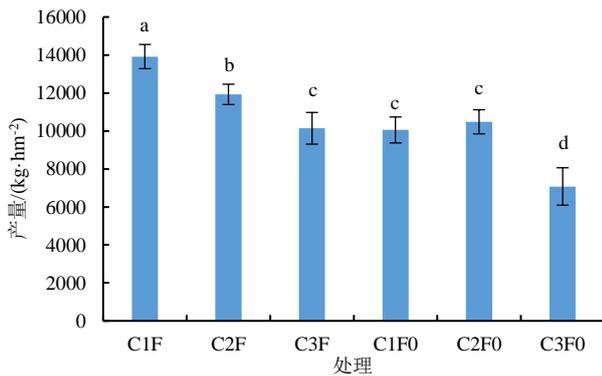


图 4 不同处理对玉米产量的影响

Fig.4 The effect of different treatments on maize yield

## 2.2 机械压实对收获期玉米农田土壤氮量的影响

不同处理下的土壤硝态氮量和总氮量如图 5 和图

表 4 不同因素对土壤硝态氮量影响的显著性分析

Tab.4 Significant analysis of the effects of different factors on soil nitrate nitrogen content

| 因素     | 10 cm  | 20 cm  | 30 cm  | 40 cm  | 60 cm  | 80 cm  | 100 cm | 120 cm |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 压实度    | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* |
| 施肥     | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* |
| 压实度×施肥 | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.000* | 0.001* |

6、表 3—表 5 所示。土壤氮素集中在 0~70 cm 土层。压实程度对土壤硝态氮量具有极显著影响，尤其是在 20~40 cm 土层，不同压实处理间的差异明显。氮肥施用对土壤硝态氮量有极显著影响，施用氮肥明显增加土壤硝态氮量；压实和氮肥施用的交互作用对硝态氮量有极显著影响。压实和施肥均会导致土壤硝态氮量增加，施用氮肥条件下的重度压实处理的土壤硝态氮量最高。在不施氮肥条件下，重度压实处理的土壤硝态氮量高于轻度压实和中度压实处理。压实程度对农田土壤总氮量没有显著影响，只有在 100 cm 土层有显著影响。氮肥施用对土壤全氮量也没有显著影响；压实和氮肥施用的交互作用对硝态氮量无显著影响。

表 3 不同因素对玉米产量影响的显著性分析

Tab.3 Significance analysis of different factors on corn yield

| 因素     | 产量      |
|--------|---------|
| 压实度    | 0.000** |
| 施肥     | 0.000** |
| 压实度×施肥 | 0.635   |

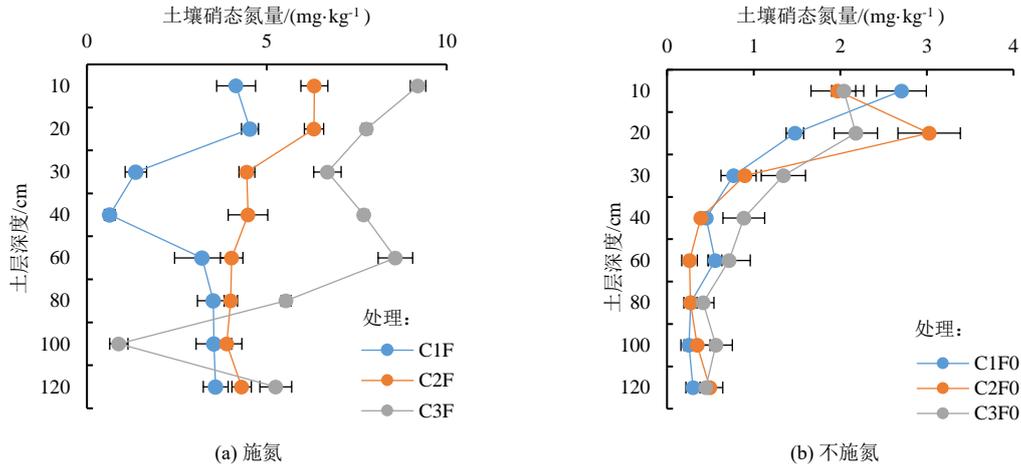


图 5 不同处理下玉米收获期土壤硝态氮量分布

Fig.5 Distribution of soil nitrate nitrogen during maize harvest under different treatments

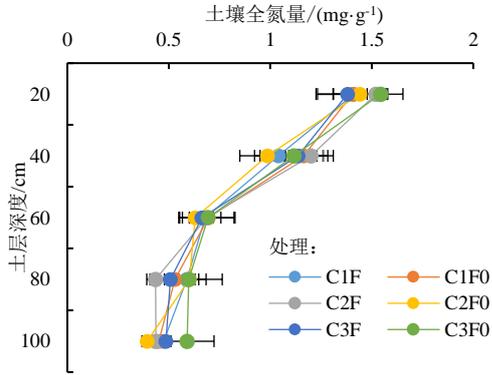


图 6 不同处理下玉米收获期土壤全氮量分布

Fig.6 Distribution of total nitrogen in soil during maize harvest under different treatments

### 2.3 机械压实对玉米氮吸收和利用的影响

由表 6 可知，压实程度对玉米地上部总吸氮量和总氮素积累量有极显著影响，中度压实处理明显高于轻度压实和重度压实处理，分别增加了 28%和 32%。压实程度对玉米氮素吸收效率有显著影响，轻度压实处理较中度压实和重度压实处理增加了 16%

表 6 不同处理对玉米氮素吸收和氮素利用效率的影响

Tab.6 Effects of different treatments on nitrogen absorption and utilization efficiency of maize

| 压实度  | 施肥     | 茎叶吸氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 地上部总吸氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 根部吸氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 植株总氮积累量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | NUTE/(kg·kg <sup>-1</sup> ) | NUPE/(kg·kg <sup>-1</sup> ) |
|------|--------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| C1   | F      | 25.86±6.57b                  | 139.12±4.71b                   | 5.55±1.68                    | 144.68±4.18ab                  | 78.87±2.29ab                | 0.8±0.02                    |
|      | F0     | 18.9±6.76b                   | 81.31±9.18b                    | 2.68±0.41                    | 83.98±9.01b                    | 95.86±10.26a                | -                           |
|      | 平均值    | 22.38±7.08                   | 110.22±9.33                    | 4.12±1.92                    | 114.33±7.83                    | 87.36±11.44                 | -                           |
| C2   | F      | 40.25±6.79a                  | 190.5±9.64a                    | 7.42±3.23                    | 197.92±8.55a                   | 58.1±5.44b                  | 1.1±0.1                     |
|      | F0     | 22.2±6.53a                   | 115.69±8.92a                   | 3.21±0.8                     | 118.9±4.54b                    | 89.28±7.57a                 | -                           |
|      | 平均值    | 31.23±11.54                  | 153.1±7.59                     | 5.31±3.12                    | 158.41±7.45                    | 73.69±9.66                  | -                           |
| C3   | F      | 35.31±6.08ab                 | 145.15±7.81b                   | 5.3±0.89                     | 150.45±8.61ab                  | 68.48±3.91b                 | 0.84±0.05                   |
|      | F0     | 19.02±1.34ab                 | 64.13±2.58b                    | 3.03±1.54                    | 67.16±4.12b                    | 89.21±5.29a                 | -                           |
|      | 平均值    | 27.17±9.75                   | 104.64±8.68                    | 4.16±1.68                    | 108.8±9.02                     | 78.85±12.09                 | -                           |
| 压实度  |        | 0.074*                       | 0.000**                        | 0.41                         | 0.000**                        | 0.064                       | 0.003*                      |
| F 检验 | 施肥     | 0.000**                      | 0.000**                        | 0.002*                       | 0.000**                        | 0.000**                     | -                           |
|      | 压实度×施肥 | 0.267                        | 0.362                          | 0.609                        | 0.352                          | 0.352                       | -                           |

和 10%。氮肥施用对玉米地上部吸氮量、氮素积累量、氮素利用效率均有极显著影响。压实和氮肥施用的交互作用对玉米氮吸收和利用的各项指标均无显著影响。在不施氮条件下，重度压实处理下的玉米氮吸收量和氮积累量受到明显限制。施用氮肥条件下，各处理的氮吸收量都有明显增加，但氮利用效率均有所下降。总体来说，重度压实较大程度上降低了玉米氮吸收效率和氮素利用效率，轻度、中度压实处理的玉米氮吸收量和氮利用效率仍处于较高水平。

表 5 不同因素对土壤全氮量影响的显著性分析

Tab.5 Significant analysis of the effects of different factors on soil total nitrogen

| 因素     | 20 cm | 40 cm | 60 cm | 80 cm | 100 cm |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 压实度    | 0.598 | 0.943 | 0.855 | 0.745 | 0.019* |
| 施肥     | 0.673 | 0.666 | 0.936 | 0.192 | 0.688  |
| 压实度×施肥 | 0.268 | 0.283 | 0.664 | 0.19  | 0.138  |

### 3 讨论

随着农业科技的不断进步，农业机械化水平逐

步提升，机械作业环节增多，农业机械对土壤的压实作用也随之增加。土壤压实会对土壤物理、化学和生物特征以及作物生长发育产生影响<sup>[17]</sup>。本试验

表明, 重度机械压实会显著影响玉米生长发育, 导致玉米株高和 *LAI* 减小。同时, 重度机械压实也会导致玉米各器官生物量明显降低。压实会对植株的生长产生较大的抑制作用, 导致植株发育不良, 重度压实处理较中度压实、轻度压实处理下的生物量减少, 这与周艳丽等<sup>[18]</sup>、杨晓娟等<sup>[19]</sup>研究结果一致。土壤压实之所以会影响作物生长发育, 是因为压实会破坏土壤三相比例。重度压实处理的土壤体积质量高于  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , 土壤孔隙度明显降低, 使得土壤导水率下降, 土壤中碳的矿化作用减缓, 氮的硝化作用减弱, 反硝化作用增强。此外, 土壤压实还会影响土壤热导率和热容; 压实处理的玉米根系生长会被显著抑制, 从而导致作物根长变短, 降低作物对土壤中养分的吸收效率。研究表明, 土壤压实可显著降低玉米产量, 重度压实和轻度压实下的玉米产量分别降低了 50% 和 25%<sup>[20]</sup>。大豆产量在轻型到重型农业机械压实作用下均会显著减少<sup>[21]</sup>。本研究发现, 氮肥施用显著影响株高, 但对 *LAI* 的影响不显著。有研究表明, 施用氮肥能够快速补充土壤矿质养分, 确保土壤对作物生长发育具有充足的养分供应, 从而提升作物根表面积和干物质量, 扩大根系对水分和营养物质的吸收<sup>[22]</sup>。因此, 合理施用氮肥是增产的重要手段。氮素是决定作物产量的关键因素<sup>[23]</sup>, 对作物增产效果最为显著<sup>[24]</sup>。Siczek 等<sup>[25]</sup>研究发现, 随着压实程度的增大, 土壤硝态氮量也随之增加, 而铵态氮量则没有明显变化。随着土壤压实程度的增大, 作物叶片中的氮素量也会随之减小, 土壤氮素量会随着压实程度的增大而增大。研究表明, 高紧实度的土壤不但对作物生长有很大的影响, 还会导致土壤速效氮、磷、钾量下降<sup>[26]</sup>, 使得土壤碳矿化和氮硝化作用受到抑制, 降低养分有效性, 限制作物对养分的吸收。本试验也得到了类似的结论, 压实程度对土壤硝态氮量有极显著影响, 压实和施氮条件均会导致土壤硝态氮量的增加, 施用氮肥条件下重度压实处理的土壤硝态氮量最高。重度压实抑制了玉米生长, 减少了植株氮素吸收, 进而导致土壤硝态氮残留量增加。

## 4 结论

1) 压实程度和氮肥施用对玉米产量均有极显著影响, 重度压实和轻度压实相比轻度压实减产 24% 和 10%。

2) 重度压实抑制玉米生长, 减少氮吸收, 进而导致土壤硝态氮残留量增加。

3) 压实程度对玉米地上部吸氮量和总氮素积累量有极显著影响, 施用氮肥下, 3 个压实水平下的玉

米氮吸收量明显增加, 但氮利用效率均有所下降。

4) 黑土机械重度压实抑制了玉米的生长, 减少了作物对土壤氮素的吸收和利用, 进而导致土壤中硝态氮残留量的增加。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

## 参考文献:

- [1] 任利东, 王丽, 林琳, 等. 农田土壤机械压实研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 610-626.  
REN Lidong, WANG Li, LIN Lin, et al. The progress and prospect of soil compaction by agricultural machinery in arable land: A review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 610-626.
- [2] BERTOLINO A V F A, FERNANDES N F, MIRANDA J P L, et al. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(1/2): 94-104.
- [3] CHEN X W, LIANG A Z, JIA S X, et al. Impact of tillage on physical characteristics in a mollisol of Northeast China[J]. Plant, Soil and Environment, 2014, 60(7): 309-313.
- [4] 陈强, KRAVCHENKO Y S, 陈渊, 等. 少免耕土壤结构与导水能力的季节变化及其水保效果[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 11-21.  
CHEN Qiang, KRAVCHENKO Y S, CHEN Yuan, et al. Seasonal variations of soil structures and hydraulic conductivities and their effects on soil and water conservation under no-tillage and reduced tillage[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 11-21.
- [5] FLOWERS M D, LAL R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 48(1/2): 21-35.
- [6] KELLER T, SANDIN M, COLOMBI T, et al. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194: 104-293.
- [7] HU W, DREWRY J, BEARE M, et al. Compaction induced soil structural degradation affects productivity and environmental outcomes: A review and New Zealand case study[J]. Geoderma, 2021, 395: 115-135.
- [8] ARRIETA C, BUSEY P, DAROUB S H. Goosegrass and bermudagrass competition under compaction[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(1): 11-16.
- [9] PUPIN B, DA SILVA FREDDI O, NAHAS E. Microbial alterations of the soil influenced by induced compaction[J]. Revista Brasileira De Ciéncia Do Solo, 2009, 33(5): 1 207-1 213.
- [10] 岳龙凯. 作物类型和品种对黑土压实响应差异的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.  
YUE Longkai. Study on the response of crop species and varieties to mollisol compaction[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [11] CAMBI M, HOSHIKA Y, MARIOTTI B, et al. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 384: 406-414.
- [12] FALKOSKI FILHO J, BATISTA I, ROSOLEM C A. Sensitivity of cotton cultivars to soil compaction[J]. Semina: Ciências Agrárias, 2013, 34(6): 3 645-3 653.
- [13] BUTTERY B R, TAN C S, DRURY C F, et al. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and nodulation of soybean and common bean[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1998, 78(4): 571-576.
- [14] PLACE G, BOWMAN D, BURTON M, et al. Root penetration through a high bulk density soil layer: Differential response of a crop and weed species[J]. Plant and Soil, 2008, 307(1): 179-190.
- [15] 霍中洋, 葛鑫, 张洪程, 等. 施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(5): 449-454.  
HUO Zhongyang, GE Xin, ZHANG Hongcheng, et al. Effect of different

- nitrogen application types on N-absorption and N-utilization rate of specific use cultivars of wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(5): 449-454.
- [16] 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(4): 699-706.  
LI Wei, LI Xuhua, LI Haiyan, et al. Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 699-706.
- [17] 乔金友, 张丹, 张宏彬, 等. 大中小型拖拉机压实对土壤坚实度和大豆产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 26-33.  
QIAO Jinyou, ZHANG Dan, ZHANG Hongbin, et al. Effects of soil compaction by various tractors on soil penetration resistance and soybean yields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(21): 26-33.
- [18] 周艳丽, 刘娜, 於丽华, 等. 土壤机械压实及其对作物生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(28): 83-88.  
ZHOU Yanli, LIU Na, YU Lihua, et al. Soil mechanical compaction and its effect on crop growth[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(28): 83-88.
- [19] 杨晓娟, 李春俭. 机械压实对土壤质量、作物生长、土壤生物及环境的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(7): 2 008-2 015.  
YANG Xiaojuan, LI Chunjian. Impacts of mechanical compaction on soil properties, growth of crops, soil-borne organisms and environment[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(7): 2 008-2 015.
- [20] GAULTNEY L, KRUTZ G W, STEINHARDT G C, et al. Effects of subsoil compaction on corn yields[J]. *Transactions of the ASAE*, 1982, 25(3): 563-569.
- [21] BOTTA G F, TOLON-BECERRA A, LASTRA-BRAVO X, et al. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(1): 167-174.
- [22] 孙洪昌. 耕作方式与施氮量对小麦-玉米产量和氮素利用的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.  
SUN Hongchang. Effects of tillage modes and nitrogen application rate on wheat-maize yield and nitrogen utilization[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
- [23] 周宝元, 王新兵, 王志敏, 等. 不同耕作方式下缓释肥对夏玉米产量及氮素利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 821-829.  
ZHOU Baoyuan, WANG Xinbing, WANG Zhimin, et al. Effect of slow-release fertilizer and tillage practice on grain yield and nitrogen efficiency of summer maize (*Z. mays* L.)[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 821-829.
- [24] 纪德智. 不同氮肥对春玉米氮磷钾吸收与土壤氮素残留的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.  
JI Dezhi. Effect of different nitrogen fertilizers on NPK uptake of the spring maize and soil residual nitrogen[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014.
- [25] SICZEK A, LIPIEC J. Soybean nodulation and nitrogen fixation in response to soil compaction and surface straw mulching[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 114(1): 50-56.
- [26] AHMAD N, HASSAN F U, BELFORD R K. Effect of soil compaction in the sub-humid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat (*Triticum aestivum*)[J]. *Field Crops Research*, 2009, 110(1): 54-60.

## The effect of soil compaction on growth, yield and nitrogen use efficiency of maize in black soil

LIU Tianyu<sup>1,2</sup>, ZHOU Tong<sup>1,2</sup>, YANG Le<sup>1,2</sup>, MA Shoutian<sup>1</sup>, LIU Zhandong<sup>1</sup>, GAO Yang<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** **【Objective】** Black soil is widely distributed in northeastern China and other countries. Machinery operations in agricultural production in these regions has resulted in soil compaction. In this paper, we investigated the impact of soil compaction on growth, yield, and nitrogen use efficiency of maize in the black soil. **【Method】** The field experiment compared three soil compactions: low compaction (C1), moderate compaction (C2) and high compaction (C3). For each compaction, there were two fertilization treatments: nitrogen fertilization (F) and no fertilization (F0). In each treatment, we measured the growth, yield and nitrogen use efficiency of the maize. **【Result】** Increasing soil compaction significantly reduced leaf area index (*LAI*) and plant height of the maize. Nitrogen fertilization affected plant height significantly but did not impact *LAI* at significant levels. Soil compaction also impacted grain yield significantly, with the high and moderate soil compaction reducing grain yield by 24% and 10%, respectively, compared to the light compaction. Soil compaction and nitrogen fertilization combined to impact nitrate in the soil. Elaborated soil compaction inhibited maize growth, reduced nitrogen absorption, leading to an increase in residual nitrate nitrogen in soil as a result. Soil compaction also influenced nitrogen uptake and its subsequent translocation in the above-ground part of the maize. Nitrogen fertilization increased nitrogen absorption by the crop significantly, but reduced nitrogen use efficiency, especially in the high compaction treatment. **【Conclusion】** Elaborated compaction of the black soil due to machinery operations severely inhibited growth, absorption and use of nitrogen of the maize, thereby leading to an increase in residual nitrate nitrogen in the soil and reducing grain yield as a result.

**Key words:** mechanical compaction; black soil; maize; yield; nitrogen utilization efficiency

责任编辑: 韩洋