

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23711

有机肥替代部分化肥氮对晋西南旱区玉米根系生长及其生理活性的影响

费 聪

(运城学院生命科学系, 山西 运城 044000)

摘 要: 为探究玉米根系分布、生理活性及产量和品质对有机肥替代部分化肥氮的响应, 于 2021—2022 年在山西省西南部旱区, 以登海 605 为试验材料, 设置当地农户施氮量 ($210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N1)、有机肥替代 15% 化学氮肥 (施入化学氮 $178.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N2)、有机肥替代 30% 化学氮肥 (施入化学氮 $147 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N3)、有机肥替代 45% 化学氮肥 (施入化学氮 $115.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N4) 处理, 有机肥施用量根据替代比例计算。通过测定玉米生育期内的土壤水分分布、根系生长特性、根系生理活性及籽粒产量和品质, 探究不同比例的有机肥替代化学氮肥对土壤水分、根系生长和根系生理活性的影响, 及其与收获期籽粒产量的关系。结果表明, 有机肥替代化学氮肥提高了 40 ~ 80 cm 土层中的土壤含水量, 尤其在 N3 处理下, 40 ~ 60 cm 土层中的土壤含水量比其他处理平均高出 11.3% ~ 22.6%; 有机替代增加了 0 ~ 40 cm 土层中的根长和根表面积, 其中, N3 处理下的根干重较其他处理提高了 6.4% ~ 20.6%; 此外, 有机替代还通过提高根系活力和氮代谢酶活性促进水肥吸收利用, 尤其是 0 ~ 40 cm 土层的根表面积、20 ~ 60 cm 的根系活力以及氮代谢酶活性的提高对产量产生了正向效应, N3 处理的籽粒产量、蛋白质和淀粉含量较其他处理分别提高了 4.4% ~ 9.3%、3.3% ~ 12.7% 和 7.4% ~ 22.4%。因此, 在晋西南旱地玉米种植区, 推荐将 30% 的无机氮替换为有机肥, 该有机替代比例不仅可以改善土壤的贮水能力, 还通过提高根系生长和根系的生理活性促进水肥吸收利用, 提高籽粒产量和品质, 这对该地区的玉米可持续性生产具有重要作用。

关键词: 玉米; 有机替代; 根表面积; 籽粒产量

氮是植物体内最重要的营养元素之一, 是植物体内氨基酸、蛋白质及进行光合作用叶绿素的重要组成部分, 可以促进植物的叶面生长, 在很大程度上决定作物产量、品质^[1]。但作物产量与氮肥施用量并非正相关, 过量的氮肥投入不仅不能持续提高作物产量, 还可能会导致作物减产^[2]。中国是化学氮肥的主要消费国, 在过去 30 年中, 中国农民平均施用的无机氮肥超出作物所需氮的 40% ~ 50%^[3], 导致水体富营养化、“温室效应”等一系列环境问题^[4-5]。因此, 探索适当的氮肥管理方案对于确保粮食安全和降低环境成本至关重要。

为促进作物生长和提高氮肥利用效率, 前人提出了许多氮肥管理方案, 如氮肥深施^[6]、单施有

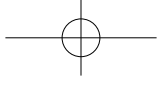
机肥^[7]、有机肥与无机氮联合施用^[8]、施用控释氮肥和脲酶抑制剂等^[9]。相较于其他方式, 有机无机配施省时省力, 还会通过增加土壤有机质、土壤全氮和土壤碱解氮含量改善土壤结构, 提高土壤肥力、促进作物生长, 从而增加产量^[10-15]。这可能与二者施入土壤后对作物根系生长和生理代谢产生了积极的影响有关。根系是作物生长与产量形成的重要器官, 庞大的根系结构和较高的根系活力往往是作物获得高产的前提^[16]。产量形成不仅取决于根系生物量, 还取决于根系在土壤中的空间分布和生理代谢能力^[17]。作物的根系生长除与自身品种特性有关外, 还受土壤、气候以及耕作过程中灌水和施肥等方式的影响。前人研究表明, 玉米生产中合理施用氮肥可以通过提高根干重、根长和根表面积延缓根系衰老, 提高根系对土壤养分和水分的吸收能力, 促进叶片进行光合物质生产、积累和转运, 从而提高籽粒产量^[18-21]。

综上所述, 前人研究多集中于施氮量、分次施氮或其他农艺措施对玉米生长及其调控土壤中肥料

收稿日期: 2023-11-17; 录用日期: 2023-12-15

基金项目: 优秀博士来晋科研专项 (QZX-2023029); 运城学院校级科研项目 (YY-202213); 运城学院博士科研启动项目 (YQ-2023009)。

作者简介: 费聪 (1990-), 博士研究生, 讲师, 主要从事作物高产生理生态研究, E-mail: 17735621796@163.com。



转化的作用,而有机肥部分替代无机氮肥对玉米根系生长及其生理生化特征影响的研究较少。因此,本研究在晋西南的褐土旱地玉米种植区进行了为期两年的大田试验,研究不同比例的有机肥替代化肥氮对玉米根系空间分布特征、生理代谢差异及产量的影响,明确玉米籽粒产量与根系生长及其生理代谢的关系,探究晋西南旱地玉米种植区减氮配施有机肥的合理施肥方式,为旱地玉米稳产增产以及氮肥减施技术提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021—2022年在山西省万荣县解店镇北张户村(110° 86' E, 35° 44' N)进行,该区属于温带大陆性季风气候区,海拔354.5 m,平均气温14.4℃,平均年降水量624.5 mm,平均总日照时数2216 h。土壤类型为褐土,土壤质地为轻壤土,以砂粒和粉粒为主。0~20 cm土层土壤有机质23.51 g·kg⁻¹,全氮1.12 g·kg⁻¹,全磷0.85 g·kg⁻¹,碱解氮113.42 mg·kg⁻¹,有效磷5.52 mg·kg⁻¹,速效钾108.23 mg·kg⁻¹,pH 7.9。

1.2 试验设计

玉米供试品种为登海605,2021和2022年均是5月上旬播种,9月下旬收获。种植行距为55 cm,株距为30.3 cm,种植密度为60000株·hm⁻²。播种方式为人工精量点播,每穴2粒,播深4~5 cm,小区面积50 m²(10 m×5 m)。试验设置4个处理:当地农户的施氮量(210 kg·hm⁻²,N1)、有机肥替代15%化学氮肥(178.5 kg·hm⁻²,N2)、有机肥替代30%化学氮肥(147 kg·hm⁻²,N3)、有机肥替代45%化学氮肥(115.5 kg·hm⁻²,N4),每个处理3次重复,所有小区随机区组排列。总施氮量的40%作为基肥施入,有机肥根据替代比例计算的量随基肥氮全部基施,剩余的氮肥按照1:1的比例分别在拔节期和大喇叭口期追施。试验所用商品有机肥为迎禾颗粒有机肥(石家庄迎禾生物科技有限公司生产,有机质45%、N 3%、P₂O₅ 2%、K₂O 2%)。有机肥替代化肥处理中有机肥用量分别为0、1.1、2.1、3.2 t·hm⁻²。氮肥为尿素(N 46%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 16%),钾肥为硫酸钾(K₂O 50%),所有处理的磷、钾肥用量保持一致,分别为120、90 kg·hm⁻²(有机替代处理磷、钾含量不足部分使用过磷酸钙和硫酸钾补足)。

1.3 测定方法

1.3.1 干物质产量和籽粒产量品质测定

于2021和2022年的玉米收获期,各小区内随机挑选1 m²长势一致的植株,取地上部分于105℃下杀青30 min,85℃烘干至恒重后称重,记为干物质产量。同时,每个小区选取中间5 m²的玉米穗全部收获测定产量,按含水率14%计算实际产量。选择5个大小均匀的果穗剥离籽粒,于45℃烘干,研磨成粉末,采用凯氏定氮法测定籽粒含氮量,使用姜菲等^[8]所报道的公式计算籽粒中蛋白质含量:蛋白质含量(mg·g⁻¹)=籽粒氮含量×6.25。使用Unity 2600XTR近红外分析仪对各处理籽粒的淀粉含量进行测定。

1.3.2 土壤含水量测定

于2021和2022年,在每个小区的玉米种植行间,随机选择3个取样点,于播种后75、100和125 d使用土钻采集土壤测定体积含水率,测定深度为100 cm,采样点的垂向间距为20 cm,即分别为0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 5个土层。土壤样品经烘干后计算体积含水率。

1.3.3 根系干重、长度和表面积测定

在两个玉米生长季的吐丝期,每个小区内挑选3株长势均匀的玉米植株,以植株为中心,在一半行距(30 cm)和一半株距(10 cm)的位置挖掘深度为100 cm土体的根系,每20 cm为一层,共5层。将每一土层装入0.425 mm网袋中进行低水压冲洗,取0~20和20~60 cm(将20~40、40~60 cm土层进行合并)土层中的一部分根系置于密封袋中保存,用于测定根系活力和氮代谢酶活性指标。根系样本经冲洗后,使用扫描仪(Epson Perfection V700 photo, Seiko Epson Corp., Japan)在500万像素下扫描成根系图像,用WinRHIZO(RegentInstrument Inc., Canada)进行分析,获得根长、根表面积,将扫描过的根系烘干后测定根系干重。将各处理5个土层(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)的根长、根表面积、根干重除以总根长、总根表面积和总根干重,以计算各土层的根长、根表面积和根干重占比。

1.3.4 根系活力及氮代谢酶活性测定

准确称取0~20和20~60 cm土层的0.25 g根系放入10 mL离心管中,加0.4%氧化三苯基四

氮唑 (TTC) 溶液和磷酸缓冲液的混合液 5 mL (体积比为 1 : 1), 37℃下暗保存 1 h 后加入 1 mol · L⁻¹ H₂SO₄ 1 mL, 静置 10 min; 取出根用吸水纸吸干根表面的液体, 放入研钵中, 加入 2 mL 乙酸乙酯和石英砂磨碎, 将提取液移入离心管, 12000 r · min⁻¹ 离心后取上清液, 用乙酸乙酯定容至 5 mL。以乙酸乙酯为对照, 在 485 nm 下读取吸光度, 根据标准曲线计算根系活力。

将上述 0 ~ 60 cm 土层的根系合并, 准确称取 0.5 g 与磷酸缓冲液研磨、离心并提取上清液, 使用酶联免疫法 (ELISA) 测定谷氨酰胺合成酶 (GS)、谷氨酸合成酶 (GOGAT)、硝酸还原酶 (NR) 和亚硝酸还原酶 (NiR) 活性。操作过程参照上海生物科技有限公司提供的植物 GS、GOGAT、NR 和 NiR 活性 ELISA 检测试剂盒所附说明书进行。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2019 进行数据整理, SPSS 25.0 进行方差分析和多重比较, Origin 2022 进行作图。

2 结果与分析

2.1 有机肥替代部分化肥氮对不同土层土壤深度含水量的影响

由图 1 可知, 随土层深度增加, 土壤含水量呈先增后降趋势。有机肥替代部分化肥氮提高了 0 ~ 100 cm 土层中的土壤含水量, 其中 0 ~ 20 和 80 ~ 100 cm 土层的土壤含水量波动较小, 但均以 N3 处理最高, 较 N1、N2、N4 处理分别高出 42.5% (两年内两个土层的平均值, 下同)、22.4%、20.8%。此外, 两年的土壤含水量均在 40 ~ 60 cm 土层最高。在播种后 75 d 的 40 ~ 60 cm 土层中, N3 处理较其他替代处理两年平均提高了 19.4% ~ 25.7%; 在播种后 100 d 平均提高了 6.54% ~ 19.7%; 在播种后 125 d 平均提高了 7.4% ~ 22.4%。结果说明, 增加有机肥替代化肥氮的比例可提高土壤蓄水能力, 尤其是提高了 40 ~ 60 cm 土层中的含水量。

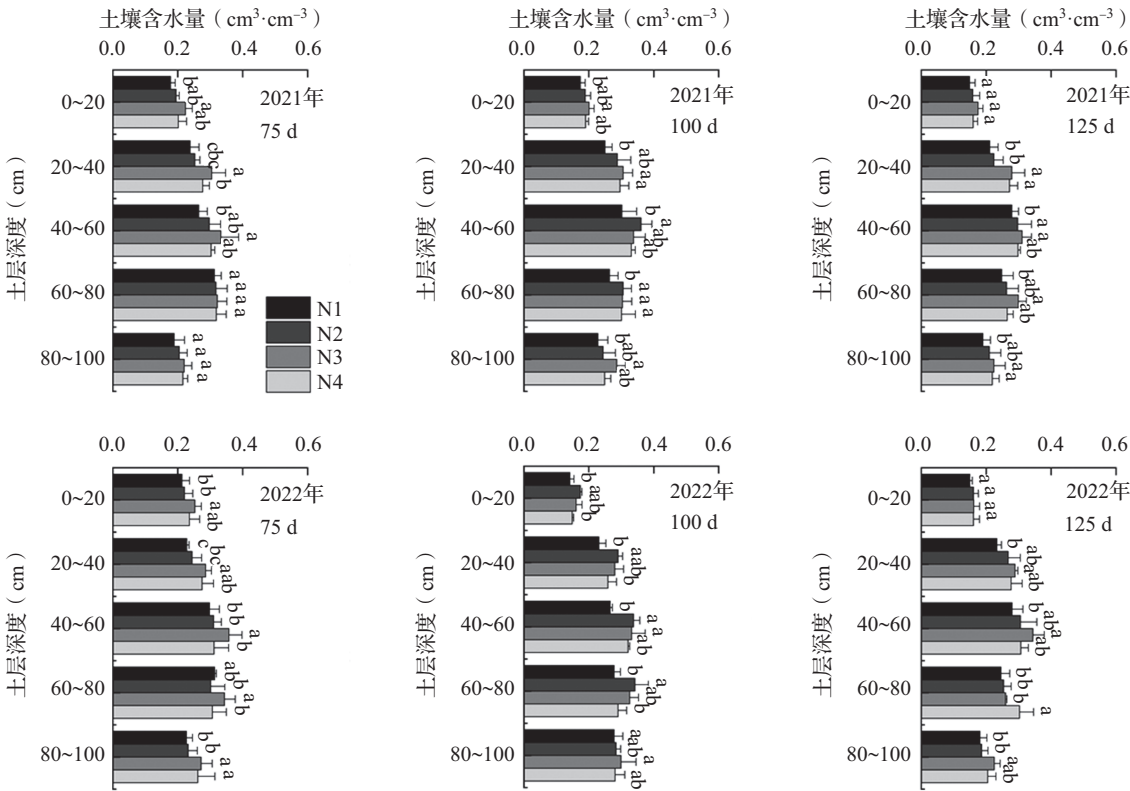


图 1 有机肥替代部分化肥氮对不同土层深度含水量的影响

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.2 有机肥替代部分化肥氮对不同土层根系生长的影响

由图 2 可知, 随土层深度增加, 根干重、根

长和根表面积呈降低趋势, 根系生长主要集中在 0 ~ 40 cm 土层。有机肥替代部分化肥氮提高了不同土层中的根干重、根长和根表面积, 尤其

在 N3 处理下最高。其中, 在 0 ~ 20 cm 土层中, N3 处理的根干重、根长和根表面积较其他替代处理 (N1、N2 和 N4) 两年分别高出 6.4% ~ 20.6%、13.0% ~ 24.2% 和 11.3% ~ 22.1%; 在 20 ~ 40 cm 土层中, N3 处理的根干重、根长和根表面积较其他替代处理两年高出 4.8% ~ 8.9%、16.1% ~

26.9% 和 5.6% ~ 10.4%。随土层深度增加 (40 ~ 100 cm), 替代处理之间的根干重、根长和根表面积差异较小, 但均以 N3 处理较高。以上结果说明, 有机肥替代部分化肥氮通过增加根长和根表面积提高了玉米根系生长, 增加了根干物质积累, 尤其促进了 0 ~ 40 cm 土层中的根系生长。

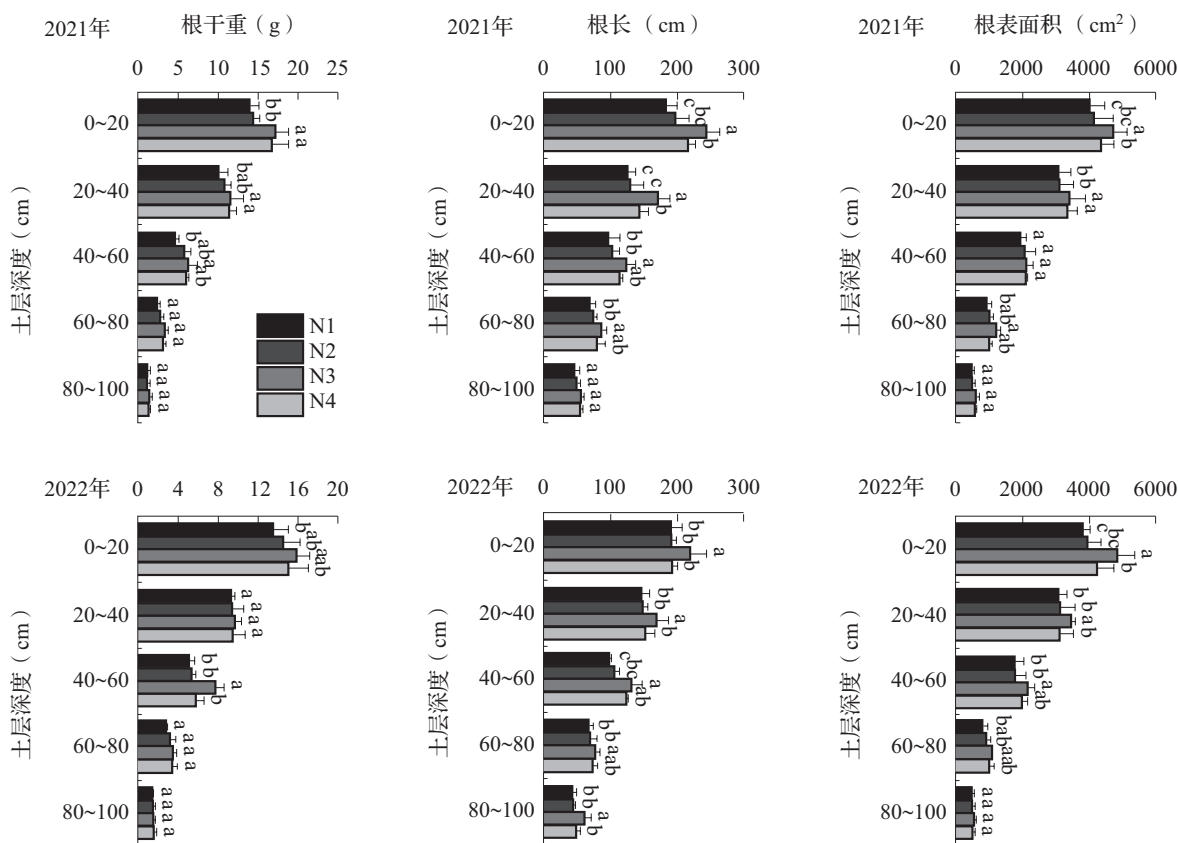


图2 有机肥替代部分化肥氮对不同土层根系生长的影响

2.3 有机肥替代部分化肥氮对不同土层根系指标占比的影响

通过计算不同土层的根干重占比、根长占比和根表面积占比可知, 随土层深度的增加, 根重、根长和根表面积的占比均降低 (图3)。两年内, 根重、根长和根表面积在 0 ~ 20 cm 土层分别占比 41% ~ 43%、33% ~ 36% 和 38% ~ 40%; 在 20 ~ 40 cm 土层分别占比 25% ~ 31%、24% ~ 26% 和 29% ~ 31%; 在 40 ~ 100 cm 土层则分别占 26% ~ 33%、38% ~ 41% 和 29% ~ 33%, 表明根重、根长和根表面积主要分布在 0 ~ 40 cm 土层中, 分别占总根重、根长和根表面积的 66% ~ 74%、57% ~ 62% 和 67% ~ 71%。

2.4 有机肥替代部分化肥氮对根系活力的影响

由图4可知, 根系活力随土层深度的增加而降低, 但有机肥替代部分化肥氮提高了根系活力。随有机肥替代比例的增加, 根系活力呈先增后降的趋势, 在 N3 处理下达到最高。两年内, N3 处理的根系活力较 N1、N2、N4 处理在 0 ~ 20 cm 土层中分别提高 21.7%、11.8%、9.4%; 在 20 ~ 60 cm 土层中分别提高 18.7%、8.7%、3.5%。N2、N3、N4 处理间的根系活力在 0 ~ 60 cm 土层中没有显著差异。这些结果说明, 有机肥替代部分化肥氮改善了上层土壤中 (0 ~ 20 cm) 的根系吸收水肥的活性, 但增加替代比例并不能进一步提高根系活性, 这可能是过高的替代比例导致土壤有效养分供应不足所致。

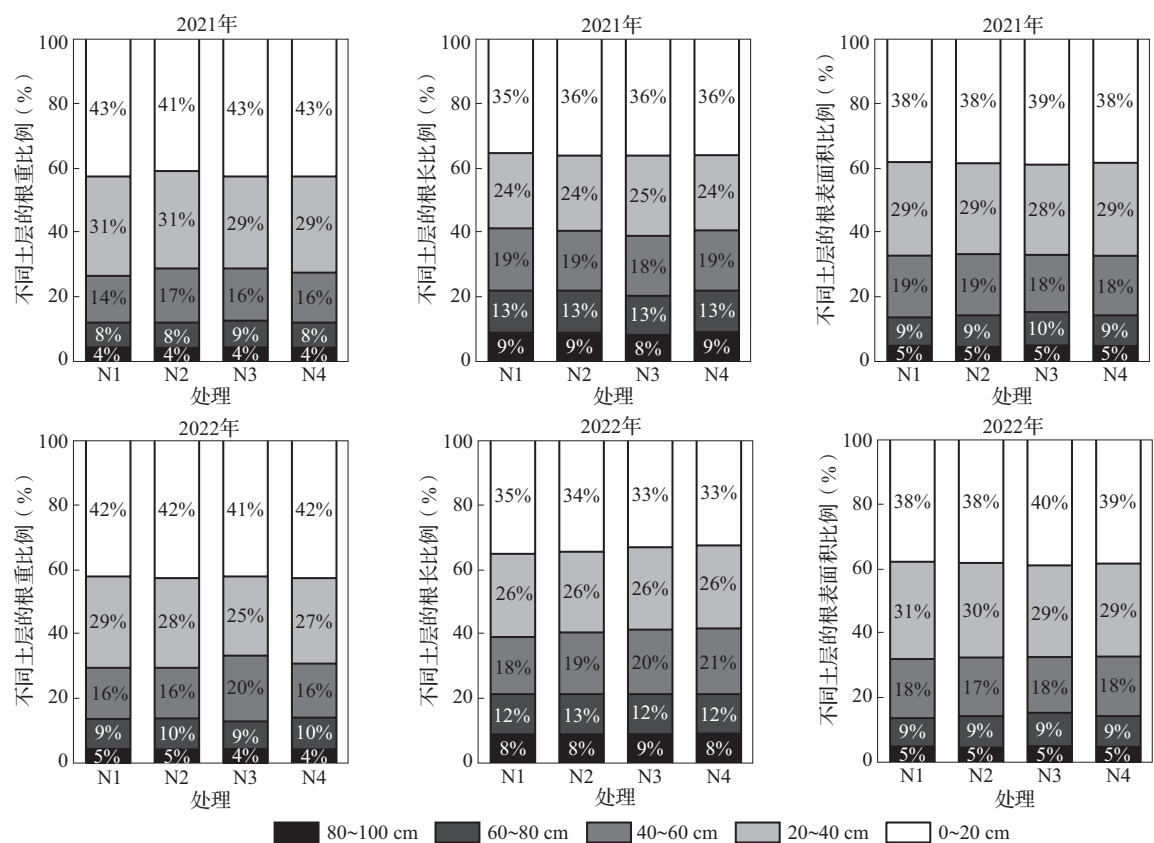


图3 有机肥替代部分化肥氮对不同土层中根重、根长和根表面积占比的影响

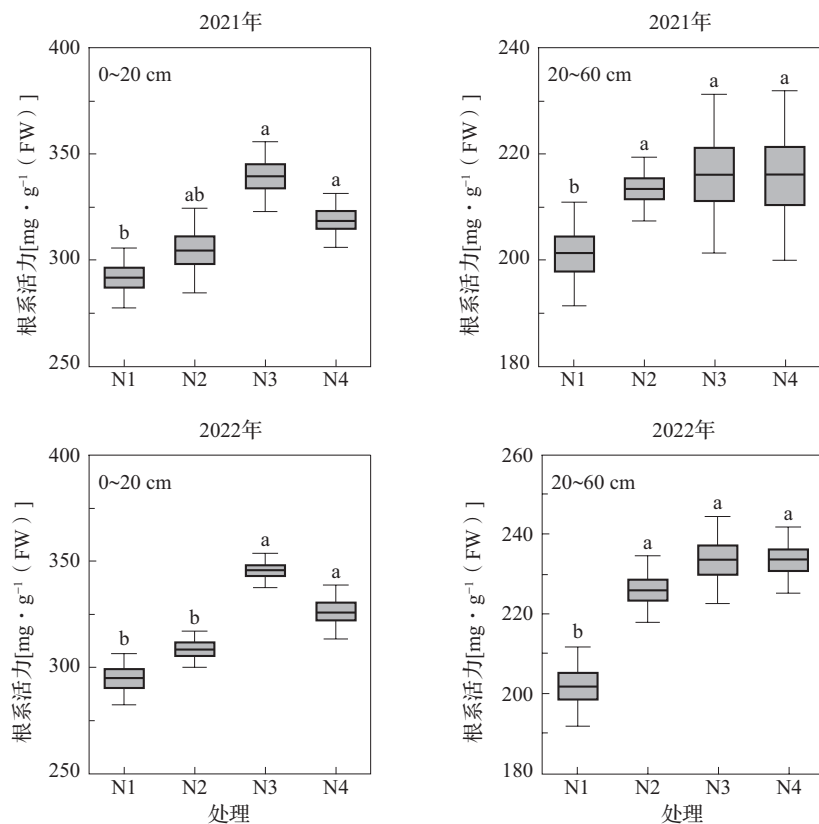


图4 有机肥替代部分化肥氮对0 ~ 20 和 20 ~ 60 cm 土层中的根系活力的影响

2.5 有机肥替代部分化肥氮对根系氮代谢相关酶活性的影响

由图 5 可知, 有机肥替代部分化肥氮提高了 0 ~ 60 cm 土层中根系氮代谢酶活性。随替代比例增加, GS、GOGAT、NR、NiR 活性呈先增后降的趋势, 在 N3 处理下最高, 在 N1 处理下最低。与 N1、N2、N4 处理相比, N3 处理的 GS、

GOGAT、NR、NiR 两年分别提高了 7.5% ~ 35.8%、3.9% ~ 20.8%、9.8% ~ 25.7%。虽然两年内 N3 处理的 GS、GOGAT、NR、NiR 最高, 但均与 N4 处理无显著差异。这些结果说明, 有机肥替代部分化肥氮可以提高玉米根系的氮代谢相关酶活性, 但过高的有机替代不能进一步提高这一过程。

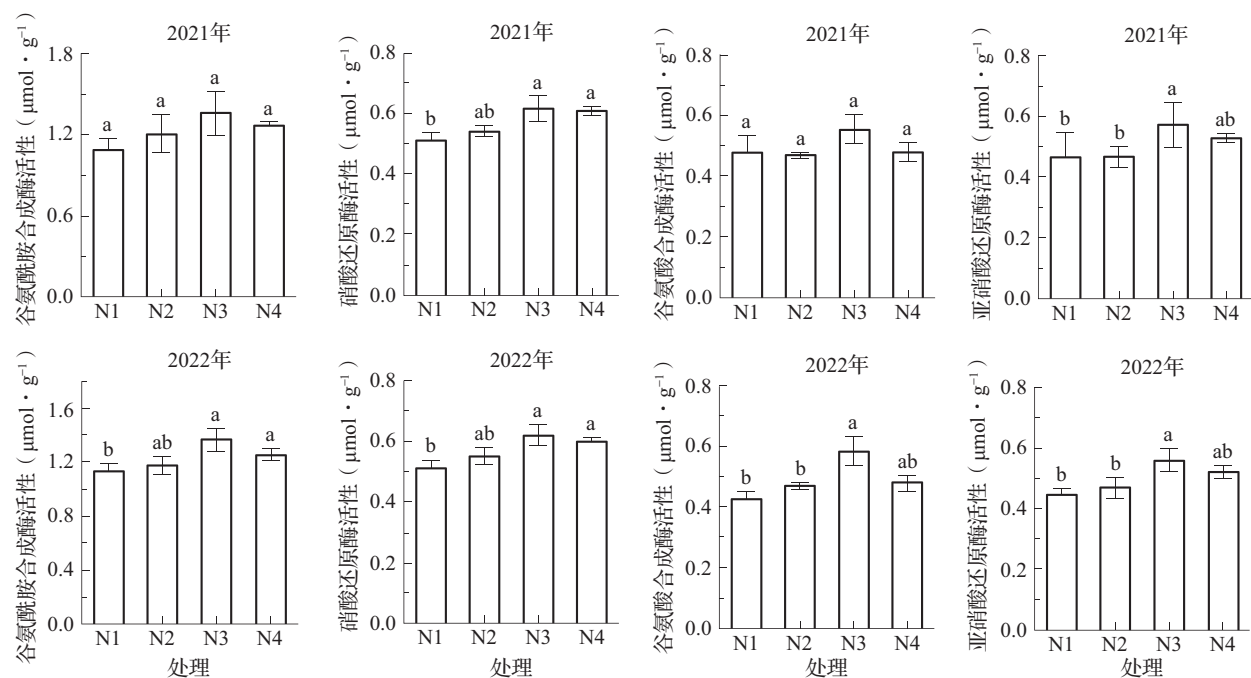


图 5 有机肥替代部分化肥氮对 0 ~ 60 cm 土层中的根系氮代谢相关酶活性的影响

2.6 有机肥替代部分化肥氮对玉米产量和品质的影响

由表 1 可知, 有机肥替代部分化肥氮提高了玉米干物质产量、籽粒产量和籽粒品质。随有机肥替代比例的增加, 干物质产量、籽粒产量、淀粉含量和蛋白质含量均呈先增后降的趋势, 在 N3 处理下最高。与其他替代处理 (N1、N2、N4) 相比, N3 处理的干物质产量、籽粒产量、淀粉含量和蛋白质含量两年分别提高了 7.0% ~ 24.1%、4.4% ~ 9.3%、3.3% ~ 12.7% 和 7.4% ~ 22.4%。这些结果说明, 有机肥替代部分化肥氮可以增加玉米的产量和品质, 但施用更高比例的有机肥并不能显著提高其产量和品质。

2.7 根系生长和生理代谢对玉米产量和品质形成的影响

通过对根系生长指标、根系生理活性指标、产量和品质进行主成分分析, 以探究不同有机肥替代

表 1 有机肥替代部分化肥氮对玉米产量和品质的影响

年份	处理	干物质产量 (kg·hm ⁻²)	籽粒产量 (kg·hm ⁻²)	淀粉含量 (%)	蛋白质含量 (%)
2021	N1	19059b	12435.7b	58.4b	8.7b
	N2	20068b	12674.0ab	60.1b	10.1a
	N3	24990a	13447.9a	67.5a	11.5a
	N4	22595ab	12857.3ab	64.3ab	10.7a
2022	N1	19923b	12591.5c	62.4b	11.9ab
	N2	22556ab	13183.4b	66.5a	12.0a
	N3	23341a	13906.6a	68.5a	13.4a
	N4	23199a	13356.8b	67.4a	12.5a

注: 不同小写字母表示不同氮处理间差异显著 ($P<0.05$)。

部分化学氮肥后对玉米籽粒产量产生影响的相关变量。由主成分分析结果 (图 6) 可知, 两年内, 主成分 1 和主成分 2 分别解释了全部变量变异的 97.9% 和 94.1%, 说明主成分 1 和主成分 2 可以代表

全部变量的绝大部分信息。其中，两年中的根系生长指标、根系生理活性指标均与产量呈正相关。使用偏最小二乘法对影响产量的根系生长指标和生理指标进行重要性排序可知，2021 年，0 ~ 20 cm 土层的根系活力显著影响产量形成，其次是 20 ~ 60 cm 土层的根系活力、GOGAT 活性、0 ~ 40 cm 土层的

的根表面积；2022 年，40 ~ 60 cm 土层的根系表面积显著影响产量形成，其次是 NR 活性、20 ~ 60 cm 土层的根系活力、0 ~ 40 cm 土层的根表面积。以上分析表明，有机肥替代部分化学氮肥通过促进根系生长，提高根系生理活性，增加根系对水分和养分吸收，最终提高产量并改善品质。

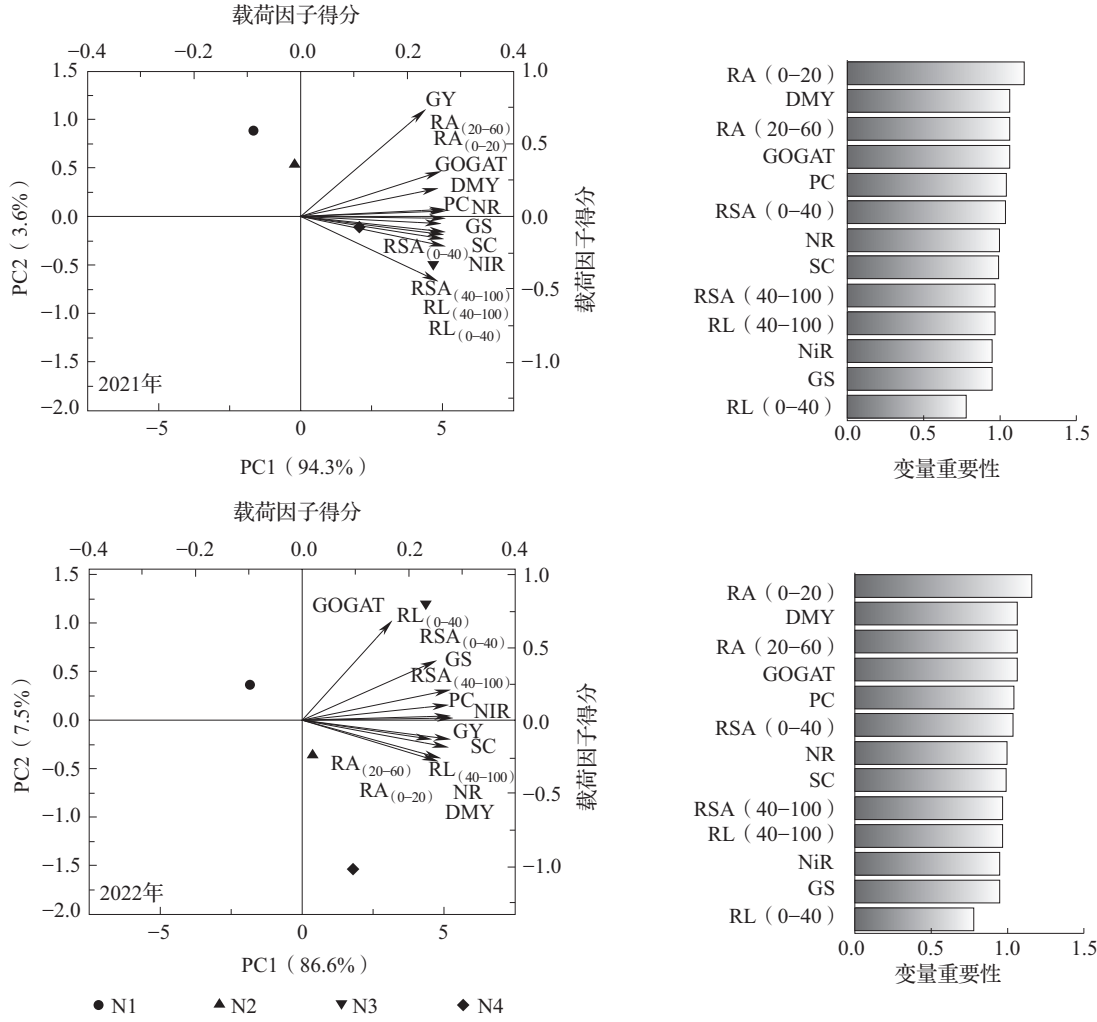


图6 根系生长与生理代谢对玉米产量和品质影响的主成分分析

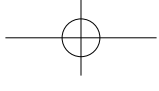
注:RA (0-20) 和 RA (20-60) 分别表示 0~20 和 20~60 cm 土层的根系活力;RL (0-40) 和 RL (40-100) 分别表示 0~40 和 40~100 cm 土层的根长;RSA (0-40) 和 RSA (40-100) 分别表示 0~40 和 40~100 cm 土层的根表面积;GOGAT 表示谷氨酸合成酶;NR 表示硝酸还原酶;GS 表示谷氨酰胺合成酶;NIR 表示亚硝酸还原酶;DMY 表示植株的干物质质量;SC 表示淀粉含量;PC 表示蛋白质含量;GY 表示玉米籽粒产量。

3 讨论

3.1 有机肥替代部分化肥氮对土壤含水量的影响

有机肥对改良土壤肥力，提高土壤有机质含量以及维持土壤微环境具有显著作用。但有机肥是无法快速释放的缓效肥，难以满足作物前期生长所需养分，限制作物生长和产量进一步提高^[22-23]。研

究表明，有机无机合理配施可以弥补单施化肥造成后期肥力不足的缺点，有效改善土壤理化性质、提升土壤贮水能力、改变土壤水分分布，进而影响作物根系生长。如谢丽华等^[24]的研究发现，有机替代 50% 的化学氮能显著提高土壤温度和土壤体积含水量，起到较好的增温保墒作用。在本研究中也具有类似的结果，即增加有机替代化学氮肥的比例提



高了土壤含水量。但在前者的研究中,有机替代主要增加0~25 cm土层中的土壤含水量。本研究发现,有机替代除了提高表层(0~40 cm)土壤的含水量外,还显著提高了40~60 cm土层中的含水量(图1)。一方面,这可能是由于有机肥施入后提高了表层土壤的贮水量,使根系的水分需求由上层土壤贮水供应,而更深层的土壤水作为“贮水库”对上层土壤水分消耗进行补充^[25]。另一方面,施加有机肥后可能通过增加土壤孔隙度,使雨季的有效降水下渗至深层土壤中贮存。因此,施用有机肥增加了深层土壤中的贮水,但当施用过多有机肥后虽然也可以提高土壤孔隙度,但是也会加剧土壤水分蒸发,降低了土壤含水量^[26]。

3.2 有机肥替代部分化肥氮对玉米根系生长及产量的影响

有机替代引起的土壤贮水变化可能引发根系产生“觅食”效应,即根系会向水肥资源更丰富的土层生长。在根系适应性生长过程中,会导致根系活力和生理活性发生改变^[27-28]。前人研究表明,根系活力及其生理活性是衡量作物根系对水分和养分吸收能力的重要指标,根系活力越强,生理活性越高,对玉米生育后期的养分吸收和维持地上部分正常生理功能具有积极的作用^[29-30]。本研究发现,有机替代后玉米根系主要集中在0~40 cm土层中生长(图2),并且使该土层中分布了大约66%的根长和69%的根表面积(图3),这可能是由于有机替代可以形成理化特性较好的上层土壤空间结构,促进根系向水平方向生长,增加了根长和根表面积。另外,上层土壤中富集的养分激发了根系的“觅食”效益,通过提高根长和根表面积以及生理活性加速养分吸收利用。尤其在适量有机肥替代化学氮肥后可以显著增加0~60 cm土层中的根系活力和氮素代谢酶活性(图4,图5),但过高的有机肥替代化学氮并不能进一步促进根系生长和生理活性,这可能是由于过高替代化学氮肥使土壤有效养分供应不足所致^[14-15]。

此外,本研究还发现,有机替代处理的玉米根系在更深土层(40~100 cm)中也有较高占比(分布了34%的根长、31%的根表面积以及更高土壤贮水)。黄慧^[31]的研究指出,玉米根系在深层土壤中的分布对提高产量、增加养分吸收利用有重要作用,尤其增加深层土壤中的根系分布可以延缓植株衰老,提高后期养分吸收。分布在深层土壤中的

根系在吸收土壤水分的同时,也吸收了深层土壤水中溶解的养分,这对玉米植株在后期向籽粒中转移同化物具有重要作用^[8]。从主成分分析以及偏最小二乘法筛选影响产量的根系生长和生理指标(图6)可知,0~20 cm土层中的根系活力和40~60 cm土层的根表面积与籽粒产量形成有显著的正相关,其次是0~40 cm土层的根表面积、20~60 cm的根系活力以及氮代谢酶活性。这些结果进一步表明,有机替代下玉米根系生长和生理活性对资源获取的适应性变化,即增加上部根系活力优先吸收利用上部资源,再通过增加下部根表面积促进植株在生长后期吸收利用深层土壤中的资源,最终平衡植株在有机替代下对整个生育期的养分需求,减少冗余生长,提高植株吸收水肥的能力,进而促使同化物向籽粒转移,提高籽粒产量和品质。

4 结论

有机肥替代部分化学氮肥对土壤贮水能力、根系生长和根系生理活性具有不同的影响。一方面,有机肥替代部分化学氮肥增加了深层土壤(40~80 cm)的含水量,促使根系产生“觅食”效益,通过增加根长和根表面积向更深土层(40~100 cm)生长,吸收利用深层土壤中的水肥资源。另一方面,有机肥替代部分化学氮肥通过平衡养分输出,激发根系的生理响应,使根系对资源获取发生适应性变化。即增加上部根系活力优先吸收利用上层土壤资源,再通过增加下部根表面积促进植株在生长后期吸收利用深层土壤中的资源,平衡植株在有机替代下对养分的需求,减少冗余生长,提高植株吸收水肥的能力,进而促使同化物向籽粒转移,提高籽粒的产量和品质。

参考文献:

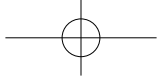
- [1] Zhao M, Tian Y H, Ma Y C, et al. Mitigating gaseous nitrogen emissions intensity from a Chinese rice cropping system through an improved management practice aimed to close the yield gap [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 203: 36-45.
- [2] Liu M, Song F, Yin Z H, et al. Organic fertilizer substitutions maintain maize yield and mitigate ammonia emissions but increase nitrous oxide emissions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30 (18): 53115-53127.
- [3] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural

- systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106 (9): 3041–3046.
- [4] Liu T Q, Huang J F, Chai K B, et al. Effects of N fertilizer sources and tillage practices on NH_3 volatilization, grain yield, and N use efficiency of rice fields in Central China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 385.
- [5] Cheng Y, Elrys A S, Wang J, et al. Application of enhanced-efficiency nitrogen fertilizers reduces mineral nitrogen usage and emissions of both N_2O and NH_3 while sustaining yields in a wheat-rice rotation system [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 324: 107720.
- [6] 姜佰文, 于士源, 杨贺淇, 等. 增密种植条件下苗期深松与氮肥侧深施对玉米根系生长与氮效率的影响 [J]. *东北农业大学学报*, 2023, 54 (6): 1–9, 19.
- [7] 刘建香, 郭云周, 杜东英, 等. 不同有机肥对云南高原红壤生产力的影响 [J]. *中国农学通报*, 2023, 39 (26): 67–75.
- [8] 娄菲, 左择平, 李萌, 等. 有机肥替代部分化肥氮对糯玉米产量、品质及氮素利用的影响 [J]. *作物学报*, 2024, 50 (4): 1053–1064.
- [9] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 控释尿素掺混比例对旱地玉米产量、无机氮含量及氮肥利用率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29 (6): 1025–1047.
- [10] 卢合全, 唐薇, 罗振, 等. 商品有机肥替代部分化肥对连作棉田土壤养分、棉花生长发育及产量的影响 [J]. *作物学报*, 2021, 47 (12): 2511–2521.
- [11] 王艳丽, 吴鹏年, 李培富, 等. 有机肥配施氮肥对滴灌春玉米产量及土壤肥力状况的影响 [J]. *作物学报*, 2019, 45 (8): 1230–1237.
- [12] 何浩, 张宇彤, 危常州, 等. 等养分条件下不同有机肥氮替代率对玉米生长及土壤肥力的影响 [J]. *核农学报*, 2021, 35 (2): 454–461.
- [13] 王兴龙, 莫太相, 邱传志, 等. 减氮配施有机肥对土壤碳库及玉米产量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26 (8): 1342–1348.
- [14] Liu H W, Du X F, Li Y B, et al. Organic substitutions improve soil quality and maize yield through increasing soil microbial diversity [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 347: 131323.
- [15] He H, Peng M W, Ru S B, et al. A suitable organic fertilizer substitution ratio could improve maize yield and soil fertility with low pollution risk [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 988663.
- [16] 彭云峰, 张吴平, 李春俭. 不同氮吸收效率玉米品种的根系构型差异比较: 模拟与应用 [J]. *中国农业科学*, 2009, 42 (3): 843–853.
- [17] 王飞飞, 张善平, 邵立杰, 等. 夏玉米不同土层根系对花后植株生长及产量形成的影响 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (19): 4007–4017.
- [18] 陈日远, 马倩, 杨艳, 等. 花后氮肥调控对春玉米叶片光合性能及产量的影响 [J]. *玉米科学*, 2023, 31 (4): 131–139.
- [19] 张玉芹, 杨恒山, 张瑞富, 等. 浅埋滴灌下水氮运筹对春玉米根系衰减特性及产量的影响 [J]. *作物学报*, 2023, 49 (11): 3074–3089.
- [20] Jing J, Zhang F, Rengel Z, et al. Localized fertilization with P plus N elicits an ammonium-dependent enhancement of maize root growth and nutrient uptake [J]. *Field Crops Research*, 2012, 133: 176–185.
- [21] Chen Q, Li Z L, Qu Z M, et al. Maize yield and root morphological characteristics affected by controlled-release diammonium phosphate and *Paecilomyces variotii* extracts [J]. *Field Crops Research*, 2020, 255: 107862.
- [22] 吴金芝, 肖慧淑, 郭锦花, 等. 秸秆还田和有机肥配合替代 1/3 化肥对旱地玉米产量、蛋白质含量和化肥利用效率影响 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37 (4): 319–326.
- [23] 刘高远, 和爱玲, 杜君, 等. 有机肥替代化肥对砂姜黑土区小麦-玉米轮作系统 N_2O 排放的影响 [J]. *中国农业科学*, 2023, 56 (16): 3156–3167.
- [24] 谢丽华, 李玲玲, 谢军红, 等. 有机肥替代化肥对陇中旱区玉米生长及农田碳排放的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28 (6): 1029–1038.
- [25] 吕梦, 黄明, 侯园泉, 等. 减氮配施有机肥对豫西旱区玉米产量及氮肥利用率的影响 [J]. *玉米科学*, 2023, 31 (4): 158–164.
- [26] 刘志平, 马晓楠, 解文艳, 等. 山西典型旱地玉米产量及水分利用效率对长期不同施肥模式的响应 [J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41 (4): 61–70.
- [27] 宋海星, 李生秀. 玉米生长空间对根系吸收特性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2003 (8): 899–904.
- [28] 管建慧, 刘克礼, 郭新宇. 玉米根系构型的研究进展 [J]. *玉米科学*, 2006 (6): 162–166.
- [29] Lynch J P. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems [J]. *Annals of Botany*, 2013, 112 (2): 347–357.
- [30] Peng Y, Niu J, Peng Z, et al. Shoot growth potential drives N uptake in maize plants and correlates with root growth in the soil [J]. *Field Crops Research*, 2010, 115 (1): 85–93.
- [31] 黄慧. 有机无机肥配施对夏玉米根系分布及产量形成的调控 [J]. *农学学报*, 2023, 13 (9): 13–17.

Effects of organic fertilizer substitution of chemical nitrogen on root growth and physiological activity of maize in arid area of southwest Shanxi province

FEI Cong (Department of Life Sciences, Yuncheng University, Yuncheng Shanxi 044000)

Abstract: To study the response of root distribution, physiological activity, yield and quality of maize to partial nitrogen



replacement by organic fertilizer, the variety ‘Denghai 605’ was used in 2021 and 2022 in the dry area of southwest Shanxi province. Four organic fertilizer substituting chemical fertilizer nitrogen treatments were conducted, including local nitrogen application rate ($210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N1), 15% nitrogen reduction combined with organic fertilizer ($178.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N2), 30% nitrogen reduction combined with organic fertilizer ($147 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N3) and 45% nitrogen reduction combined with organic fertilizer ($115.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N4). The amount of organic fertilizer used was calculated based on the substitution ratio. The soil water distribution, root growth characteristics, root physiological activities, yield and quality were measured during the growth period of maize. The relationship between soil moisture, root growth, root physiological activity and grain yield at harvest was studied under different organic replacement ratios. The results showed that the soil water content in 40–80 cm soil layer was increased by organic substitution, especially in N3 treatment. The soil water content in 40–60 cm soil layer was 11.3%–22.6% higher than that in other treatments. Organic substitution increased root length and root surface area in 0–40 cm soil layer, and root dry weight was increased by 6.4%–20.6%, compared with other treatments. Organic substitution also promoted water and fertilizer absorption and utilization by increasing root activity and nitrogen metabolism enzyme activity. The root surface area of 0–40 cm soil layer, the root activity of 20–60 cm soil layer and the activity of nitrogen metabolism enzymes had positive effects on yield. The grain yield, protein and starch content of N3 treatment were increased by 4.4%–9.3%, 3.3%–12.7% and 7.4%–22.4%, respectively, compared with other treatments. Therefore, it is recommended to replace 30% inorganic nitrogen with organic fertilizer in dryland maize growing areas of southwest Shanxi province. It also could promote water and fertilizer absorption and utilization by improving root growth and root physiological activity, and improve grain yield and quality, which plays an important role in sustainable maize production in this area.

Key words: maize; organic substitution; root surface area; seed yield