

引用格式:

占志立, 刘坤平, 何菲, 林海飞, 傅伟, 杜虎, 尹立初. 施肥方式对喀斯特峰丛洼地玉米根系特征和产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(1): 97–104.

ZHAN Z L, LIU K P, HE F, LIN H F, FU W, DU H, YIN L C. Effects of fertilization methods on root characteristics and yield of maize in karst peak-cluster depressions[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(1): 97–104.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 施肥方式对喀斯特峰丛洼地玉米根系特征和产量的影响

占志立<sup>1,2,3</sup>, 刘坤平<sup>1,3\*</sup>, 何菲<sup>1,3</sup>, 林海飞<sup>1,2,3</sup>, 傅伟<sup>1,3</sup>, 杜虎<sup>1,2,3</sup>, 尹立初<sup>2</sup>

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125; 2. 湖南农业大学资源学院, 湖南 长沙 410128; 3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

**摘要:** 为探明不同比例有机肥替代无机氮肥在等氮量投入条件下对喀斯特峰丛洼地玉米根系特征的影响及根系性状与产量的关系, 在喀斯特峰丛洼地区设置不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、70%NPK+30%秸秆(J1)、70%NPK+30%牛粪(N1)、40%NPK+60%秸秆(J2)和40%NPK+60%牛粪(N2)等6个处理小区, 通过微根管监测不同土层深度(0~14、>14~28、>28~42 cm)的玉米细根根系形态。结果表明: 0~14 cm土层各处理玉米细根根系特征指标间的差异均无统计学意义, 在>14~28 cm和>28~42 cm土层, 除根直径外, J1处理的细根根系特征指标均最高, 均显著高于CK处理的; 在>14~28 cm土层, J1处理细根总根长为409.32 cm, 显著高于N1和N2处理的, J1处理的细根根表面积、细根存量分别为54.13 cm<sup>2</sup>、1.25 cm/cm<sup>3</sup>, 显著高于N1处理的; 在>28~42 cm土层, J1处理细根根表面积、根体积分别为66.05 cm<sup>2</sup>和0.88 cm<sup>3</sup>, 显著高于N1处理的; 仅CK处理的最底层细根根系总根长、根表面积、根尖数、细根存量显著小于上两层的, 其他各处理土层间细根根系特征指标差异均无统计学意义; 施肥处理的各产量指标间的差异均无统计学意义, 但单位面积地上部总干质量和单位面积生物量均显著高于CK处理的; 产量指标与细根根系特征指标的相关性随土层加深而增强, 株高和单位面积地上部总干质量与0~14 cm土层的细根根直径呈显著负相关, 单位面积地上部总干质量与>14~28 cm土层的细根总根长、根表面积、细根存量和根表面积密度呈显著正相关, 单位面积地上部总干质量与>28~42 cm土层的细根根直径呈极显著负相关, 与>28~42 cm土层的其他细根根系特征指标呈显著或极显著正相关。综上, 70%NPK+30%秸秆(J1)的施肥处理能显著促进玉米根系生长, 表明在喀斯特峰丛洼地区适当以秸秆替代部分化肥氮有利于深层根系培育。

**关键词:** 玉米; 牛粪; 秸秆; 细根; 根系特征; 微根管; 喀斯特峰丛洼地

中图分类号: S513.062

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2026)01-0097-08

## Effects of fertilization methods on root characteristics and yield of maize in karst peak-cluster depressions

ZHAN Zhili<sup>1,2,3</sup>, LIU Kunping<sup>1,3\*</sup>, HE Fei<sup>1,3</sup>, LIN Haifei<sup>1,2,3</sup>, FU Wei<sup>1,3</sup>, DU Hu<sup>1,2,3</sup>, YIN Lichu<sup>2</sup>

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 2. College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

**Abstract:** The effects of organic nitrogen in place of chemical nitrogen on maize root characteristics in the karst peak-cluster depression and the relationship between their root traits and yield under the same nitrogen input level were

收稿日期: 2025-02-19

修回日期: 2025-05-12

基金项目: 广西自然科学基金项目(2023GXNSFAA026109); 国家自然科学基金项目(42277245)

作者简介: 占志立(1999—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事喀斯特生态系统管理研究, 2549986585@qq.com; \*通信作者, 刘坤平, 学士, 工程师, 主要从事生态系统管理研究, lkp18125@163.com

investigated. A field experiment included six treatments, no fertilizer(CK), chemical fertilizer only(NPK), 70% NPK+30% straw(J1), 70% NPK+30% cattle manure(N1), 40% NPK+60% straw(J2), and 40% NPK+60% cattle manure(N2) were performed. The maize fine root morphology at different soil depths(0-14, >14-28, >28-42 cm) were analyzed by means of minirhizotrons. The results showed that no statistically significant differences in maize fine root characteristic indicators were observed among treatments in the 0-14 cm soil layer. In the >14-28 cm and >28-42 cm soil layers, all fine root characteristic indicators of the J1 treatment, except fine root diameter(RD), were the highest and significantly greater than those of CK. In the >14-28 cm soil layer, the fine root total root length(RL) of J1 was 409.32 cm, significantly higher than those of N1 and N2, and the fine root surface area(RSA) and fine root biomass(FRB) of J1 were 54.13 cm<sup>2</sup> and 1.25 cm/cm<sup>3</sup>, respectively, both significantly higher than those of N1. In the >28-42 cm soil layer, the RSA and fine root volume(RV) of J1 were 66.05 cm<sup>2</sup> and 0.88 cm<sup>3</sup>, respectively, significantly higher than those of N1. Only the CK treatment exhibited significantly lower RL, RSA, number of fine root tips(Ntips), and FRB in the deepest soil layer compared with the upper two layers, while no statistically significant differences in fine root characteristic indicators among soil layers were detected for the other treatments. No statistically significant differences in yield indicators were found among the fertilization treatments; however, aboveground dry weight per unit area(ADW) and production output per unit area(PO) were significantly higher than those of CK. The correlation between yield indicators and fine root characteristic indicators strengthened with increasing soil depth. Plant height(PH) and ADW were significantly negatively correlated with RD in the 0-14 cm soil layer. ADW was significantly positively correlated with RL, RSA, FRB, and RSA density in the >14-28 cm soil layer. In the >28-42 cm soil layer, ADW was highly significantly negatively correlated with RD, and significantly or highly significantly positively correlated with the other fine root characteristic indicators. In conclusion, the fertilization treatment J1 with 70% NPK and 30% straw significantly promoted maize root growth. This indicates that partially substituting chemical nitrogen fertilizers with straw in karst peak cluster depression areas is conducive to fostering deep root systems.

**Keywords:** maize; cow dung; straw; fine roots; root characteristics; minirhizotron; karst peak-cluster depression

根系是作物吸收营养的主要器官之一,其生长动态是反映作物生长发育状况和产量形成的一个重要标志,对作物的产量影响巨大<sup>[1]</sup>。细根是对土壤养分吸收最敏感、最活跃的根系部分<sup>[2]</sup>。细根通常指直径小于2 mm的根<sup>[3]</sup>,无木质部、直径小、寿命短、周期短、吸收表面积大且生理活性强<sup>[4]</sup>。细根生物量在根系整体生物量中占比不高,但贡献了33%~60%的净初级生产力<sup>[5]</sup>,其在地下生态系统中所起的作用是不可忽视的。开展作物根系动态研究对探明其对作物生长发育的影响有重要意义。至今,已有多种监测作物根系生长的方法,如土钻法、土柱法、剖面法、根室法、容器法、微根管法等<sup>[6]</sup>,其中容器法和微根管法为非破坏性的观测方法<sup>[7]</sup>。微根管法具有定点、原位和连续观测的优势,可实现根系生长动态的实时、重复、无损监测<sup>[8]</sup>,配合高精度的内窥摄像头,可清晰捕捉根系生长过程;结合高精度根系参数测定与图像处理技术,可较好地获取根系的参数信息,是长期原位监测根系生长动态变化的先进方法<sup>[9]</sup>。

玉米是我国第一大作物,在保障国家粮食安全方面具有重要地位<sup>[10]</sup>。近年来,我国玉米种植面积

占比(达28.4%)不断增加,其产量占我国粮食总产量的29.5%,已成为主要的粮食资源<sup>[11]</sup>。广西是南方玉米大省之一,玉米种植区域分布很广,但大部分区域为石漠化地区,灌溉能力弱<sup>[12]</sup>,春、秋季易遭受旱灾,属于典型的西南“镰刀弯”地区;该区域生态环境脆弱,抵御自然灾害能力差,玉米产量低而不稳<sup>[13]</sup>。在广西峰丛洼地农业生产中,肥料施用量较少且品种单一,以氮肥为主,有机肥施用较少,化肥与有机肥配施比例较低<sup>[14]</sup>。施肥可以显著提高新垦石灰土的土壤肥力,增加土壤中的氮、磷、钾等养分含量以及有机碳含量<sup>[15]</sup>,改善土壤结构、土壤微生态环境,显著提升玉米产量<sup>[16-20]</sup>。有研究<sup>[21]</sup>发现,不同的施肥处理对根系生长和玉米产量均有一定的促进作用,但不同施肥处理对根系特征有何种影响,以及根系特征与玉米产量是否有关联尚不清楚。本研究中,以玉米为供试作物,通过研究不同的施肥处理对玉米根系特征和产量的影响,探讨实现玉米高产的最佳根系特征对应的合理施肥方式,以期合理设计有机肥与化肥的配施比例提供数据支撑,为当地农业生产中的有机废弃物资源化利用提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地区概况

试验在中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站(24°43'57.6"N~24°44'51.8"N, 108°18'55.2"E~108°19'56.7"E)开展,该站于2006年建立长期定位试验小区。供试土壤为棕色石灰土,试验前土壤理化性质:pH为7.57,有机质、全氮、全磷、全钾质量分数分别为43.04、1.70、1.35、9.12 g/kg。试验区属亚热带季风气候区,1月份平均气温为10.1 °C,7月份平均气温为27.9 °C,年均温度为19.9 °C,年均 $\geq 10$  °C积温为6 300 °C,年均无霜期为329 d;平均年降水量为1 389.1 mm,其中4月至9月为雨季,降水量占全年的73.7%,10月至次年3月为旱季<sup>[22]</sup>。

### 1.2 试验设计

采用随机区组设计,设置6种不同的施肥处理方式,每种处理设4次重复。处理包括不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、70%NPK+30%秸秆(J1)、70%NPK+30%牛粪(N1)、40%NPK+60%秸秆(J2)和40%NPK+60%牛粪(N2)。除CK处理外,其余施肥处理均遵循等氮施肥原则<sup>[23]</sup>。单个小区面积为7.5 m $\times$ 4.0 m,行距为1 m,株距为50 cm。玉米品种为‘瑞单8号’。

### 1.3 数据收集

2020年5月下旬,参照廖小琴等<sup>[24]</sup>的方法,在每个小区中安装2根亚克力材料微根管(长60 cm、内径5 cm、外径6 cm)。根管与水平方向呈45°夹角。裸露出土面的微根管部分使用黑色塑料膜包裹,顶端加盖密封,避免水分和光线进入管内,影响根系生长。为使根系更好地恢复到安装微根管之前的状态,一年内不进行根系监测,同时微根管在研究期内保持原位。

采用CI-602根系扫描仪,分别在0~14、>14~28、>28~42 cm这3个土壤深度获取根系图像。2023年5月23日采集图像,此时玉米处于拔节期。每根微根管获取3张图片,每张图片大小为21.6 cm $\times$ 18.0 cm。

采用根系分析软件WinRHIZO Torn 2009a对所获取的图像数据进行处理,通过观测根系颜色来分辨根系的存活状态,其中,白色、褐色的为活根,颜色较深(黑色)和消失的根系为死根,只记录观测窗中直径小于2 mm的细根<sup>[24]</sup>;同时通过该软件分析细根总根长(RL)、根表面积(RSA)、根体积(RV)、

根直径(RD)以及根尖数(Ntips)。参照赵俊威等<sup>[25]</sup>的方法,利用微根管所得到的根系长度计算出细根根长密度、根表面积密度(RSAD),并将根长密度转化为细根存量(FRB)。

在玉米的收获期,从每个小区中随机选取5株长势均匀的玉米植株,分别测定其株高(PH)、单位面积穗数(SN)及单位面积地上部总干质量(ADW),并折算单位面积生物量(PO)<sup>[26]</sup>。

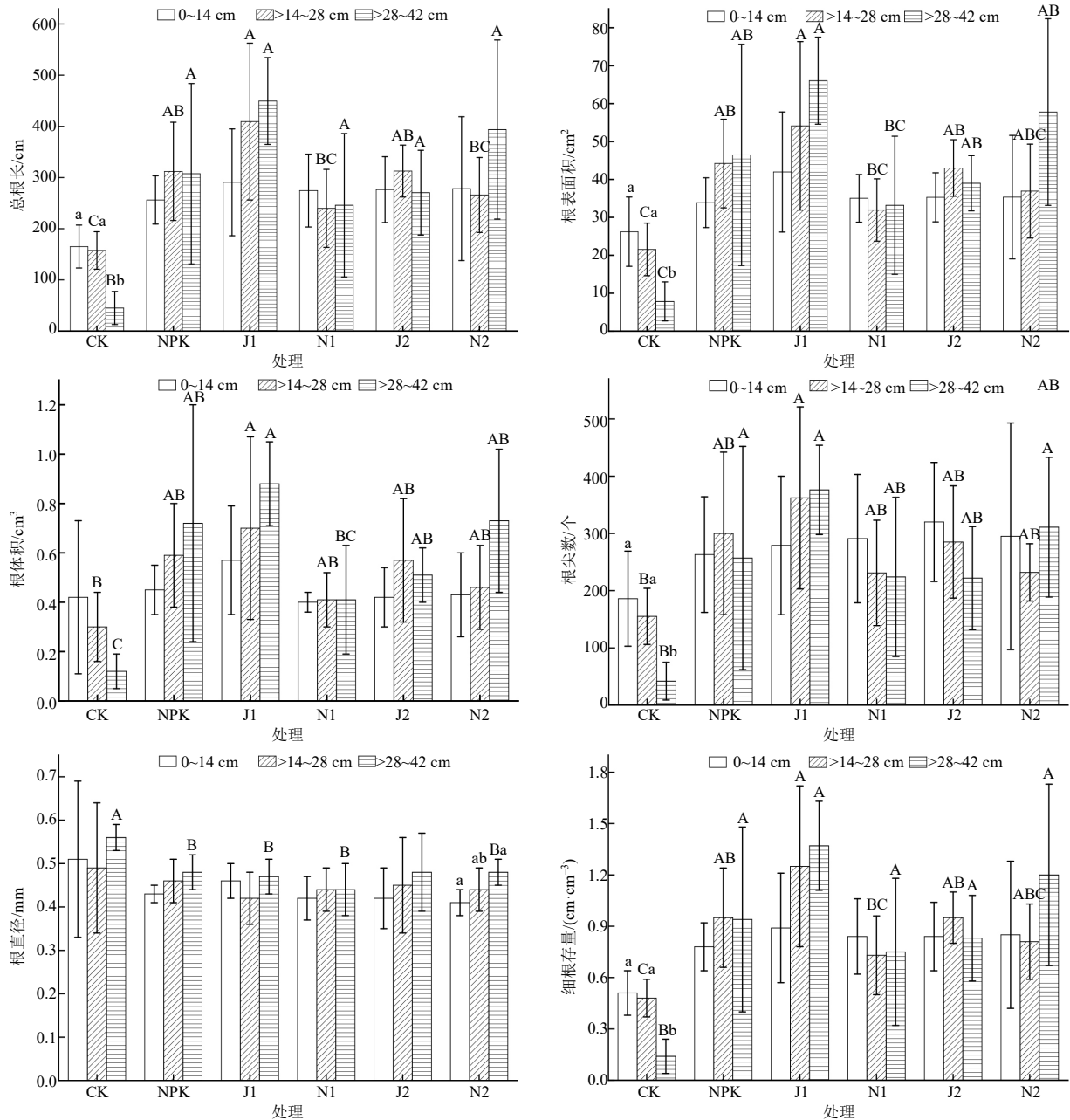
### 1.4 数据统计与分析

采用Microsoft Excel 2021进行数据整合与初步处理。运用R语言进行数据分析和制图,其中,采用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验施肥处理和土层深度对根系特征的影响,通过Tukey HSD法进行多重比较,检验处理间差异的显著性( $P < 0.05$ );采用Pearson相关性分析,揭示不同土层根系特征指标与产量指标间的相关关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥处理和土层深度对细根根系特征的影响

由图1可知,在0~14 cm土层中,J1处理的细根总根长为290.66 cm,根表面积为41.96 cm<sup>2</sup>,根体积为0.57 cm<sup>3</sup>,细根存量为0.89 cm/cm<sup>3</sup>,这些指标均高于其他处理的,但该土层中玉米各项细根根系特征指标在各处理间的差异均无统计学意义。在>14~28 cm土层中,J1处理的总根长、根表面积、根体积、根尖数和细根存量分别为409.32 cm、54.13 cm<sup>2</sup>、0.70 cm<sup>3</sup>、362个和1.25 cm/cm<sup>3</sup>,均高于其他处理的,且其总根长显著高于CK、N1和N2处理的,根表面积和细根存量显著高于CK和N1处理的,根尖数显著高于CK的;另外,NPK和J2处理的总根长、根表面积和细根存量均显著高于CK处理的。在>28~42 cm土层中,所有施肥处理的总根长、细根存量、根表面积(N1处理的除外)和根体积(N1处理的除外)均显著高于CK处理的,而根直径则均显著小于CK处理的;另外,NPK、J1和N2处理的根尖数均显著高于CK处理的,J1处理的根表面积和根体积分别为66.05 cm<sup>2</sup>和0.88 cm<sup>3</sup>,均显著高于N1处理的。除CK处理的最底层总根长、根表面积、根尖数和细根存量显著低于0~14 cm和>14~28 cm的外,其余各处理的各项细根根系特征指标在不同深度土层间的差异均无统计学意义。



图柱上不同大写字母表示同一土层深度下不同施肥处理间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ ); 不同小写字母表示同一处理在不同深度土层间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

图1 不同施肥处理和土层深度下玉米的细根根系特征

Fig. 1 Fine root characteristics of maize under different fertilization treatments and soil layer depths

方差分析结果(表1)显示, 施肥处理对总根长、根表面积、根体积、细根存量、根尖数均有极显著影响( $P < 0.01$ ), 而对根直径无显著影响; 土层深度

及施肥处理与土层深度的交互作用对各项细根根系特征指标均无显著影响。

表1 施肥处理和土层深度影响玉米细根根系特征的双因素方差分析结果

Table 1 Two-way ANOVA results of the effects of fertilization treatment and soil depth on fine root traits in maize

误差来源	自由度	$F(P)$					
		总根长	根表面积	根体积	细根存量	根尖数	根直径
施肥处理	5	8.55(<0.01)	8.22(<0.01)	5.30(<0.01)	8.59(<0.01)	4.26(<0.01)	1.90(0.10)
土层深度	2	0.57(0.57)	1.49(0.23)	1.52(0.23)	0.57(0.57)	0.51(0.56)	2.38(0.11)
施肥处理×土层深度	10	1.27(0.27)	1.49(0.17)	1.25(0.28)	1.29(0.26)	0.74(0.68)	0.26(0.99)

注: 括号中的值为 $P$ 。

### 2.2 玉米的产量指标

由表2可知, J2处理的群体株高最高, CK处理的单位面积穗数最多, 但群体株高和单位面积穗数在所有处理间的差异均无统计学意义; 各施肥处理的单位面积地上部总干质量和单位面积生物量均

显著高于CK处理的; 施肥处理中J2和N2的单位面积地上部总干质量大于其他施肥处理的, J2和NPK处理的单位面积生物量大于其他施肥处理的, 但各施肥处理间的差异均无统计学意义。

表2 不同施肥处理的玉米产量指标

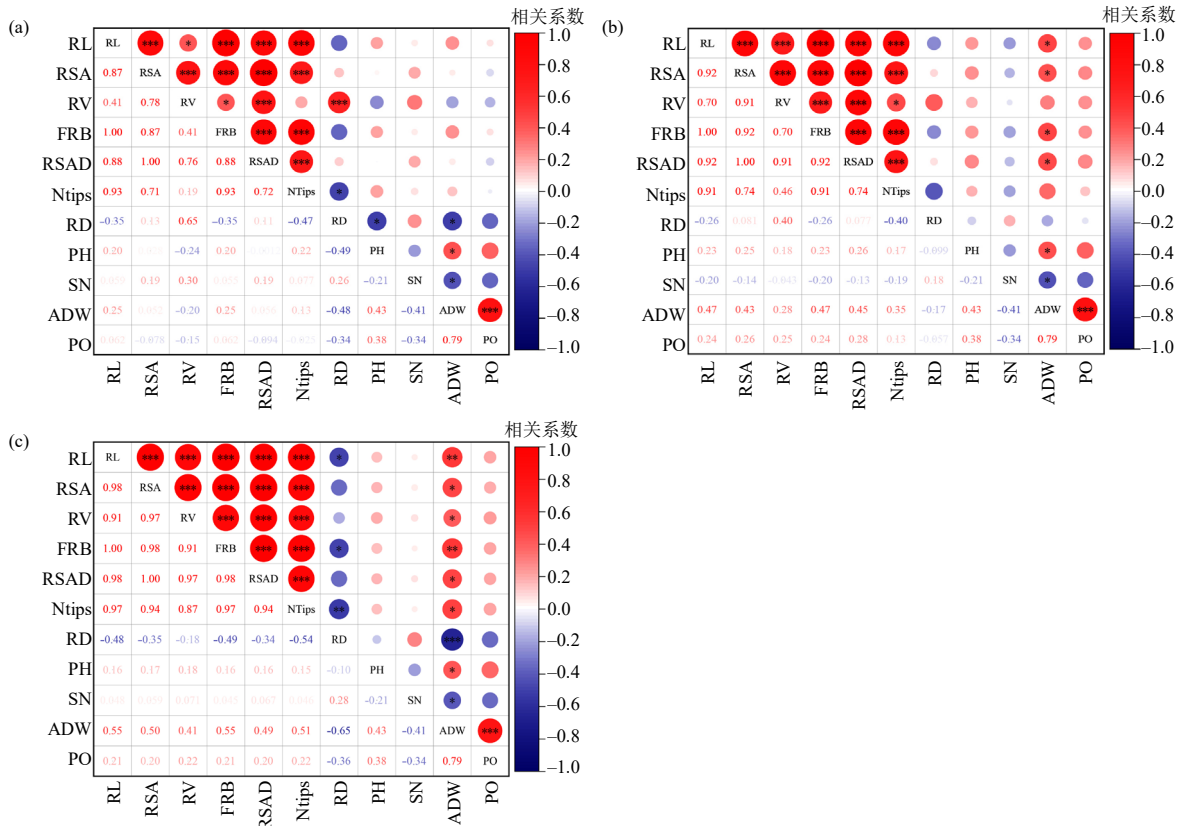
处理	群体株高/cm	单位面积穗数/(m <sup>2</sup> )	单位面积地上部总干质量/(g·m <sup>-2</sup> )	单位面积生物量/(g·m <sup>-2</sup> )
CK	187.28±89.28	3.28±0.17	(171.87±154.45)b	(66.29±65.94)b
NPK	219.34±5.38	2.84±0.56	(504.80±130.17)a	(231.95±109.58)a
J1	213.65±6.04	2.94±0.51	(529.46±102.77)a	(197.76±58.27)a
N1	213.54±14.64	3.00±0.48	(537.22±83.28)a	(207.77±84.25)a
J2	221.55±12.22	2.85±0.26	(593.31±109.20)a	(248.79±74.86)a
N2	208.02±16.32	2.87±0.40	(595.81±121.13)a	(212.58±117.48)a

注: 同列不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

### 2.3 产量指标与根系特征间指标的相关性

由图2可知, 在0~14 cm表层土中, RV与RD呈极显著正相关, 与Ntips不显著相关; Ntips、PH、ADW与RD均呈显著负相关; 其余各根系特征指标(RD除外)间均呈显著或极显著正相关。在>14~28 cm

土层中, 除RV与Ntips呈显著正相关, 以及RD与其他各指标均不显著相关外, 其余各根系特征指标间均呈极显著正相关; ADW与根系特征指标中的RL、RSA、FRB、RSAD均呈显著正相关。在>28~42 cm土层中, RL、FRB、Ntips与RD均呈显著负相关;



\*, \*\*, \*\*\*分别表示P<0.05、P<0.01、P<0.001。

(a) 0~14 cm土层; (b) >14~28 cm土层; (c) >28~42 cm土层

图2 不同土层玉米产量指标与细根根系特征指标间的相关性

Fig. 2 Correlation between fine root system traits and yield indicators of maize across different soil layers

除RD外,其余各根系特征指标间均呈极显著正相关;ADW与RD呈极显著负相关,而与其余各根系特征指标间均呈显著正相关。

### 3 结论与讨论

本研究中,施肥对喀斯特峰丛洼地玉米根系特征有较大影响,且效果随土层深度的增加而愈加明显。与不施肥的CK处理相比,各施肥处理在不同土层深度均不同程度地促进了根系生长,其中以70%NPK+30%秸秆(J1)处理的促进效果最为突出。在0~14 cm表层土中,各施肥处理间的细根根系特征指标差异均无统计学意义。这可能与喀斯特峰丛洼地表层土壤养分相对丰富有关,作物根系无须过度扩展即可满足养分需求,进而减少对根系生长的碳投入<sup>[27]</sup>。在>14~28 cm土层中,J1处理的总根长、根表面积、根体积、根尖数和细根存量均高于其他处理的,且其总根长与CK、N1和N2处理的差异均有统计学意义,根表面积和细根存量与CK和N1处理的差异均有统计学意义。在>28~42 cm土层中,J1处理的总根长、根表面积、根体积、根尖数和细根存量同样高于其他处理的,且J1处理的各细根根系特征指标与CK处理间的差异均有统计学意义。J1处理表现出的优势,可能与化肥和秸秆的协同效应有关:一方面,70%的NPK化肥为秸秆矿化分解提供了充足的氮素驱动,速效养分能够在生育期内及时释放,相比化肥比例更低的J2处理,养分供应的时效性更强<sup>[28]</sup>;另一方面,与单施NPK或配施牛粪的处理相比,秸秆具有较高的碳氮比及木质素含量,有助于在深层土壤中形成腐殖质,持续改善土壤孔隙结构,为根系向深层延伸创造有利的物理环境,而牛粪有机质分解相对较快,对深层土壤结构的长期改善效果弱于秸秆的<sup>[29]</sup>。综合来看,J1处理在速效养分供应与深层土壤结构改善之间达到了较好的平衡,这是其深层根系特征指标优于其他处理的主要原因<sup>[30]</sup>。此外,J1处理提高了细根存量,而细根比粗根具有更高的比表面积,有助于增强根系对氮、磷的吸收能力,进一步体现了该处理在根系构型上的优势<sup>[31]</sup>。从相同施肥处理不同土层间根系特征指标来看,CK处理的底层(>28~42 cm)的总根长、根表面积、根尖数和细根存量均显著低于上

两层的,呈现出明显的根系表聚现象。这可能是由于在无外源养分输入条件下,喀斯特峰丛洼地深层土壤养分匮乏,根系倾向于集中分布在养分相对丰富的表层,从而造成深层根系发育受限<sup>[24]</sup>。而各施肥处理不同土层间的根系特征指标差异均无统计学意义,这表明施肥有效缓解了根系分布的表聚趋势,促进了根系在不同土层间的均匀延伸<sup>[32]</sup>。这种根系垂直分布格局的改变具有重要的生态功能:更均匀的根系垂直分布有助于作物充分利用不同土层的水分和养分资源,提升资源利用效率<sup>[33]</sup>,对于作物在养分或水分胁迫条件下维持正常生长具有重要意义<sup>[34]</sup>;而在深层土壤(>28~42 cm)中,有机肥料的施用能有效促进根系生长及根系在深层土壤中的垂直分布,提高深层根系生理活性,这与文献<sup>[35~37]</sup>的研究结果类似,而未被即时分解的秸秆则通过木质部形成腐殖质胶体,在深层土层释放微量元素,也会诱导根系向深层拓展,形成更为立体的根系形态。

本研究还发现,产量指标与部分根系特征指标之间存在显著的相关性。除表层土壤外,其余土层中单位面积地上部总干质量与根长、根表面积和细根存量等指标呈显著正相关。较长的根长和较大的根表面积可以增加根系与土壤的接触面积,从而增强根系从土壤中吸收养分的能力,这可能是玉米产量提高的重要原因之一<sup>[38~39]</sup>。同时,良好的根系发育提升了作物对水分的吸收和利用能力,增强了作物的抗旱能力,在干旱条件下,深层的根系可以获取更多水分,从而维持作物的生长<sup>[40~43]</sup>。根系不仅影响养分和水分的吸收,良好的根系还会促进作物的生物量积累和优化干物质分配,从而提高作物产量<sup>[44]</sup>。从土层深度与根系特征和产量指标的相关性来看,随着土层深度的增加,相关性逐渐增强。这与喀斯特峰丛洼地深层土壤的功能特性有关:深层土壤养分相对匮乏,根系需依靠更长的根长和更大的根表面积来获取有限的养分,因此,深层根系特征与产量的关联更紧密<sup>[45]</sup>。

然而值得注意的是,尽管J1处理的根系形态指标最优,但各施肥处理间的单位面积地上部总干质量和单位面积生物量差异并无统计学意义。这表明根系形态的改善与产量的提升之间并非简单的线

性关系。一方面,根系对养分的吸收效率不仅取决于根长和根表面积,还受根系生理活性、土壤养分有效性以及地上部库容等多重因素的共同调控;另一方面,有机物料(尤其是秸秆)对土壤结构和根系状况的改善可能存在一定的滞后效应,其对产量的提升效果可能需要经过多个生长季的持续积累才能充分体现<sup>[46]</sup>。

综上所述,不同施肥处理对喀斯特峰丛洼地玉米根系特征有明显影响,尤其在深层土壤(>28~42 cm)中表现突出,而各施肥处理间的产量指标差异均无统计学意义,但单位面积地上部总干质量和单位面积生物量均高于CK处理的。与CK处理相比,施肥处理,尤其是化肥与秸秆配施能有效促进玉米深层根系的生长,增强根系对水分和养分的获取能力,这可能是其产量高于CK处理的重要原因之一。综合根系形态和产量表现,化肥与有机物料配施,尤其是秸秆还田与化肥配施,是改善喀斯特峰丛洼地玉米根系构型、增强土壤可持续性的有效措施,但其对产量的长期影响仍有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 廖荣伟,刘晶淼,白月明,等.玉米生长后期的根系分布研究[J].中国生态农业学报,2014,22(3):284-291.
- [2] ZHAO J J, GONG L. Response of fine root carbohydrate content to soil nitrogen addition and its relationship with soil factors in a schrenk(*Picea schrenkiana*) forest[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2021, 40(3): 1210-1221.
- [3] 肖春旺,杨帆,柳隽瑶,等.陆地生态系统地下碳输入与输出过程研究进展[J].植物学报,2017,52(5):652-668.
- [4] 倪惠菁,苏文会,范少辉,等.养分输入方式对森林生态系统土壤养分循环的影响研究进展[J].生态学杂志,2019,38(3):863-872.
- [5] MATAMALA R, GONZÁLEZ-MELER M A, JASTROW J D, et al. Impacts of fine root turnover on forest NPP and soil C sequestration potential[J]. Science, 2003, 302: 1385-1387.
- [6] 张小全,吴可红, MURACH D. 树木细根生产与周转研究方法评述[J].生态学报,2000(5):875-883.
- [7] MAEGHT J L, REWALD B, PIERRET A. How to study deep roots—and why it matters[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 4: 299.
- [8] 李俊英,王孟本,史建伟.应用微根管法测定细根指标方法评述[J].生态学杂志,2007,26(11):1842-1848.
- [9] 廖荣伟,刘晶淼,安顺清,等.基于微根管技术的玉米根系生长监测[J].农业工程学报,2010,26(10):156-161.
- [10] 李少昆,赵久然,董树亭,等.中国玉米栽培研究进展与展望[J].中国农业科学,2017,50(11):1941-1959.
- [11] 陈伟.我国玉米种植产业发展现状及对策研究[J].中国高新科技,2018(20):6-8.
- [12] 罗培敏.广西玉米生产现状及发展策略[J].作物杂志,2001(1):6-8.
- [13] 毛留喜,赵俊芳,徐玲玲,等.我国“镰刀弯”地区春玉米种植的气候适宜性与调整建议[J].应用生态学报,2016,27(12):3935-3943.
- [14] 张亚杰,邓少虹,李伏生,等.喀斯特地区春玉米套作夏大豆下作物产量和农田碳储量对有机肥与化肥配施的响应[J].南方农业学报,2015,46(9):1584-1590.
- [15] 张玉平,荣湘民,刘强,等.猪粪与化肥配施对春玉米碳氮代谢及产量与品质的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2012,38(3):319-324.
- [16] 杨文飞,杜小凤,顾大路,等.长期施肥对根系及土壤微生态环境、养分和结构的影响综述[J].江西农业学报,2020,32(12):37-44.
- [17] 刘文,武继承.不同肥料配施对砂质潮土玉米产量与土壤培肥的影响[J].河南农业科学,2012,41(3):63-66.
- [18] 刘苗,孙建,李立军,等.不同施肥措施对玉米根际土壤微生物数量及养分含量的影响[J].土壤通报,2011,42(4):816-821.
- [19] 战秀梅,李亭亭,韩晓日,等.不同施肥方式对春玉米产量、效益及氮素吸收和利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(4):861-868.
- [20] 尹彩侠,李桂花,张淑香,等.氮磷用量与施肥方式对玉米生长发育的影响[J].玉米科学,2011,19(4):112-115.
- [21] 张玉,秦华东,伍龙梅,等.玉米根系生长特性及氮肥运筹对根系生长的影响[J].中国农业大学学报,2014,19(6):62-70.
- [22] 张伟,陈洪松,苏以荣,等.不同作物和施肥方式对新垦石灰土土壤肥力的影响[J].土壤通报,2013,44(4):925-930.
- [23] 罗焱霞,肖孔操,赵易艺,等.长期施肥对西南喀斯特区玉米-大豆轮作根际和非根际土壤氮形态及酶活性的影响[J].江苏农业科学,2022,50(1):195-201.
- [24] 廖小琴,王长庭,刘丹,等.氮磷配施对高寒草甸植物根系特征的影响[J].草业学报,2023,32(7):160-174.
- [25] 赵俊威,李生仪,孙延亮,等.不同氮磷水平下不同土层中紫花苜蓿细根周转特征[J].草业学报,2022,31(9):118-128.
- [26] 郭世乾,崔增团,高飞,等.氮肥深施对旱作覆膜农田玉米养分利用及产量的影响[J].玉米科学,2024,32(7):83-91.
- [27] 刘熙明,王滢渺,田洪涛,等.秸秆还田方式与施氮

- 量对秸秆腐解及玉米氮素利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(10): 15–26.
- [28] 武晓森, 周晓琳, 曹凤明, 等. 不同施肥处理对玉米产量及土壤酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(1): 44–49.
- [29] COTRUFO M F, WALLENSTEIN M D, BOOT C M, et al. The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 988–995.
- [30] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, 528: 60–68.
- [31] EISSENSTAT D M, WELLS C E, YANAI R D, et al. Building roots in a changing environment: implications for root longevity[J]. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 33–42.
- [32] 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.
- [33] SHABBIR A, MAO H P, ULLAH I, et al. Improving water use efficiency by optimizing the root distribution patterns under varying drip emitter density and drought stress for cherry tomato[J]. *Agronomy*, 2021, 11(1): 3.
- [34] 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.
- [35] 刘镜波, 王小林, 张岁岐, 等. 有机肥与种植密度对旱作玉米根系生长及功能的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 32–36, 41.
- [36] 李絮花, 杨守祥, 于振文, 等. 有机肥对小麦根系生长及根系衰老进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 467–472.
- [37] 张永清, 苗果园. 水分胁迫条件下有机肥对小麦根苗生长的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(6): 811–816.
- [38] ERENOGLU E B, KUTMAN U B, CEYLAN Y, et al. Improved nitrogen nutrition enhances root uptake, root-to-shoot translocation and remobilization of zinc(<sup>65</sup>Zn) in wheat[J]. *New Phytologist*, 2011, 189(2): 438–448.
- [39] 刘磊, 宋娜娜, 齐晓丽, 等. 水稻根系特征与氮吸收利用效率关系的研究进展[J]. 作物杂志, 2022(1): 11–19.
- [40] 唐立涛, 毛睿, 王长庭, 等. 氮磷添加对高寒草甸植物群落根系特征的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(9): 105–116.
- [41] COMAS L, BECKER S, CRUZ V M V, et al. Root traits contributing to plant productivity under drought[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2013, 4: 442.
- [42] 傅伟, 刘坤平, 陈洪松, 等. 等氮配施有机肥对喀斯特峰丛洼地农田作物产量与养分平衡的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 812–820.
- [43] 漆栋良, 胡阳光, 胡田田, 等. 不同灌水方式下春玉米的根系生长分布[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(11): 990–997.
- [44] DU P Z, LYNCH J P, SUN Z L, et al. Does root respiration and root anatomical traits affect crop yield under stress? A meta-analysis and experimental study[J]. *Plant and Soil*, 2025, 509(1): 763–777.
- [45] 苏志峰, 杨文平, 杜天庆, 等. 施肥深度对生土地玉米根系及根际土壤肥力垂直分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 142–153.
- [46] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 36–46.

责任编辑: 邹慧玲  
英文编辑: 柳 正