

耕作方式对玉米根系构型及抗根倒伏能力的影响

李永贤,周世永,吴伯志

(云南农业大学农学与生物技术学院,昆明 650201)

摘要: 通过云南典型的红壤坡耕地对土壤实施深松+旋耕 15 cm(SRT)、深松+免耕(SNT)、深松+翻耕 20 cm(SP1)、深松+翻耕 30 cm(SP2)、旋耕 15 cm(RT)、免耕(NT)、翻耕 20 cm(P1)和翻耕 30 cm(P2)8种耕作方式,研究对玉米的根系根条数、根直径、入土角度、根幅、生物量及根系抗拔力等的影响。结果表明,深松+翻耕 20 cm处理能增加玉米根条数、根系入土角度和 10 cm土层处根系生长幅度,增大根系生物量,尤其是深层土壤(20~30 cm)根系生物量,同时对玉米产量也具有提高作用。深松+翻耕 30 cm处理能增大根系的垂直抗拔力。因此,土壤通过深耕处理能改善玉米根系构型和分布,进而增强玉米根系抗倒伏能力。

关键词: 夏玉米;耕作方式;根系构型;根倒伏

中图分类号: S513.047

文献标识码: A

Effects of Tillage Methods on Structure and Lodging Resistance of Maize Root

LI Yong-xian, ZHOU Shi-yong, WU Bo-zhi

(College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: In this study, the root system of maize (*Zea mays*) was studied in a typical red soil slope in Yunnan province using eight tillage practices: deep loosening+15 cm rotational tillage(SRT), deep loosening + no-tillage (SNT), deep loosening + 20 cm tillage(SP1), deep loosening+30 cm tillage(SP2), 15 cm rotational tillage(RT), no-tillage(NT), 20 cm tillage(P1), and 30 cm tillage(P2). The effects of root number, root diameter, soil entry angle, root amplitude, biomass and root uprooting resistance were investigated. The results showed that the 20 cm tillage and deep loosening could increase the number of roots, root entry angle and root growth at the 10 cm soil level, increase root biomass, especially at the deep soil level(20–30 cm), and improve the yield of maize; the 30 cm tillage and deep loosening could increase the vertical root resistance. Tilling and deep loosening can increase the vertical resistance of the roots. Soil tillage can improve the configuration and distribution of maize roots and thus enhance the ability of maize roots to resist failure.

Key words: Summer maize; Cultivation method; Root configuration; Root lodging

土壤耕作作为土壤耕层构造的关键措施,在调节土壤的水、肥、气、热等土壤环境要素,改善土壤理化性状,促进作物生长发育,提高作物产量等方面起

着重要的作用^[1]。根系是作物的重要组成部分,不仅具有吸收水分和养分功能,而且在固定和支持植株方面起重要作用。目前,旋耕是我国坡地玉米主要的耕作方式。由于长期单一的旋耕方式导致农田有效耕层土壤量逐渐减少,严重影响坡地玉米的根系生长,严重时造成大面积的根倒伏,严重影响农业的持续稳定发展^[2]。大量研究表明,玉米根系发育质量是影响玉米抗倒性的重要因素,如根系的粗度、韧性、入土深度和广度都影响着植株抗拔力的大小,从而影响根倒伏^[3-5]。

与传统的旋耕比较,保护性耕作免耕增加了水分入渗,促进土壤深层水分储存,在根系长度、表面积、根系直径、根系活力均显著高于旋耕^[6]。随着年

录用日期: 2021-03-12

基金项目: 云南省现代农业玉米产业技术体系建设(2016KJTX002)、绿色新型饲料与养殖产业化关键技术研究及示范(2019ZG00902)

作者简介: 李永贤(1995-),女,昆明人,硕士,主要从事山地农业可持续发展研究。E-mail: Yongxianli2017@outlook.com

周世永为并列第一作者。

E-mail: zhoushiyong-ynau@outlook.com

吴伯志为本文通讯作者。E-mail: bozhiwu@outlook.com

限的增加,土壤硬度也明显增加,阻碍作物根系的下扎和生长。翻耕在调节土壤理化性质方面也具有重要的作用,翻耕在玉米生育期减少了土壤容重,改变了土壤通透性,有利于根系生长。近年来,作为全球重要的作物,玉米根系的构型研究越来越引起重视^[7]。相关研究一方面止步于耕作措施对根系构型的影响,另一方面对根系构型变化后的功能特征改变主要集中在营养功能即水肥利用^[8],对根系的非营养功能关注不多。其中,针对不同土壤耕作方式对玉米根系抗倒伏的影响研究逐渐引起关注。土壤耕作在影响玉米根系构型特别是增加土壤深层的根系分配量、减缓传统耕作下土壤养分的“上层富集,下层贫化”的现象也缺乏研究结果^[9]。

本研究以玉米根构型为切入点,研究不同耕作措施对红壤坡地玉米根系构型及抗根倒伏能力的影响,明确耕作方式对根系抗倒伏性的影响及其与根构型的关系,为云南省红壤坡地合理耕层构建和玉米抗倒伏的耕作调控措施选择提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2018~2019年在云南省昆明市石林县西街口镇雨布宜村进行。该地区属于高原山地季风气候,平均海拔1 942.5 m,全年日照2 339.0 h,年平均气温16.6℃,年平均降雨量为949.6 mm,降雨时间集中在5~9月,占全年降雨量的80%,其中,2018、2019年年均气温分别为16.8℃和15.2℃,年均降雨量分别为861.6、782.4 mm。试验地土壤为酸性石灰岩红壤,试验地坡度为8°,土壤pH值为4.5,有机质含量15.69 g/kg,全氮、全磷和全钾分别为1.08、0.38、12.94 g/kg,水解氮、有效磷和速效钾分别为50.58、23.65、86.37 mg/kg。大春作物主要为玉米、烤烟;小春主要种植小麦、油菜等。

1.2 试验设计

试验采取裂区设计,主处理深松(S)、未深松;副处理旋耕15 cm(RT)、免耕(NT)、翻耕20 cm(P1)、翻耕30 cm(P2),即深松+旋耕15 cm(SRT)、深松+免耕(SNT)、深松+翻耕20 cm(SP1)、深松+翻耕30 cm(SP2)、旋耕15 cm(RT)、免耕(NT)、翻耕20 cm(P1)、翻耕30 cm(P2)8个处理,4次重复,小区面积42 m²(7 m×6 m)。土壤耕作于每年夏玉米播种前进行,先进行深松处理,用深松机(大华宝来1SZL-300)深松1遍,作业深度为30 cm;再进行副处理,旋耕处理采用旋耕机(阳宇1GBT-250)旋耕1遍;翻耕处理采用铧式犁(世纪农享1L-527)翻耕1遍;免耕处理不进

行任何耕作。

试验材料为云瑞88(云南省农科院选育提供),播种日期2018年为5月15日,2019年为5月10日,播种方式为开沟(沟深15 cm)播种玉米,行距为60 cm,株距为25 cm,单株留苗,密度为66 700株/hm²,每穴2粒。底肥于耕作前撒施精制有机肥15 000 kg/hm²(有机质≥45%,N+P₂O₅+K₂O≥5%)、复合肥600 kg/hm²(N-P₂O₅-K₂O:15-15-15),播种玉米时置于两株玉米中间;3叶期追施苗肥,尿素225 kg/hm²(总氮≥46.4%);大喇叭口时期追施穗肥,尿素300 kg/hm²(总氮≥46.4%)。出苗后检查玉米的出苗情况,及时间苗、定苗。

1.3 数据观测与方法

1.3.1 玉米根系形态及力学指标

垂直根拔力,在玉米成熟期(2018年9月18日和2018年9月28日)按“S”形选取能代表小区整体长势的8株玉米,从玉米植株地上部20 cm处剪断,用根拔测力仪(3YC-I型)的固定绳固定茎基部,缓缓转动测力仪方向盘,将植株垂直拔出,记录拔出地面所需的最大力(kg),记为垂直根拔力;根系入土角度,拔出的根用清水冲洗干净后,沿根茎横切面直径对根系纵切,在每条节根距茎节0.5 cm处做切线,用量角器测量其与主茎轴线的夹角,记为根系的入土角度;根条数,人工数出玉米根层数及对应的根条数,根层记录方向,气生根→胚根,依次记为根层1→6;根直径,用电子游标卡尺测每条节根基部的直径;根幅,在玉米灌浆期(2018年8月27日和2019年8月11日),每小区随机选3株代表性样株,齐地面割去地上部分带回实验室,以植株为中心,在1/2株距处、1/2行距处标记,向下挖至30 cm深处,挖出长25 cm×宽60 cm×深30 cm的土体,直尺测量土层10 cm深处的节根水平伸展广度,记为根幅;根系生物量,测完体积的根系分别装入纸袋中,置于85℃烘箱中烘干至恒重,称其干重(精度0.01 g)。

1.3.2 玉米经济产量

每小区收获除边行外的全部玉米穗,称鲜重(精度0.01 kg),最后以14%的安全含水量进行产量折算。

1.3.3 数据分析

数据经过整理后,以耕作方式为因子,以根系数量、入土角度、根系直径、根幅、生物量和垂直抗拔力以及产量等指标为因变量,采用IBM SPSS Statistics 23.0对所有指标进行方差分析,分析前对所有统计指标进行方差齐性检验,若方差不齐则进行自然对数转换。采用Duncan法进行均值的多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式对玉米根条数的影响

玉米根系主要包括胚根和节根,共有6层构成,从根系近地面节根到胚根的方向将根分为了1~3层和4~6层。表1结果表明,1~3层根数较多,4~6层根数较少,且2019年根数总体较2018年多。从1~3层根数看,无论深松与否,都以旋耕和免耕处理根数相对较多,翻耕20 cm处理根数较少;在2019年未深松条件下,免耕与翻耕20 cm处理间根数差

异达显著水平($F=4.059, P=0.011$)。4~6层根数较少,占1~3层的31.62%~53.07%,处理间差异不大,呈旋耕、免耕处理根条数多于翻耕的趋势。处理间总根数相比较,旋耕、免耕处理大于翻耕处理。总体来看,同一耕作处理下,深松与否对玉米根条数无明显影响。由于2019年较2018年降雨量少,干旱条件促进了根系生长,2019年玉米根数较多;旋耕、免耕处理较翻耕处理玉米根系范围小,根数较多;深松与否对根数无显著影响,可能是间隔深松,对整个耕层影响不大。

表1 不同土壤耕作方式的玉米根条数

Table 1 The number of root of different soil tillage methods

条

年份 Year	耕作处理 Tillage treatment	根层 Root layer		总根条数 Total root
		1~3	4~6	
2018	SRT	28.85±5.81 ab	12.71±3.30 a	41.56±8.65 b
	SNT	29.00±2.44 ab	10.40±5.07 a	39.40±6.42 ab
	SP1	24.66±3.01 a	9.66±3.88 a	32.80±1.92 a
	SP2	27.12±5.96 ab	11.50±5.01 a	38.62±8.60 ab
	RT	26.25±5.44 ab	8.75±4.06 a	35.00±4.34 ab
	NT	31.66±3.93 b	10.83±4.11 a	42.50±3.14 b
	P1	25.57±7.52 ab	13.57±5.68 a	39.14±8.19 ab
	P2	27.20±1.30 ab	8.60±4.03 a	35.80±4.76 ab
2019	SRT	37.66±2.42 ab	14.71±1.88 ab	49.66±2.50 abc
	SNT	39.87±2.90 b	17.12±3.64 b	57.00±5.75 c
	SP1	39.22±4.26 b	13.71±0.75 ab	51.25±2.91 abc
	SP2	37.22±4.71 ab	14.44±3.35 ab	51.66±7.46 abc
	RT	38.00±2.23 ab	13.55±4.36 ab	50.88±6.60 abc
	NT	39.11±7.67 b	15.55±5.34 ab	54.66±1.52 bc
	P1	33.22±2.72 a	12.88±2.61 a	45.25±2.25 a
	P2	36.88±5.01 ab	14.33±3.70 ab	49.25±5.82 ab

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著(LSD检验, $P<0.05$)。下表同。

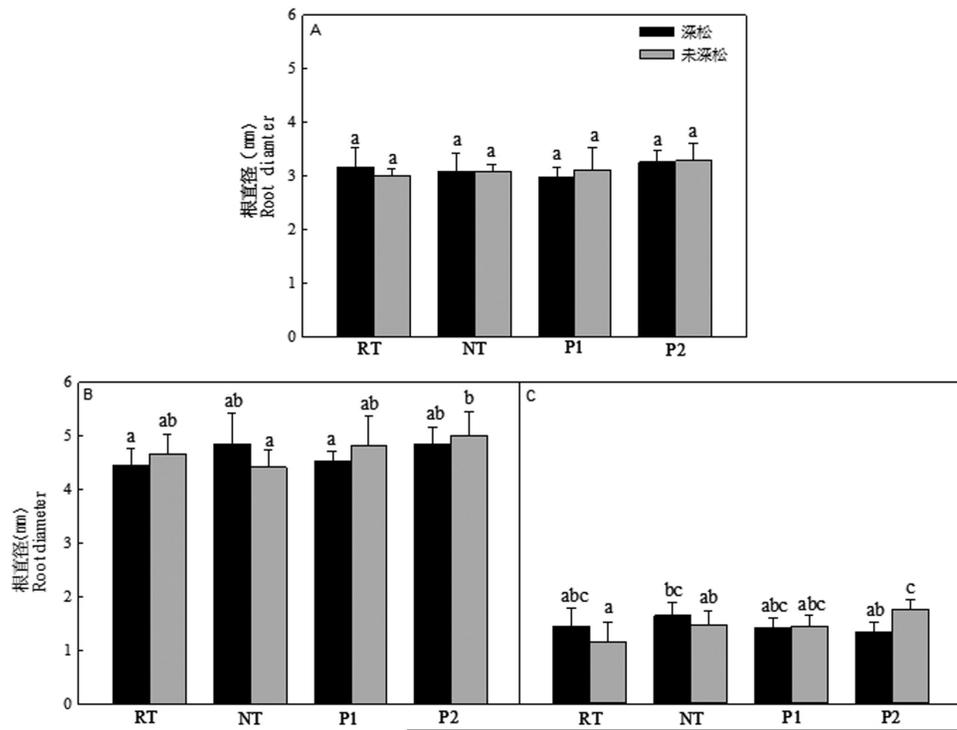
Note: Different lowercase letters after the same column date indicate significant difference(Duncan, $P<0.05$). The same as below.

2.2 不同耕作方式对玉米根直径的影响

从单株玉米平均直径来看(图1),无论深松与否,处理间根系直径差异不显著,翻耕30 cm处理较其他耕作处理粗。处理间1~3层根系平均直径差异显著($F=2.427, P=0.03$),表现为翻耕30 cm处理显著大于深松+翻耕20 cm、深松+旋耕15 cm和免耕处理,免耕处理最小;未深松条件下,翻耕>旋耕>免耕。同一耕作处理,深松处理大于未深松处理(免耕除外)。耕作方式对玉米4~6层根系平均直径有显著影响($F=3.164, P=0.007$),主要表现为未深松条件下,翻耕30 cm处理最大,与1~3层根系平均直径规律一致,显著大于旋耕、免耕处理,旋耕处理最

小;在深松条件下,免耕处理最大,翻耕30 cm处理反而最小。

总体而言,翻耕30 cm有利于玉米根系增粗,深松会增加免耕或旋耕处理4~6层玉米根直径。根系直径的大小对养分、水分运输效率以及植株抗倒伏性起着重要作用,就玉米而言,节根越粗,根系运输作用和支撑能力就越强,植株不易倒伏。从根系微观结构上解释^[10],可能是由于深耕(深翻和深松)后土壤机械阻力小,根系皮层木质化程度低,皮层厚度薄,导管数量和直径增大,根系直径变粗,进而提高导水和抗倒伏能力。



注:图中A、B、C分别表示单株平均、1~3层、4~6层根直径。根层方向为气生根→胚根,依次记为1→6。同列数据后不同小写字母表示差异显著(LSD检验, $P < 0.05$)。下图同。

Note: Figure A, B and C indicate the average root diameter of a single plant, 1-3 root layer and 4-6 root layer respectively. Direction of root layer: Aerial root→Radicle, expressed as 1→6. Different lowercase letters after the same column date indicate significant difference(Duncan, $P < 0.05$). The same as below.

图1 2019年不同耕作方式的根直径

Fig.1 The root diameter of different soil tillage methods in 2019(mm)

2.3 不同耕作方式对玉米根系入土角度的影响

表2 不同土壤耕作方式的根系入土角度

Table 2 The root penetration angle of different soil tillage methods

年份 Year	耕作处理 Tillage treatment	根层 Root layer		平均 Average
		1~3	4~6	
2018	SRT	57.04±5.69 a	46.73±1.19 b	53.98±6.35 c
	SNT	56.22±1.35 a	41.67±5.97 ab	47.82±4.96 ab
	SP1	58.66±2.53 a	35.88±11.32 a	50.98±4.28 abc
	SP2	56.65±5.18 a	43.23±4.33 ab	52.39±4.17 bc
	RT	53.88±3.52 a	45.81±6.07 b	50.62±3.35 abc
	NT	52.65±4.31 a	40.95±4.26 ab	46.04±1.85 a
	P1	58.39±3.84 a	42.33±3.62 ab	51.00±2.25 abc
	P2	52.72±2.15 a	47.95±6.16 b	48.66±2.76 abc
2019	SRT	53.98±4.03 a	48.90±4.01 b	52.18±2.15 c
	SNT	48.95±5.09 a	45.72±2.45 ab	46.43±3.82 ab
	SP1	49.40±9.49 a	46.41±4.20 ab	49.83±4.26 bc
	SP2	51.37±6.47 a	47.50±3.21 ab	48.53±4.22 bc
	RT	50.38±7.12 a	44.67±1.93 ab	47.99±3.79 abc
	NT	46.23±3.01 a	47.84±4.36 ab	43.83±4.64 a
	P1	51.19±9.05 a	43.54±4.89 a	47.00±6.09 ab
	P2	47.79±4.53 a	46.69±3.80 ab	47.40±2.91 ab

各处理玉米根系自下而上入土角度呈递增趋势,1~3层根系入土角度较大,便于吸收浅层土壤水分,起到固定支撑玉米植株的作用;4~6层根系入土角度较小,利于向深层土壤延伸,拓展水肥吸收空间^[11,12],说明当代玉米品种为了有利于形成高密度大群体的良好群体结构,玉米根系具有横向缩减、纵向延伸的特点。两年相同处理比较,2018年玉米根系入土角度较2019年大,这可能是根系对土壤水分含量响应的结果,在玉米根系生长需水时期,2018年土壤含水量较2019年高,利于玉米根系横向延伸,觅取水分。综合1~3、4~6根层和单株平均根系入土角度看,深松+旋耕15 cm处理显著大于免耕处理($F=4.11, P=0.01$)。同一耕作处理下,深松后根系入土角度有增大趋势;未深松条件下,根系入土角度表现为旋耕15 cm>翻耕>免耕(表2)。

2.4 不同耕作方式对玉米根系幅度的影响

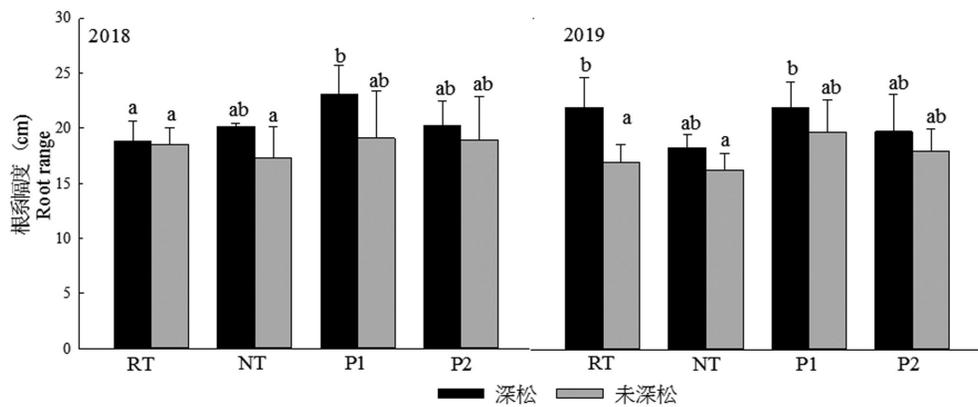


图2 不同土壤耕作方式10 cm土层处玉米行间的根幅

Fig.2 The root range of 10 cm soil layer between lines of maize under different soil tillage methods

2.5 不同耕作方式对根系生物量垂直分布的影响

由表3所示,两年间玉米根系生物量随土层加深而减少,与2018年相比,2019年0~10 cm土层玉米根系分布减少,11~20 cm和21~30 cm两个土层根系生物量有所增加,且占总生物量的比重增加明显,分别从5.27%和1.92%增加到11.2%和4.75%。可能是因为2019年降雨减少,在玉米根系需水期受干旱胁迫,玉米根系为满足自身需求而向深土层伸长;也有可能是因为2019年玉米根系入土角度较2018年小,根系主要是向下生长,水平伸展广度小,所以单位土壤体积内根系分布少。

在0~10 cm土层,翻耕20 cm处理根系生物量显著高于深松+翻耕30 cm处理,与免耕处理差异不显著;在11~20 cm土层,根系生物量仍为翻耕20 cm处理最高,且在2019年无论深松与否其均显著高于免耕处理;在21~30 cm土层,无论深松与否,翻耕

根幅是指玉米根系在土壤内水平伸展范围,在一定范围内根幅越大,玉米根节根水平伸展面积就越大,说明节根对植株的固着能力就越强,抗根倒伏能力也就越强。通过比较两年玉米行间根幅(图2),不同耕作方式对两年玉米根幅影响规律相对一致,同一耕作处理下,深松处理根幅较未深松处理大,且在2019年旋耕处理达显著水平($F=2.793, P=0.033$)。无论深松与否,玉米根幅均表现为翻耕大于旋耕和免耕(2019年旋耕除外),在2018年深松条件下,翻耕20 cm与旋耕处理间达显著水平($F=2.283, P=0.046$)。总的来说,免耕处理根幅最小,旋耕处理次之,与前两者相比,翻耕和深松均能增加玉米根幅,根系在土壤上的固着能力增强,玉米不易出现根倒伏。分析其原因,可能是免耕处理土壤紧实,限制了根系的延伸,而翻耕和深松处理土壤较其疏松,根系生长阻力相对较小。

根系生物量均较旋耕和免耕高。同一耕作处理下,深松处理根系生物量较未深松处理呈增加趋势^[13],在2019年旋耕和翻耕20 cm两个耕作处理达显著水平($F=5.201, P=0.029$)。综合来看,耕作方式对上层土壤(0~10 cm)中根系生物量无显著影响,处理间差异主要体现在中下层土壤中,尤其是下层土壤(21~30 cm)较为明显。同一耕作处理下,深松均可增加下层根系生物量,翻耕处理根系生物量较旋耕、免耕处理多,免耕处理最少。深松和翻耕中下层土壤相对疏松,有利于根系下扎,进而使单位土壤体积根系生物量增加。

2.6 不同耕作方式对平均根质量密度的影响

根系生物量密度表示单位体积土壤中根系干重,其数值大小可以反映植物根系的生长状况以及对土壤水分、养分的吸收能力。从两年0~30 cm土层平均根系生物量密度来看,与2018年相同处理比

较,2019年各处理根系生物量密度降低,说明单位土壤体积内,根量减少,这与根系生物量变化规律相一致,这可能是由于虽然2019年降雨量较2018年少,根系为了汲取水分生长加快,但并不增加根系的绝对量,只是根系长度分布下移,根系总长和总量减小^[14]。具体来看,耕作深度对2018年($F=3.126, P=0.038$)和2019年($F=4.176, P=0.014$)平均根系生物量密度均有显著影响,主要表现为在未深松条件下,翻

耕处理(2018年翻耕30 cm除外)显著高于或高于旋耕和免耕处理。对旋耕15 cm和免耕两个耕作处理而言,深松处理有增加其单位土壤体积内根系生物量的趋势,对翻耕起到相反作用。翻耕和深松处理对土壤起到疏松耕层的作用,玉米根系生长阻力小,利于其生长发育,根系生物量增加,相应的根系生物量密度也增大(图3)。

表3 不同土壤耕作方式的根系生物量

Table 3 The root biomass of different soil tillage methods

g/0.01 m³

年份 Year	耕作处理 Tillage treatment	土层(cm) Soil layer		
		0~10	11~20	21~30
2018	SRT	12.19±3.56 a	0.81±0.30 a	0.29±0.12 ab
	SNT	12.30±3.33 a	0.70±0.35 a	0.29±0.11 ab
	SP1	13.36±3.82 ab	0.76±0.33 a	0.33±0.17 ab
	SP2	11.28±4.55 a	0.81±0.42 a	0.38±0.21 b
	RT	11.52±2.14 a	0.73±0.41 a	0.18±0.09 a
	NT	14.60±5.85 ab	0.51±0.24 a	0.20±0.08 a
	P1	17.56±1.63 b	0.93±0.44 a	0.22±0.14 ab
	P2	11.57±2.98 a	0.62±0.33 a	0.25±0.04 ab
2019	SRT	6.89±2.66 ab	0.79±0.30 ab	0.59±0.11 d
	SNT	7.22±3.38 ab	0.66±0.19 a	0.26±0.07 a
	SP1	7.66±1.60 ab	1.11±0.33 b	0.49±0.04 cd
	SP2	5.44±0.65 a	1.02±0.20 ab	0.33±0.15 ab
	RT	6.46±1.62 ab	0.92±0.25 ab	0.30±0.10 a
	NT	7.22±0.99 ab	0.67±0.30 a	0.25±0.11 a
	P1	9.01±2.19 b	1.07±0.30 b	0.42±0.15 bc
	P2	4.84±0.96 a	0.89±0.28 ab	0.34±0.04 ab

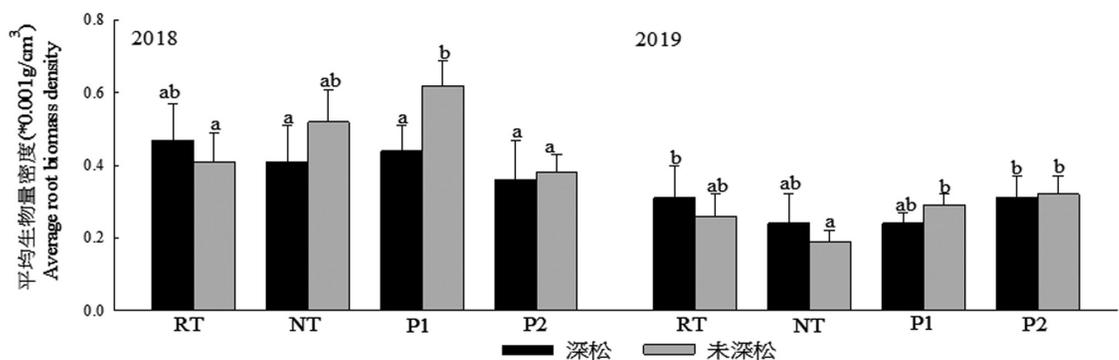


图3 不同土壤耕作方式的平均根系生物量密度

Fig.3 The root weight density of different soil tillage methods

2.7 不同耕作方式对玉米垂直抗拔力的影响

根拔力是指将玉米植株从地面垂直拔出所需的最大力,其数值大小直接反映了根系发达程度,根拔力大,说明玉米抗倒伏能力越大,反之越小。两年各处理间根拔力反映趋势基本一致,但年际间变化明

显。图4显示,与2018年相比,2019年各处理(免耕处理除外)根拔力均有增大趋势,这可能是与2018年拔根前一天降雨有关,土壤相对潮湿,利于拔根。在2018年,对于免耕来说,降雨后其土壤较为紧实,根拔力反而增大,显著大于除翻耕30 cm处理外的

其余处理($F=2.814, P=0.013$)。2019年,翻耕30 cm处理玉米根拔力显著大于其他处理(深松+翻耕20 cm和翻耕20 cm处理除外)($F=2.63, P=0.028$),免耕处理根拔力最小,上述玉米根系构型指标结果也可说明这一点,免耕处理玉米根系较其他处理入土浅,根幅小,根拔力小。总体来看,未深松条件下,根系抗拔力随耕作深度增加而增大(2018年免耕除外);深松

处理对于免耕、旋耕15 cm和翻耕20 cm这三个耕作处理来说,有促进增大根拔力,增强抗倒伏能力的趋势,趋势幅度表现为免耕>翻耕20 cm>旋耕15 cm。深耕处理玉米根系发达,在土壤中体现出较强抓地力,进而增强抗倒伏能力,尤其在干旱情况下较为明显,是由于干旱胁迫下,根系为了扩大觅水空间而横向、纵向伸展,根系分布广,更不易倒伏。

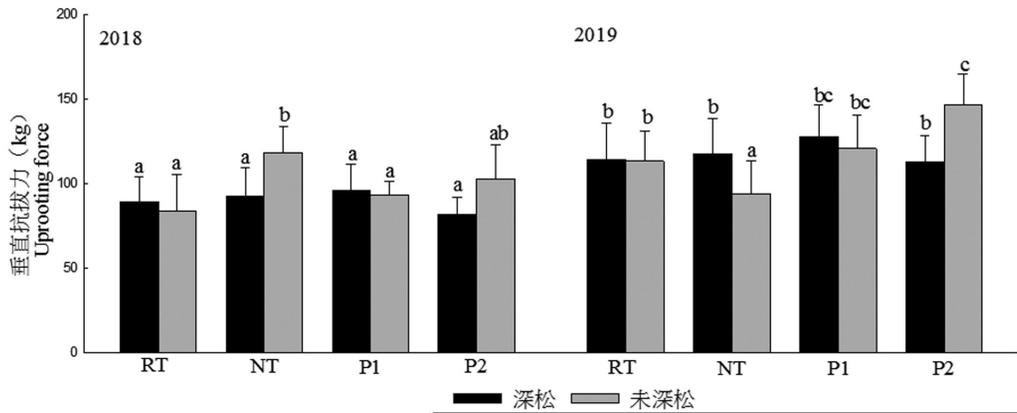


图4 不同土壤耕作方式的根系垂直抗拔力

Fig.4 The uprooting force of different soil tillage methods

2.8 不同耕作方式对玉米产量的影响

玉米经济产量即玉米子粒产量,体现了玉米的有效生产力。2019年较2018年玉米呈增产趋势,平均增产率高达37.05%,这可能是由于2019年后期追肥较为及时,且玉米较2018年生长良好,单株茎叶干重高,且玉米百粒重大。图5显示,2018年,深松与否对玉米经济产量影响显著($F=7.615, P=0.011$),表现为相同翻耕深度下,未深松处理显著高于深松处理,增产幅度分别达31.31%(翻耕20 cm)、36.07%

(翻耕30 cm)。2019年,翻耕30 cm处理玉米经济产量高,达12 477.39 kg/hm²,显著高于免耕处理^[15]。结合两年经济产量结果看,深松促进免耕玉米产量增加,增幅分别达2.11%(2018年)、5.00%(2019年),且增产优势逐年增加;未深松条件下翻耕较其他处理增产趋势明显,较当年产量最低处理分别增产了28.67%(2018年)、16.26%(2019年),且在年际间具有稳定的增产优势。

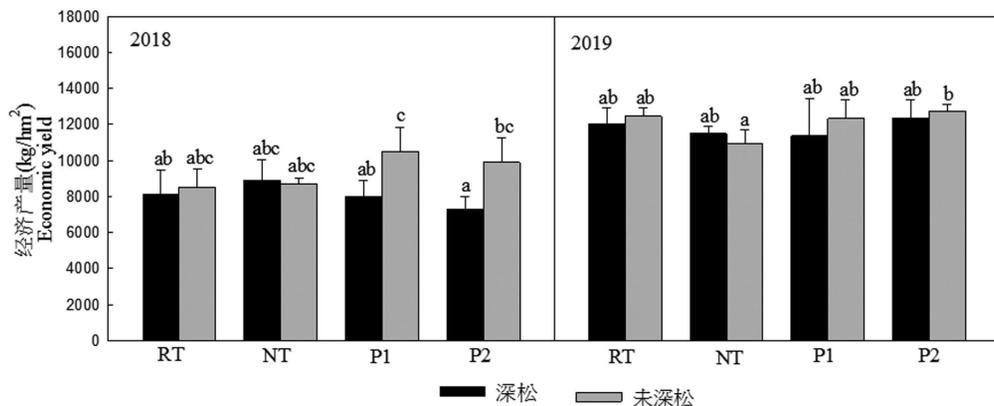


图5 不同土壤耕作方式的玉米经济产量

Fig.5 The economic yield of different soil tillage methods

3 结论与讨论

玉米的抗倒伏能力直接体现在田间其倒伏程度

和倒伏面积上,但在未倒伏时,如何科学评价品种的抗倒性,是一个重要的研究课题。有研究表明,根倒率与根条数、根直径和根干重呈极显著负相关,与根

体积呈显著负相关^[16]。玉米对根倒伏的抗性与根系生长方向密切相关,且相比于垂直方向的根系,与根系水平方向上伸展范围大小关系更甚,表现为根幅增加,根倒伏率呈极显著负相关,相关系数高达0.91^[17]。Crook M J^[18]认为,根系入土角度与根系抗倒伏性高度正相关,抗倒伏玉米杂交的亲本系根夹角为40°较合适。此外玉米抗根倒伏性不仅取决于地下部根系的固定支持作用,还与地上部植株重心高度、穗位高和株高及两者比值密切相关,其中,穗位高或重心越高,根倒伏率显著增加^[19]。边大红^[20]研究表明,玉米根系最大垂直抗拔力和植株抗拉力与根倒伏率呈极显著负相关,相关系数分别达0.89和0.85,与单根气生根平均抗拉力相关性不显著。总之根倒伏率是对玉米整个植株根系力学强度的表达,单个根系发育程度并不能说明抗根倒伏能力的强弱。本研究从根系的条数、入土角度、根直径等指标入手,也可表明玉米植株根系形态指标和根系力学特性可以作为抗根倒伏性的评价指标。

不同耕作方式对玉米农艺性状、根系形态以及根系力学特性影响不同,根系抗倒伏性能也有所不同。如旋耕后播种处理较麦茬播种处理能够明显降低玉米株高、穗位高和重心高,根条数增多,单位体积根长、根体积、根幅和根干重均呈增加趋势,根拔力显著增大,植株抗根倒伏能力增强。梁金凤等^[21]表示,深松和旋耕处理下夏玉米根干密度、根长密度均大于免耕直播,抗倒性也相对较强。冬小麦播前翻耕与旋耕相比,夏玉米根条数、根冠比和地上节根条数显著增加,抗倒伏能力显著提高。刘胜群等^[22]认为,垄作中耕条件下的玉米根系数量,较高茎节节根尤其是气生根数量高于平作,有利于作物抗根倒伏能力的增强。与传统耕作相比,深耕30 cm和深耕50 cm处理春玉米根长、根表面积和0~80 cm土层根系生物量显著增加,深耕50 cm处理植株抗倒性较强,这一特性有利于玉米在极端条件下实现高产稳产^[23]。在本研究中,随耕作深度增加,玉米主根直径、根系入土角度和根幅等根系性状呈增大趋势,根拔力增大^[24],这主要是由于深耕能有效缓解土壤的板结问题,打破犁底层,降低土壤容重,利于根系生长发育,增强抗根倒伏能力。查国栋^[25]表示,土壤紧实度直接影响了植物根系的形态建成,在高紧实度的力学刺激下,拟南芥主根伸长生长受到抑制,表现为根系数量增加。在本研究中由于免耕土壤较翻耕紧实,根条数会有所增加。另外,紧实的土壤条件下,植物根系生长优于地上部分,这也是免耕处理玉米根系数量虽较翻耕处理多但其产量低的原因之

—^[26]。

在本研究中,两年间不同耕作方式下玉米在不同生育时期均未出现直接的倒伏情况,这可能与当地降雨、风力及其分布并未达到使玉米倒伏的强度有关。从杨杨等^[27]对玉米倒伏胁迫影响因子进行的空间回归分析看,日降雨量是诱导倒伏的首要因素,多雨水易造成土壤松软,根系固定能力降低,倒伏程度随日降雨量的增加而加大。另外,短时雷雨大风型天气造成的玉米倒伏范围广,若同时伴有强降水,则玉米倒伏面积增加,倒伏程度严重^[28]。另外,考虑到玉米根系形态及其抗倒伏性能受品种本身以及种植密度影响较大,玉米倒伏率随种植密度的增大而增加,主要是由于在高密度种植情况下,玉米生育中后期群体内光照不足,个体在竞争水、肥、气、热等环境条件的过程中光合强度降低,单株光合产物减少,进而使分配给根系的有机物质减少,限制了根系生长和功能的发挥,特别是支持根,植株总体呈现出“头重脚轻”的状态,易发生根倒伏^[29]。

翻耕20 cm处理和深松耕能增加玉米根条数、根系入土角度和10 cm土层处根系生长幅度,促进根系增粗,增大根系体积和生物量密度,特别是深层土壤(21~30 cm)根系生物量,起到改善玉米根构型和分布的作用。深翻和深松处理均能增大根冠比和根系垂直抗拔力,降低玉米穗高系数,进而增强玉米根系抗倒伏能力。总体上,本研究明确翻耕20 cm能较传统旋耕促进玉米根系生长和产量形成,提高山区玉米生产能力,对于云南石灰岩红壤坡耕地作物增产和玉米抗倒伏的耕作调控措施选择具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] Davies W J, Zhang J H. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1991, 42(1): 55-76.
- [2] Tong W J, Deng X P, Xu Z L, et al. Effect of plowing depth on soil physical characteristics and spatial distribution of root system of flue-cured tobacco[M]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016.
- [3] Chaudhary M R, Gajri P R, Prihar S S, et al. Effect of deep tillage on soil physical properties and maize yields on coarse textured soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 1985, 6(1): 31-44.
- [4] Karunatilake U, Es H M V, Schindelbeck R R. Soil and maize response to plow and no-tillage after alfalfa-to-maize conversion on a clay loam soil in New York[J]. *Soil & Tillage Research*, 2000, 55(1-2): 31-42.
- [5] Qiu G B, He T B, Long Y H, et al. Effect of No-tillage cultivation on maize root characters and yield[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011: 55-57.
- [6] Kenob K, Atkinson J A, Wells D M, et al. Linear discriminant analy-

- sis reveals differences in root architecture in wheat seedlings related to nitrogen uptake efficiency[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017: 4969–4981.
- [7] Jiang W, Wang K, Wu Q, et al. Effects of narrow plant spacing on root distribution and physiological nitrogen use efficiency in summer maize[J]. *The Crop Journal*, 2013, 1(1): 77–83.
- [8] Mohammad W, et al. Effect of tillage, rotation and crop residues on wheat crop productivity, fertilizer nitrogen and water use efficiency and soil organic carbon status in dry area(rainfed) of north-west Pakistan[J]. *Journal of Soil ence & Plant Nutrition*, 2012: 12.
- [9] Li Z, Liu P, Zhang X, et al. Genome-wide association studies and QTL mapping uncover the genetic architecture of ear tip-barneness in maize[J]. *Physiologia Plantarum*, 2020(1): 27–39.
- [10] 尹宝重,甄文超,冯悦. 海河低平原深松播种对夏玉米根系生理的影响及其节水增产效应[J]. *作物学报*, 2015(4): 113–122. Yin B Z, Zhen W C, Feng Y. Effects of Subsoiling-Seeding on root physiological indices, water-saving and yield-increasing behaviors in summer maize(*Zea mays* L.) in Haihe lowland plain of China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015(4): 113–122. (in Chinese)
- [11] David R W. A light and electron microscope investigation of the transfer cell region of maize caryopses[J]. *Canada Journal Botany*, 1990, 68: 471–479.
- [12] 王聚辉. 玉米茎叶夹角与根系入土角度相关性研究[J]. *华北农学报*, 2015, 30(增刊): 173–178. Wang J H. Study on the correlation between maize leaf angle and root penetration angle[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(S): 173–178. (in Chinese)
- [13] 王新兵,侯海鹏,周宝元,等. 条带深松对不同密度玉米群体根系空间分布的调节效应[J]. *作物学报*, 2014, 40(12): 2136–2148. Wang X B, Hou H P, Zhou B Y, et al. Effect of strip subsoiling on population root spatial distribution of maize under different planting densities[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(12): 2136–2148. (in Chinese)
- [14] Xiang G, Shao K, Li S. Effects of regulated deficit irrigation on root growth in maize[J]. *Irrigation and Drainage*, 2001: 15–20.
- [15] 邱红波,何腾兵,龙友华,等. 免耕栽培对玉米根系性状及其产量的影响[J]. *贵州农业科学*, 2011(9): 63–65. Qiu H B, He T B, Long Y H, et al. Effect of no-till cultivation on root traits and yield of maize[J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2011 (9): 63–65. (in Chinese)
- [16] 郝玉波,李梁,葛选良,等. 不同耐密性玉米品种抗倒伏特性研究[C]. 第十五届全国玉米栽培学术研讨会会议论文集, 2017.
- [17] 郑丕尧. 作物的形态与机能[J]. *世界农业*, 1985(9): 64. Zheng P Y. Form and function of crops[J]. *World Agriculture*, 1985 (9): 64. (in Chinese)
- [18] Crook M J, Ennos A R. Stem and root characteristics associated with lodging resistance in four winter wheat cultivars[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1994, 123(2): 167–174.
- [19] 李俊民,南明慧,刘蕾. 化控药剂对玉米抗倒性及产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2005, 33(12): 2246–2246. Li J M, Nan M H, Liu L. Effect of chemical on the corn lodging resistance and yield[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2005, 33(12): 2246–2246. (in Chinese)
- [20] 边大红,贾桂平,蔡丽君,等. 耕作方式对玉米根系发育及抗根倒伏能力的影响[C]. 中国作物学会学术年会, 2013.
- [21] 梁金凤,齐庆振,贾小红,等. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 945–950. Liang J F, Qi Q Z, Jia X H, et al. Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 945–950. (in Chinese)
- [22] 刘胜群,佟殿文,庄文君,等. 春玉米节根抗拉能力对耕作措施的响应[J]. *土壤与作物*, 2019, 8(3): 288–292. Liu S Q, Tong D W, Zhuang W J, et al. Response of nodal tensile capacity to tillage in spring maize[J]. *Soil and Crop*, 2019, 8(3): 288–292. (in Chinese)
- [23] Cai H G, Ma W, Zhang X J, et al. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize[J]. *Crop Journal*, 2014(5): 297–307.
- [24] 张黛静,张艳艳,王艳杰,等. 耕作方式和有机肥对灌浆中后期小麦茎秆抗倒特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(3): 396–402. Zhang D J, Zhang Y Y, Wang Y J, et al. Effect of tillage pattern and organic fertilizer on culm lodging resistance characteristics of wheat at the mid-late filling stage[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(3): 396–402. (in Chinese)
- [25] 查国栋. 梯度应力作用下拟南芥根系生长行为研究[D]. 重庆大学, 2015.
- [26] 杨喜田,董惠英,山寺喜成. 土壤硬度对播种苗和栽植苗根系发育的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(4): 60–64, 69. Yang X T, Dong H Y, Shan S X C. On effect of soil hardness on development of seeded and planted seedling root system[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(4): 60–64, 69. (in Chinese)
- [27] 杨扬,杨建宇,李绍明,等. 玉米倒伏胁迫影响因子的空间回归分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(6): 244–249. Yang Y, Yang J Y, Li S M, et al. Spatial regression analysis on influence factors of maize lodging stress[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(6): 244–249. (in Chinese)
- [28] Yu L, Xin M W, Xia Z, et al. The weather characteristics and forecast of summer maize lodging in Henan province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(18): 220–226.
- [29] 付华,李猛,刘兴舟,等. 不同种植密度下玉米品种倒伏与产量的相关分析[J]. *作物研究*, 2019, 33(6): 534–537. Fu H, Li M, Liu X Z, et al. Correlation analysis of corn variety collapse and yield at different planting densities[J]. *Crop Research*, 2019, 33(6): 534–537. (in Chinese)

(责任编辑:朴红梅)