

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202008003

黄俞铭, 罗维钢, 胡钧铭, 等. 保护地蔗田对土壤优先流与根系生物量及产量品质的影响 [J]. 广西植物, 2022, 42(11): 1854–1864.

HUANG YM, LUO WG, HU JM, et al. Effects of protected sugarcane field on soil preferential flow and root biomass and yield quality of sugarcane [J]. *Guihaia*, 2022, 42(11): 1854–1864.



## 保护地蔗田对土壤优先流与根系生物量及产量品质的影响

黄俞铭<sup>1,2</sup>, 罗维钢<sup>3</sup>, 胡钧铭<sup>2\*</sup>, 韦翔华<sup>1</sup>, 黄嘉琪<sup>1,2</sup>, 陈仕林<sup>1,2</sup>, 蒙炎成<sup>2</sup>,  
俞月凤<sup>2</sup>, 李婷婷<sup>2</sup>, 张俊辉<sup>2</sup>, 周慧蓉<sup>2</sup>, 黄忠华<sup>3</sup>, 韦本辉<sup>4</sup>, 陈 渊<sup>4</sup>

( 1. 广西大学 农学院, 南宁 530004; 2. 广西壮族自治区农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007;

3. 南宁市灌溉试验站, 南宁 530001; 4. 广西壮族自治区农业科学院经济作物研究所, 南宁 530073 )

**摘 要:** 为探明保护性耕作对蔗田土壤及甘蔗生长的影响, 该研究设置 2 种耕作方式 (常规耕作、粉垄耕作) 与 2 种施肥水平 (减量施肥 20%、常规施肥), 并于甘蔗苗期后在甘蔗行间近根部覆盖豆科秸秆, 以第二年宿根蔗为研究对象, 采用染色示踪法测定秸秆覆盖下蔗田土壤优先流特征, 同时测定分析甘蔗株高、茎围、地下根系生物量、产量及品质等重要农艺性状。结果表明: (1) 粉垄耕作方式下蔗田土壤优先流发生速度快且活跃, 添加秸秆覆盖降低了土壤优先流发生程度, 增加了土壤水分在 10~25 cm 土层的横向运移能力, 在一定程度上提高了土壤蓄水能力。(2) 粉垄保护性耕作在秸秆覆盖下提高了甘蔗根系生物量和产量, 秸秆覆盖下粉垄免耕宿根蔗根系生物量提高了 8.97%~25.54%, 并且减量施肥处理中秸秆覆盖宿根蔗长期地下根系生物量显著高于无秸秆覆盖, 秸秆覆盖下甘蔗株高提高了 4.2%~13.1%; 在减量施肥处理中, 粉垄耕作添加秸秆覆盖甘蔗产量提高了 16.27%, 并且添加秸秆覆盖较常规施肥中无秸秆覆盖, 产量提高了 5.95%。(3) 粉垄保护性耕作利于提高甘蔗品质, 对比无秸秆覆盖处理, 粉垄耕作下秸秆覆盖后显著提高了甘蔗蔗汁视纯度, 并且宿根蔗纤维分、蔗汁锤度、转光度和蔗糖分均有提升。综上认为, 免耕秸秆覆盖可作为粉垄红壤坡耕地蔗田保护性生产调控方式。

**关键词:** 保护性耕作, 秸秆覆盖, 土壤优先流, 甘蔗根系, 粉垄耕作

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2022)11-1854-11

## Effects of protected sugarcane field on soil preferential flow and root biomass and yield quality of sugarcane

收稿日期: 2021-03-28

基金项目: 国家自然科学基金 (41661074); 广西“新世纪十百千人才工程”专项 (2018221); 广西创新驱动重大专项 (桂科 AA17204037-3); 广西农业科学院创新团队项目 (桂农科 2018YT08, 桂农科 2021YT040) [Supported by National Natural Science Foundation of China (41661074); Special Fund for Guangxi “New Century Ten Hundred Thousand Talent Project” (2018221); Innovation of Guangxi Driven Project (AA17204037-3); Innovation Team Project of Guangxi Academy of Agricultural Sciences (2018YT08, 2021YT040)].

第一作者: 黄俞铭 (1995-), 硕士研究生, 研究方向为农业资源管理与利用, (E-mail) 562866447@qq.com。

\*通信作者: 胡钧铭, 博士, 研究员, 研究方向为农业有机资源利用与生境调控及逆境生态, (E-mail) jmhu06@126.com。

HUANG Yuming<sup>1,2</sup>, LUO Weigang<sup>3</sup>, HU Junming<sup>2\*</sup>, WEI Xianghua<sup>1</sup>, HUANG Jiaqi<sup>1,2</sup>,  
CHEN Shilin<sup>1,2</sup>, MENG Yancheng<sup>2</sup>, YU Yuefeng<sup>2</sup>, LI Tingting<sup>2</sup>, ZHANG Junhui<sup>2</sup>,  
ZHOU Huirong<sup>2</sup>, HUANG Zhonghua<sup>3</sup>, WEI Benhui<sup>4</sup>, CHEN Yuan<sup>4</sup>

( 1. Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530004; 2. Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007; 3. Nanning Irrigation Experiment Station, Nanning 530001; 4. Cash Crop Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530073 )

**Abstract:** In order to investigate the effects of conservation tillage on the soil and sugarcane growth in sugarcane field, the study set up two farming methods (conventional farming, smash ridging) and two fertilization levels (reduced fertilization by 20%, conventional fertilization), and covered leguminous straw near the roots between sugarcane rows after the sugarcane seedling stage, taking the second-year stubble cane as the object. The dyeing tracer method was used to determine the characteristics of preferential flow in the sugarcane field under straw mulching, and the study also determined and analyzed sugarcane plant height, stem circumference, underground root biomass, yield and quality and other important agronomic characteristics. The results were as follows: (1) The soil preferential flow in the sugarcane field under the smash ridging was fast and active. The addition of straw mulch reduced the degree of soil preferential flow, increased the lateral transport capacity of soil moisture in the 10–25 cm soil layer, and improved the soil water storage capacity to a certain extent. (2) Conservation tillage of smash ridging under straw mulching improved the root biomass and yield of sugarcane. The root biomass of no-tillage stubble cane under straw mulching increased by 8.97%–25.54%. Compared without straw mulching, the biomass of the underground root system during the elongation period of the straw mulching stubble cane increased by 4.2%–13.1% under the reduced fertilization treatment; In the weight loss treatment, the sugarcane yield increased by 16.27% under adding straw mulch and smash ridging coupling, and compared with conventional fertilization without straw mulching, the yield increased by 5.95% under adding straw mulching. (3) Smash ridging conservation tillage was beneficial to improve the quality of sugarcane. Compared with the treatment without straw mulching, the straw mulching under smash ridging tillage significantly improved the apparent purity of sugarcane juice, and the fiber, brix, pol and sucrose content were all improved. In summary, no-tillage straw mulching can be used as a protective production regulation method for sugarcane fields in smash ridging red soil slope farmland.

**Key words:** conservation tillage, straw mulching, soil preferential flow, sugarcane root system, smash ridging

坡耕地是南方红壤旱地重要耕地类型之一, 土壤质地经长期自然演化形成酸、瘦、粘等典型特征(赵其国等, 2013)。受化肥集约化农业生产影响, 耕地板结、耕层浅薄、地力下降越发严重, 同时受亚热带季节性降雨影响, 造成裸露坡耕地水土流失, 坡耕地土壤环境退化已影响到耕地质量和农作物生产(金慧芳等, 2018)。因此, 稳定提升坡耕地土壤质量和农业生产力具有重要意义。

土壤优先流是土壤水和溶质通过土壤大孔隙等向土壤深层快速运移的非均匀流动现象(王伟等, 2010), 优先流的发生使溶质随水分快速向土壤深层入渗, 造成水肥流失(盛丰等, 2016), 同时

也是土壤侵蚀与水土流失等自然灾害的诱发因子之一(吕刚等, 2018), 陈晓冰等(2019)对不同作物田间优先流比较研究发现, 玉米地优先流发育程度最高。保护性耕作作为一项农业可持续生产技术, 通过免少耕或地表覆盖等措施减少土壤侵蚀, 其中秸秆覆盖是一种典型的保护性耕作生产措施, 已在水稻、小麦、大豆、烤烟等不同作物生产上得到应用(Liu et al., 2012; 董云云等, 2020; 吕凯和吴伯志, 2020), 可以增加地表糙度, 减少地面径流形成, 降低雨水对表层土壤的冲刷和侵蚀(Jordán et al., 2010; 郭强等, 2019)。

耕地保护是实现我国社会经济可持续发展的

一项基本国策,高质量的耕地对我国农业生产极为重要,土壤利用必须坚持与土壤保护同步(赵其国等,2006)。随着城市化进程的加快,人们对耕地土壤的侵占以及对糖品质需求的不断提升,保护并提升坡耕地土壤质量,对稳定甘蔗生产具有重要的经济价值和生态价值。近年来,粉垄耕作被广泛用于甘蔗生产,粉垄耕作将土壤垂直旋磨粉碎,打破土壤犁底层,实现土壤定向扰动,改变土壤结构、水分分布,进而影响土壤肥力和甘蔗生长。有关粉垄耕作后茬免耕保护地蔗田土壤结构及土壤侵蚀的影响有待深入研究。

甘蔗是我国南方红壤旱地与坡耕地的重要糖料经济作物(Jonathan et al., 2005)。蔗叶还田有利于保持土壤水分和温度,促进甘蔗萌芽、分蘖及发株,增强甘蔗抗倒伏能力(周林等,2004),但受蔗叶表面蜡质保护层影响,土壤自然腐解困难,影响耕作生产。豆科绿肥和豆科作物秸秆易于腐解,便于直接覆盖还田,是一种较为理想覆盖型保护耕作生产方式(胡钧铭等,2018)。本研究通过保护并优化坡耕地土壤结构,在粉垄发源地南宁,试验地为典型坡耕地,依靠自然降雨作为灌溉条件,以连续秸秆覆盖第2年免耕宿耕蔗田及甘蔗为对象,开展秸秆覆盖对粉垄免耕宿耕蔗田土壤优先流影响特征的研究,探明秸秆覆盖对粉垄雨养甘蔗株高、茎围、生物量及糖品质的影响,以期高产高糖双高甘蔗以及保护地蔗田土壤结构优化提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验于2018—2019年在南宁市隆安县那桐镇(107°21′—108°6′E, 22°51′—23°21′N)进行,试验地为典型坡耕地(坡度8°~10°)雨养甘蔗区,土壤质地为红壤黏粒土壤,土壤pH 4.2,年均降雨量为1400 mm,有机质为19.9 g·kg<sup>-1</sup>,全氮为1.33 g·kg<sup>-1</sup>,全磷为0.555 g·kg<sup>-1</sup>,全钾为9.98 g·kg<sup>-1</sup>,速效钾为77.7 mg·kg<sup>-1</sup>。田间数据为第2年宿根保护地蔗田,采集时间为2019年3月25日(苗期)、5月15日(分蘖期)、8月20日(伸长期)和12月5日(成熟期)。

### 1.2 试验设计和田间管理

采用随机区组设计,设粉垄耕作(SR)与常规耕作(CT)2种耕作模式,粉垄耕作利用螺旋型垂直钻头横向切割土壤,打破土壤犁底层,耕作深度为40~50 cm,一次性完成自然悬浮成垄。常规耕作采用常规耕作措施,耕作深度为15~20 cm。2种耕作方式中,同时设置常规施肥和减量20% 2种施肥方式。常规施肥,即采用三元复合肥(氮:磷:钾为16:16:16)2250 kg·hm<sup>-2</sup>,分2次施用,其中前期底肥占70%,后期大培土追施占30%。减量20%施肥,即采用三元复合肥(氮:磷:钾为16:16:16)1800 kg·hm<sup>-2</sup>,分2次施用,其中前期底肥占70%,后期大培土追施占30%。2种施肥方式中,设置秸秆覆盖和无秸秆覆盖处理,宿根蔗苗期将大豆秸秆按2252 kg·hm<sup>-2</sup>覆盖在甘蔗行间近根部30 cm,大豆秸秆干基含N 1.630%、P 0.170%、K 1.857%。试验共设8个处理,3次重复,每小区面积87.75 m<sup>2</sup>。大豆秸秆田间腐解特性以及2018—2019年降雨量如图1所示,各处理具体设置见表1。试验供试甘蔗品种为桂糖42号,采用双芽蔗种,沿种植方向按“品”字型摆种,每公顷下种量为6万个双芽苗。田间管理按广西双高甘蔗生产进行。

### 1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤优先流测定 在每个处理小区内选取一处土壤优先流观测点,将土壤表面枯枝落叶层缓慢清除,并垂直砸入长、宽均为50 cm,高40 cm的金属框,砸入深度为20 cm。选择前5 d内无降雨发生的样地,避免土壤含水量差异影响优先流的观测。样地预处理后,配置浓度为5 g·L<sup>-1</sup>的亚甲基蓝溶液10 L,以200 mL·min<sup>-1</sup>的速度将溶液均匀喷洒于样方内,为防止降雨影响,溶液喷洒结束后将一层薄膜覆于金属样方,24 h后将薄膜掀开,对染色区域进行挖掘,垂直于种植方向每10 cm纵向垂直挖掘4个40 cm×50 cm的土壤剖面,剖面修整完毕后用数码相机进行拍摄。拍摄图像使用Photoshop CS6软件处理,将染色区域变为黑色,未染色区域变为白色。将处理后的黑白图像导入Image Pro Plus 6.0软件中进行图像分析计数,将图像转换为0(黑色像素)和255(白色像素)组成的二值数据矩阵,并将其导入Excel中,计算

同一行中黑色像素个数占总数的百分比,即为土壤剖面染色面积比。

1.3.2 甘蔗农艺性状及糖品质测定 在试验第2年保护地甘蔗各个生长发育期(苗期、分蘖期、伸长

期、成熟期)测定甘蔗株高、茎围,2019年9月15日和12月1日取样测量各处理甘蔗的地上生物量、地下生物量,2019年12月6日砍收甘蔗,测产量、甘蔗蔗糖分、甘蔗纤维分、蔗汁锤度、蔗汁视纯度。

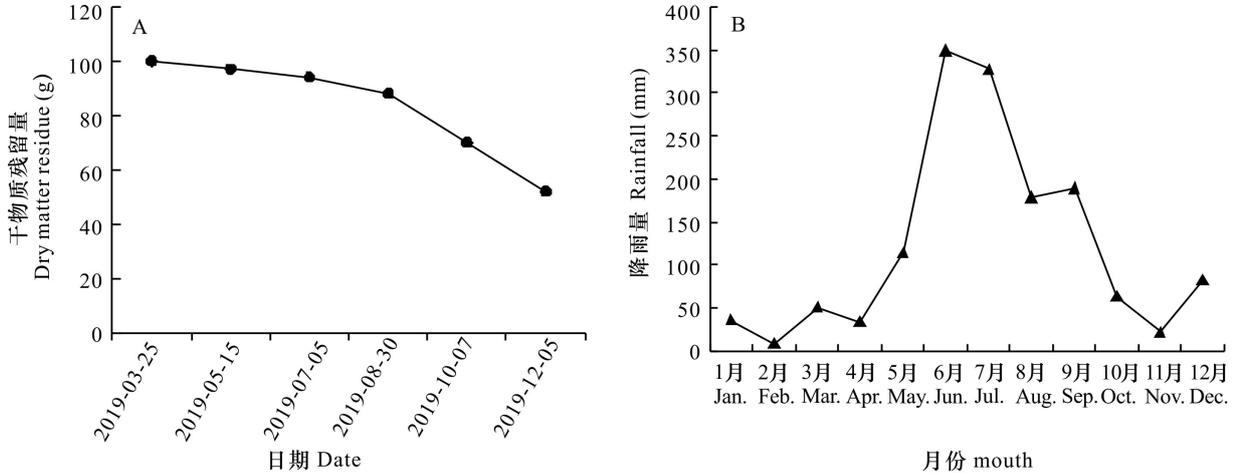


图1 大豆秸秆干物质腐解特征以及2018—2019年降雨量

Fig. 1 Decomposition characteristics of soybean straw dry matter and rainfall in 2018—2019

表1 试验处理设置

Table 1 Description of different treatments

耕作方式 Tillage style	减量施肥 20% Reducing fertilization by 20%		常规施肥 Conventional fertilization	
	无秸秆覆盖 No straw cover	秸秆覆盖 Straw cover	无秸秆覆盖 No straw cover	秸秆覆盖 Straw cover
常规耕作 Conventional tillage (CT)	CT1-1	CT1-2	CT2-1	CT2-2
粉垄耕作 Smash ridging (SR)	SR1-1	SR1-2	SR2-1	SR2-2

## 1.4 数据分析和处理

应用 IBM SPSS Statistics 19.0 软件分析,用 LSD 法进行多重比较,差异显著性水平为  $P < 0.05$ ,采用 Microsoft Excel 2007 制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆覆盖对粉垄保护地蔗田土壤优先流的影响

由于每个处理均有4个土壤染色剖面,总计32个土壤染色剖面,因此选择各个处理中1个比较具有代表性的剖面进行展示。由图2可知,常

规耕作蔗田土壤染色主要集中在表层0~20 cm 深度范围内,粉垄耕作蔗田土壤垂直剖面染色深度均大于20 cm,说明粉垄耕作提高了深层土壤的水分入渗能力。常规耕作下,垂直剖面染色区域连片横向分布,染色面积达80%以上,说明常规耕作蔗田土壤水分入渗形式主要以基质流为主。粉垄耕作下20~50 cm 土层范围内的剖面染色呈零星分布,染色部分呈树枝分布形态,说明粉垄耕作蔗田土壤基质流和优先流伴随发生。

由图2可知,减量施肥处理中,常规耕作下秸秆覆盖蔗田土壤染色面积大于无秸秆覆盖,说明常规耕作下减量施肥处理后添加秸秆覆盖能提高土壤水分入渗能力。粉垄耕作下秸秆覆盖蔗田土壤染色深度小于无秸秆覆盖,并且秸秆覆盖后蔗田土壤染色区域以大面积块状为主,染色区域比较集中,说明粉垄耕作下减量施肥处理后添加秸秆覆盖在一定程度上限制了土壤优先流的发生,使蔗田土壤水分集中在10~20 cm 土层范围进行横向运移。

由图2可知,常规施肥处理中,常规耕作下秸秆覆盖蔗田土壤染色面积小于无秸秆覆盖,并且染色区域集中于一侧,而无秸秆覆盖蔗田土壤0~10 cm 土层范围染色区域分布较均匀,连通性较

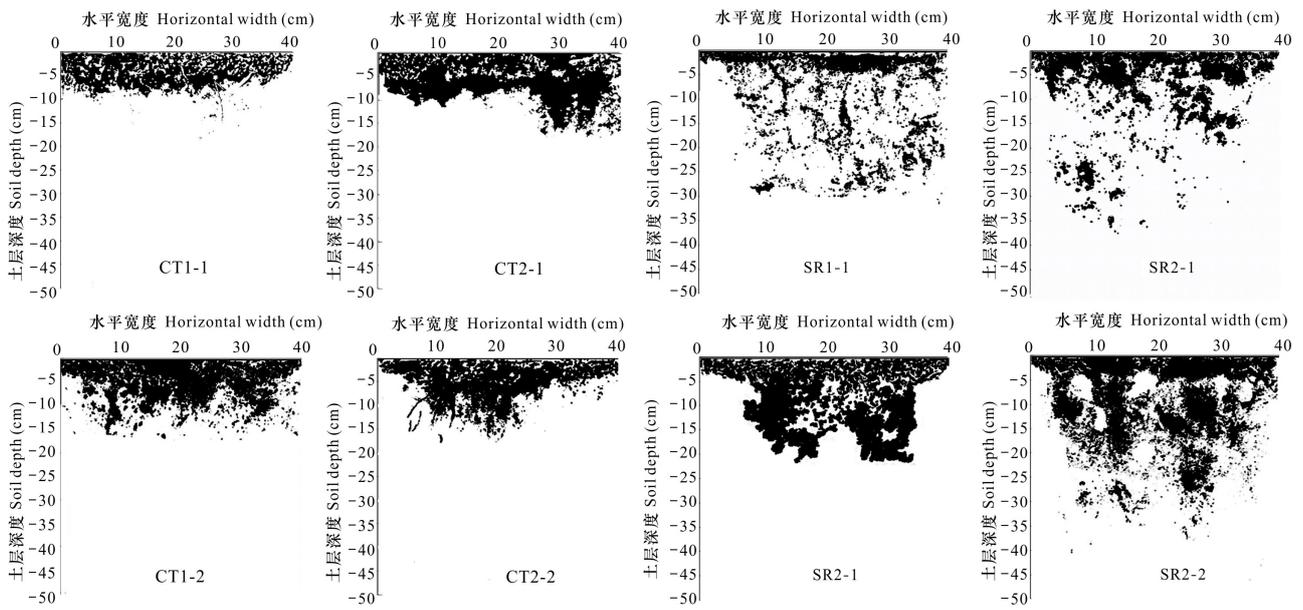


图 2 不同处理土壤优先流垂直分布图像

Fig. 2 Vertical distribution images of soil preferential flow under different treatments

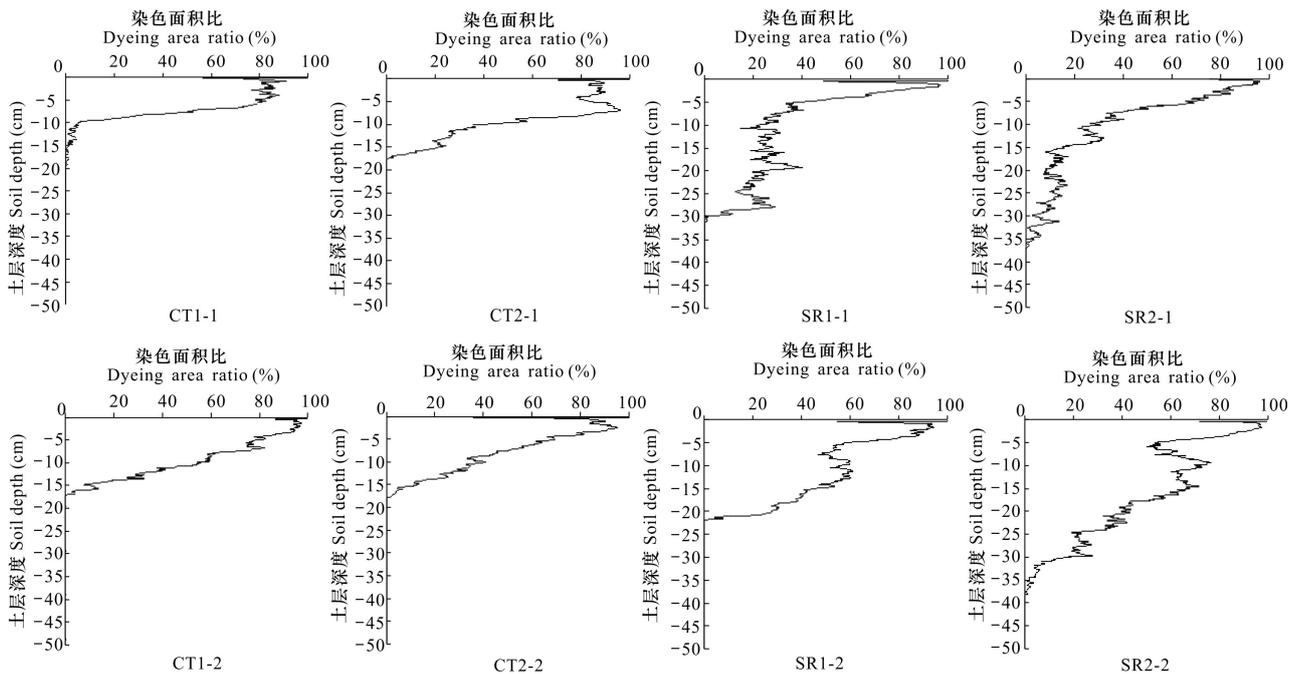


图 3 不同处理土壤剖面染色面积比

Fig. 3 Dyeing area ratio of different treatment soil profiles

好,说明常规施肥处理中,秸秆覆盖后会在一定程度上堵塞蔗田土壤表层孔隙,影响水分下渗。粉垄耕作下秸秆覆盖蔗田土壤染色面积大于无秸秆覆盖,并且 10~25 cm 土层范围内出现大面积均匀染色,呈现左右连通性较高的入渗通道,水分先横

向运移再以优先流形式向下入渗,说明常规施肥处理中,秸秆覆盖后增加了蔗田耕层土壤的孔隙度,有利于水分向下运移,增强土壤的储水能力。

分析并对比各处理土壤剖面染色面积(图 3),粉垄耕作方式下,无秸秆覆盖处理土壤染色面积

比随土壤深度的增加而减少,其中减量施肥处理和常规施肥处理土壤深度大于 7 cm 后染色面积比降低至 40% 及以下,并且 10 cm 土层以下减量施肥处理土壤染色面积比大于常规施肥处理。粉垄耕作下添加秸秆覆盖后土壤剖面染色面积比随土层深度的增加,总体呈现先减少后增加再减少的趋势,其中 10~20 cm 土层染色面积比增加,并且减量施肥处理中添加秸秆覆盖后土壤剖面染色深度减少。常规耕作方式下,无秸秆覆盖处理 0~8 cm 土层范围内,土壤染色面积比随土层深度的增加呈增减反复趋势,总体面积比在 80% 以上,说明土壤 0~8 cm 范围内的土壤水分以基质流的形式发生入渗,在 10 cm 土层深度染色面积比迅速减少,并且在 16~20 cm 土层范围内土壤染色停止。常规耕作下添加秸秆覆盖后土壤基质流深度虽降低,但随着土层深度增加,土壤剖面染色面积比减少趋势较为缓慢,对比同一处理中无秸秆覆盖,同一土层深度中秸秆覆盖后土壤染色面积比大于无秸秆覆盖,间接反映了水分在土壤中横向运移活动得到增强。

基质流深度间接反映了土壤优先流的发生速度。由图 3 可知,与常规耕作相比,粉垄耕作下土壤基质流深度减少,土壤优先流发生较快,并且土壤剖面染色深度较深,说明粉垄耕作提高了土壤渗透率,水分向深层土壤运移。在粉垄耕作下,对比无秸秆覆盖,添加秸秆覆盖后土壤剖面染色面积比减少趋势较平缓,同一土层染色面积比较大,结合上文对土壤优先流垂直分布图像的分析,说明秸秆覆盖提高了土壤水分横向运移能力。

## 2.2 秸秆覆盖对粉垄保护地甘蔗地下根系生物量的影响

由表 2 可知,粉垄耕作下,同一处理中,秸秆覆盖甘蔗伸长期与成熟期地上生物量与无秸秆覆盖无明显差异。粉垄耕作下甘蔗伸长期、成熟期地上生物量均大于同一处理常规耕作,分别提高了 4.22%~41.55%、0.66%~37.55%。常规耕作下,各处理甘蔗伸长期地上生物量由高到低依次为 CT1-2 (2.086 kg)、CT2-2 (1.872 kg)、CT1-1 (1.838 kg)、CT2-1 (1.656 kg),秸秆覆盖较无秸秆覆盖,地上生物量增加了 13.04%~13.49%;各处理甘蔗成熟期地上生物量由高到低依次为 CT1-2

(2.591 kg)、CT2-2 (2.304 kg)、CT2-1 (2.034 kg)、CT1-1 (1.835 kg),秸秆覆盖较无秸秆覆盖,地上生物量增加了 13.27%~41.20%,说明常规耕作下秸秆覆盖有利于促进甘蔗地上生物量增加。

由表 2 可知,同一处理中,粉垄耕作下甘蔗伸长期的地下根系生物量均高于常规耕作,并且秸秆覆盖甘蔗伸长期地下根系生物量均高于同一处理中无秸秆覆盖,常规耕作下秸秆覆盖较无秸秆覆盖甘蔗伸长期地下根系生物量增加了 2.17%~18.18%,粉垄耕作下秸秆覆盖较无秸秆覆盖甘蔗伸长期地下根系生物量增加了 2.07%~25.54%,其中减量施肥处理添加秸秆覆盖显著提高了甘蔗伸长期地下根系生物量,说明秸秆覆盖有利于促进甘蔗伸长期根系生长。甘蔗成熟期时,粉垄耕作下甘蔗地下根系生物量高于常规耕作且差异显著,其中常规施肥处理中,粉垄耕作下添加秸秆覆盖甘蔗地下根系生物量显著高于常规耕作。同一处理中,秸秆覆盖伸长期至成熟期甘蔗根系占比分别增加了 -5.29%、45.90%、-0.83%、17.17%,无秸秆覆盖伸长期至成熟期甘蔗根系占比分别增加了 31.07%、35.39%、28.44%、17.97%。综上可知,甘蔗根系的生长受土壤温度和土壤湿度的影响较大,秸秆覆盖为甘蔗根部提供了湿润的微环境,在一定程度上使甘蔗提前进入成熟期,根系吸收的养分主要供给甘蔗地上部。

## 2.3 秸秆覆盖对粉垄保护地甘蔗主要农艺性状及产量的影响

由图 4 可知,同一处理中,甘蔗苗期和分蘖期的株高基本一致,且秸秆覆盖后的甘蔗株高与无秸秆覆盖的甘蔗株高无显著差异。同一处理中,粉垄耕作下甘蔗伸长期株高均高于常规耕作,粉垄耕作下甘蔗伸长期株高由高到低依次为 SR2-1 (231.4 cm)、SR2-2 (228.0 cm)、SR1-1 (219.8 cm)、SR1-2 (217.0 cm),对比同一处理中常规耕作增加 12.7%~34.7%。常规耕作下,甘蔗伸长期株高由高到低依次为 CT1-2 (192.6 cm)、CT1-1 (187.6 cm)、CT2-2 (178.2 cm)、CT2-1 (171.8 cm),秸秆覆盖甘蔗伸长期株高比无秸秆覆盖增加了 2.7%~3.7%。同一处理中,除常规耕作下常规施肥处理 (CT2) 外,各处理中秸秆覆盖甘蔗成熟期株高均高于无秸秆覆盖,株高增加了 4.2%~13.1%,其中常

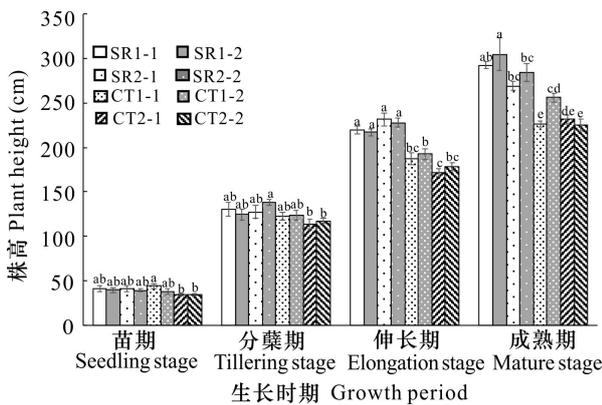
表 2 甘蔗伸长期、成熟期地下和地上生物量

Table 2 Underground and aboveground biomasses of sugarcane during elongation and mature stages

区组 Deal with	甘蔗伸长期 Sugarcane elongation stage				甘蔗成熟期 Sugarcane maturity stage			
	地上生物量 Aboveground biomass (kg)	地下根系 生物量 Root biomass (kg)	总生物量 Total biomass (kg)	根系占比 Root ratio (%)	地上生物量 Aboveground biomass (kg)	地下根系 生物量 Root biomass (kg)	总生物量 Total biomass (kg)	根系占比 Root ratio (%)
SR1-1	2.208ab	0.184bc	2.392	7.69	2.524ab	0.283a	2.807	10.08
SR1-2	2.174b	0.231a	2.405	9.60	2.608ab	0.261ab	2.869	9.10
SR2-1	2.344a	0.145c	2.489	5.83	2.721a	0.233bc	2.954	7.89
SR2-2	2.234ab	0.158c	2.392	6.61	2.548ab	0.254ab	2.802	9.06
CT1-1	1.838c	0.176bc	2.014	8.74	1.835d	0.232bc	2.067	11.22
CT1-2	2.086b	0.208ab	2.294	9.07	2.591ab	0.256ab	2.847	8.99
CT2-1	1.656c	0.138c	1.794	7.69	2.034cd	0.203c	2.237	9.07
CT2-2	1.872c	0.152c	2.024	7.51	2.304bc	0.206c	2.510	8.21

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ( $P < 0.05$ ). The same below.



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ( $P < 0.05$ ). The same below.

图 4 不同处理宿根蔗株高

Fig. 4 Plant height of stubble cane under different treatments

规耕作下减量施肥处理秸秆覆盖 (CT1-2) 比无秸秆覆盖 (CT1-1) 增加了 13.1%, 达到显著性差异水平 ( $P < 0.05$ ), 说明秸秆覆盖有利于甘蔗株高的增长。

由图 5 可知, 各处理甘蔗苗期茎围基本一致。同一处理中, 粉垄耕作下甘蔗分蘖期茎围均明显

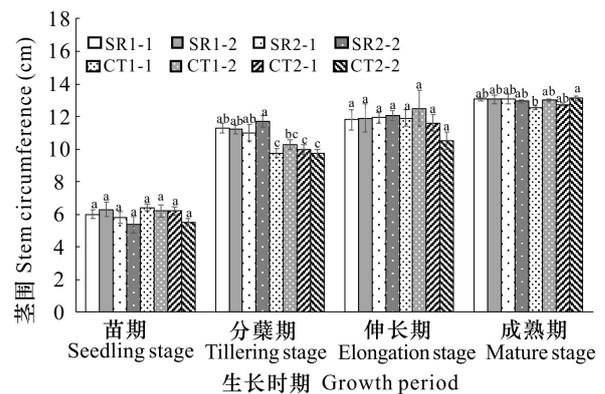


图 5 不同处理宿根蔗茎围

Fig. 5 Stem circumference of stubble cane under different treatments

高于常规耕作, 并且秸秆覆盖后的甘蔗茎围与无秸秆覆盖的甘蔗茎围无显著差异。甘蔗伸长期和成熟期中, 各处理间甘蔗茎围无显著差异, 说明秸秆覆盖对甘蔗茎围增粗无影响。

甘蔗单茎重是甘蔗产量的重要指标之一。由表 3 可知, 同一处理中, 粉垄耕作较常规耕作, 甘蔗单茎重提高了 1.79% ~ 50.33%, 其中常规施肥处理中, 粉垄耕作下甘蔗单茎重显著大于常规耕作, 有效茎数增加了 2.44% ~ 20.51%, 甘蔗产量增

表 3 不同处理下甘蔗产量

Table 3 Sugarcane yield under different treatments

处理 Deal with	单茎重 Single stem weight (kg)	密度 Density (plant · m <sup>-2</sup> )	有效 茎数 Millable stalks (plant · m <sup>-2</sup> )	理论 产量 Thretical yield (t · hm <sup>-2</sup> )	实际 产量 Actual yield (t · hm <sup>-2</sup> )
SR1-1	2.07±0.08bc	6.2	3.9	80.73	98.95
SR1-2	2.27±0.05ab	5.7	4.2	114.24	115.05
SR2-1	2.30±0.03a	6.8	4.7	108.10	108.59
SR2-2	2.30±0.05a	6.3	4.1	94.30	106.99
CT1-1	2.00±0.03cd	5.2	3.5	70.00	67.26
CT1-2	2.23±0.11ab	4.8	3.7	82.51	98.33
CT2-1	1.83±0.08d	5.6	3.9	71.37	70.11
CT2-2	1.53±0.07e	5.1	4.1	62.73	68.97

加了 6.83%~55.13%。粉垄耕作下甘蔗每公顷实际产量由高到低依次为 SR1-2(115.05 t)、SR2-1(108.59 t)、SR2-2(106.99 t)、SR1-1(98.95 t),减量施肥处理中,秸秆覆盖较无秸秆覆盖,甘蔗产量提高了 16.27%。粉垄耕作下,减量施肥处理较常规施肥处理,甘蔗产量降低了 9.74%且达到显著差异水平。而减量施肥处理中添加秸秆覆盖较常规施肥中无秸秆覆盖,产量提高了 5.95%。常规耕作下,减量施肥处理中,秸秆覆盖较无秸秆覆盖,甘蔗产量提高了 46.19%,说明减量施肥处理下添加秸秆覆盖能够达到增产的效果。

#### 2.4 秸秆覆盖对粉垄保护地甘蔗品质的影响

甘蔗的糖品质主要从蔗汁视纯度、纤维分、蔗汁锤度和商业糖分 (commercial cane sugar, CCS) 等方面体现。由表 4 可知,各个处理的甘蔗视纯度在 84.12%~88.55%之间,与常规耕作相比,粉垄耕作下甘蔗蔗汁视纯度提高了 0.1%~3.7%,其中减量施肥处理和常规施肥处理中添加秸秆覆盖后,粉垄耕作下蔗汁视纯度显著高于常规耕作,并且同一处理中秸秆覆盖较无秸秆覆盖蔗汁视纯度提高了 0.7%~4.3%。甘蔗纤维分在 14.11%~14.99%之间,与常规耕作相比,粉垄耕作下甘蔗纤维分提高了 0.8%~5.0%,并且同一处理中秸秆覆盖较无秸秆覆盖甘蔗纤维分提高了 1.1%~3.3%。蔗汁锤度在 22.27%~23.87%之间,与常规耕作相比,粉垄耕作下蔗汁锤度提高了 3.6%~6.1%,并且同一处理中秸秆覆盖较无秸秆覆盖蔗汁锤度提

高了 0.4%~3.3%,各处理间蔗汁锤度差异不显著。转光度在 20.02%~21.41%之间,同一处理中秸秆覆盖较无秸秆覆盖转光度提高了 0.8%~2.7%,蔗汁蔗糖分在 20.77%~22.62%之间,同一处理中秸秆覆盖较无秸秆覆盖转光度提高了 3.0%~6.5%。说明粉垄耕作和秸秆覆盖均对提高甘蔗糖品质有促进作用。

## 3 讨论与结论

### 3.1 保护地蔗田对土壤优先流的影响

土壤染色示踪法反映了不同处理田间土壤水分的入渗形式,通过对染色形态图像进行分析,揭示不同耕作下秸秆覆盖后坡耕地土壤优先流分布特征(van Schaik, 2009)。陈晓冰等(2019)利用染色示踪法发现,蔗田土壤优先流程度与土壤垂直联通孔隙数量有关。本研究发现,粉垄耕作下土壤优先流程度大于常规耕作,可能是因为粉垄耕作深度大于常规耕作,螺旋型垂直钻头将 0~50 cm 土壤旋磨细碎,有效降低了土壤容重,增加了总孔隙度,从而提高了土壤水分入渗能力,这与李轶冰等(2013)研究结果一致。白永会等(2017)研究发现,秸秆覆盖在增加土壤入渗速率的同时,减少了降雨对表土冲击造成的侵蚀和结皮率。而本研究发现,常规耕作方式下添加秸秆覆盖影响了土壤基质流深度,土壤优先流发生较快,在一定程度上提高了土壤水分入渗能力。本研究还发现,粉垄耕作下,减量施肥处理中添加秸秆覆盖后土壤垂直剖面染色深度减少,10~20 cm 土层范围染色面积增大,限制深层土壤优先流发生的同时,增加土壤水分横向运移能力,提高了土壤保水、保肥能力,而常规施肥处理中添加秸秆覆盖后深层土壤优先流发生程度和分化程度较高,存在水肥流失风险,可能是因为不同的施肥方式下土壤孔隙发育程度不同,秸秆腐解后在一定程度上影响了土壤大孔隙,从而削弱土壤优先流程度,这与汪金舫等(2009)、王珍和冯浩(2009)研究结果一致。

### 3.2 保护地蔗田对甘蔗根系生物量及产量的影响

秸秆覆盖粉垄免耕保护地耕作促进了甘蔗根系生长,增加了地下和地上的生物量。甘蔗株高和茎围是决定甘蔗产量的主要构成因素(刘鲁峰

表 4 不同处理下甘蔗成熟期糖的品质

Table 4 Sugar quality of sugarcane at mature stage under different treatments

区组 Deal with	蔗汁视纯度 Purity (%)	纤维分 Fiber (%)	蔗汁锤度 Brix (%)	转光度 Pol (%)	商业糖分 CCS (%)	蔗汁蔗糖分 Sucrose (%)
SR1-1	85.70±0.27bc	14.41	23.10±0.21a	20.18	14.71	20.91
SR1-2	88.55±0.52a	14.89	23.87±0.90a	20.72	15.20	21.51
SR2-1	84.21±0.60c	14.71	23.63±0.22a	21.21	15.18	21.24
SR2-2	87.87±1.06ab	14.99	23.73±0.41a	21.41	15.43	22.62
CT1-1	84.96±1.11c	14.29	22.30±0.59a	20.02	14.57	20.77
CT1-2	85.59±0.77bc	14.53	22.80±0.15a	20.17	14.69	21.68
CT2-1	84.12±1.13c	14.11	22.27±0.58a	20.21	14.35	21.10
CT2-2	84.74±0.67c	14.27	22.87±0.71a	20.55	14.53	21.74

等,2020),汪金舫等(2009)研究表明秸秆还田能改善土壤物理性状,降低土壤容重,增加总孔隙度和毛管孔隙度,改善土壤肥力。本研究结果表明,粉垄耕作较常规耕作,甘蔗株高增加了 12.67%~34.69%,甘蔗产量增加了 6.83%~55.13%,其中减量施肥处理中,粉垄耕作添加秸秆覆盖甘蔗产量提高了 16.27%,且添加秸秆覆盖较常规施肥中无秸秆覆盖,产量提高了 5.95%,常规耕作添加秸秆覆盖甘蔗产量提高了 46.19%。本研究还发现,粉垄耕作下秸秆覆盖较无秸秆覆盖甘蔗伸长期地下根系生物量增加了 8.97%~25.54%。这可能因为添加秸秆覆盖后避免降雨对土壤表层的直接冲刷而造成土壤结构被破坏,减少了水土流失(刘红梅等,2020;张统帅等,2020),同时秸秆腐解提高了土壤有机质含量,为甘蔗根系发育提供了良好的土壤微环境(李卓等,2009),甘蔗根系发达有利于提高了水肥利用率,从而促进甘蔗生长提高产量。本研究中,秸秆覆盖成熟期甘蔗根系占比增加最高达 37.24%,无秸秆覆盖成熟期甘蔗根系占比增加最高达 35.39%,可能是因为秸秆覆盖改善了甘蔗根际土壤水、肥、气、热状况,提高根系活性,促进伸长期根系生长,并在甘蔗成熟期根系吸收的水分和养分主要供给地上部生长发育。而无秸秆覆盖,土壤表层水分自然蒸发较多,在一定程度上造成干旱,由于根系的向地性和向水性(李鸿博等,2019),因此根系向深层土壤生长以吸收土壤深层的水分(赵丽萍等,2019)。

### 3.3 保护地蔗田对甘蔗糖品质的影响

影响甘蔗糖分及品质形成因素有多种,其中自然降雨对甘蔗糖分的影响较大(陈迪文等,2020)。甘蔗糖品质主要从蔗汁视纯度、纤维分、蔗汁锤度和商业糖分等方面体现(陈月桂等,2007)。本研究中,粉垄耕作和秸秆覆盖均能有效提高甘蔗品质,其中同一耕作方式下,秸秆覆盖较无秸秆覆盖,甘蔗纤维分提高了 1.1%~3.3%,蔗汁锤度提高了 0.4%~3.3%,转光度提高了 0.8%~2.7%,蔗汁蔗糖分提高了 3.0%~6.5%,说明粉垄耕作下宿根蔗在秸秆覆盖有利于糖分积累,提高甘蔗糖品质,这可能因为免耕宿根蔗在秸秆覆盖条件下利于蓄水保墒,根系快发优势明显利于甘蔗生长和糖分累积(姚全等,2007),同时秸秆覆盖不仅保持了地表土壤湿度,而且对降雨形成的地表径流有拦截作用,延长水分下渗时间,有利于自然降水资源利用,提高了甘蔗蔗糖累积效率。

粉垄耕作方式下秸秆覆盖降低深层土壤优先流发生,提高深层土壤水分横向运移能力,利于 10~25 cm 土层蓄水,促进甘蔗根系生长,提高甘蔗根系对水肥的利用率,从而增加甘蔗产量和提高糖品质。免耕秸秆覆盖可作为粉垄红壤坡耕地蔗田一种重要的保护性生产调控方式。

### 参考文献:

CHEN XB, YAN L, LI ZD, et al., 2019. Tillage pattern effects

- on characteristics of soil preferential flow in sugarcane fields in the karst region [J]. *Soils*, 51(4): 786-794. [陈晓冰, 严磊, 李振东, 等, 2019. 耕作方式对岩溶区甘蔗地土壤优先流特征的影响 [J]. *土壤*, 51(4): 786-794.]
- CHEN YG, HUANG ZR, AN YX, et al., 2007. Analysis of main quality character indexes of sugarcane [J]. *Guangdong Agric Sci*, 34(9): 13-16. [陈月桂, 黄振瑞, 安玉兴, 等, 2007. 甘蔗主要品质性状指标分析 [J]. *广东农业科学*, 34(9): 13-16.]
- CHEN DW, WU GF, ZHOU WL, et al., 2020. Research progresses of sugar regulation factors and sugar-increasing application in sugarcane [J]. *Sugarcane Canesugar*, (3): 43-51. [陈迪文, 吴庚福, 周文灵, 等, 2020. 甘蔗糖分调控因素与增糖应用研究现状 [J]. *甘蔗糖业*, (3): 43-51.]
- DONG YY, WANG F, HAN JQ, et al., 2020. Effects of plastic film and straw mulching on soil moisture and soybean yield in dryland farmland [J]. *Res Soil Water Conserv*, 27(3): 364-371. [董云云, 王飞, 韩剑桥, 等, 2020. 地膜和秸秆覆盖对旱地农田土壤水分和大豆产量的影响 [J]. *水土保持研究*, 27(3): 364-371.]
- GUO Q, MO YW, TANG LQ, et al., 2019. Effects of sugarcane bagasse mulching and reduced fertilization on agronomic characters and quality of sugarcane [J]. *Guangxi Sugarcane Ind*, (3): 31-35. [郭强, 莫勇武, 唐利球, 等, 2019. 蔗渣还田和减量施肥对甘蔗农艺性状和品质的影响 [J]. *广西糖业*, (3): 31-35.]
- HU JM, HUANG ZH, LUO WG, et al., 2018. Effects of micro-sprinkler irrigation on soil water and nitrogen and yield under banana-mung bean intercropping [J]. *Guihaia*, 38(6): 710-718. [胡钧铭, 黄忠华, 罗维钢, 等, 2018. 蕉肥间作下微喷灌对蕉园土壤水氮动态及香蕉产量的影响 [J]. *广西植物*, 38(6): 710-718.]
- FOLEY JA, DEFRIES R, ASNER GP, et al., 2005. Global consequences of land use [J]. *Science*, 309(5734): 570-574.
- JORDÁN A, ZAVALA LM, GIL J, 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain [J]. *Catena*, 81(1): 77-85.
- JIN HF, SHI DM, CHEN ZF, et al., 2018. Evaluation indicators of cultivated layer soil quality for red soil slope farmland based on cluster and PCA analysis [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 34(7): 155-164. [金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等, 2018. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标 [J]. *农业工程学报*, 34(7): 155-164.]
- LÜ G, FU XY, LI YX, et al., 2018. Soil preferential flow characteristics under different land utilization styles in the reclaimed dump of Haizhou surface coal mine [J]. *J Nat Resour*, 33(1): 37-51. [吕刚, 傅昕阳, 李叶鑫, 等, 2018. 海州露天煤矿复垦排土场不同土地利用土壤优先流特征研究 [J]. *自然资源学报*, 33(1): 37-51.]
- LÜ K, WU BZ, 2020. Effects of straw mulching on nutrient loss from red soil and quality of flue-cured tobacco in sloping land [J]. *Soils*, 52(2): 320-326. [吕凯, 吴伯志, 2020. 秸秆覆盖对坡地红壤养分流失及烤烟质量的影响 [J]. *土壤*, 52(2): 320-326.]
- LIU LF, DI YN, XIE LY, et al., 2020. Effects of different fertilizer treatments on yield traits, sugar content and benefit of sugarcane [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 36(19): 25-31. [刘鲁峰, 狄义宁, 谢林艳, 等, 2020. 不同肥料处理对甘蔗产量性状、糖分及效益的影响 [J]. *中国农学通报*, 36(19): 25-31.]
- LI HB, CAI WJ, XIE YT, et al., 2019. Physiological responses of new sugarcane lines to drought stress and evaluation of their drought resistances [J]. *J S Chin Agric Univ*, 40(6): 51-58. [李鸿博, 蔡伟俊, 谢雨彤, 等, 2019. 甘蔗新品系对于旱胁迫的生理响应及抗旱性评价 [J]. *华南农业大学学报*, 40(6): 51-58.]
- LI YB, PANG HC, YANG X, et al., 2013. Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in Northern China's Huang-Huai-Hai Region [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(23): 7478-7486. [李铁冰, 逢焕成, 杨雪, 等, 2013. 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响 [J]. *生态学报*, 33(23): 7478-7486.]
- LIU HM, LI RY, GAO JJ, et al., 2020. Research progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates and microbiological characteristics [J]. *Ecol Environ Sci*, 29(6): 1277-1284. [刘红梅, 李睿颖, 高晶晶, 等, 2020. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物学特性的影响研究进展 [J]. *生态环境学报*, 29(6): 1277-1284.]
- LI Z, WU PT, FENG H, et al., 2009. Effects of soil clay particle content on soil infiltration capacity by simulated experiments [J]. *Agric Res Arid Areas*, 27(3): 71-77. [李卓, 吴普特, 冯浩, 等, 2009. 不同粘粒含量土壤水分入渗能力模拟试验研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 27(3): 71-77.]
- LIU Y, TAO Y, WAN KY, et al., 2012. Runoff and nutrient losses in *Citrus* orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China [J]. *Agric Water Manag*, 110: 34-40.
- SHENG F, ZHANG LY, WU D, 2016. Review on research theories and observation techniques for preferential flow in unsaturated soil [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 32(6): 1-

10. [盛丰, 张利勇, 吴丹, 2016. 土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展 [J]. 农业工程学报, 32(6): 1-10.]
- VAN SCHAIK NLMBV, 2009. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed [J]. *Catena*, 78(1): 36-47.
- WANG W, ZHANG HJ, CHENG JH, et al., 2010. Macropore characteristics and its relationships with the preferential flow in broadleaved forest soils of Simian Mountains [J]. *Chin J Appl Ecol*, 21(5): 1217-1223. [王伟, 张洪江, 程金花, 等, 2010. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系 [J]. 应用生态学报, 21(5): 1217-1223.]
- WANG JF, LIU YJ, LI BY, 2006. Effects of returning crop straw into Vertisol on the physical and chemical properties and availability of manganese, zinc, copper [J]. *Chin J Eco-Agric*, 14(3): 49-51. [汪金舫, 刘月娟, 李本银, 2006. 秸秆还田对砂姜黑土理化性质与锰、锌、铜有效性的影响 [J]. 中国生态农业学报, 14(3): 49-51.]
- WANG Z, FENG H, 2009. Study on the influence of different straw-returning manners on soil structure and characters of soil water evaporation [J]. *J Soil Water Conserv*, 23(6): 224-228. [王珍, 冯浩, 2009. 秸秆不同还田方式对土壤结构及土壤蒸发特性的影响 [J]. 水土保持学报, 23(6): 224-228.]
- YAO Q, FANG MZ, LUO CY, et al., 2007. Drought in autumn and winter having an influence on accumulating of cane sugar [J]. *Guangxi Sugarcane Canesugar*, (2): 23-27. [姚全, 方苗朱, 罗春毅, 等, 2007. 秋冬季干旱对甘蔗蔗糖分积累的影响 [J]. 广西蔗糖, (2): 23-27.]
- ZHAO QG, ZHOU SL, WU SH, et al., 2006. Cultivated land resources and strategies for its sustainable utilization and protection in China [J]. *Acta Pedol Sin*, 43(4): 662-672. [赵其国, 周生路, 吴绍华, 等, 2006. 中国耕地资源变化及其可持续利用与保护对策 [J]. 土壤学报, 43(4): 662-672.]
- ZHAO QG, HUANG GQ, MA YQ, 2013. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(24): 7615-7622. [赵其国, 黄国勤, 马艳芹, 2013. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策 [J]. 生态学报, 33(24): 7615-7622.]
- ZHOU L, GUO SY, CAI MY, 2004. Bio-industrial applications of sugarcane bagasse [J]. *Sugar Crop China*, 26(2): 40-42. [周林, 郭祀远, 蔡妙颜, 2004. 蔗渣的生物利用 [J]. 中国糖料, 26(2): 40-42.]
- ZHANG TS, YAN LJ, LI G, et al., 2020. Effects of no tillage and straw mulching on soil nitrogen, water content and yield of spring wheat in dryland farming area [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 32(8): 1329-1341. [张统帅, 闫丽娟, 李广, 等, 2020. 免耕和秸秆覆盖对旱作区土壤氮素、水分和春小麦产量的影响 [J]. 浙江农业学报, 32(8): 1329-1341.]
- ZHAO LP, LIU JY, ZHAO PF, et al., 2019. The impact of water stress on the growth of roots and above-ground parts in sugarcane [J]. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 45(1): 10-15. [赵丽萍, 刘家勇, 赵培方, 等, 2019. 水分胁迫对甘蔗根系及地上部生长的影响 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 45(1): 10-15.]

(责任编辑 蒋巧媛)