

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.018.

张硕, 王松, 张钰, 等. 广西地区甘蔗粉垄与旋耕耕作方式下土壤孔隙特征变化[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 221-229.

Zhang Shuo, Wang Song, Zhang Yu, et al. Changes in Soil Pore Characteristics Under Powder Ridge Tillage and Rotary Tillage in Sugarcane Field in Guangxi Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 221-229.

广西地区甘蔗粉垄与旋耕耕作方式下土壤孔隙特征变化

张硕¹, 王松², 张钰¹, 张红霞², 韦本辉³, 黄金生⁴, 甘磊^{1,2}

(1. 桂林理工大学 广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心,

广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004;

3. 广西农业科学院 经济作物研究所, 南宁 530007; 4. 广西农业科学院 农业资源与环境研究所, 南宁 530007)

摘要: [目的] 分析广西地区甘蔗地不同耕作方式下土壤孔隙结构特征参数的变化规律, 为粉垄技术的推广应用提供一定的理论依据。[方法] 选取经过 3 年粉垄 20 cm 耕作(F_{20})和旋耕 20 cm 耕作(X_{20})处理的两种不同耕作方式下的甘蔗地土壤作为研究对象, 同时利用 X 射线 CT 扫描技术并结合 ImageJ 等软件来获取土壤孔隙分布二维和三维特征的参数指标, 并对土壤孔隙结构进行了三维重构可视化。[结果] 两种耕作处理下均会对土壤二维和三维孔隙数量产生影响, 呈现较小孔隙高于较大孔隙的情况。 F_{20} 处理在二维及三维孔隙数量形成上要低于 X_{20} 处理, 但前者整体圆度均高于后者。 F_{20} 处理整体上土壤孔隙面密度远低于 X_{20} 处理, 但相同土层深度下前者土壤孔隙复杂度要高于后者。 F_{20} 处理的孔隙度和紧实度均值 (2.08%, 25.22) 低于 X_{20} 处理均值 (4.71%, 27.23) ($p < 0.05$), 但前者比表面积均值 (2.62 mm^{-1}) 高于 X_{20} 处理均值 (2.50 mm^{-1}) ($p < 0.05$)。两种处理下连通度均值无明显差异, 但 F_{20} 处理的弯曲度均值 1.42% 与 X_{20} 处理均值 1.45% 差异显著 ($p < 0.05$)。两种处理下分支长度密度差异较大, X_{20} 处理其均值 (115.87 mm/cm^3) 高于 F_{20} 处理均值 (50.41 mm/cm^3) ($p < 0.05$)。同时两种处理的三维重构上 F_{20} 处理孔隙分布较为均匀且甘蔗的主要生长区连通性孔隙分布要优于 X_{20} 处理。[结论] 相较传统旋耕而言, 在广西地区进行甘蔗种植的过程中, 粉垄耕作在土壤孔隙结构上更具优势性, 更有利于促进甘蔗根系生长, 提高甘蔗的产量。

关键词: 孔隙结构; CT 扫描; 三维重构; 粉垄耕作; 甘蔗地

中图分类号: S152; S566.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0221-09

Changes in Soil Pore Characteristics Under Powder Ridge Tillage and Rotary Tillage in Sugarcane Field in Guangxi Region

Zhang Shuo¹, Wang Song², Zhang Yu¹, Zhang Hongxia², Wei Benhui³, Huang Jinsheng⁴, Gan Lei^{1,2}

(1. Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin

University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Environmental

Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. Institute of Economic Crops, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 4. Agricultural

Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: [Objective] The objectives of this study are to analyze the variation patterns of soil pore structure characteristic parameters under different tillage methods in sugarcane fields in Guangxi region, and to provide a theoretical foundation for the promotion and application of powder ridging tillage technology. [Methods] Soils obtained from sugarcane fields had been subjected to two different tillage methods: powder ridging tillage to a depth of 20 cm (F_{20}) and rotary tillage to a depth of 20 cm (X_{20}) after three years of cultivation. X-ray CT scanning technology, in combination with ImageJ, was utilized for the analysis of soil

收稿日期: 2023-09-27

修回日期: 2023-12-19

资助项目: 国家自然科学基金 (42067002, 4226070061); 广西科技重大专项 (桂科 AA20302020-2)

第一作者: 张硕 (1998—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 研究方向为土壤结构及土壤养分运移。E-mail: zs810777977@163.com

通信作者: 甘磊 (1983—), 男, 湖南岳阳人, 博士, 教授, 主要从事土壤结构及土壤水热耦合运移研究。E-mail: allen_gl2006@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

pore distribution parameters in both two-dimensional and three-dimensional formats, ultimately enabling the visualization of the three-dimensional reconstruction of soil pore structure. [Results] Both tillage methods influenced the quantity of two-dimensional and three-dimensional soil pores, with a higher prevalence of smaller pores compared to larger ones. The F_{20} treatment showed the reduced amounts of two-dimensional and three-dimensional pores in comparison to the X_{20} treatment, but demonstrated higher overall roundness. The soil pore surface density exhibited a significant decrease in the F_{20} treatment in comparison to the X_{20} treatment. Conversely, the complexity of soil pores at the same soil depth was found to be higher in the former treatment. The mean porosity and compactness values of the F_{20} treatment (2.08%, 25.22) were lower than those of X_{20} treatment (4.71%, 27.23) ($p < 0.05$), whereas the mean specific surface area value of the F_{20} treatment (2.62 mm^{-1}) was higher than that of X_{20} treatment (2.50 mm^{-1}) ($p < 0.05$). The mean connectivity values did not exhibit a statistically significant difference between the two treatments; however, the mean curvature value of F_{20} treatment (1.42%) was significantly different from that of X_{20} treatment (1.45%) ($p < 0.05$). Moreover, the branch length density differed greatly between the two treatments, with the mean value of X_{20} treatment (115.87 mm/cm^3) being higher than that of F_{20} treatment (50.41 mm/cm^3) ($p < 0.05$). The pore distribution in the three-dimensional reconstruction images of both treatments exhibited a higher degree of uniformity for the F_{20} treatment. Moreover, the analysis revealed that the connectivity of pores in the primary growth region of sugarcane was found to be more effective in the F_{20} treatment in comparison to the X_{20} treatment. [Conclusion] In the Guangxi region, the utilization of powder ridging tillage offers several advantages over conventional rotary tillage for cultivating sugarcane. This approach provides several advantages associated with soil pore structure, which in turn promotes the growth of the sugarcane root system and ultimately results in increased sugarcane yield.

Keywords: pore structure; CT scanning; 3D reconstruction; powder ridge tillage; sugarcane field

土壤结构是影响土壤功能的关键因素,在土壤水分和养分的储存和运移方面发挥着重要作用,同时也是微生物分解活动的重要场所。土壤孔隙是土壤结构的重要组成部分,通过对土壤孔隙进行研究可以直观地反映土壤结构的真实状况^[1]。土壤孔隙的几何形态、空间排列和连通性在决定土壤的渗透性和保水能力方面具有关键作用。此外,土壤孔隙内部组成和结构动态的变化对生态多样性以及作物根系在土壤环境中延伸和发育产生深远影响^[2]。分析土壤内部结构,有助于认识土壤水、气运动规律,了解土壤各种物理过程。土壤耕作是一项关键的农业生产措施,能够显著提升作物产量。不同的耕作方式会导致土壤扰动程度和深度的差异,从而可能对其物理、化学特性以及生物特征产生影响^[3]。因此,探究不同耕作方式下的土壤结构变化对农业种植来讲尤为重要。

作为土壤质量重要衡量指标之一,土壤结构在农业生产和生态环境方面发挥着重要作用。近年来,学者们针对各类耕作措施对土壤结构的影响进行了大量的研究^[4-5]。有学者研究发现秸秆还田+免耕可增加土壤表层的通气孔隙,改善土壤结构,提高土壤持水能力,增加土壤水分储存量^[6]。但也有学者通过多年免

耕实践发现,受免耕影响土壤紧实度提高,土壤呼吸被抑制,从而导致作物产量的降低^[7]。有研究表明深耕耕作增加了土壤扰动程度,从而降低了土壤坚实度,提升了土壤保水能力^[8],但也有研究认为深耕带动底部生土至土壤表层,在一定程度上恶化了土壤物理性状,降低土壤肥力,影响作物的产量^[9]。部分学者研究证明“翻耕+浅旋”的耕作方式会严重破坏土壤结构,致使土壤有机碳矿化损失大、土壤水分利用效率低等问题^[10]。由此可见不同耕作方式对不同区域土壤结构的影响存在一定的差异性,针对特定区域不同耕作方式对土壤结构的影响研究有着重要的理论意义。

量化土壤孔隙结构的方法有很多,其中作为一种非侵入无损害的三维成像技术,CT扫描技术因其对土体无破坏性、成像速度快、分析精度高等优点,逐步成为学者们进行土壤学研究的热门手段^[11-12]。近年来,国内学者利用CT扫描技术对南方红壤土区、黄淮海旱作区以及四川盆地丘陵区等进行了大量的土壤孔隙结构研究^[6,13-14]。与此同时,许多国外学者也通过CT扫描技术对埃及三角洲盐碱区、英国盐沼区及西班牙细壤质热性土开展论证研究^[15-17]。

作为我国重要的甘蔗生产地区,广西多样化的耕

作方式显著影响着甘蔗的土壤结构,进而对其生长和产量提升密切关联。因此,进行合理的耕作方式研究可有效提升农业经济水平。粉垄耕作技术在南方农业生产中已有一定范围的应用^[18],但其研究大部分集中于提升作物产量、防治病虫害等问题上^[7],涉及土壤结构方面研究相对较少。因此,本研究基于CT扫描技术,探究传统旋耕与粉垄耕作方式对广西地区甘蔗土壤孔隙结构的影响,以期为该地区甘蔗地种植以及确保土壤质量改善提供坚实的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于广西壮族自治区南宁市广西农业科学院里建科研基地内(23°14'N,108°02'E)。该试验区位于武鸣区的丘陵地带,主要由优质红壤组成,基部岩层为石灰岩。土壤pH值介于5.0~6.5,有机质含量约为15~30 g/kg。该地属亚热带季风气候,年平均气温约为21.6℃,日照充足,年平均日照总时1800 h。此外,该地降雨充沛,年平均降水量约1300 mm。全年平均相对湿度保持在79%左右,并且雨季从5月持续至9月,在全年总降水量中占比超过60%。

1.2 试验方法

本试验区设置两种处理:粉垄20 cm耕作后种植甘蔗(F₂₀)和传统旋耕20 cm耕作后种植甘蔗(X₂₀)。其中粉垄耕作方式在兼顾耕作深度的同时并未打乱土层顺序。每种处理下按随机区组选取3个重复,共6个小区,甘蔗的品种为桂柳05-136。试验区保持一致的灌溉和施肥条件。综合考虑甘蔗的根系生长深度和成垄情况,在各个区域内分别挖掘边长为50 cm的正方体土壤剖面,并采用规格为100 cm³的环刀来获取原状土样,每10 cm为一层,每层3个重复,采集0—40 cm土层样品,采集后,将土样用保鲜膜包裹,并每层采集约1.5 kg的扰动土样一并带回实验室,以进行土壤的基本理化性质的测定。其中,利用烘干法测定土壤容重,马尔文激光粒度仪测定土壤质地,以及重铬酸钾外加热法测定土壤有机质。用合适规格高强度抗压的PVC管对原状土进行采集,PVC管规格为高50 cm、内径为10 cm。取样前,将PVC管的一端用磨砂片打磨成刀刃状,以便打入土中取样,采集深度40 cm。土壤表层采用敲击取样法轻轻将PVC管嵌入土层,使得土柱与PVC管顶端之间的距离约为10 cm。随后,取出PVC管并对其进行泡沫胶填充,并使用保鲜膜和泡沫板等材料对土柱进行密封和防震处理。最后,将土柱带回实验室进行CT扫描。

1.3 孔隙结构的测定

CT扫描设备为美国GE公司制造的Discovery CT HD 750,扫描模式为GSI(宝石能谱成像),扫描管电压为120 kV,扫描管电流为600 mA。土柱以0.625 mm的切片厚度和384×384的分辨率进行扫描,共获得640个DICOM格式的切片图像。将获取到的CT扫描图像存储至计算机中,并转换成JPG格式的灰度图像。使用ImageJ软件进行土壤和孔隙图像的二值化处理。在进行图片分析前,首先需要将所得CT图像转换为8位图像,并在二值化图像的基础上进行土壤和孔隙度的分割。根据已知的大孔隙确定适当的分割阈值。经过图像分割后,获得黑白二值图像,其中白色区域代表土壤基质,黑色区域代表土壤孔隙。利用3D-Object Counter插件获取三维数据包括孔隙数量、体积和表面积等信息。此外还运用内置插件Bone J执行骨架化操作,并采用细化算法计算各类参数。用ImageJ软件完成一系列修正处理后,利用其内置插件Volume Viewer进行图像的三维重建和可视化。

1.4 孔隙参数提取与计算

孔隙面密度(M_z)通过计算孔隙面积与总面积之比来定量评价^[19]。较高的 M_z 值表示土壤中孔隙占比较大,土壤更为疏松。计算公式如下:

$$M_z = \frac{A_z}{A} \quad (1)$$

式中: M_z 为深度 Z 处孔隙面密度; A_z 为深度 Z 处的孔隙总面积; A 为深度 Z 处孔隙和土的总面积。

孔隙复杂度(D_z)通过计算孔隙周长与面积之比来定量评价, D_z 值越高则表示孔隙扭曲程度越复杂。计算公式如下:

$$D_z = 2 \frac{\lg P_z}{\lg A_z} \quad (2)$$

式中: D_z 为深度 Z 处的孔隙复杂度; P_z 为深度 Z 处孔隙周长; A_z 为深度 Z 处的孔隙面积。

孔隙弯曲度可通过计算孔隙中轴上的两点之间的实际长度与最短距离之比来评估,该比值可表征孔隙的空间弯曲形态, T 值越大,表示孔隙通道及其网络越复杂,水和溶质在其中的实际路程更加曲折。计算公式如下:

$$T = \frac{P_a}{P_b} \quad (3)$$

式中: T 为孔隙弯曲度; P_a 为孔隙中轴线两点之间实际长度; P_b 为孔隙中轴线两点之间最短长度。

孔隙的连通度可通过孔隙相交点数(J)和端点数(E)之间的关系来定量评估。连通度越高,表明孔

隙网络具有更好的连通性。计算公式如下:

$$C = \frac{J}{J+E} \quad (4)$$

式中: C 为孔隙的连通度; J 为孔隙分枝相交点数; E 为孔隙分枝端点数。

紧密度是土壤孔隙形态的表征,其数值越小表示孔隙形态越接近球形。计算公式如下:

$$CP = \frac{A^{1.5}}{V} \quad (5)$$

式中: A 和 V 分别为孔隙的表面积和体积,平均紧密度的计算为各孔隙紧密度的体积加权平均值。

1.5 统计分析

本研究采用 Excel 2016 和 SPSS 27 进行数据分析,并运用 Origin 2021 制图,同时使用 ImageJ 1.53b 进行图像处理。

2 结果与分析

2.1 两种不同耕作方式下土壤理化性质

由表 1 可知,在 0—40 cm 土层深度内,两种处理土壤质地均值相差并不大, X_{20} 处理的粉粒和黏粒颗粒含量分别仅高于 F_{20} 处理 0.11%, 0.6%, 而砂粒含量较 F_{20} 处理仅降低了 0.98%。0—20 cm 土层深度内, F_{20} 处理的各容重含量均高于 X_{20} 处理,但 20—30 cm 土层深度则小于后者。30—40 cm 土层区间内两者容重相差不大。两种处理下有机质含量整体上均呈现随深度的增加而减少的趋势。

表 1 两种不同耕作方式下土壤理化性质
Table 1 Physico-chemical characteristics of soil under two different tillage practices

处理	土层深度/cm	粉粒/%	黏粒/%	砂粒/%	容重/(g·cm ⁻³)	有机质/(g·kg ⁻¹)
X_{20}	0—10	35.82	39.59	21.68	1.570	36.343
	10—20	36.37	38.01	22.58	1.642	41.502
	20—30	32.54	40.18	24.27	1.613	35.082
	30—40	46.52	31.32	19.45	1.642	35.770
F_{20}	0—10	31.95	32.97	35.08	1.670	36.113
	10—20	31.36	32.38	36.25	1.747	37.948
	20—30	41.49	41.18	17.33	1.589	32.674
	30—40	41.00	28.47	30.53	1.642	33.591

2.2 两种不同耕作方式下土壤二维孔隙分布特征

如图 1 所示, F_{20} 处理在 0—15 cm 土层深度下土壤孔隙面密度随深度增加,并达到了最大值 5.47%,随后在 15—20 cm 土层深度下土壤孔隙面密度逐步减小至 0.16%,并于 20—25 cm 土层附近出现小“波峰”,增长了 2.3%,波动幅度逐渐趋于平稳。而 X_{20} 处理下土壤的孔隙面密度整体上与 F_{20} 处理趋势相反。在土壤表层深度

下, X_{20} 处理土壤面密度由最大峰值 13.43% 逐步减小至 1.46% 左右,降幅约为 89.1%。 X_{20} 处理的最大峰值较 F_{20} 处理浅 10 cm 左右,同时前者的峰值要比后者高 7.9% 左右。总体而言, X_{20} 处理在整个土层深度上土壤孔隙面密度要比 F_{20} 处理高 1.9 倍左右。

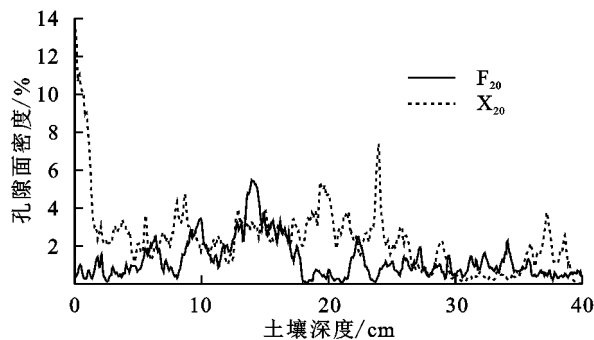


图 1 两种处理下土壤孔隙面密度土层深度变化

Fig. 1 Changes in soil pore surface density and soil depth under two treatments

如图 2 所示,在 0—10 cm 土层至 10—20 cm 土层深度间, F_{20} 处理土壤孔隙复杂度逐步增加,并于 10—20 cm 土层出现最大值 1.28%。20—30 cm 土层比 10—20 cm 土层土壤孔隙复杂度减小 0.17%。在 20—30 cm 土层至 30—40 cm 土层,土壤孔隙复杂度有所回升,并于 30—40 cm 土层回升至 1.22%。相较于 F_{20} 处理, X_{20} 处理的土壤孔隙复杂度变化趋势相反。总体而言,在相同的土层深度下, F_{20} 处理的土壤孔隙复杂度均高于 X_{20} 处理,其中于 10—20 cm 土层差异最大,前者比后者高 0.31%。

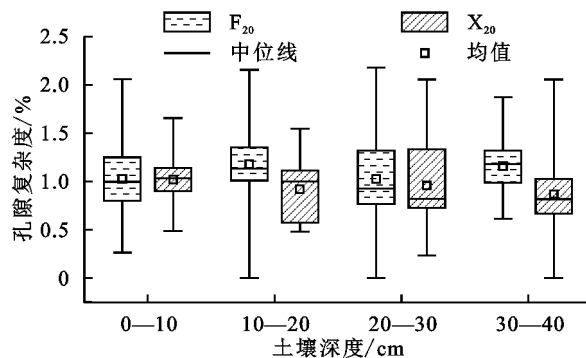


图 2 两种处理下土壤孔隙复杂度土层深度变化

Fig. 2 Changes in soil pore complexity and soil depth under two treatments

由表 2 可知,整体上两种处理中 1~10 mm 孔径对应孔隙数均最多,大于 10 mm 孔径对应孔隙数最少,其中孔隙数在孔径 1~2 mm 处均达到峰值,且 X_{20} 处理对应孔隙数为 F_{20} 处理的 1.5~2 倍左右。1~10 mm 孔径内,两者孔隙数随孔径的增大呈现持续下降的趋势,但达到大于 10 mm 孔径后孔隙数均有所回升。由圆度数据可知,两种处理下圆度大致均呈现随孔径增大而减小的趋势,且呈现整体上 F_{20} 处理圆度

在前 63.6% 的孔径范围内要高于 X_{20} 处理,具体表现为 F_{20} 处理下小于 7 mm 孔径范围内圆度均值范围高于 X_{20} 处理 1.5%~30.3%,但大于 7 mm 孔径范围则反之,后者均值范围高于前者 2.9%~5.0%。

2.3 两种不同耕作方式下土壤三维孔隙分布特征

表 3 为 2 种处理方式下土壤孔隙度、比表面积、弯曲度、连通性、分支长度密度及紧实度等三维孔隙特征数据。 F_{20} 处理的孔隙度和紧实度均值分别比 X_{20} 处理小 2.63% 和 2.01 ($p<0.05$),但 F_{20} 处理的比表面积均值较 X_{20} 处理大 0.12/mm ($p<0.05$)。两种处理下连通度均值无明显差异,但 F_{20} 处理的弯曲度均值与 X_{20} 处理均值差异显著 ($p<0.05$)。两种处理下分支长度密度差异较大, X_{20} 处理下的分支长度密度比 F_{20} 处理大 2.2 倍左右 ($p<0.05$),这或许是造成

其弯曲度差异显著的原因之一。

表 2 两种耕作方式下不同孔径的土壤二维孔隙数量

Table 2 Number of two-dimensional soil pores with different pore sizes under two tillage methods

孔径/ mm	对应孔隙数均值/个		圆度均值/%	
	F_{20}	X_{20}	F_{20}	X_{20}
<1	758	1331	75.4	73.9
1~2	1613	2922	67.6	66.5
2~3	811	1626	62.8	59.8
3~4	455	990	56.7	53.8
4~5	245	521	52.3	50.1
5~6	153	362	47.8	47.1
6~7	105	241	47.2	45.1
7~8	76	157	43.9	45.2
8~9	50	109	42.3	43.4
9~10	36	77	41.8	42.8
>10	128	194	36.5	40.7

表 3 两种处理下土壤孔隙三维数据

Table 3 Three-dimensional soil pore data obtained from two different treatments

土柱编号	孔隙度/%	比表面积/ (mm ⁻¹)	弯曲度/%	连通度	分支长度密度/ (mm·cm ⁻³)	紧实度
F_{20} -1	1.95	2.47	1.46	0.33	39.96	25.93
F_{20} -2	1.29	2.75	1.40	0.28	45.18	24.27
F_{20} -3	2.99	2.66	1.39	0.25	66.09	25.47
F_{20} 均值	2.08±0.49a	2.62±0.08a	1.42±0.02a	0.29±0.02a	50.41±7.98a	25.22±0.49a
X_{20} -1	4.75	2.06	1.41	0.34	97.83	26.79
X_{20} -2	3.10	2.88	1.49	0.24	83.47	27.20
X_{20} -3	6.28	2.58	1.46	0.38	166.29	27.71
X_{20} 均值	4.71±0.92b	2.50±0.24b	1.45±0.02b	0.32±0.03a	115.87±18.9b	27.23±0.27b

注:同列不同小写字母表示差异显著 ($p<0.05$), $n=6$ 。

由表 4 可知,整体上两种处理下体积 1~1 000 mm³ 对应孔隙数最多,且两者三维孔隙数随体积增大呈现持续下降的趋势。尽管 1~1 000 mm³ 体积内 X_{20} 处理三维孔隙数均值为 F_{20} 处理的 1.43~2 倍左右,但由孔隙数百分比均值可知,1~1 000 mm³ 体积内两者孔隙数百分比均值相差不大,均在 7.25% 左右。同时小于 1 mm³ 体积内 F_{20} 处理的孔隙数百分比均值较 X_{20} 处理多 0.84%,但大于 1 000 mm³ 体积内前者孔隙数百分比均值却比后者小 0.13%。结合二维孔隙分布情况,两个维度下孔隙分布整体趋势大致相同。

2.4 两种不同耕作方式下的孔隙三维重构

如图 3 所示, X_{20} 处理孔隙分布数量较多,这一点从二维和三维数据中也可看出。但整体而言, F_{20} 处理孔隙分布较为均匀,土壤孔隙结构表层稀疏但随着深度的增加逐渐密集,其土壤连通性的孔隙多在甘蔗根系主要生长区的 10—30 cm 土层中出现较多分布。而 X_{20} 处理下土壤孔隙较 F_{20} 处理土壤孔隙分布更为集中在土壤上表层区域。同时 X_{20} 处理的连通性孔

隙分布则相对随机,特别是在甘蔗根系主要生长区,连通性孔隙相对较少。

表 4 两种处理下不同体积的土壤三维孔隙分布情况

Table 4 Three-dimensional distribution of soil pores of different volumes under two treatments

体积/mm ³	对应孔隙数均值/个		孔隙数百分比均值/%	
	F_{20}	X_{20}	F_{20}	X_{20}
<1	376	524	34.8	33.96
1~10	482	658	44.89	42.90
10~30	134	193	12.63	12.55
30~50	27	54	2.53	3.46
50~150	29	67	2.65	4.27
150~300	11	19	1.06	1.21
300~450	4	8	0.41	0.53
450~650	4	7	0.37	0.43
650~850	2	3	0.25	0.21
850~1000	2	1	0.17	0.09
>1000	3	6	0.25	0.38
孔隙数				
孔隙总数	1074	1540	百分比 9.09	9.09
总体均值				

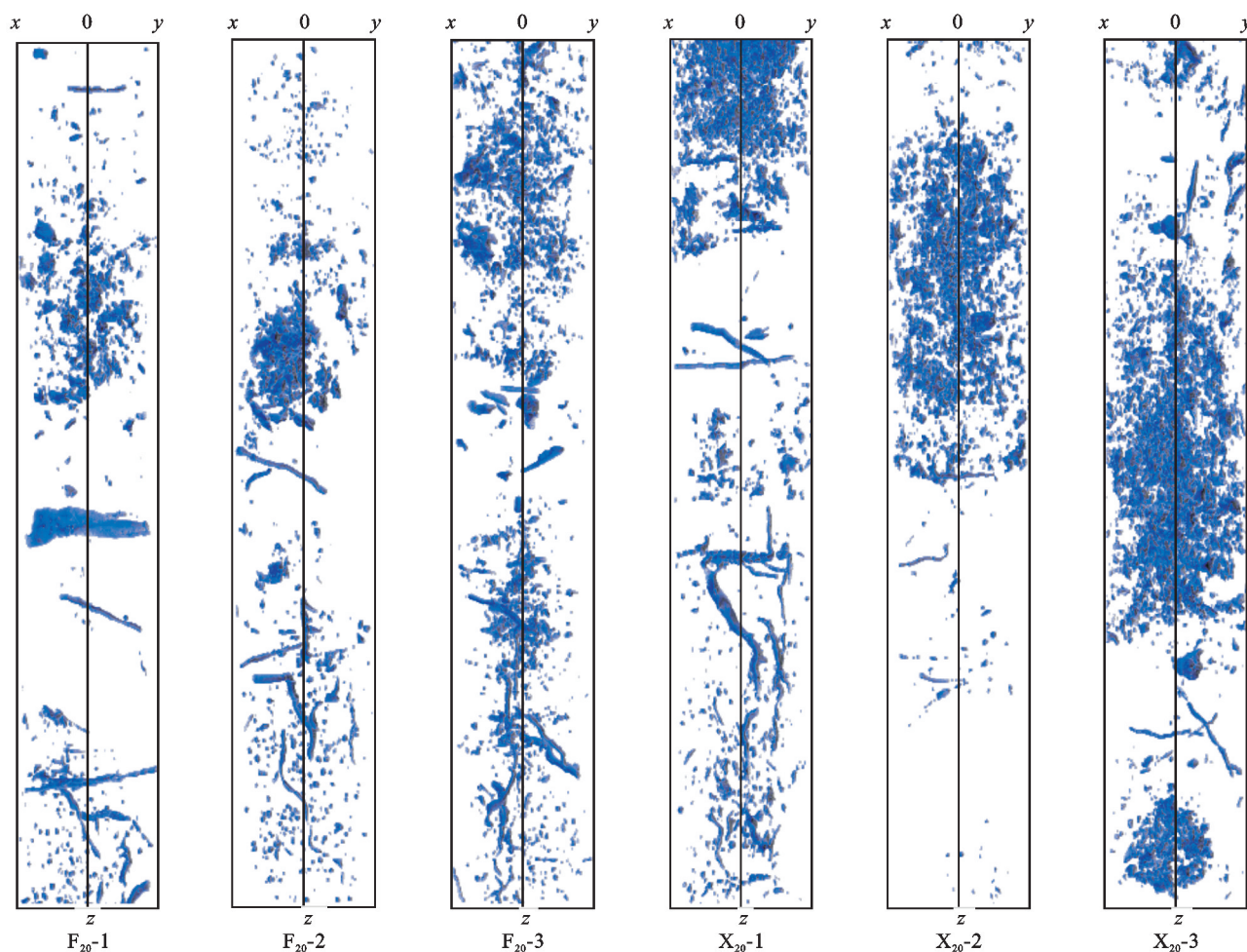


图 3 两种处理下土壤孔隙三维结构

Fig. 3 Three-dimensional structure diagrams of soil pores under two treatments

3 讨论

本研究发现,0—20 cm 土层深度内, F_{20} 处理的土壤容重高于 X_{20} 处理,这主要是由于土壤表层区域旋耕处理经旋转、打碎、切割等操作,击碎土壤部分大颗粒程度更大,加剧了土壤矿化分解,土壤颗粒更为细粒化,使得土壤容重随之减小^[20]。但 20—30 cm 土层深度内, F_{20} 处理的土壤容重却低于 X_{20} 处理,这是由于受上层耕作的机械压实作用影响,土壤自然沉降,土壤紧实度升高,土壤容重会受到一定影响。 F_{20} 处理采用粉垄耕作 20 cm 深度,其土壤自然悬浮成垄^[21],对下层土壤的压实作用要低于 X_{20} 处理。这意味着 F_{20} 处理该层较小的容重为甘蔗根系主要生长区(20—30 cm)提供了相对较好的生长空间。而由于两种深度均为 20 cm,随着深度的增加深层土壤受表层耕作影响随之减小,使得 30—40 cm 土层呈现未扰动状态,其容重无并无差异。

前人研究表明传统旋耕会使土壤中的大中孔隙减少,土壤中的小孔隙明显增加^[5]。也有学者在分析

粉垄耕作对赤红壤地区土壤理化性质及团聚体稳定性影响的研究中认为,粉垄耕作能显著提高中、小粒径的团聚体含量与稳定性,同时增加土壤通透性,改善土壤的耕层状况,提高作物对土壤养分的利用效率^[22]。本研究中无论是传统旋耕还是粉垄耕作,均表现为土壤中较小孔隙数量要高于较大孔隙数量的趋势。作为土壤孔隙的二维界面特征指标,土壤孔隙面密度和土壤孔隙复杂度可分别反映土壤孔隙二维界面的大小和复杂程度。在相同的土层深度下, F_{20} 处理土壤孔隙面密度均值整体要小于 X_{20} 处理,主要是由于粉垄耕作过程并未打乱土层顺序,但旋耕处理过程使得土壤上下土层相互混合,增加了层与层之间的土壤交换^[17],使得更多大孔隙破碎,因而增大了土壤孔隙面密度的可能性。尽管传统旋耕在二维孔隙数量要远胜于粉垄耕作,但传统旋耕处理的圆度在各孔径范围内都是要低于粉垄耕作,这说明传统旋耕所形成的孔隙远不及粉垄耕作所形成的更为圆滑的孔隙边界,因此其面密度是高于粉垄耕作。有学者通过探究粉垄耕作对农田赤红壤团聚体结构影响发现粉

垄耕作处理下孔隙边界圆滑,土壤孔隙比表面积较大^[23]。本研究中两种处理下的孔隙复杂度均处于动态变化过程,但表层的变化幅度要高于土壤深层。这是由于经过长期耕作,土壤表层区域的土壤层活性较高,并受农事活动和自然因素的强烈干扰^[7],因此两种不同处理下的孔隙复杂度在表层相较于其他深度而言呈现更大的形态变化。

从三维土壤结构图中看出,粉垄耕作处理总孔隙大致呈现均匀、主生长区较多连通的分布特征,而传统旋耕处理下的总孔隙则呈现密集、连通孔隙零散分布的特征。这是因为粉垄耕作通过利用专用机械垂直螺旋型钻头,将土壤旋削粉碎并自然悬浮成垄,可以在尽可能少地打乱土层的情况下一次作业即完成深松、深耕与整地^[13]。耕作后可在保证不改变上下层土壤分布的同时改善土壤的结构,增加机械稳定性团聚体,使得土壤孔隙变大^[24]。在旋耕耕作层内,土壤结构被旋耕刀打破重组,上下土层交换,故总孔隙,特别是连通孔隙更为零散。部分学者通过探究粉垄耕作对水稻土的土壤结构影响表明,粉垄耕作处理下的土壤具有更稳定的孔隙网络结构,使孔隙分布更适合作物根系生长^[25]。这与本研究三维结构中所示甘蔗根系主要生长区其连通性较好的孔隙在粉垄耕作中分布较为明显是一致的。良好的孔隙网络结构对于促进土壤水分和养分的运移,以及促进甘蔗等作物的生长和发育至关重要,从而确保甘蔗的产量持续提升^[12]。因此,在广西甘蔗种植过程中,粉垄耕作处理较传统旋耕处理表现出更好的土壤结构特征。

分析粉垄耕作和传统旋耕处理下孔隙的关联性及整体结构性的同时,还应厘清两种耕作方式的差异。甘蔗是喜水作物,尤其在甘蔗的伸长期,需水量占全生育期总量的54.3%~57.8%^[26]。广西地区近年来长期遭受干旱威胁,为了避免田间烧苗等情况的发生,需要及时提供水分灌溉。相较于传统耕作起垄种植甘蔗,粉垄耕作是通过利用粉垄机械设备使土壤形成斜坡状的垄起,此时土壤呈现一系列斜坡和坑沟的梯状结构,这种梯度设计在一定程度上可以促进水分的下渗和贮存^[13]。尽管本研究中传统旋耕的孔隙数量高于粉垄耕作,但后者的孔隙比表面积要高于前者,孔隙接触面积更多,可使水分得到更好的吸收。有学者通过论证土壤团聚体结构演变发现,具有较大比表面积的细长孔隙,更有利于水气的储存与交换,从而满足植物生长需要^[27]。同时也有学者指出土壤中孔隙的连通度及弯曲度等指标均对土壤的导水透气性产生重要影响,对于相同饱和度的土壤来说,孔隙弯曲度越低,水分运移的所需路径越短,其导水透气性越好^[28]。这与本文中的研究结

果一致,在两者连通性无显著差异的情况下,粉垄耕作降低了土壤的弯曲度,保障了水气在土壤中的运移。本研究中粉垄耕作的分支长度密度整体比传统耕作的要低,这主要因为分支长度密度受具体空间内孔隙数量的直接影响。尽管粉垄耕作形成的孔隙弯曲度较小,圆滑较好,但因传统耕作形成了较多分散性孔隙,故传统旋耕的整体分支长度密度要比粉垄耕作的高。适宜的土壤紧实度能够增强各类农作物根系的穿透力,提高土壤渗透和蓄水能力,并进一步提升土壤的水肥利用效率。有学者通过探究机械压实对不同类型苜蓿地土壤结构影响,证明压实改变了土壤物理结构,增加土壤容重、土壤坚实度,降低饱和导水率,同时压实次数和接地压力对不同层次的土壤结构参数影响不同^[29]。尽管传统旋耕产生更多数量的孔隙但其土壤紧实度却有所增加,说明对于两者耕作方式中机械压实对土壤结构的影响中,粉垄耕作对土壤的压实作用要低于传统旋耕。综上所述,在广西地区粉垄耕作可以有效地改善土壤的内部深层结构特性,增加土壤的透气性和透水性,有利于水分的运移,促进甘蔗物根系的生长发育。

4 结论

(1) 甘蔗粉垄耕作形成的土壤孔隙形态更为圆滑,说明相较于传统旋耕而言,其在一定程度上优化了土壤孔隙质量。

(2) 甘蔗粉垄耕作的土壤紧实度和弯曲度低于传统旋耕,形成了更有利于水分运移的路径。

(3) 粉垄耕作形成了更为均匀的孔隙网络结构,且在甘蔗根系生长区域形成较多连通性孔隙,可有效促进水分及养分更快运移至根系生长区。

因此,在广西地区甘蔗种植过程中,粉垄耕作较旋耕更有利于改善土壤结构及水肥运移通道,促进甘蔗生长,提高水肥利用效率。

参考文献(References):

- [1] Young I M, Crawford J W. Interactions and self-organization in the soil-microbe complex[J]. Science, 2004, 304(5677):1634-1637.
- [2] 赵玥,刘雷,韩巧玲,等.基于CT图像的土壤孔隙结构重构[J].农业机械学报,2018,49(S1):401-406.
Zhao Y, Liu L, Han Q L, et al. Reconstruction of soil pore structure based on CT images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1):401-406.
- [3] 钱泳其,熊鹏,王玥凯,等.不同耕作方式对砂姜黑土孔隙结构特征的影响[J].土壤学报,2024,61(1):52-63.
Qian Y Q, Xiong P, Wang Y K, et al. Effect of tillage

- practices on soil pore structure characteristics in shajiang black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(1):52-63.
- [4] 甘磊,张俊,郑思文,等.秸秆覆盖对广西甘蔗地土壤水分与结构变化的影响[J].*南方农业学报*, 2021, 52(7): 1745-1752.
- Gan L, Zhang J, Zheng S W, et al. Effects of straw mulching on the change of soil moisture and structure in sugarcane field in Guangxi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(7):1745-1752.
- [5] 王殿武,褚达华,少、免耕对旱地土壤物理性质的影响[J].*河北农业大学学报*, 1992(2):28-33.
- Wang D W, Chu D H. Effect of zero tillage and minimum tillage on physical properties of soil in dryland[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 1992(2):28-33.
- [6] 刘定辉,陈尚洪,舒丽,等.四川盆地丘陵区秸秆还田少免耕对土壤水分特征的影响[J].*干旱地区农业研究*, 2009, 27(6):119-122, 128.
- Liu D H, Chen S H, Shu L, et al. Impact of straw mulching and no-tillage on soil water characteristics of paddy field in hilly area of Sichuan basin[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(6):119-122, 128.
- [7] 蔡丽君,边大红,田晓东,等.耕作方式对土壤理化性状及夏玉米生长发育和产量的影响[J].*华北农学报*, 2014, 29(5):232-238.
- Cai L J, Bian D H, Tian X D, et al. Effect of tillage methods on soil physical and chemical properties, growth and grain yield of summer maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(5):232-238.
- [8] He J N, Shi Y, Zhao J Y, et al. Strip rotary tillage with subsoiling increases winter wheat yield by alleviating leaf senescence and increasing grain filling[J]. *The Crop Journal*, 2020, 8(2):327-340.
- [9] 黄尚书,武琳,叶川,等.耕作深度对红壤坡耕地花生根系生长及活力的影响[J].*江西农业学报*, 2018, 30(12): 9-12.
- Huang S S, Wu L, Ye C, et al. Effects of tillage depth on root growth and activity of peanut in red soil slope field[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2018, 30(12):9-12.
- [10] 李荣,王敏,贾志宽,等.渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响[J].*农业工程学报*, 2012, 28(2):106-113.
- Li R, Wang M, Jia Z K, et al. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(2):106-113.
- [11] 杨永辉,武继承,毛永萍,等.利用计算机断层扫描技术研究土壤改良措施下土壤孔隙[J].*农业工程学报*, 2013, 29(23):99-108.
- Yang Y H, Wu J C, Mao Y P, et al. Using computed tomography scanning to study soil pores under different soil structure improvement measures[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(23):99-108.
- [12] 甘磊,张静举,黄太庆,等.基于CT技术的甘蔗地不同耕作措施下土壤孔隙结构研究[J].*西南农业学报*, 2017, 30(8):1843-1848.
- Gan L, Zhang J J, Huang T Q, et al. Pore structure in sugarcane soil under different tillage managements based on CT scanning[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(8):1843-1848.
- [13] 甘磊,李健,李帅,等.广西甘蔗地不同耕作方式下土壤孔隙特征[J].*水土保持研究*, 2020, 27(6):122-130.
- Gan L, Li J, Li S, et al. Soil pore characteristics of sugarcane field under different tillage treatments in Guangxi[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6):122-130.
- [14] 李勇,赵宇泽,勾宇轩,等.黄淮海旱作区农田耕层土壤结构特征与其影响因素[J].*农业机械学报*, 2022, 53(3):321-330.
- Li Y, Zhao Y Z, Gou Y X, et al. Characteristics and influencing factors of topsoil structure of farmland in dry farming region of Huang-Huai-Hai[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(3):321-330.
- [15] Chirol C, Carr S J, Spencer K L, et al. Pore, live root and necromass quantification in complex heterogeneous wetland soils using X-ray computed tomography[J]. *Geoderma*, 2021, 387:114898.
- [16] Udawatta R P, Anderson S H. CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils influenced by agroforestry and grass buffers[J]. *Geoderma*, 2008, 145(3/4):381-389.
- [17] Ding Z L, Kheir A M S, Ali O A M, et al. A vermicompost and deep tillage system to improve saline-sodic soil quality and wheat productivity[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277:111388.
- [18] 盛勇创,王释苇,张硕,等.不同粉垄深度对甘蔗地土壤孔隙结构的影响[J].*中国土壤与肥料*, 2023(9):12-19.
- Sheng Y C, Wang S W, Zhang S, et al. Effects of different depths of Fenlong tillage on the soil pore structure in sugarcane field[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(9):12-19.
- [19] 王松,张硕,张钰,等.广西某露天矿区不同复垦模式下土壤的孔隙特征[J].*金属矿山*, 2024(3):269-277.
- Wang S, Zhang S, Zhang Y, et al. Soil pore characteristics under different reclamation modes for a open-pit mine

- area in Guangxi[J]. *Metal Mine*, 2024(3):269-277.
- [20] Sirjani E, Sameni A, Moosavi A A, et al. Portable wind tunnel experiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars Province, Iran [J]. *Geoderma*, 2019,333:69-80.
- [21] 盛勇创.不同耕作方式及耕作深度对广西甘蔗地土壤孔隙特征的影响[D].广西桂林:桂林理工大学,2023.
Sheng Y C. The Influence of Different Tillage Methods and Depths on Soil Pore Characteristics of Sugarcane Fields in Guangxi[D]. Guilin, Guangxi: Guilin University of Technology, 2023.
- [22] 张宇,蒋代华,黄金兰,等.粉垄耕作对赤红壤团聚体粒级分布和稳定性的影响[J].*生态学杂志*,2021,40(12):3922-3932.
Zhang Y, Jiang D H, Huang J L, et al. Effect of deep vertically rotary tillage on particle size distribution and stability of latosolic red soil aggregates[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021,40(12):3922-3932.
- [23] 王世佳,蒋代华,朱文国,等.粉垄耕作对农田赤红壤团聚体结构的影响[J].*土壤学报*,2020,57(2):326-335.
Wang S J, Jiang D H, Zhu W G, et al. Effect of deep vertical rotary tillage on aggregate structure in farmland of lateritic red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020,57(2):326-335.
- [24] Li L T, Li J W, Wei C F, et al. Effect of mechanized ridge tillage with rice-rape rotation on paddy soil structure[J]. *Agriculture*, 2022,12(12):2147.
- [25] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J].*水土保持学报*,2020,34(3):267-273,298.
- [26] Liu J Y, Zhou Z C, Su X M. Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(3):267-273,298.
- [27] 王释苇,盛勇创,王健豪,等.香蕉种植方式和环境因子对土壤热导率的影响[J].*西南农业学报*,2023,36(4):692-700.
Wang S W, Sheng Y C, Wang J H, et al. Effects of banana cultivation patterns and environmental factors on soil thermal conductivity[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023,36(4):692-700.
- [28] Wei B H. Fenlong cultivation-the fourth set of farming methods invented in China[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017,18(11):2045-2048,2052.
- [29] 王卫华,张志鹏.基于土壤导气率的燥红土孔隙结构及弯曲连通性研究[J].*土壤学报*,2018,55(2):360-368.
Wang W H, Zhang Z P. Study on the dry red soil pore structure and pore tortuosity-connectivity based on soil air permeability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018,55(2):360-368.
- [30] 高爱民,张雪坤,王咏梅,等.机械压实对不同类型苜蓿地土壤结构影响的试验研究[J].*林业机械与木工设备*,2019,47(12):53-58.
Gao A M, Zhang X K, Wang Y M, et al. Experimental study on effect of mechanical compaction on the soil structure in different types of alfalfa fields[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2019,47(12):53-58.

~~~~~

(上接第220页)

- [26] 屠丹,毛天旭.添加生物质炭对喀斯特地区黄壤饱和导水率的影响[J].*水土保持研究*,2021,28(5):108-113,120.  
Tu D, Mao T X. Effect of biochar addition on saturated hydraulic conductivity of yellow soil in Karst area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(5):108-113,120.
- [27] 王丹丹,郑纪勇,颜永毫,等.生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J].*水土保持学报*,2013,27(2):101-104,109.  
Wang D D, Zheng J Y, Yan Y H, et al. Effect of biochar application on soil water holding capacity in the southern region of Ningxia [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013,27(2):101-104,109.
- [28] 解倩,王丽梅,齐瑞鹏,等.生物炭对黄绵土水分入渗和持水性能的影响[J].*地球环境学报*,2016,7(1):65-76,86.  
Xie Q, Wang L M, Qi R P, et al. Effects of biochar on water infiltration and water holding capacity of loessial soil[J]. *Journal of Earth Environment*, 2016,7(1):65-76,86.
- [29] 刘艳丽,周蓓蓓,王全九,等.纳米碳对黄绵土水分运动及溶质迁移特征的影响[J].*水土保持学报*,2015,29(1):21-25.  
Liu Y L, Zhou B B, Wang Q J, et al. Effects of nano-carbon on water movement and solute transport in loessial soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015,29(1):21-25.
- [30] Stagnitti F, Li L, Barry A, et al. Modelling solute transport in structured soils: Performance evaluation of the ADR and TRM models[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2001,34(3/4):433-440.