

广西甘蔗地不同耕作方式下土壤孔隙特征

甘磊^{1,2}, 李健³, 李帅³, 韦灵³, Saeed Rad^{1,3}

(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.桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:为探究广西地区不同耕作方式对甘蔗地土壤孔隙结构的影响,选取经过 3 年耕作(CT)与免耕(NT)处理的两种不同耕作方式下的甘蔗地土壤作为研究对象,利用 X 射线 CT 扫描技术和 ImageJ 等软件获得表征土壤孔隙二维分布和三维特征的参数,并对土壤孔隙结构进行三维重构与可视化。结果表明:两种处理下土壤质地组成差异不大,但耕作使得土壤容重降低,改变了有机质的分布,使有机质含量显著增加。耕作主要影响土壤中的大孔隙($>50\ \mu\text{m}$)和中孔隙($0.2\sim50\ \mu\text{m}$)的分布,使得 0—30 cm 土层大孔隙减少,中孔隙增加。耕作处理土壤孔隙的面密度和复杂度的波动大于免耕处理。耕作处理的土壤孔隙连通度均值(0.687)显著高于免耕处理(0.465),孔隙弯曲度均值(1.314)显著低于免耕处理(1.348),孔隙度和孔隙数均值(0.526%, 8 174)显著小于免耕处理(1.181%, 16 306)。免耕土壤孔隙在三维空间中分布较多且均匀,但孔隙孤立,连通较少,并且孔隙路径较弯曲。耕作土壤孔隙在三维空间中分布虽少,但分布呈网络型,交叉连通孔隙较多,孔隙通道连续且规则。因此,在广西地区甘蔗种植中,相较免耕而言,耕作增加土壤中生物性大孔隙,增加孔隙的连通度,降低孔隙通道的弯曲度,有利于土壤水分与溶质运移通道形成,并且促进作物根系生长和微生物活动,改善土壤的导水透气性,对甘蔗的生长发育具有积极作用。

关键词:孔隙特征; 甘蔗地; CT 扫描; 三维重构; 耕作措施

中图分类号: S152.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)06-0122-09

Soil Pore Characteristics of Sugarcane Field Under Different Tillage Treatments in Guangxi

GAN Lei^{1,2}, LI Jian³, LI Shuai³, WEI Ling³, Saeed Rad^{1,3}

(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.College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: This study aimed to explore influence of different tillage treatments on soil pore structure in sugarcane fields in Guangxi region and provide reference for appropriate tillage to local sugarcane planting. In this study, sugarcane fields under tillage (CT) and non-tillage (NT) for 3 years in Guangxi were studied. Computed tomography with ImageJ software was applied to obtain the soil pore distribution features of the two-dimensional and three-dimensional space characteristics. The three-dimensional reconstruction and visualization of soil pore structure have been conducted. The results showed that there was a small difference in soil texture between the two treatments, but the content of soil organic matter in tillage plot increased and the bulk density decreased significantly; tillage mainly affected the number of macropores and medium pores in the soil, in which the number of macropores decreased and the number of medium pores increased; for the two-dimensional distribution, the density and complexity of pore cross-sectional area in tillage plot fluctuated more than that in non-tillage plot; as for the three-dimensional characteristics, the values of pore density (0.526%), pore number (8 174) and tortuosity (1.314) in tillage plot were less than those of values in non-tillage plot for 1.181%, 16 306, 1.348, respectively; however, the average connectivity values of pore in tillage plot (0.687) were greater than these values (0.465) in non-tillage plot; for the three-dimensional

收稿日期: 2019-12-26

修回日期: 2020-02-09

资助项目: 国家自然科学基金(41501230; 41761048); 广西自然科学基金(2016GXNSFAA380197)

第一作者: 甘磊(1983—), 男, 湖南岳阳人, 副教授, 博士, 主要从事土壤结构与土壤水热耦合模拟研究。E-mail: allen_gl2006@163.com

visualization figure, the distribution range of pores in non-tillage plot was larger, but relatively isolated, while the more network connectivity is demonstrated in the pores in tillage plot. On the other hand, since this study also has proved the method of CT scanning combined with three-dimensional reconstruction, hence the information of soil internal characteristics intuitively and comprehensively can be obtained. Compared with non-tillage in this study, tillage could reduce tortuosity but increase connectivity of the soil. Moreover, tillage could promote the formation of biological macropores that was located at the surface of the soil, which could facilitate infiltration of soil moisture. Thus, tillage is beneficial to crop root growth and microbial activity, and therefore improves the soil water and solute transport corridor, which lets tillage play a positive role in sugarcane growth.

Keywords: pore characteristics; sugarcane field; CT(computerized tomography) scan; 3D reconstruction; tillage measures

土壤孔隙作为土壤结构的重要组成部分,能够真实地反映土壤内部空间状况^[1]。定量研究土壤孔隙特征,对获取土壤内部空间结构信息,改善土壤环境,指导作物种植具有重要意义。土壤孔隙的几何形态是影响土壤中水分运动和溶质运移的关键因子之一,孔隙的大小、形状以及连通度等会对土壤溶液的流动速度和通量分布的均匀性产生直接影响^[2]。耕作过程会扰动土壤的孔隙结构,间接影响土壤中水分的分布和运移。然而不同的耕作措施对土壤产生的扰动不同,对土壤性质的影响也不同^[3]。免耕对土壤扰动很少,使得土壤容重显著增大,土壤有机质、有效磷也会在表层富集^[4]。深松能打破犁底层,增加耕层厚度,改变耕层土壤的紧实度和容重^[5-6]。而长期翻耕和旋耕能提高土壤孔隙度和养分含量,增强了土壤通气性,但这会使得耕层变浅,养分库容降低^[7]。事实上由不同耕作措施所带来的各种效应,都可以归结为土壤结构的变化,从而间接地改变土壤的理化性能^[8]。

早期土壤孔隙结构的研究主要以室内试验和模型模拟的方法间接地研究土壤孔隙,在尺度上和仿真性上存在一定欠缺^[2]。相比之下,X射线CT扫描技术以其无破坏性、直接、快捷等优点被逐渐应用于土壤孔隙的定量化和可视化研究中^[9-11]。早在1982年国外学者就将CT扫描技术应用于土壤容重和土壤大孔隙的三维图像获取研究中,并分析大孔隙的几何结构^[12-13]。国内学者从1988年开始利用CT扫描测定土壤结构及其内部发育过程^[14],CT技术也开始被研究人员熟知在土壤结构领域的应用,后被逐渐广泛应用于土壤的孔隙曲折度、孔隙网络结构特征、渗透率和土壤水分特征曲线分析等研究中^[15]。目前关于土地耕作方式对土壤理化性质、结构等影响,国内学者在南方红壤区、黄土高原区、干热河谷区等水土流失严重的地区进行了大量研究^[16-18]。相比之下,作为我国甘蔗主产区之一的广西气候温暖、雨水丰沛、光

照充足,区内土壤性质与北方和南方的其他地区有所不同。研究区又是广西甘蔗主产地,区内不同耕作方式对甘蔗地土壤结构的影响会间接影响甘蔗的生长及其产量,而目前不同土地处理方式对广西区甘蔗土壤孔隙结构的影响研究也相对较少^[19-20]。为此,本研究基于CT扫描和图像处理技术,深入研究广西区不同耕作方式下的甘蔗地土壤孔隙特征,可为该地区甘蔗种植过程中改善土壤结构、调整合理的种植模式提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西南宁市广西自治区农业科学院里建科研基地内,地理位置为23°14'N,108°02'E。研究区地处武鸣区盆地,境内以丘陵地貌为主。区内土壤类型主要以红壤为主,质地良好,土壤pH值为5.0~6.5,土壤有机质含量为15~30 g/kg。区内气候属亚热带季风气候,日照充足,雨量充沛。区内年平均气温21.7℃,年平均降雨1 100~1 700 mm,年平均相对湿度79%,年平均日照总时1 800 h。区内盛产甘蔗、木薯、花生等农作物产品,其中甘蔗是我国主要的糖料作物,是一年或多年生热带和亚热带实心草本植物,具有纤维须根系,甘蔗收割后土壤内会留有宿根,第二年会重新分枝生茎。本试验开始于2014年,试验前地块以常规耕作种植甘蔗为主,试验后免耕区不进行任何翻耕措施,耕作区翻耕时间为3 a一次,以机械翻耕为主,深度为30 cm,采样时间为2017年9月。试验区分免耕(NT)和耕作(CT)两种处理,样地面积均为50 m²,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。试验区灌溉条件和施肥条件均保持一致。

1.2 样品采集与基本性质测定

综合考虑甘蔗根系的生长深度、耕作深度以及成

垄情况。对 0—40 cm 深度的土层进行原状土样(环刀 100 cm³)和扰动土样(约 1.5 kg)采集,每 10 cm 一层,每层 5 个重复,用于测量土壤基本理化性质。其中采用激光法测定土壤质地^[21],重铬酸钾稀释热比色法测定土壤有机质^[22]。并采用内径 10 cm,厚度 0.5 cm,长度 52 cm 的高强度抗压 PVC 管(取土端为刀口状),以敲击取样法采集原状土柱,土柱内土壤距离 PVC 管顶端 12 cm。土柱取出后用泡沫填充剂外加保鲜膜以避免土柱水分蒸发,再用泡沫板等作防震措施带回实验室用于 CT 扫描。本研究中共采集 6 个 PVC 大土柱,其中免耕和耕作处理各 3 个重复。

1.3 CT 图像扫描与处理

1.3.1 CT 图像扫描 CT 扫描设备选用美国 GE 公司生产的机器,型号为 Discovery CT 750HD,扫描管电压 120 kV,扫描管电流 300 mA。扫描体素尺寸:0.468 8 mm×0.468 8 mm×0.625 mm,共获得 640 张图像矩阵为 512×512 的图片,输出格式为 DICOM(Digital Imaging and Communications in Medicine)。

1.3.2 CT 图像处理

(1) CT 图像二值化。在图像降噪和增强处理的基础上,采用 ImageJ 插件对土壤和孔隙图像作二值化处理。再在二值化图像的基础上进行土壤与孔隙的分割,其中分割阈值是以二值化后孔隙与原孔隙进行对比直至差值≤1%得到,可较保证孔隙与实际情况相符。最后对二值化后的图像进行膨胀和腐蚀处理以消除孔隙间的细小连接,最终得到>400 μm 孔隙图像,用于后续孔隙特征提取。

(2) 孔隙二维特征提取。综合考虑扫描图像边缘影响,对单张孔隙图像进行感兴趣区域(ROI)选取,本研究 ROI 选取大小为 52.5 mm×52.5 mm,并利用 ImageJ 软件获取 ROI 上孔隙的数目、面积、周长等二维形态参数,用于计算孔隙面密度和孔隙复杂度。

孔隙面密度(M_z)用孔隙面积与总面积的比值来定量评价^[23], M_z 值越高说明孔隙占比越大,土壤越疏松,计算公式如下:

$$M_z = A_z / A \quad (1)$$

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)用孔隙周长与面积的比值关系来定量评价^[24], D_z 值越高,孔隙的扭曲复杂程度越高。计算公式如下:

$$D_z = 2 \lg P_z / \lg A_z \quad (2)$$

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。

(3) 孔隙三维可视化与三维特征提取。用 Image J

软件中相关插件对 ROI 中孔隙进行三维重建和骨架提取。主要提取参数:孔隙数、孔隙体积、内壁表面积,孔隙分支数量和交点数及分支长度,用于计算表征孔隙三维特征的指标:孔隙度、比表面积、弯曲度和连通度等。

孔隙比表面积可用孔隙内壁表面积和体积之间的关系来定量评价^[25],可反映单位体积上内孔壁对水分和溶质运动的阻挡能力,计算公式如下:

$$S = W_p / V_p \quad (3)$$

式中: S 为孔隙的比表面积; W_p 为孔隙内壁表面积; V_p 为孔隙体积。

孔隙弯曲度可用孔隙中轴上的两点之间的实际长度与最短距离之比评价^[26],可表征孔隙的空间弯曲形态, T 值越大,孔隙通道及其网络越复杂,水和溶质的实际路程越曲折,计算公式如下:

$$T = P_a / P_b \quad (4)$$

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。

孔隙的连通度可用孔隙相交点数(J)和端点数(E)之间的关系来定量评价^[27],连通度越高,孔隙网络的连通性越好,计算公式如下:

$$C = J / (J + E) \quad (5)$$

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。

1.4 孔隙分级测定

可根据毛细管上升理论以及土壤基质势与孔隙大小的关系获取不同大小孔隙。大孔隙(>50 μm)为基质势大于-6 kPa 时所对应的孔隙,中孔隙(0.2~50 μm)为-6~-1 500 kPa 所对应的孔隙,小孔隙(<0.2 μm)为基质势小于-1 500 kPa 所对应的孔隙^[28]。采用 RETC(retention curve)软件对压力膜仪测定环刀样品的数据拟合得到土壤水分特征曲线,并根据土壤水分特征曲线获得不同基质势对应的不同直径孔隙,最终绘制孔隙大小分布图。孔隙的直径计算公式如下^[29]:

$$d = 300 / \psi \quad (6)$$

式中: d 为孔隙直径(μm); ψ 为土壤基质势绝对值(kPa)。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式下土壤基本性质

总体上免耕与耕作两种处理间质地组成无明显差异,同处理不同土层间质地差异也不显著,而容重和有机质存在差异(表 1)。免耕处理土壤容重大于耕作处理,但仅在 0—10 cm 土层差异显著。随土层深度增加两种处理下容重变化趋势不同,免耕处理容

重随土层深度的变化不明显,而耕作处理容重随土层深度增加呈逐渐增大趋势,其中 0—20 cm,20—30 cm,30—40 cm 土层之间容重差异显著。耕作处理

有机质含量显著高于免耕处理,两种处理有机质含量均随土层深度增加呈逐渐减小的趋势,但免耕处理各土层间差异显著,而耕作处理各土层差异相对较小。

表 1 不同耕作方式下土壤基本理化性质

处理方式	深度/cm	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	容重/(g·cm ⁻³)	有机质/(g·kg ⁻¹)
NT	0—10	25.03±1.80Aa	34.67±1.52Aa	40.30±2.48Aa	1.550±0.015Aa	15.41±1.53Aa
	10—20	22.49±2.02Aa	31.03±1.38Aa	48.61±4.14Aa	1.521±0.065Aa	11.72±1.32Ab
	20—30	19.63±0.72Aa	31.81±3.85Aa	46.25±3.03Aa	1.552±0.056Aa	12.06±1.28Ac
	30—40	25.44±3.24Aa	35.48±6.27Aa	37.45±4.79Aa	1.534±0.036Aa	7.21±2.31Ad
CT	0—10	25.67±5.54Aa	31.42±3.95Aa	39.48±6.87Aa	1.437±0.499Ba	20.03±1.63Ba
	10—20	24.82±3.59Aa	32.36±2.68Aa	41.68±3.72Aa	1.451±0.053Aa	17.63±1.19Bab
	20—30	22.52±8.45Aa	34.42±1.33Aa	44.27±7.88Aa	1.478±0.043Ab	18.62±1.10Bac
	30—40	26.75±1.80Aa	35.59±1.36Aa	37.67±2.68Aa	1.530±0.027Ac	13.69±2.49Bad

注:同列中不同大写字母代表同深度下不同处理间差异显著,不同小写字母代表同处理下不同深度间差异显著($p<0.05,n=6$)。

2.2 不同耕作方式下土壤孔隙垂向二维分布特征

根据水分特征曲线计算的两种处理下不同土层土壤孔隙的大小分布存在差异(图 1)。总体上两种处理下各不同土层中 3 种孔隙占比均呈中孔隙>小孔隙>大孔隙的趋势,总孔隙占比在 45%左右。耕作处理大孔隙和小孔隙随土层深度增加变化并不明

显,但中孔隙在 0—30 cm 土层明显高于 30—40 cm 土层。耕作处理的大孔隙在 3 个深度范围(0—10 cm,10—30 cm,30—40 cm)均显著低于免耕处理,中孔隙在 0—30 cm 土层显著高于免耕处理,而小孔隙在 3 个深度范围与免耕处理差异均不显著。免耕处理大、中、小孔隙随土层深度增加的变化则不明显。

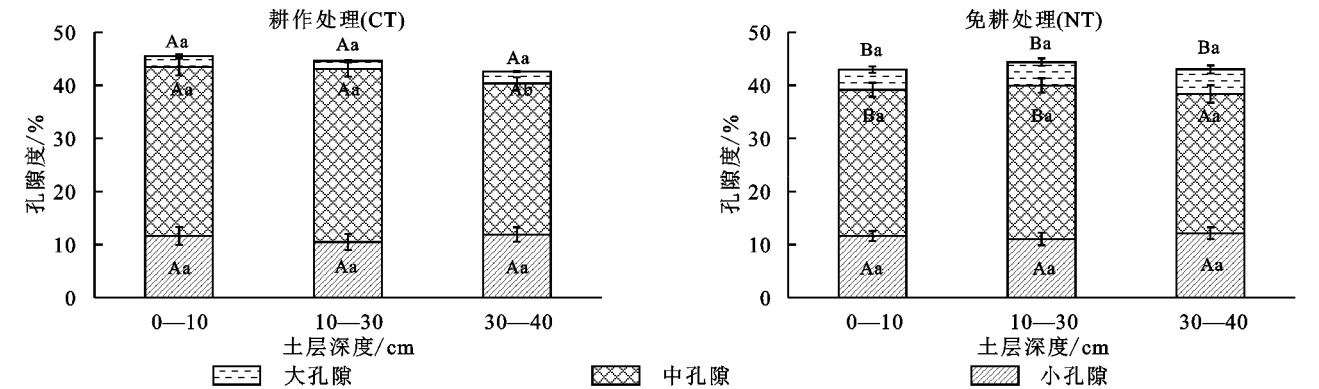


图 1 不同耕作方式下土壤孔隙大小分布

两种处理下土壤孔隙面密度总体上沿土层深度均呈逐渐降低的趋势(图 2),但耕作处理下土壤孔隙面密度均值(2.45%)大于免耕处理(1.15%)。在免耕处理下,0—10 cm 孔隙面密度在 0—2 cm 较小,而在 2—6 cm 范围逐渐增加并达到整个研究深度范围内最大值(4%),并在 6—10 cm 范围内以较大幅度波动。在 10—30 cm,孔隙面密度波幅逐渐减小,以次于 0—10 cm 土层的波幅波动。在 30—40 cm,孔隙面密度波幅达到最小,但局部有增大现象。在耕作处理下,0—10 cm 孔隙面密度在 0—5 cm 以较快速度增加并达到整个研究范围内最大值(7.4%),5—10 cm 孔隙面密度值逐渐降低。在 10—30 cm,孔隙面密度以次于 0—10 cm 土层波幅波动,30—40 cm 孔隙面密度值和波幅逐渐减小,后有局部区域的孔隙面密度值较小突增。相比而言,耕作处理孔隙面密度在 3 个深度范围内波幅和均值都高于免耕处理,其中

0—10 cm 土层尤其明显。孔隙面密度受孔隙的横截面大小或数量的影响,由此可见两种处理沿深度分布孔隙的直径大小或者数量有所不同。

总体上免耕与耕作处理下孔隙复杂度主要在 1%~2%波动(图 2),均值上相差不大,约为 1.6%。耕作处理下孔隙复杂度波动幅度显著大于免耕处理,波动的持续范围也存在差异。在免耕处理下,孔隙复杂度总体波幅和持续范围均较小,波幅相对比较均匀,最大波幅约为 0.2%,最大值出现在 0—5 cm,约为 2.2%,最小值出现在 30—40 cm,约为 1.2%,0—20 cm 孔隙复杂度较 20—40 cm 而言略高。在耕作处理下,孔隙复杂度总体波幅和持续范围均较大,波幅较不均匀,最大波幅约为 0.6%,最大值出现在 0—10 cm,约为 2.1%,最小值出现在 30—40 cm,约为 0.6%,0—20 cm 孔隙复杂度略高于 20—40 cm,但 20—40 cm 孔隙复杂度的波动较 0—20 cm 更为剧

烈。孔隙复杂度的波动剧烈程度反映沿深度方向孔隙边界的异同程度,可见免耕土壤孔隙形态较均匀,

而耕作处理 0—20 cm 孔隙复杂多变,20—40 cm 孔隙简单相似,整体上孔隙形态相对复杂。

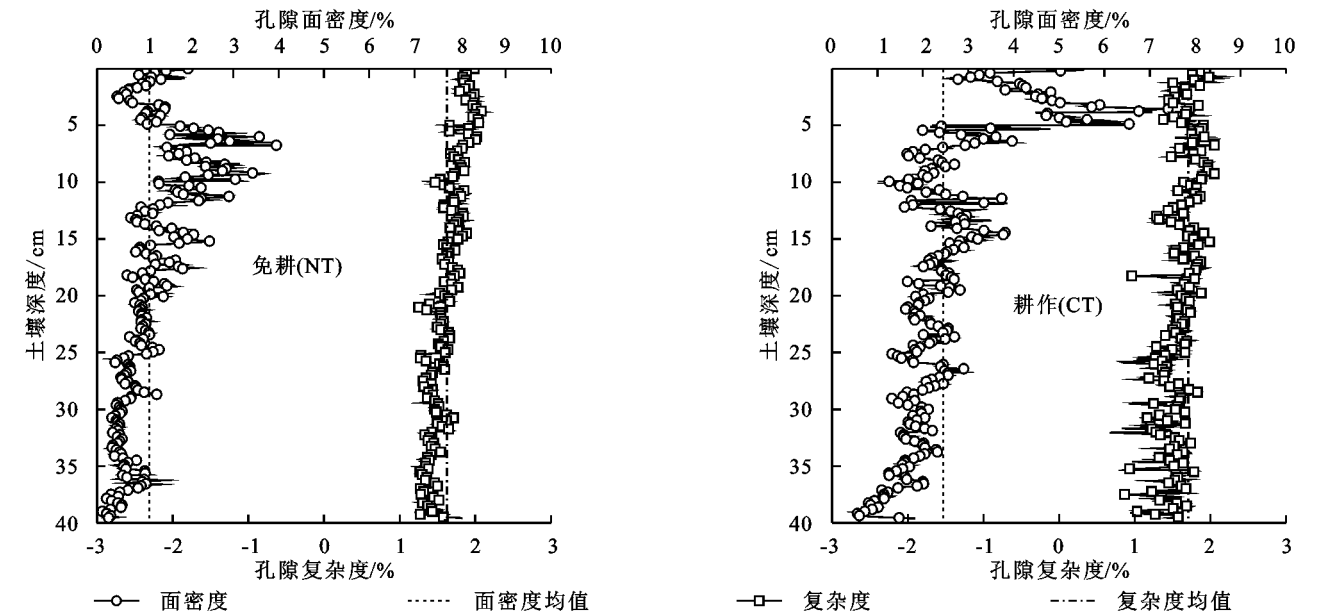


图 2 不同耕作方式下土柱孔隙面密度和复杂度随深度变化

2.3 不同耕作方式下土壤孔隙三维特征

基于整体统计表征土壤孔隙三维特征的两处理孔隙量化数据存在差异(表 2),免耕处理下孔隙数量和孔隙度均显著大于耕作处理($p<0.05$),孔隙数和孔隙度(16 306,1.181%)是耕作处理(8 174,0.526%)的 2 倍左右。免耕土壤孔隙比表面积大于

耕作处理,但两者差异并不显著。免耕处理下孔隙的弯曲度(1.348)高于耕作处理(1.314),但连通度(0.465)低于耕作处理(0.687),检验达到显著水平($p<0.05$)。这说明免耕土壤孔隙的孔隙虽多,但其弯曲度和连通度情况可能导致其通气导水性不如耕作处理。

表 2 不同耕作方式下土柱孔隙三维数据

土柱	孔隙数量/个	孔隙度/%	比表面积/ mm^{-1}	弯曲度	连通度
NT-1	15188	1.061	4.545	1.349	0.413
NT-2	16582	1.220	4.475	1.346	0.506
NT-3	17150	1.263	5.021	1.348	0.477
NT 均值	16306A	1.181±0.106A	4.680±0.297A	1.348±0.002A	0.465±0.047A
CT-1	6719	0.562	4.197	1.320	0.662
CT-2	9349	0.439	4.492	1.318	0.684
CT-3	8454	0.577	4.668	1.304	0.714
CT 均值	8174B	0.526±0.076B	4.452±0.238A	1.314±0.009B	0.687±0.026B

注:同列不同大写字母表示差异显著($p<0.05$), $n=6$ 。

经扫描重构的三维可视化图显示(图 3),免耕处理的孔隙分布空间范围较大、数量较多,但孔隙较小、相对孤立,连通较少,孔隙总体在表层和底层分布较少,中部偏上分布较多。耕作处理的孔隙分布空间范围较小、数量较少,但孔隙相对较大、连通孔隙较多、孤立孔隙较少,如靠近土壤表层的直径较大孔隙和中部大量连通孔隙,孔隙总体上沿土层深度呈逐渐减少的分布趋势,表层孔隙大而粗,中部孔隙呈连续细管状并沿深度向下发育,相互交叉,形成总体向下的孔隙通道网络,但随土层深度增加,孔隙相对减少。可

见两种处理孔隙的三维分布情况可对土壤孔隙结构的相关参数之间的差异进行解释。

3 讨论

在本研究中,耕作使得土壤容重降低、有机质含量增加、而对土壤质地组成影响有限。这主要是翻耕的作用使得土壤疏松,降低了土壤的容重,而随着土层深度增加,耕作对土壤容重的影响也逐渐减小,因为土壤容重受其他因素的影响会使得耕作带来的容重差异降低。前人研究表明人为活动压实、降

雨、自然升温等作用都会对土壤容重产生影响^[30]。土壤在耕作后短期内较为疏松,但随着时间推移,降雨等击散作用会使得土壤细颗粒随水流下渗进入大孔隙,使容重增加。升温等作用又加速植物的蒸腾和根系吸水作用,使土壤的含水量降低,促使容重增大。可见这些作用会使耕作后的疏松土壤,变得更加紧实,降低耕作带来的容重差异。而水分胁迫作用和疏松的土壤条件下作物根系会更容易下扎^[31],进一步使得深层含水量降低,并且细颗粒随水流不断运移到下层土壤,从而使得表层土壤容重的差异相对较小。翻耕作用使上下层土壤混合,同时也使表层较多的植物残体被翻到下层土壤空间,因为植物残体会成为有机质的一个重要来源^[32],所以使得下层土壤

有机质含量增加。表层土壤的有机质主要来源应是甘蔗拔节生长过程中不断的剥叶产生的植物残体。相比之下耕作处理土壤拥有更多的有机质来源,所以表层有机质含量较高。有研究表明有机质的分布可间接地影响土壤孔隙结构,改变土壤理化性质^[33],改善土壤的孔隙状况^[34]。前人在多种土壤组成的有机质分布研究中发现有机质随土层深度增加呈减小趋势^[35],这在本研究中也是一致的。而在本研究中耕作主要通过改变有机质的来源分布,间接改变有机质的分布,总体增加了有机质的含量,从而改善了土壤的性质。此外相关研究也证明耕作能影响土壤理化及生物学特性,提高土壤透气性,增加土壤中有机质的含量^[36]。

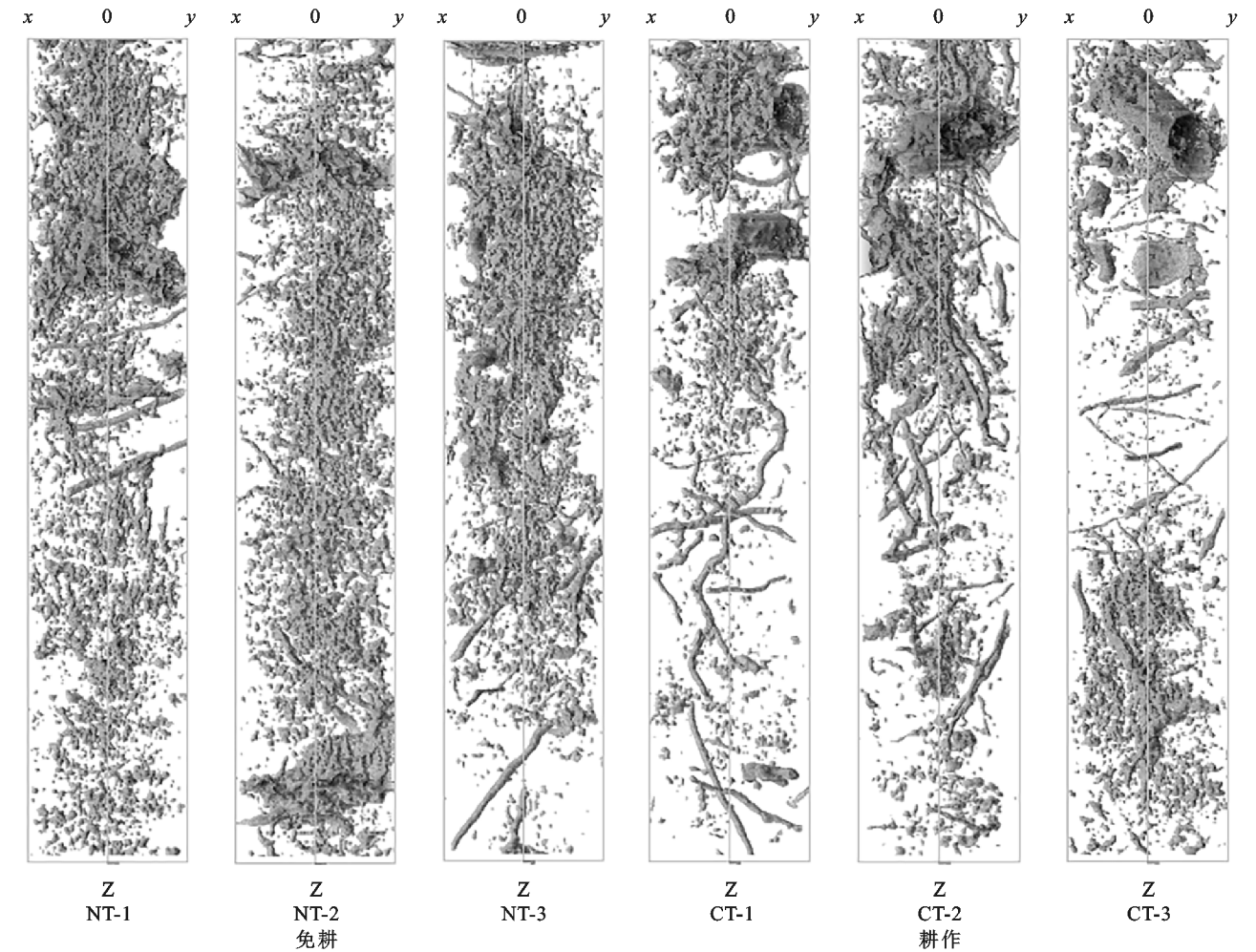


图 3 不同耕作方式下土柱孔隙三维图

尽管目前孔隙的大小分级尚缺乏统一标准,不同分级名称和阈值存在一定差异,但可根据大多数学者研究将其大致分为大、中、小孔隙类型^[37]。其中大孔隙和中孔隙主要为传输孔隙,小孔隙为储存孔隙。在本研究中,耕作主要改变了土壤大孔隙和中孔隙的分布,使得大孔隙减少,中孔隙增加,而对小孔隙的影响有限。前人也在南方坡耕地土壤研究中发现深松和

翻耕对小孔隙的增加并不显著现象^[38]。而相较耕作而言,前人研究也表明免耕会使得土壤小孔隙增加,而大、中孔隙明显减少^[39]。这说明耕作在对土壤的储水功能影响不大的基础上,提高了土壤传输水与溶质的能力。对于大、中孔隙的分布,相关学者也在多种土壤类型的孔隙分布研究中发现耕层的大孔隙明显减少,而中孔隙增加,这充分说明了耕作在减少大

孔隙,增加中孔隙过程中的显著作用^[40]。也有学者在分析轮耕对土壤物理性状及水稻产量影响的研究中认为,翻耕和旋耕等作用对耕层土壤的储水功能有提高作用^[41],即对小孔隙的改变作用,这可能与研究土壤类型、种植作物类型以及耕作管理模式等有关。

在本研究中,免耕与耕作处理下孔隙面密度和复杂度都存在趋于稳定的趋势,但二者的“稳定状态”有所不同,免耕处理趋于一种波幅较小的“静态稳定”,而耕作处理则趋于一种波幅较大的“动态稳定”。两种处理下不同的稳定状态可说明两种处理下相应土层深度范围内孔隙分别以不同的状态持续存在。土壤表层受外界(如降水、太阳辐射等)直接作用和干湿循环过程会导致土壤易干裂收缩产生孔隙^[42],耕作过程通过改变土壤孔隙的界面形态特征使得土壤疏松多孔,这些作用使得土壤通透性增加,土壤动物活动强度增大,而土壤动物活动形成的大孔隙又经常与植物根系交错连通到土壤表面^[43],所以两种处理下土壤表层孔隙应具有较其他深度大的形态变化。而免耕土壤结构基本保持原有状态,随土层深度的增加受外界的影响在逐渐减小,土壤孔隙面密度和复杂度波动也逐渐降低,这与前人研究发现免耕土壤中孔隙变异系数随深度减小趋势一致^[44]。另外免耕过程会增加土壤表面的机械阻力,限制根系的分布和下扎^[45],从而对孔隙二维形态改变有限,这与前人研究中免耕区根系穿插对孔隙复杂度的影响偏低结论也一致^[46],所以免耕土壤孔隙复杂度并未随深度增加产生较大变化。这也说明免耕土壤中水分与溶质需要经过比较复杂路径才能到达甘蔗根系的生长区,这对甘蔗根系生长吸收养分的过程产生阻力。

透过表 2 孔隙数据和图 3 孔隙分布图,本研究中免耕土壤孔隙数(度)虽然高于耕作土壤,但后者孔隙的连通度和弯曲度情况均优于前者。相关研究指出孔隙连通度和弯曲度对土壤导水透气性有着重要影响,对于相同饱和度的土壤,孔隙连通度越高其导水透气性越好,弯曲度则相反^[47]。因此相较免耕而言,本研究中耕作土壤孔隙的连通和弯曲情况更有利于促进土壤的导水透气性。前人研究也发现免耕虽对土壤结构具有改善作用,但是并不能提高孔隙连通性和增加土壤的导水能力,反而降低孔隙的连通性和土壤水分累积入渗量^[48-49]。但也有研究认为免耕通过减少耕翻次数减轻对土壤的扰动,保留土壤大孔隙,能提高土壤贮水量,尤其在降水较少地区该作用尤为明显,但对于降水较丰沛的地区而言,免耕土壤的水

分利用率却低于耕作处理^[50]。究其原因主要是因为免耕处理随着年限的增加土壤容重增大,土壤紧实度增加,导致通水通气性能下降。而对于高含水率的土壤,孔隙的分布其实也制约着其导水透气性^[47]。本研究中耕作土壤 30 cm 土层以上分布有较多直径较大、连通性较好、呈长条或细管状的孔隙,这些大而连通的孔隙对土壤的导水透气性的贡献会更多。这些孔隙的存在很大程度上应归功于耕作带来的综合作用,使得土壤中动植物活动增强,进而形成的较大生物性孔隙(根孔和虫洞)。该现象的发现也正好回应了前述孔隙二维分布特征中孔隙面密度和复杂度的变化情况,但仍然值得注意的是这些大孔隙形成的基础应该是耕作改变原有土壤孔隙分布后形成的较疏松多孔的土壤结构,进一步为土壤中生物活动提供有利条件,生物活动作用又反过来使得土壤可形成更多的生物性孔隙,这种程度在免耕区是体现不出来的。前人研究也说明类似本研究中耕作土壤的网络型孔隙结构对于作物根系的生长和根系对养分的吸收具有良好的综合效益^[49,51]。

单从土壤结构的二维特征和一些孔隙量化数据上,无法完全理清两种耕作方式下土壤孔隙结构的差异性,而借助 CT 扫描技术及重构土壤孔隙三维图,能直观和清晰地辨明两种耕作方式下土壤孔隙结构的差异,很好地解释土壤孔隙结构的相关参数之间的差异。但是由于本研究中扫描设备的精度问题,只能扫描和重构土壤孔隙中的“大孔隙”。尽管由于仪器精度问题的限制无法得到采集土柱中的全部孔隙影像,但从图 3 中可以确定的是在广西甘蔗地土壤中,耕作带来了土壤多个生物性孔隙的形成以及更好的骨架型孔隙网络结构,这要比免耕土壤更利于水肥的运移和作物根系的生长发育,进而促进甘蔗产量的提升。因此,与免耕处理相比,在广西甘蔗种植中耕作处理下的土壤具有较好的结构性。

4 结 论

(1) 耕作对广西旱地甘蔗种植土壤质地组成影响有限,但能降低耕层土壤容重,促进土壤中有机的含量提高。(2) 耕作措施将大孔隙破碎成中孔隙,降低大孔隙,增加中孔隙。(3) 耕作改变土壤原有大孔隙结构,在二维截面上增加孔隙的面密度,增加孔隙复杂度波动程度。在三维空间上改变土壤孔隙分布,降低孔隙的弯曲度,提高孔隙的连通度,增加土壤表层生物性大孔隙。综上,耕作使得土壤孔隙网络结构性增强,这种

网络型结构能满足土壤的导水透气需求,促进水分和养分的快速运移至甘蔗根系生长区。因此,在广西地区的甘蔗种植过程中,耕作措施可促进土壤结构和水肥运移通道的改善,有利于甘蔗的生长发育。

参考文献:

- [1] 杨永辉,武继承,毛永萍,等.免耕对土壤剖面孔隙分布特征的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(7):1019-1028.
- [2] 程亚南,刘建立,张佳宝.土壤孔隙结构定量化研究进展[J].土壤通报,2012,43(4):988-994.
- [3] 杨艳.不同耕作措施对农田土壤理化性质和作物产量的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [4] 宋鸽,史东梅,朱红业,等.不同耕作措施对红壤坡耕地耕层质量的影响[J].土壤学报,2020,57(3):610-622.
- [5] 孟令斌,高玮,郑永照,等.不同耕作措施对土壤特性影响研究进展[J].农业科技通讯,2019(2):164-166.
- [6] 罗俊,林兆里,阙友雄,等.耕作深度对蔗地土壤物理性状及甘蔗产量的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):405-412.
- [7] 汤文光,肖小平,唐海明,等.长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响[J].应用生态学报,2015,26(1):168-176.
- [8] 许淑青.不同农作方式对耕层土壤理化性质的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2008:22-24.
- [9] Munkholm L J, Heck R J, Deen B. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability[J]. Geoderma, 2012,181/182:22-29.
- [10] Muhammad N, Per M, Schaap M G, et al. Prediction of biopore-and matrix-dominated flow from X-ray CT-derived macropore network characteristics[J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2016, 20(10):4017-4030.
- [11] 赵玥,韩巧玲,赵燕东.基于 CT 扫描技术的土壤孔隙定量表达优化[J].农业机械学报,2017,48(10):252-259.
- [12] Petrovic A M, Siebert J E, Rieke P E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982,46(3):445-450.
- [13] San José Martínez F, Caniego F J, García-Gutiérrez C. Lacunarity of soil macropore space arrangement of CT images: Effect of soil management and depth[J]. Geoderma, 2017,287:80-89.
- [14] 吴景社.用 CT 扫描器测定土壤结构[J].灌溉排水学报,1988(4):51-52.
- [15] 姚志华,陈正汉,李加贵,等.基于 CT 技术的原状黄土细观结构动态演化特征[J].农业工程学报,2017,33(13):134-142.
- [16] 唐柄哲,何丙辉,闫建梅.川中丘陵区土地利用类型对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J].应用生态学报,2016,27(5):1445-1452.
- [17] 赵锦梅,张德罡,刘长仲,等.祁连山东段高寒地区土地利用类型对土壤性状的影响[J].生态学报,2012,32(2):548-556.
- [18] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究[J].水土保持学报,2005,19(1):93-96.
- [19] 田涟祎.石漠化地区土壤性质对不同土地利用类型的响应研究[D].贵阳:贵州师范大学,2016.
- [20] Li Z Y, Jin Z J, Li Q. Changes in land use and their effects on soil properties in Huixian karst wetland system [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2017,26(2):699-707.
- [21] 刘建新,邓凌毅,唐晶晶.激光粒度仪在江西河流泥沙颗粒分析中的应用[J].江西水利科技,2015,41(4):259-263.
- [22] 谢细香.重铬酸钾稀释热比色法测定土壤有机质的研究[J].安徽农业科学,2005,33(6):998-999.
- [23] 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.
- [24] 李德成,Velde B,张桃林.利用土壤切片的数字图像定量评价土壤孔隙变异度和复杂度[J].土壤学报,2003,40(5):678-682.
- [25] 刘伟,范爱武,黄晓明.多孔介质传热传质理论与应用[M].北京:科学出版社,2006.
- [26] 孙经纬.农业恢复措施对黑土母质发育的新成土土壤结构性质的影响[D].北京:中国农业科学院,2015.
- [27] 刘春,王宝军,施斌,等.基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J].岩土工程学报,2008,30(9):1383-1388.
- [28] 王震宇,于晓冬,许颖,等.土壤微孔对有机物吸附/解吸的影响及其表征[J].生态学报,2009,29(4):2087-2096.
- [29] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [30] 郭李娜,樊贵盛.旱作农田土壤表层容重年内变化特性的试验研究[J].节水灌溉,2018,269(1):23-27.
- [31] 张爱良,王建平.作物根系与水分的关系[J].作物研究,1997,11(2):4-6.
- [32] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2006,26(3):901-913.
- [33] 刘效东,乔玉娜,周国逸.土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J].植物生态学报,2011(12):5-14.

- [34] 李成亮,孔宏敏,何园球.施肥结构对旱地红壤有机质和物理性质的影响[J].水土保持学报,2004,18(6):116-119.
- [35] 董林林,张海东,于东升,等.引黄灌淤耕作对剖面土壤有机质组分构成的影响[J].土壤学报,2017,54(3):613-623.
- [36] Angers D, N'dayegamiye A, Côté D. Tillage-induced differences in organic matter of particle-size fractions and microbial biomass[J]. Soil Science Society of America Journal (USA), 1993,57(2):512-516.
- [37] 孙梅,黄运湘,孙楠,等.农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J].土壤通报,2015,46(1):233-238.
- [38] 杜满聪,李江涛,李淑玲,等.不同耕作方式对华南坡耕地土壤孔隙结构和抗穿透强度影响[J].广州大学学报:自然科学版,2018,17(6):74-80.
- [39] 王殿武,褚达华.少、免耕对旱地土壤物理性状的影响[J].河北农业大学学报,1992,15(2):28-33.
- [40] 虞娜,金鑫鑫,安晶,等.玉米田耕层不同类型土壤孔隙及库容特征的研究[J].沈阳农业大学学报,2014,45(6):685-690.
- [41] 孙国峰,张海林,徐尚起,等.轮耕对双季稻田土壤结构及水贮量的影响[J].农业工程学报,2010,26(9):66-71.
- [42] 李文杰,张展羽,王策,等.干湿循环过程中壤质黏土干缩裂缝的开闭规律[J].农业工程学报,2015,31(8):126-132.
- [43] 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等.土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J].生态学报,2014,34(11):2801-2811.
- [44] 冯杰,郝振纯.CT扫描确定土壤大孔隙分布[J].水科学进展,2002,13(5):611-617.
- [45] Mosaddeghi M R, Mahboubi A A, Safadoust A. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran[J]. Soil & Tillage Research, 2009,104(1):173-179.
- [46] 赵丽萍,刘家勇,赵培方,等.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,2019,45(1):10-15.
- [47] 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.
- [48] Gómez J A, Giráldez J V, Pastor M, et al. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard [J]. Soil & Tillage Research, 1999,52(3):167-175.
- [49] 相方园.土壤孔隙三维构建与特征表达[D].武汉:华中农业大学,2008.
- [50] 黄高宝,郭清毅,张仁陟,等.保护性耕作条件下旱地农田麦豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应[J].生态学报,2006(4):210-219.
- [51] Hu X, Li X Y, Wang P, et al. Influence of enclosure on CT-measured soil macropores and root architecture in a shrub-encroached grassland in northern China[J]. Soil and Tillage Research, 2019,187:21-30.

~~~~~  
(上接第 121 页)

- [45] 胡建民,胡欣,谢颂华.南方红壤坡地几种典型治理措施的径流调控效应[J].水土保持通报,2013,33(6):32-36,41.
- [46] 周怡雯,戴翠婷,刘窑军,等.耕作措施及雨强对南方红壤坡耕地侵蚀的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):49-54.
- [47] 鲍玉海,丛佩娟,冯伟,等.西南紫色土区水土流失综合治理技术体系[J].水土保持通报,2018,38(3):143-150.
- [48] 朱波,陈实,游祥,等.紫色土退化旱地的肥力恢复与重建[J].土壤学报,2002(5):743-749.
- [49] 郭永明.四川盆地的水土流失特征与水土保持防护体系建设[J].中国水土保持,1992(5):9-13.
- [50] 曹建华,蒋忠诚,杨德生,等.我国西南岩溶区土壤侵蚀强度分级标准研究[J].中国水土保持科学,2008,6(6):1-7,20.
- [51] 尹辉,蒋忠诚,罗为群,等.西南岩溶区水土流失与石漠化动态评价研究[J].水土保持研究,2011,18(1):66-70.
- [52] Alex M, JesúsÁ, Rafael G. Evaluation of surface roughness parameters in agricultural soils with different tillage conditions using a laser profile meter [J]. Soil & Tillage Research, 2016,161:19-30.
- [53] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.