

# 利用基于偏微分方程的图像滤波技术研究土壤孔隙结构

华 珊, 陈 研<sup>\*</sup>, 梁露焄, 任图生

(中国农业大学资源与环境学院植物-土壤相互作用教育部重点实验室, 北京 100193)

**摘 要:** 利用自主研发的土壤切片数字图像处理分析系统软件, 采用 3 种滤波方式, 即 BMO 滤波 (boundary mean oscillation 有界平均振荡模型)、PM 滤波 (Perona-Malik 偏微分方程模型) 和中值滤波, 对免耕、翻耕和旋耕 3 种耕作方式下不同深度土壤切片的数字图像进行去噪增强, 并对处理后的图像进行了孔隙特征参数提取与统计。在此基础上, 探讨了几种图像滤波技术的效果以及耕作方式对不同土层土壤孔隙形态结构的影响, 以期找到适用于土壤切片数字图像的滤波技术, 为后期土壤孔隙信息的提取与统计提供工具。结果表明, 采用 BMO 滤波后, 从土壤切片数字图像得到的土壤孔隙度与试验结果最为接近; 其中, 孔径  $< 5 \mu\text{m}$  的孔隙度显著大于其他图像滤波技术的结果, 而  $5 \sim 50 \mu\text{m}$  与  $> 50 \mu\text{m}$  孔径的孔隙度与其他图像滤波技术的结果没有显著差异; 与免耕相比, 翻耕与旋耕提高了表层土壤的孔隙度, 增加了传导孔隙的比例。

**关键词:** 土壤; 图像处理; 模型; 有界平均振荡模型; 土壤孔隙度; 孔隙分布; 图像滤波技术

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.03.011

中图分类号: S11<sup>+</sup>2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-03-0078-08

华 珊, 陈 研, 梁露焄, 等. 利用基于偏微分方程的图像滤波技术研究土壤孔隙结构[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 78-85.

Hua Shan, Chen Yan, Liang Lutao, et al. Studying soil pore structure by using image filtering technology based on partial differential equation model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 78-85. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

土壤孔隙的大小、数量、连续性、弯曲度和分布状况等直接影响着土壤中的许多重要过程, 特别是土壤中的水、气、热的运动和土壤生物的活动。因此土壤孔隙状况可以作为土壤结构重要指标<sup>[1]</sup>。随着土壤微形态学的发展, 科学家们逐步应用薄片法来直接分析土壤的孔隙状况<sup>[2]</sup>。在偏光显微镜下采用正交偏光与单偏光 2 种方式观察土壤切片并显微摄影<sup>[3-4]</sup>, 然后对图像进行处理, 通过分析二维的土壤孔隙状况, 可以获得土壤孔隙的大小、形状和方向等信息<sup>[5]</sup>, 为研究土壤水气运动, 耕作措施对土壤微形态的影响提供了大量有用的信息。然而, 由于设备与技术的限制, 在土壤切片图像的制作中经常产生大量噪声,

对后期的图像分析带来一定的影响。因此, 要获得比较准确的土壤孔隙信息, 图像的去噪、平滑和增强成为图像前处理的关键。

理想的图像平滑去噪方法应满足以下 2 个条件: 1) 保持边界和细节, 使信息损失最小; 2) 有效去除均质区域的噪声。减少噪声的图像处理方法大致分为 2 类: 基于统计技术的去噪方法与基于偏微分方程的去噪方法。基于统计技术的去噪方法即传统的图像平滑算法, 如均值滤波、中值滤波和高斯滤波等, 属于各向同性扩散<sup>[6]</sup>。该类去噪方法由于不考虑图像的形状特征, 在去噪的同时也模糊甚至破坏了图像的边缘。基于偏微分方程的去噪方法属于各向异性扩散模型, 由图像梯度决定其扩散速度, 能够兼顾噪声消除和特征保持 2 方面<sup>[6-8]</sup>。其中, Perona-Malik 偏微分方程<sup>[6]</sup>滤波是应用较为广泛的一种图像滤波方法<sup>[9-10]</sup>。然而, 在滤波过程中, 该方法有可能把细微的边缘特征当作噪声给滤掉。因此, 在研究对象为土壤孔隙时, 基于 Perona-Malik 偏微分方程滤波有其局限性。

本研究提出利用 BMO (bounded mean oscillation, 有界平均振荡)<sup>[11-12]</sup>方法构建图像滤波器, 对土壤切片数字图像进行去噪增强处理。BMO 滤波不仅能有效地对图像进行去噪, 并且可较好地保留细小的图像特征, 为之后的土壤孔隙

收稿日期: 2013-06-17 修订日期: 2013-12-24

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项 (编号: 201303130-03); 循环农业科技工程项目 (编号: 2012BAD14B01-01)

作者简介: 华 珊 (1986—), 浙江宁波人, 博士生, 研究方向: 土地利用与信息技术。北京 中国农业大学资源与环境学院土壤与水科学系, 100193。Email: qbxs.dhl@163.com

※通信作者: 陈 研 (1957—), 吉林人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 资源利用和环境管理的数学模型、数值算法的研究。北京 中国农业大学资源与环境学院土壤与水科学系, 100193。

Email: chenyan@cau.edu.cn

特征提取与统计提供了工具。我们自主研发了土壤切片数字图像处理分析系统软件 V1.0, 该软件内置 BMO 滤波、PM 滤波和中值滤波 3 种图像滤波增强方法, 可对土壤切片数字图像进行图像前处理。本文利用该软件对这 3 种图像滤波技术的处理效果进行了比较。

## 1 材料与方法

土壤样品采自中国科学院栾城农业生态系统试验站的土壤耕作长期定位试验田。该试验设置翻耕 (conventional tillage, CT)、旋耕 (rotary tillage, RT) 和免耕 (no-tillage, NT) 3 个耕作处理, 每个处理设 3 个重复, 小区面积为 900 m<sup>2</sup> (60 m×15 m)。在夏玉米收获后, 用 5 cm×5 cm 的环刀取 0~5、5~10 和 25~30 cm<sup>3</sup> 层原状土, 每层 3 个重复, 带回实验室风干, 用于制作土壤切片。将带回的原状土样经过取出水分、浸渍、固化、切片和抛光等过程制作成土壤切片, 切片厚度一般为 30 μm, 在偏光显微镜下用正交偏光与单偏光 2 种方式进行显微摄影来获得相关的数字图像, 拍摄所得的图像像素为 3 264×2 448, 分辨率为每像素 0.308 μm。在每个取样点旁边再以相同的方法取原状土用于测定土壤容重。

同时用 1 cm×5.4 cm 的环刀采集原状土, 测定土样低吸力 (0、0.5、1.0、2.0、2.9、3.9、4.9、5.9 kPa) 和高吸力 (10、30、50、70、100、300、500、700、1 000、1 500 kPa) 下的水分特征曲线。低吸力用张力台技术, 高吸力用压力板法<sup>[13]</sup>。完成全部吸力后, 利用烘干法测定最后的土壤含水量。采用 van Genuchten<sup>[14]</sup>建立的函数式拟合得到水分特征曲线参数, 并利用毛管上升公式计算得到相应的土壤孔径分布。

## 2 图像处理分析原理

### 2.1 土壤切片数字图像处理分析系统 V1.0 的总体功能与特色

土壤切片数字图像处理分析系统 V1.0 (软件著作权登记号: 2011SRBJ0407) 主要用于土壤切片数字图像的前期处理、图像中孔隙特征参数的提取和相关数据的统计。系统中包括 BMO 滤波、PM 滤波和中值滤波 3 种图像滤波技术, 并可以对处理完成后的土壤切片数字图像进行孔隙特征的提取, 包括总孔隙度、孔隙总个数、各孔隙面积以及相同面积孔隙个数。该系统能够直接由土壤切片数字图像获取土壤孔隙特征相关信息, 有别于传统的间接物理方法。其运行流程如图 1 所示。

### 2.2 几种图像滤波技术的算法描述

#### 2.2.1 中值滤波

本文采用传统的中值滤波算法<sup>[15]</sup>, 其基本原理是把数字图像或数字序列中某一点的值用该点的一个邻域中各点值的中值代换。设  $F(x,y)$  为数字图像像素点的灰度值, 滤波窗口为  $A$  的中值滤波器可以定义为:

$$G(x,y) = \text{Med}_{(x,y) \in A} \{F(x,y)\} \quad (1)$$

传统的中值滤波算法简单, 对图像有一定的去噪效果, 但是其窗口内的排序处理破坏了图像的空间相邻信息和结构, 会造成图像的细节、棱角和细线被模糊或去除, 近年来, 人们在此基础上提出一些改进算法<sup>[16-17]</sup>。

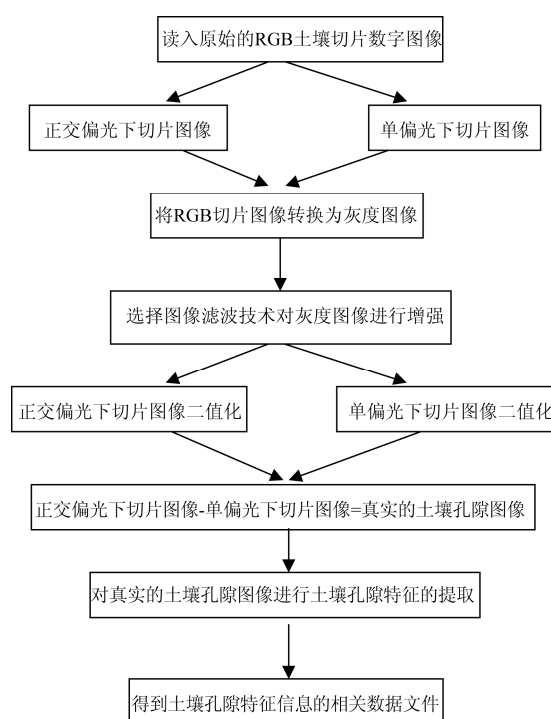


图 1 图像处理流程图

Fig.1 Flow chart of image processing

#### 2.2.2 Perona-Malik 偏微分方程滤波

20 世纪 90 年代初期, Perona 和 Malik 在热传导方程的基础上建立了各向异性扩散方程并将其利用到了图像处理中尺度空间 (scale space) 的图像平滑上, 取得了较好的结果<sup>[6]</sup>。从数学意义上来分析, Perona-Malik 方程模型实质是非线性热传导方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial I(x,y,t)}{\partial t} = \text{div}(c(|\nabla I(x,y,t)|) \nabla I(x,y,t)) \\ I(x,y,0) = f(x,y) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $f(x,y)$  表示二维图像的空间信息;  $I(x,y,t)$  表示图像随时间  $t$  变化的状态;  $I(x,y,0)$  表示图像的

原始状态,  $\text{div}$  和  $\nabla$  分别表示散度算子和梯度算子,  $c(\cdot)$  是扩散系数函数。在 Perona-Malik 方程中,  $c(\cdot)$  是关于梯度的函数, 即在梯度低的区域平滑效果很强, 而在接近边缘梯度较高的区域尽可能的减少平滑甚至不平滑, 这样就实现了既能有效去除噪声, 同时又能较好的保持原图像的线条、纹理等特征。然而, 在滤波过程中, 该方法可能把细微的边缘特征当做噪声给滤掉。因此, 在研究对象为土壤孔隙时, Perona-Malik 偏微分方程滤波有其局限性。

### 2.2.3 BMO 滤波

BMO 即有界平均振动模型, 它通过一种新导数格式的确定来探测边界特征, 并运用积分平均的思想来消除噪声的影响。由此引出的  $Z^Q$  梯度算子与直接使用梯度模的方法相比, 其受噪声的干扰更小; 而与 Catte 等的带 Gaussian 平滑核的梯度算子<sup>[18]</sup>相比, 其算法结构比较简单。这就使得基于 BMO 算法的计算格式在近年得到更多的重视与发展。

假设  $f(x)$  是一个 1-D 的函数, 我们在以  $x$  为中点,  $h$  为半径的区间  $[x-h, x+h]$  内进行积分。如果  $f(x)$  在  $x$  点的邻域内满足某些性质 (即  $f(x)$  在此区域内 Lebesgue 可积), 那么就有以下的现象:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{2h} \int_{x-h}^{x+h} f(y) dy = f(x) \quad (3)$$

将等式右侧也写入积分之中, 就得到以下形式:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{2h} \int_{x-h}^{x+h} |f(y) - f(x)| dy = 0 \quad (4)$$

在  $f(x)$  函数中, 具有这样性质的点就被称为 Lebesgue 点。人们将 BMO 算法引入 PDE 模型, 并且基于 1-D 的 Lebesgue 点的结构, 写出其 2-D 结构。假设  $Q(x, r)$  是一个以  $x$  为中点边长  $2r$  的正方形邻域,  $|Q(x, r)|$  表示此正方形邻域的面积,  $u(x)$  是平面上的一个函数, 于是 2-D 的 Lebesgue 点结构为:

$$\frac{1}{|Q(x, y)|} \int_{Q(x, y)} |u(y) - u(x)| dy \quad (5)$$

这时在被积函数在引进一次积分平均, 即为 2-D 的 BMO 格式:

$BMO =$

$$\frac{1}{|Q(x, r)|} \int_{Q(x, r)} \left| u(y) - \frac{1}{|Q(x, r)|} \int_{Q(x, r)} u(z) dz \right| dy \quad (6)$$

在 BMO 格式和梯度的关系上, 将正方形邻域  $Q(x, r)$  换成球  $B(x, r)$ , 则可以证明如下等式<sup>[11]</sup>:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r |Z_n| |B(x, r)|} \int_{B(x, r)} \left| u(y) - \frac{1}{|B(x, r)|} \int_{B(x, r)} u(z) dz \right| dy = |\nabla u(x)| \quad (7)$$

上式适用于 2-D 正方形区域  $Q(x, r)$  的 BMO 形式即为  $Z^Q$  梯度算子:

$$Z^Q(u, x, r) = \frac{2}{r |Q(x, r)|} \int_{Q(x, r)} \left| u(y) - \frac{1}{|Q(x, r)|} \int_{Q(x, r)} u(z) dz \right| dy \quad (8)$$

$Z^Q$  梯度算子通过 2 次积分平均计算来对抗噪声的干扰, 同时可以以较少的计算量和计算步骤检测出更为细微的边界特征。因此, BMO 滤波既能达到去噪效果, 又能较好地保留图像中的细节特征。

## 2.3 土壤切片图像处理及其统计分析

描述土壤孔隙结构的指标主要有孔隙度 (porosity)、孔隙大小分布 (pore size distribution, PSD)、连通性 (connectivity)、定向性 (orientation) 和分数维 (fractal dimension) 等。本研究主要选择孔隙度和孔隙大小分布这 2 个常用指标。

### 2.3.1 孔隙度

像素是数字图像最小的单位, 在土壤切片二值图像中, 孔隙度为孔隙面积 (即白色部分) 与整幅图像面积的比值, 其计算公式为:

$$P = S_p / S \quad (9)$$

式中:  $P$  指孔隙度;  $S_p$  指孔隙面积, 像素数;  $S$  指整幅图像的面积 (像素数)。

### 2.3.2 孔隙大小分布

在土壤切片的二维图像中, 孔隙可以近似地被看作不同大小孔径的圆形。因此孔隙大小分布可看作各孔径级别孔隙所对应的孔隙面积比。其计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$P_i = S_{pi} / S \quad (10)$$

式中:  $i$  指孔径范围, 本文采用 Carter 和 Ball 的分级标准<sup>[20]</sup>将孔径分为 3 类, 分别为  $< 5 \mu\text{m}$  (残余孔隙),  $5 \sim 50 \mu\text{m}$  (储存孔隙),  $> 50 \mu\text{m}$  (传导孔隙)。  $P_i$  指孔径为  $i$  的孔隙所对应的面积比值,  $S_{pi}$  指孔径为  $i$  的孔隙面积。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同图像滤波技术对孔隙度的影响

图 2 和图 3 分别为 3 种耕作方式下不同深度土层土壤切片的数字图像采用 BMO 滤波处理与原图直接二值化后结果的比较。我们将土壤切片图像直接采用自适应阈值<sup>[21]</sup>二值化, 即未经过任何图像增强滤波处理, 作为原图进行对比分析。从计算结果

来看（表 1），3 种图像滤波技术处理后获得的孔隙度并没有显著性差异，但与传统物理方法计算所得的孔隙度相比差异显著。这是由于土壤结构的复

杂性，有限的二维土壤切片不能完整的表征出土壤结构的全部性质特征。另外，在切片显微摄影成像时，图像分辨率也可能导致部分孔隙的损失。

表 1 基于图像滤波技术处理和土壤容重得到的不同耕作方式下 3 个土层的孔隙度  
Table 1 Soil porosity derived from digital images processed by different image filters and soil bulk density

土层深度 Soil layer/cm	耕作方式 Tillage method	孔隙度 Soil porosity				实测数据 Experimental data
		原图二值 Blank control	中值滤波 Median filter	PM 滤波 PM filter	BMO 滤波 BMO filter	
0~5	翻耕 CT	0.351±0.005b	0.350±0.005b	0.348±0.005b	0.356±0.006b	0.500±0.006a
	旋耕 RT	0.345±0.007b	0.345±0.007b	0.344±0.006b	0.346±0.007b	0.493±0.004a
	免耕 NT	0.330±0.006b	0.329±0.007b	0.326±0.008b	0.329±0.001b	0.471±0.008a
5~10	翻耕 CT	0.332±0.004b	0.331±0.004b	0.332±0.004b	0.336±0.006b	0.459±0.005a
	旋耕 RT	0.319±0.007b	0.318±0.007b	0.317±0.008b	0.320±0.008b	0.445±0.009a
	免耕 NT	0.302±0.007b	0.300±0.007b	0.299±0.007b	0.306±0.007b	0.425±0.005a
25~30	翻耕 CT	0.292±0.006bc	0.289±0.007bc	0.285±0.008c	0.297±0.006b	0.389±0.008a
	旋耕 RT	0.287±0.008b	0.284±0.009b	0.280±0.009b	0.292±0.006b	0.389±0.006a
	免耕 NT	0.290±0.006b	0.289±0.006b	0.287±0.005b	0.292±0.007b	0.382±0.006a

注：不同字母表示同一耕作方式与土层深度下不同图像滤波技术间的差异显著，相同字母表示差异不显著（ $p<0.05$ ）。

Note: Different letters represent soil porosity obtained from three image filters differ significantly in the same soil layers and tillage methods.

利用图像滤波技术得到的孔隙度在不同耕作方式与不同深度土层间的变化趋势与传统物理方法是一致的，即 0~5 与 5~10 cm 的土层中，各耕作方式土壤的孔隙度大小为 CT>RT>NT，而在 25~30 cm 的土层中，各耕作方式土壤的孔隙度差异不显著。其中，BMO 滤波处理所获得的孔隙度与传统物理方法所获得的孔隙度最为接近，原图二值化处理次之，中值滤波与 PM 滤波处理所得结果则相差较远。

### 3.2 不同图像滤波技术对孔隙大小分布的影响

土壤总孔隙是由各级孔隙组成的，不同孔径级别的孔隙对土壤内部水、气、热的交换与养分供给起着重要作用。因此图像滤波技术能否最大程度的保留土壤切片图像的边界与细节特征，更好地反映孔隙大小分布，是值得关注的问题。表 2 是 3 种图像滤波技术与水分特征曲线获得的不同耕作方式下各孔径范围的孔隙度。以翻耕土壤 0~5 cm 土层为例，各滤波技术所得孔径 5~50  $\mu\text{m}$  的孔隙度与实测值有显著性差异，而孔径 >50  $\mu\text{m}$  的孔隙度，则与实测值无显著性差异，且各图像滤波技术所得结果之间没有显著性差异。各滤波技术所得孔径 <5  $\mu\text{m}$  的孔隙度大小为 BMO 滤波>原图二值>中值滤波>PM 滤波，BMO 滤波所得结果分别比其他滤波技术增加了 33.3%、59.3%和 70.4%，各滤波技术之间的结果差异显著。其他 2 种耕作方式与不同深度下孔隙度的分布呈现类似的变化趋势。

各滤波技术所得结果指出，不同图像滤波技术对孔隙大小分布计算结果的影响主要在孔径<

5  $\mu\text{m}$  的孔隙：PM 滤波在针对大孔隙去噪增强方面的效果要比其他的图像滤波技术稍好，但在保留小孔隙特征信息方面效果最差，导致最终所得的土壤总孔隙度与实测结果相差最大；中值滤波作为传统的图像滤波技术，其算法对去噪效果具有不稳定，在滤波过程中丢失了大量的孔隙特征信息，滤波效果也不佳；而 BMO 滤波兼顾去噪增强与保留细节 2 方面，尤其是在保留图像中小孔隙信息方面，效果显著优于其他 2 种滤波技术。对于孔径<50  $\mu\text{m}$  的孔隙度，滤波技术所得结果仍与实测值有显著性差异。其原因如下：一方面，二维土壤切片无法完整地反映出原状土样内部复杂的结构，会导致一部分小孔隙的损失；另一方面，土壤切片显微摄影时，图像分辨率也会导致无法辨别一部分孔径较小的孔隙。BMO 滤波在识别保留孔径<5  $\mu\text{m}$  孔隙方面的效果显著优于其他 2 种滤波技术，在一定程度上弥补了土壤切片制备与显微成像过程中造成的小孔隙信息的损失，但 BMO 滤波所得结果与实测值仍有显著性差异。通过制备连续土壤切片及其数字图像方法能够获得土壤的三维结构，但是这种方法有个最大的缺点就是费时费力<sup>[22-23]</sup>。医用 CT (computed tomography)可以在不扰动分析对象内部结构的情况下直接对原状土壤样本进行分析，而且成像速度快，可以进行三维立体分析等<sup>[24-25]</sup>。在今后的研究中，可将图像滤波技术与 CT 断层扫描技术结合，以此来避免前期成像过程中孔隙信息不必要的损失，使得最终结果更好的反映原状土内部的孔隙数量与大小分布状况。

表 2 根据不同图像滤波技术处理后的图像分析与水分特征曲线得到的各孔径范围孔隙度

Table 2 Soil porosity of various aperture ranges derived from digital images processed with four different image filters and soil-water characteristic curve

耕作处理 Tillage method	土层深度 Soil layer/cm	图像滤波方式 Image filter	各孔径范围孔隙度 Aperture range		
			$<5\ \mu\text{m}$	$5\sim50\ \mu\text{m}$	$>50\ \mu\text{m}$
翻耕 CT Conventional tillage	0~5	BMO 滤波	0.027±0b	0.055±0.014b	0.274±0.011a
		PM 滤波	0.008±0c	0.058±0.015b	0.282±0.013a
		中值滤波	0.011±0c	0.058±0.015b	0.280±0.013a
		原图二值	0.018±0bc	0.056±0.014b	0.277±0.013a
		实测数据	0.233±0.017a	0.150±0.005a	0.303±0.045a
	5~10	BMO 滤波	0.027±0.006b	0.070±0.031b	0.239±0.036a
		PM 滤波	0.008±0.002d	0.073±0.031b	0.249±0.030a
		中值滤波	0.011±0.002d	0.074±0.031b	0.246±0.032a
		原图二值	0.018±0.004c	0.072±0.030b	0.243±0.033a
		实测数据	0.249±0.001a	0.142±0.003a	0.224±0.048a
	25~30	BMO 滤波	0.032±0.002b	0.083±0.039b	0.182±0.036a
		PM 滤波	0.010±0.003b	0.087±0.039b	0.189±0.034a
		中值滤波	0.014±0.004b	0.088±0.040b	0.187±0.037a
		原图二值	0.022±0.003b	0.086±0.041b	0.184±0.037a
		实测数据	0.232±0.030a	0.131±0.021a	0.190±0.048a
旋耕 RT Rotary tillage	0~5	BMO 滤波	0.024±0.002b	0.077±0.018b	0.245±0.025a
		PM 滤波	0.008±0.001b	0.081±0.020b	0.255±0.026a
		中值滤波	0.011±0.001b	0.081±0.019b	0.252±0.026a
		原图二值	0.017±0.001b	0.080±0.019b	0.248±0.026a
		实测数据	0.236±0.022a	0.145±0.003a	0.259±0.042a
	5~10	BMO 滤波	0.027±0.001b	0.091±0.009b	0.203±0.016a
		PM 滤波	0.010±0d	0.094±0.009b	0.213±0.017a
		中值滤波	0.013±0d	0.094±0.009b	0.211±0.016a
		原图二值	0.019±0c	0.093±0.008b	0.207±0.015a
		实测数据	0.292±0.005a	0.121±0.018a	0.237±0.049a
	25~30	BMO 滤波	0.033±0.002b	0.085±0.020b	0.174±0.015a
		PM 滤波	0.010±0c	0.092±0.020b	0.178±0.014a
		中值滤波	0.015±0c	0.091±0.019b	0.179±0.014a
		原图二值	0.023±0.001bc	0.088±0.019b	0.176±0.013a
		实测数据	0.285±0.018a	0.159±0.013a	0.154±0.037a
免耕 NT No-tillage	0~5	BMO 滤波	0.023±0.002b	0.079±0.029b	0.228±0.030a
		PM 滤波	0.007±0.001b	0.080±0.026b	0.239±0.019a
		中值滤波	0.011±0.001b	0.081±0.026b	0.238±0.020a
		原图二值	0.016±0.002b	0.079±0.026b	0.234±0.022a
		实测数据	0.305±0.029a	0.150±0.009a	0.254±0.048a
	5~10	BMO 滤波	0.031±0.004b	0.101±0.016b	0.173±0.022b
		PM 滤波	0.010±0.002c	0.106±0.015b	0.182±0.021b
		中值滤波	0.015±0.002c	0.107±0.014b	0.179±0.020b
		原图二值	0.022±0.003bc	0.105±0.016b	0.176±0.021b
		实测数据	0.256±0.016a	0.150±0.021a	0.224±0.045a
	25~30	BMO 滤波	0.029±0.002b	0.115±0.004b	0.148±0.003b
		PM 滤波	0.010±0.001d	0.117±0.005b	0.159±0.002b
		中值滤波	0.014±0.001d	0.120±0.005b	0.154±0.005b
		原图二值	0.021±0.001c	0.117±0.002b	0.152±0.005b
		实测数据	0.245±0.011a	0.161±0.030a	0.174±0.040a

注：不同字母表示同一耕作方式、土层深度与孔径范围下不同图像滤波技术间的差异显著，相同字母表示差异不显著( $p<0.05$ )。Note: Different letters represent soil porosity obtained from three image filters differ significantly in the same soil layer and tillage methods. ( $p<0.05$ ).



### 3.3 耕作方式对土壤孔隙结构的影响

耕作方式对土壤结构,尤其是土壤孔隙,有一定的影响(如图2、图3)。

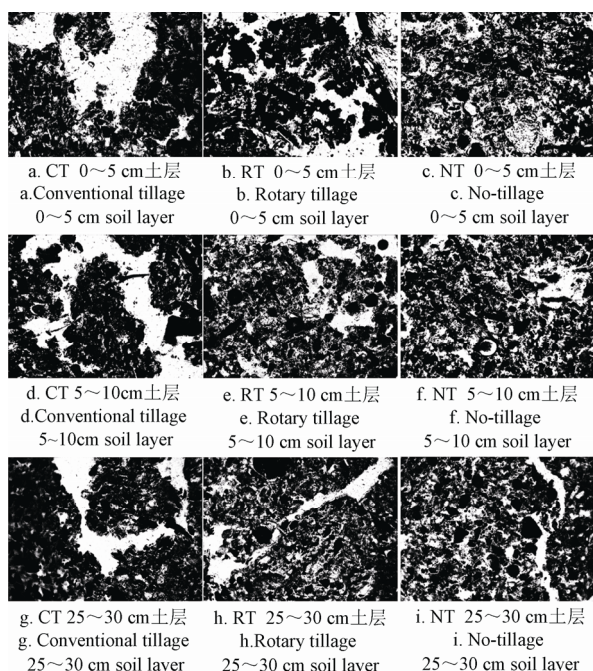


图2 3种耕作方式在不同土层深度下的土壤切片数字图像采用BMO滤波后的效果图

Fig.2 Digital images of soil section from different tillage measures and soil layers processed by BMO filter

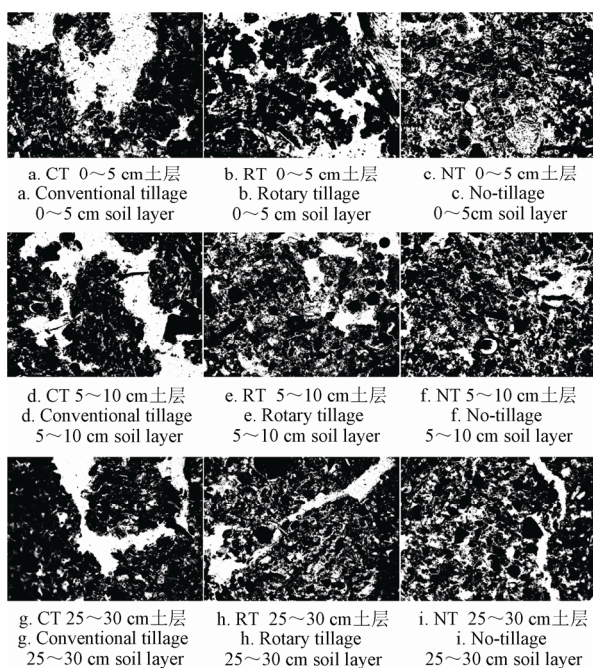


图3 3种耕作方式在不同土层深度下的土壤切片数字图像采用原图二值化后的效果图

Fig.3 Digital images of soil section from different tillage measures and soil layers without any image filters

从图2与图3可以看到,在0~5 cm土层中,翻耕土壤主要以不规则形状的大孔隙为主,数量不

多,但面积较大,旋耕土壤孔隙形态主要是细长的孔道,形状弯曲,而免耕土壤的孔隙数量较多,但面积较小,形状多以圆形、椭圆形和管道状为主。在5~10 cm与25~30 cm土层中,翻耕土壤的大孔隙形状变得较为细长,旋耕土壤的孔隙逐渐变得细小分散,而免耕土壤的孔隙仍以细小孔隙为主,数量较旋耕与翻耕土壤多。上述分析指出,BMO滤波在3种滤波技术中效果最佳,因此我们利用BMO滤波所获得的土壤孔隙度与孔隙大小分布来定量的分析耕作方式对土壤孔隙结构的影响。

#### 3.3.1 耕作方式对孔隙度的影响

由表1可知,在0~5与5~10 cm的土层中,孔隙度大小为:CT>RT>NT,且差异显著;而在25~30 cm的土层中,3种耕作方式下的孔隙度差异不显著。可见土壤在耕作过程中,采取不同的耕作方式,对耕层土壤产生的人为扰动程度也不同,其中CT的扰动程度最大,RT的扰动程度其次,从而导致了孔隙度的差别,25cm以下的底层由于扰动较少,耕作方式对孔隙度的影响差别很小。

#### 3.3.2 耕作方式对孔隙大小分布的影响

由表2可知,孔径>50  $\mu\text{m}$ 的孔隙度在各耕作方式与深度土层间均显著大于其他2个孔径级别,且随着土层深度的增加而减少;在同一土层深度下,该孔径的孔隙度大小为CT>RT>NT。孔径5~50  $\mu\text{m}$ 的孔隙度在不同深度土层间比较稳定,在同一土层深度下,该孔径的孔隙度大小则为NT>RT>CT。孔径<5  $\mu\text{m}$ 的孔隙度在各耕作方式与土层深度间比较稳定,且呈现不一致的变化趋势。可见,实行免耕措施后,孔径>50  $\mu\text{m}$ 的孔隙度会有所减少,但增加了孔径5~50  $\mu\text{m}$ 的孔隙度。该孔径范围的孔隙(储存孔隙)水分传导性能较好,并且能够保持水分与养分,有利于植物生长。因此,与免耕相比,翻耕与旋耕对土壤表层人为地进行了不同程度的扰动,增加了土壤中孔径>50  $\mu\text{m}$ 的孔隙(传导孔隙)的比例,从而提高了表层土壤的孔隙度。

## 4 结 论

本文综合了计算机软件技术、图像处理和数值分析方法,自主研发了一款土壤切片数字图像处理分析系统,对土壤切片数字图像进行了增强滤波去噪处理,并将结果与常用滤波技术进行了比较。主要研究结果如下:

3种滤波技术处理结果的比较表明,三者对土壤切片图像都有一定的去噪增强效果,但BMO滤波在保留图像的边界与细节特征方面显著优于其他滤波技术,能够识别保留孔径<5  $\mu\text{m}$ 的孔隙特征

信息, 所得的孔隙度结果与实测数据最为接近; PM 滤波在针对孔径  $5 \sim 50$  和  $>50 \mu\text{m}$  的孔隙去噪增强方面较其他滤波技术稍强, 但容易丢失小孔隙特征信息。由于土壤切片以及相关设备的局限性, 无法完整的反映土体内的孔隙分布状况, 导致各滤波技术最后分析所得的土壤总孔隙度显著低于传统物理方法计算所得结果。在今后的研究过程中, 可以考虑将图像滤波技术与 CT 断层扫描技术结合, 以期能够完整的描述土体内部的孔隙数量、大小分布状况。

耕作方式对土壤表层结构有显著影响。各耕作处理土壤孔隙度和孔隙大小分布的结果指出, 在同一土层深度, 土壤总孔隙度大小为  $\text{CT} > \text{RT} > \text{NT}$ 。其中, 孔径  $>50 \mu\text{m}$  的孔隙度大小为  $\text{CT} > \text{RT} > \text{NT}$ , 而孔径  $5 \sim 50 \mu\text{m}$  的孔隙度大小则为  $\text{NT} > \text{RT} > \text{CT}$ , 孔径  $<5 \mu\text{m}$  的孔隙度则在不同土层深度间变化趋势不一致。翻耕和旋耕都不同程度地增加了表层传导孔隙的比例, 使得孔隙度增大; 免耕则减少了土壤的人为扰动, 孔隙度较小, 可能有助于土壤表层团聚体结构形成。

#### [参 考 文 献]

- [1] 姚贤良, 程云生. 土壤物理学[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 49—50.
- [2] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. Soil and Tillage Research, 1988, 11(3/4): 199—388.
- [3] Murphy C P. Thin Section Preparation of Soils and Sediments[M]. Berkhamsted, Hertfordshire, UK: AB Academic Publishers, 1986.
- [4] 黄瑞采. 土壤微形态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [5] Murphy C P, Bullock P, Turner R H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and technologies[J]. Journal of Soil Science, 1977, 28(3): 498—508.
- [6] Perona P, Malik J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629—639.
- [7] Buades A, Coll B, Morel J M. Neighborhood filters and PDE's[J]. Numerische Mathematik, 2006, 105(1): 1—34.
- [8] Witelski T P, Schaeffer D G, Shearer M. A discrete model for an ill-posed nonlinear parabolic PDE[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2001, 160(3/4): 189—221.
- [9] Jin Zhengmeng, Yang Xiaoping. Strong solutions for the generalized Perona-Malik equation for image restoration[J]. Nonlinear Analysis: Theory, Methods and Applications, 2010, 73(4): 1077—1084.
- [10] Piotrowska-Kurczewski I, Schlasche J W, Weimer D, et al. Image denoising and quality inspection of micro components using Perona-Malik diffusion[J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 432—437.
- [11] Chen Yan, Wang Zhuangji, Zhang Keiwei. Approximations for modulus of gradients and their applications to neighborhood filters[J]. Frontiers of Mathematics in China, 2013, 8(4): 761—782.
- [12] Chen Yan, Yan Ying, Zhang Keiwei. On the local fractional derivative[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2010, 362(1): 17—33.
- [13] Dane J H, Hopmans J W. Water Retention and Storage. In J H Dane and G C Topp (Eds). Methods of Soil Analysis: Physical Methods: Part. 4[M]. Madison, Wisconsin: Science Society of America, 2002, 680—690.
- [14] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892—898.
- [15] Turkey J W. Exploratory Data Analysis(Limited Preliminary Edition)[M]. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1970.
- [16] Hsieh M H, Cheng F C, Shie M C, et al. Fast and efficient median filter for removing 1-99% levels of salt-and-pepper noise in images[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(4): 1333—1338.
- [17] Zhang Jianjun. An efficient median filter based method for removing random-valued impulse noise[J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(4): 1010—1018.
- [18] Mikula K. Image processing with partial differential equations[J]. Modern Methods in Scientific Computing and Applications: NATO Science Series, 2002, 75: 283—321.
- [19] 李德成, Velde B, Delerue J F, 等. 用于研究土壤孔隙三维结构的连续数字图像的制备[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2): 108—110.  
Li Decheng, Velde B, Delerue J F, et al. Preparation of consecutive digital images for analysis of pore 3D structure in soil[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(2): 108—110. (in Chinese with English abstract)
- [20] Carter M, Ball B C. Soil Porosity in: Carter M R(Ed) Soil Sampling and Methods of Analysis[M]. Canadian Society of Soil Science, Chelsea, Michigan, USA: Lewis Publishers, 1993.
- [21] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62—66.
- [22] 李德成, 张桃林, Velde B. CT 分析技术在土壤科学研究中的应用[J]. 土壤, 2002(6): 328—332.  
Li Decheng, Zhang Taolin, Velde B. Application of CT analytical technique in research of soil sciences[J]. Soils, 2002, 34(6): 328—332. (in Chinese with English abstract)
- [23] Vogel H J, Kretzschmar A. Topological characterization of pore space in soil-sample preparation and digital image-processing[J]. Geoderma, 1996, 73(1): 23—28.

- [24] 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.
- [25] Pierret A, Capowiez Y, Belzunces L, et al. 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis[J]. Geoderma, 2002, 106(3/4): 247—271.

## Studying soil pore structure by using image filtering technology based on partial differential equation model

Hua Shan, Chen Yan<sup>\*</sup>, Liang Lutao, Ren Tusheng

(Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** In this paper, we applied an original image filter called BMO (bounded mean oscillation) and two other common image filters, the PM filter (Perona-Malik PDE model), and the median filter, to remove the noise and estimate the porosity and pore size distribution of digital images of a soil thin section obtained from three contrasting tillage systems (conventional tillage, rotary tillage, and zero tillage) and soil layers. The BMO filter uses a new derivative format to detect the boundary characteristics of images, and eliminates the influence of image noise using the mathematical method of integral average. The results showed that the BMO filter performed better than the other two filters in detecting image edges and detail characteristics. Compared with the other two techniques, the BMO filter gave a significantly higher porosity for the soil pore with aperture  $< 5 \mu\text{m}$ , and the soil porosity obtained from the BMO filter was the closest to the experimental data. The PM filter produced higher porosities for the pores with aperture 5 to  $50 \mu\text{m}$  and  $> 50 \mu\text{m}$  than the other two filters, but no significant differences were observed among them. It followed that the PM filter was a little better than the other two filters in analyzing pores with aperture  $> 5 \mu\text{m}$ . There were no remarkable differences between the soil porosities with aperture  $> 50 \mu\text{m}$  obtained from the three image filters and experimental data. However, for soil pores with aperture  $< 50 \mu\text{m}$ , porosities obtained from the image filters and experimental data were significantly different. The main reason for that was that the two-dimensional soil slice could not completely represent a three-dimensional structure of undisturbed soil samples. Image resolution may also impact on identifying small soil pores. The advantage of a BMO filter on identifying small soil pores to some extent compensated the loss of small soil pores caused by a preparation of soil section and image resolution. Our results also indicated that the conventional and rotary tillage systems improved soil porosity and the ratio of transmission pores (pores with aperture  $> 50 \mu\text{m}$ ) in a surface soil layer. Zero tillage decreased soil porosity due to the reduction of mechanical disturbance on a surface soil layer, and showed beneficial effects on increasing the ratio of storage pores (with apertures of 5 to  $50 \mu\text{m}$ ).

**Key words:** soils; image processing; models; bounded mean oscillation; soil porosity; pore size distribution; image filter

(责任编辑: 刘丽英)