运用 Image J 软件分析土壤结构特征

毕利东[1,2]， 张 斌[1,2*]， 潘继花[1,2]

(1 中国科学院南京土壤研究所，南京 210008； 2 中国科学院研究生院，北京 100049)

摘 要： 以土壤团聚体、土壤裂隙以及土壤优先流特征数码图像为研究对象，介绍了 Image J 软件在土壤结构特征分析中的应用。研究结果表明：①马尾松林地表层土壤团聚体圆度大于母质层土壤颗粒的圆度；②运用图像测量方法能够快速地测定土壤裂隙几何特征以及土壤收缩曲线；③土壤优先流示踪图像分析结果显示红壤性水稻土犁底层具有显著的防渗功能，而同一土壤剖面内土壤连通性孔隙存在较大的空间分异。最后，本文还对以上研究结果和图像分析方法进行了探讨。

关键词： Image J；土壤结构；图像分析；土壤团聚体；裂隙形态

中图分类号： S152

土壤学中图像测量方法的应用开始于土壤薄片图像分析。我国诸多学者曾将这些分析方法应用于土壤微形态特征[1-3]、土壤孔隙结构与空间分异的分析[4-6]以及耕作土壤结构演变[7-8]等研究领域。图像测量技术已成熟地应用于大尺度的土壤学研究领域[9]，但除土壤微形态特征分析外，其在土壤学其他研究领域中的应用相对较少。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元，影响土壤的许多理化性质。以往土壤团聚体几何特征的分析方法只有筛分法一种，测定指标只有粒径一项，常用于计算水稳性团聚体平均重量直径或平均几何直径[10]。高精度CT扫描技术虽然可以获得土壤团聚体的准确三维几何特征[11]，但其费用非常昂贵，分析过程较为复杂。土壤裂隙是孔隙的一类，对土壤水分运动、气体扩散以及作物根系生长有着重要影响[12-13]。有关土壤裂隙几何特征参数的测定通常由手工测量完成[14-15]，精度受人为因素影响较大。而用传统方法测定土壤收缩曲线更是需要专门的仪器设备[16]。因此，发展简单高效的测定方法对提高测定精度和工作效率具有重要意义。染色示踪法研究土壤形态特征能够给我们提供直观的图像信息，研究者曾借助图像测量方法对土壤大孔隙染色图像进行定量分析[5]，但目前国内用此方法用于定量分析红壤性水稻土土壤优先流特征的报道还比较少。因此，本文以图像分析软件Image J为例，尝试将其几何特征分析功能应用于土壤团聚体、土壤裂隙以及土壤优先流示踪图像形态特征分析和水稻土土壤收缩曲线测定，以期为丰富和改进土壤学研究手段提供参考。

1 材料与方法

1.1 Image J 图像分析软件

Image J 图像分析软件是美国国家心理健康研究所（National Institute of Mental Health）开发的免费科学图像分析工具（http://rsb.info.nih.gov），现广泛应用于生物学研究领域。Image J 软件可计算选定区域内分析对象的一系列几何特征。分析指标包括：长度、角度、周长、面积、长轴、短轴、圆度、最佳椭圆拟合、最小外接矩形拟合以及质心坐标等。此外，Image J 软件还支持插件技术，用户可根据自身需求用 java 语言编写各种几何特征分析程序。运用 Image J 软件进行图像分析的一般步骤如图 1 所示。

1.2 供试土壤及其处理分析

（1）土壤团聚体 2-D形态分析。土壤样品采自江西省鹰潭市刘家站中国科学院红壤生态实验站侵蚀地植被（马尾松）恢复试验区（28°15'N，116°55'E）的表层（0 ~ 5 cm）土壤团聚体（以筛分法获取的 3 ~ 5 mm粒径团聚体为例）以及母质层土壤颗粒（聚铁网纹层颗粒），土壤性质详细信息参考相关研究报道[17]。将获取的土壤团聚体颗粒（不少于 30 粒）放置在A4（29.7 cm×21.0 cm）白纸上，用Canon PowerShot A620 数码相机拍摄土壤颗粒照片（拍摄距离：50 cm，分辨率：3072×2304 像素），将照片导入计算机用

* 通讯作者（bzhang@issas.ac.cn）

作者简介：毕利东（1980—），男，贵州桐梓人，博士研究生，主要从事土壤结构与土壤肥力保育方面研究。E-mail: bilidong@hhu.edu.cn

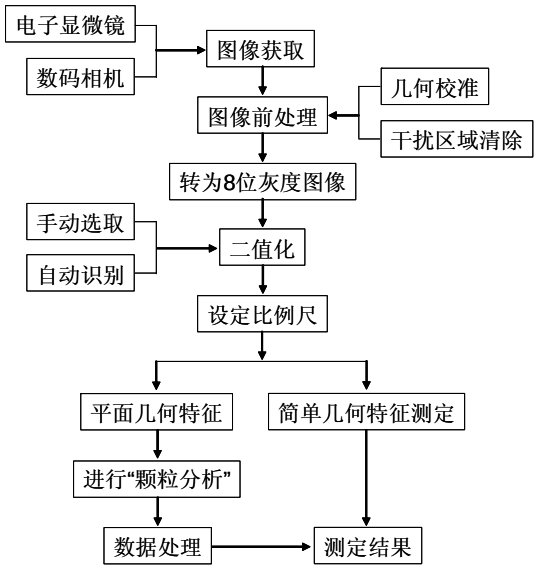

图 1　数码图像分析流程图

Fig. 1　Flow chart of digital image analysis

Image J 软件分析。

（2）土壤裂隙形态分析以及土壤收缩曲线测定。红壤性水稻土采自江西省红壤研究所（28°21'N，116°10'E）化肥长期定位试验地全量NPK处理，土壤性质详细信息参考相关研究报道[18-19]。称取风干土 50 g（＜2 mm）于自封袋中，加入去离子水 32.5 ml（含水量大约 65%），静置 24 h，反复揉搓塑料袋直至袋中水稻土呈均匀泥糊状，迅速转移样品 60 g至培养皿（内径 15.3 cm）中，放置于 40℃ 烘箱中，定期（大约 15min）对培养皿称重，并用Canon PowerShot A620 数码相机拍摄裂隙形态照片（拍摄距离：50 cm，分辨率：3072×2304 像素）。将数码照片导入计算机用Image J 软件分析，裂隙总面积、裂隙总周长由图像测量结果直接获得。

$$\text{裂隙平均宽度}=\frac{\text{周长}+\sqrt{\text{周长}^2-16\times\text{面积}}}{4}$$（假设裂隙表面展开为矩形）；

$$\text{2D土壤收缩率}=\frac{\text{裂隙面积}}{\text{总面积}}$$

（3）土壤剖面优先流示踪图像分析。供试稻田位于江西省鹰潭市余江县孙家小流域内（28°15'N，116°55'E），土壤为第四纪红黏土发育水稻土，研究区详细信息参考Zepp 等[20]的研究报道。将 1 m×1 m正方形铁框水平嵌入待测土体犁底层（深度约 20 cm），在铁框内壁垫一层塑料薄膜，加入 0.1% 亮蓝染色液 50 kg，迅速抽出塑料薄膜，待水分完全渗漏后 8 h（通常需过夜）移去铁框，沿正方形铁框一条边的垂直方向以每 5 cm挖取土壤断面，运用 1 m×1 m正方形木框框取研究断面进行拍照（分辨率：3072×2304 像素），将数码照片导入计算机用Image J 软件分析。限于篇幅，本文仅选用研究土体中央 50 cm处一个垂直剖面进行分析。其中，优先流特征分析方法为：沿Y轴方向以每 5.0 cm对土壤进行分层，分别计算染色比例；纵向连通性孔隙分布分析方法为：沿X轴方向以每 2.5 cm对土壤进行剖分，分别统计染色图斑数目（直径＞0.1 mm）。

2　结果与讨论

2.1　土壤团聚体 2-D 形态分析

测定表层土壤团聚体样本数目为 104，其平均长轴长度与短轴长度分别为 0.49 cm 和 0.40 cm。严格意义上讲，筛分法获得的土壤团聚体平均直径仅仅是土壤团聚体最小断面的平均直径，其长度应近似于图像分析结果中的短轴长度。本研究中筛分法获得的两级筛孔直径的平均值 0.40 cm，这一结果完全等同于本研究中图像分析的结果（表 1）。比较而言，图像分析方法显然能够改进筛分法的不足，更有助于研究者全面直观了解土壤团聚体的二维几何特征（图 2）。

母质层土壤颗粒的平均等圆直径为 1.54 cm，远大于表层团聚体直径。与母质层土壤颗粒圆度相比，表层土壤团聚体的圆度较大（表 1），说明马尾松林地表层土壤团聚体形成的过程不仅仅是母质层颗粒受土壤膨胀收缩作用崩解的过程[21]，同时也是土壤结构体几何特征向稳定性更高的球状体转化的过程。

表 1　土壤颗粒 2D 几何特征分析结果

Table 1　2D geometrical characteristics of soil particles

土壤样品	颗粒数目	长轴（cm）	短轴（cm）	等圆直径（cm）	面积（cm^2）	周长（cm）	圆度
表层团聚体	104	0.49 ± 0.10	0.40 ± 0.06	0.41 ± 0.06	0.14 ± 0.04	1.48 ± 0.25	0.76 ± 0.06
母质层颗粒	31	1.88 ± 0.34	1.51 ± 0.31	1.54 ± 0.30	1.94 ± 0.72	5.85 ± 1.11	0.69 ± 0.06

注：表中长轴与短轴长度分别采用土壤颗粒垂直投影最小外接矩形的长和宽。

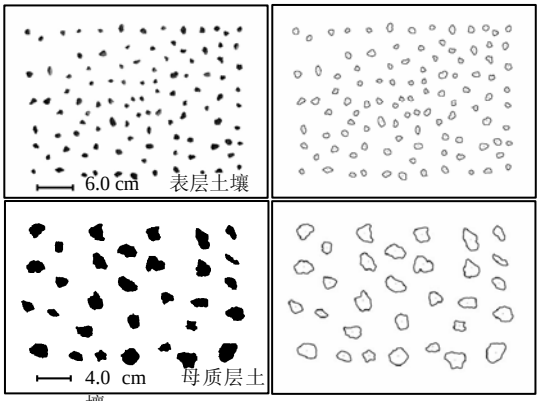

图 2 红壤颗粒图像（左）及其轮廓图（右）

Fig. 2 Images of red soil particles (left) and their outlines (right)

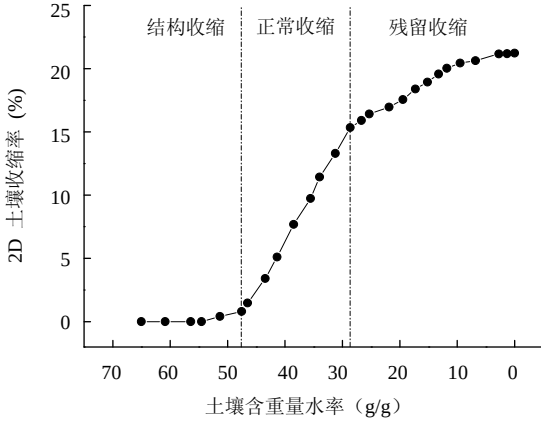

图 4 红壤性水稻土土壤收缩曲线

Fig. 4 Shrinkage curve of Stagnic Anthrosol

2.2 土壤裂隙形态分析以及土壤收缩曲线测定

由图 3 可知，初始裂隙产生使得土壤分割为延展性较大的几个块体，随土壤收缩的进行，裂隙总体朝着近似垂直于土体长轴的方向产生。产生原因则是由于土壤收缩过程中长轴方向承受了更大的张力以及弯矩作用[22]。研究裂隙总面积为 20.6 cm^2，总周长为 224.8 cm，主裂隙（如图 3，环形裂隙）平均宽度为 0.50 cm。此外，红壤性水稻土 2D土壤收缩率为 21.2%，而土壤收缩过程分为 3 个阶段（图 4）。与传统方法测定的太湖地区水稻土收缩曲线相比[23]，本方法测得的红壤性水稻土土壤收缩曲线的阶段过渡更为显著。根据几何学知识，2D土壤收缩率（S_{2D}）转换为常用线性土壤收缩率（S_{1D}）的公式为：$S_{1D}=1-\sqrt{1-S_{2D}}$ 。

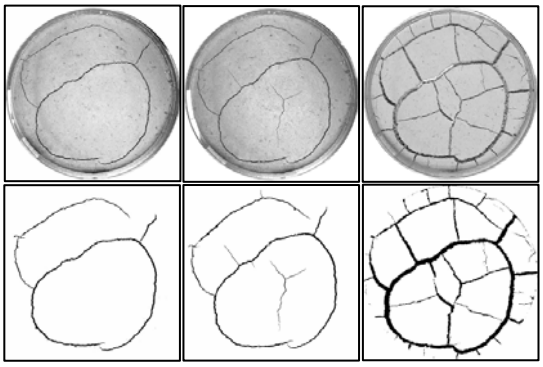

图 3 红壤性水稻土土壤裂隙图像

Fig. 3 Crack pattern of Stagnic Anthrosol

2.3 土壤剖面优先流示踪图像分析

图 5 表明，分析剖面亮蓝示踪剂多分布在 0 ~ 80 cm 土层内，80 cm 以下未发现显著的优先流踪迹。犁底层具有明显的防渗功能，犁底层以下亮蓝分布呈现迅速降低趋势。水平方向上土体染色图斑数目由左到右呈显著递减趋势（0 ~ 25 cm：165，25 ~ 50 cm：101，50 ~ 75 cm：75，75 ~ 100 cm：63），这一现象说明研究土体连通性土壤大孔隙存在较大的空间分异，并对土体优先流特征产生显著影响。

2.4 图像分析方法讨论

图像分析的方法使研究对象的几何特征定量分析成为可能，还可避免目测法带来的人为误差，提高分析精度。但专业图像分析软件通常都只能安装在与仪器设备相连的固定计算机或工作站上[8,24]，对于分析普通数码图片具有较大的局限性。而遥感图像处理软件ERDAS以及地理信息系统软件ArcGIS、MapInfo虽具有强大的图像处理功能[6,25]，但其价格较为昂贵，软件操作也不易为普通研究者所掌握。相比之下，Image J 软件为免费软件，具备较强的几何分析功能，而软件操作更容易为普通研究者所掌握。

理论上讲，同一个研究对象的分辨率越高，其分析精度也越高，因此图像获取过程中应尽量选取分辨率较高的成像设备。而在实际操作中，仪器设备获取图像的分辨率通常是固定的，较高的图像分辨率通常是以缩小观察区域来实现，这虽可提高局部分析精度，但降低了对总体的代表性[26]。因此，实际分析过程中应根据不同的研究对象确定合适的分辨率。由于数码图像在拍摄或者扫描的过程中都会产生一些“噪点”，而图像分析过程中“噪点”也会被列为研究对象进行分析，从而影响分析结果。在图像分析过程中发现，“噪点”通常都是由单个栅格或少量栅格点组成，其数目与分析对象栅格数目一般存在数量级上的差异，

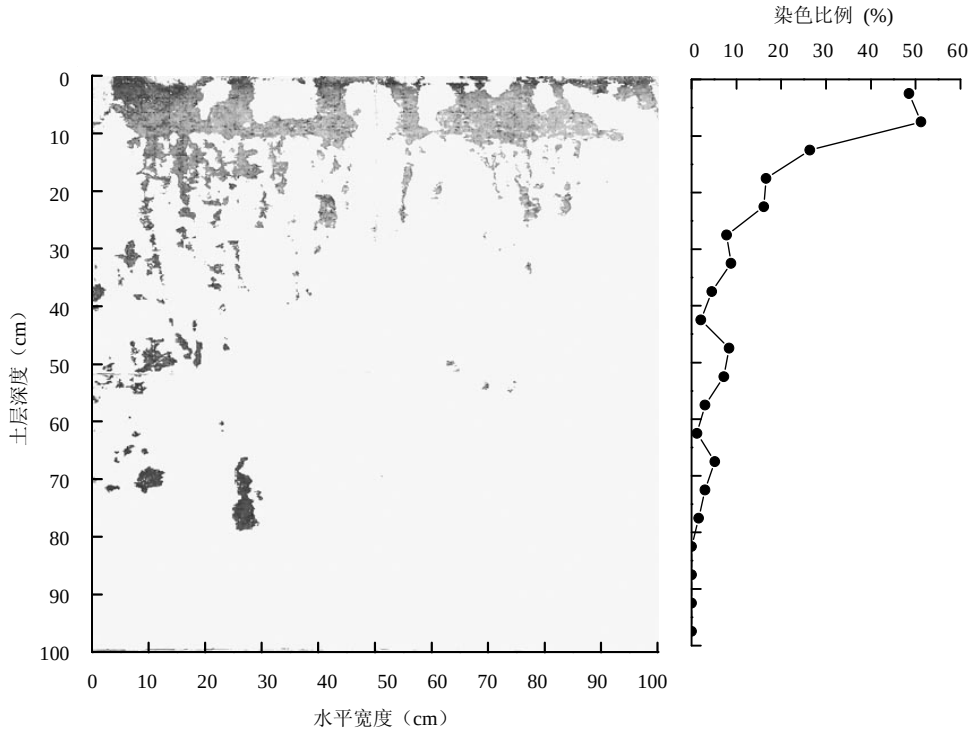

图 5　江西鹰潭红壤性水稻土土壤优先流示踪剂分布图像

Fig. 5　Distribution of blue tracer in preferential flow of paddy field in Yingtan, Jiangxi Province.

因此可以在后期数据处理过程中去除“噪点”的分析结果，提高分析精度。虽然一般图像处理软件中都带有“去噪”功能，但本文还是建议在后期数据处理过程中“去噪”，避免软件“去噪”操作对分析对象边缘产生影响。

3　结论

（1）马尾松林地表层土壤团聚体的圆度较母质层土壤颗粒圆度大，说明表层土壤团聚体形成的过程也是土壤结构体几何特征向稳定性更高的球状体转化的过程。

（2）运用图像测量方法能够快速地测定土壤裂隙几何特征和土壤收缩曲线。与传统方法测定的太湖地区水稻土收缩曲线相比，本方法测得的红壤性水稻土土壤收缩曲线的阶段过渡更为显著。

（3）优先流示踪试验图像分析结果表明红壤性水稻土土壤犁底层具有显著的防渗功能，红壤稻田同一土壤剖面内土壤连通性孔隙存在显著的空间分异。

参考文献：

[1]　曹升赓. 土壤微形态在土壤发生、分类研究中的应用. 土壤专报, 1980, 37: 25−50

[2]　何毓蓉, 黄成敏, 周红艺. 成都平原水耕人为土诊断层的微形态特征与土壤基层分类. 山地学报, 2002, 20(2): 157−163

[3]　何毓蓉, 张保华, 周红艺, 张丹, 程根伟. 贡嘎山东坡亚高山林区土壤的微形态特征. 山地学报, 2003, 21(3): 281−286

[4]　李德成, Velde B, 张桃林. 土壤中裂隙与其他类型孔隙结构差异的图像比较. 土壤与环境, 2002, 11(1): 57−60

[5]　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. 土壤学报, 2003, 40(5): 678−682

[6]　邱琳, 吴华山, 陈效民, 潘剑君. 利用染色示踪和图像处理技术对土壤大孔隙进行定量研究. 土壤, 2004, 39(4): 621−626

[7]　李德成, Velde B, Delerue JF, 张桃林. 免耕制度下耕作土壤结构演化的数字图像分析. 土壤学报, 2002, 39(2): 214−220

[8]　庞奖励, 黄春长, 查小春, 张旭. 关中地区两种不同农业管理方式下土壤微形态特征. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2518−2526

[9]　王静. 土地资源遥感监测与评价方法. 北京: 科学出版社, 2006

[10]　Dane JH, Topp GC. Methods of Soil Analysis-Part 4, Physical Methods. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America Inc, 1996

[11]　Sleutel S, Cnudde V, Masschaele B, Vlassenbroek J, Dierick M, Van Hoorebeke L, Jacobs P, De Neve S. Comparison of different nano- and micro-focus X-ray computed tomography set-ups for the visualization of the soil microstructure and soil organic matter.

Computers & Geosciences, 2008, 34: 931−938

[12] 黄树辉, 吕军, 曾光辉. 水稻土裂缝的生成对N_2O释放的影响. 中国环境科学, 2004, 24(4): 410−413

[13] Wopereis MCS, Bouma J, Kropff MJ, Sanidad W. Reducing bypass flow through a dry, cracked and previously puddled rice soil. Soil & Tillage Research, 1994, 29: 1−11

[14] Dasog GS, Shashidhara GB. Dimension and volume of cracks under different crop covers. Soil Science, 1993, 155 (6): 424−428

[15] Bandyopadhyay KK, Mohanty M, Painuli DK, Misra AK, Hati KM, Mandal KG, Ghosh PK, Chaudhary RS, Acharya CL. Influence of tillage practices and nutrient management on crack parameters in a Vertisol of central India. Soil & Tillage Research, 2003, 71: 133−142

[16] 南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978

[17] 王会利, 毕利东, 张斌. 退化红壤马尾松恢复林地土壤微生物生物量变化及其控制因素研究. 土壤学报, 2008, 45(2): 313−320

[18] Li JT, Zhang B. Paddy soil stability and mechanical properties as affected by long-term application of chemical fertilizer and animal manure in Subtropical China. Pedosphere, 2007, 17(5): 568−579

[19] 黄欠如, 胡锋, 袁颖红, 刘满强, 李辉信. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体特征的影响. 土壤, 2007, 39(4): 608−613

[20] Zepp H, Tang JL, Zhang B. Methodological framework for a multi-scale study on hydrological processes and soil erosion in subtropical Southeast China. Pedosphere, 2005, 15(6): 695−706

[21] Horn R, Smucker A. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. Soil & Tillage Research, 2005, 82: 5−14

[22] Ibarra SY, McKyes E, Broughton RS. A model of stress distribution and cracking in cohesive soils produced by simple tillage implements. Journal of Terramechanics, 2005, 42: 115−139

[23] 赵诚斋, 赵渭生. 水稻土的水理性质与土壤耕作的关系. 土壤学报, 1983, 20(2): 140−153

[24] 申朝瑞, 庞奖励. 土壤微形态学研究进展及前瞻. 固原师专学报(自然科学) , 2005, 26(6): 34−40

[25] 吴华山, 陈效民, 陈粲. 利用 CT 扫描技术对太湖地区主要水稻土中大孔隙的研究. 水土保持学报, 2007, 21(2): 175−178

[26] 李德成, Velde B, Delerue JF, 张桃林. 孔隙结构图像分析中不同试验因素对分析结果的影响. 土壤学报, 2002, 39(1): 52−57

Analysis of Soil Structural Properties by Using Image-J Software

BI Li-dong[1,2], ZHANG Bin[1,2], PAN Ji-hua[1,2]

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *China*;
2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Based on the digital images of soil aggregates, soil cracks and soil preferential flow patterns in the paddy field, the Image J software was introduced and applied in analyzing soil structural properties in the study. The results indicated that (1) the circularity of soil aggregates in the surface horizon was higher than that of soil clods in the parent material horizon in Pinus massoniana woodland, (2) it is possible to quantify the morphological properties of soil cracks and soil shrinkage curve efficiently through image analysis, (3) dye tracing images in paddy field showed that plough-pan prevented soil preferential flow significantly, moreover, soil pore connectivity varied significantly in the same soil profile. At last the results and the methods of image analysis were discussed also in the paper.

Key words: Image J, Soil structure, Image analysis, Soil aggregate, Crack pattern