土壤显微结构的 X 光—同步加速器计算机三维图像透视技术*

贺秀斌[1]　冯　桓[2,3]　冯兆东[2]

(1 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610061; 2 Department of Earth & Environmental Studies, Montclair State University, New Jersey 07043, USA; 3 Department of Environment Science, Brookhaven National Laboratory, New York 11973, USA)

3D IMAGING OF SOIL MICROSTRUCTURE USING SYNCHROTRON X-RAY COMPUTED MICROTOMOGRAPHY

He Xiubin[1]　Feng Huan[2,3]　Feng Zhaodong[2]

(1 Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS & MWR, Chengdu 610041, China; 2 Department of Earth & Environmental Studies, Montclair State University, New Jersey 07043, USA; 3 Department of Environment Science, Brookhaven National Laboratory, New York 11973, USA)

关键词　同步加速器; X 光; 三维图像; 土壤微形态; 黄土
中图分类号　S151.24　　文献标识码　A

土壤结构特征决定了土壤的主要物理性能, 并影响着土壤生态系统内的许多功能, 土壤结构的三维结构透视及其定量分析是认识土壤结构和研究土壤结构与功能关系的前提。自 20 世纪 30 年代, 奥地利学者库比纳开始使用生物显微镜、偏光显微镜和双目实体显微镜, 研究土壤生物、土壤中的结晶形成物、土壤的结构和孔隙, 显微观测与探测技术的每一次进步都被应用到土壤微结构的研究, 产生了土壤学的一支独立学科—土壤微形态学[1~7]。但是, 原状土壤样品的镜下观测需要复杂的前处理, 观察的现像多数为二维图像, 并且需要很多定性的描述和解译才能相互交流和理解, 从而限制了土壤微形态学的应用和发展。CT (Computed tomography) 技术的应用可以直接对原状土样的内部结构进行分析, 而且成像及分析速度快[6]; 但是缺乏显微放大功能, 并且不能同时应用其他探测技术对结构单元的化学组成进行分析。最近美国 BROOKHAVEN 国家实验室的研究人员报道了[8~11]利用 X 光—同步加速器计算机显微图像技术 (Synchrotron X-Ray computed microtomography) 对岩石和土壤等原状样品的结构进行微观分析, 使得在不同空间分辨率上透视土体的三维结构与组成, 并进行定量分析成为可能。本文对该技术与方法作简要介绍。

1　X 光—同步加速器及其工作原理

图 1 是美国 BROOKHAVEN 国家实验室的同步加速器工作的原理框架图。具有 20 keV 的能量 X 光经过单色器和离子室后成直径为 350 μm 的光束, 再经过 Kirkpatrick-Baez 平行聚焦后, 成为 15μm 的光束直接照射样品, 显微 CCD 摄像机记录样品的测试过程。小景深的放大镜头把由闪烁器散射 X 光产生的模糊影像减少到最小。系统的空间分辨率取决于光束的能量, CCD 摄像机分辨率为 1 317 × 1 035 和 3 072 × 2 048 像素, 数字化后将数据存储在计算机中。样品无需特殊的前处理, 其大小可以是几个 cm 到几个 mm, 最高分辨率可达 0.001 mm, 样品载物台可相对 X 光束旋转 180°, 每次旋转的角度大小取决于精度的要求, 数据的大小取决于样品和空间分辨率的高低。通常数据采集的时间为 1~2 h。还

* 国家自然科学基金项目 (40331012 和 49901012) 资助
作者简介: 贺秀斌 (1967~　), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤微形态、土壤侵蚀与水土保持等方面的研究。E-mail: xiubinh@imde.ac.cn
收稿日期: 2003-11-11; 收到修改稿日期: 2004-01-12

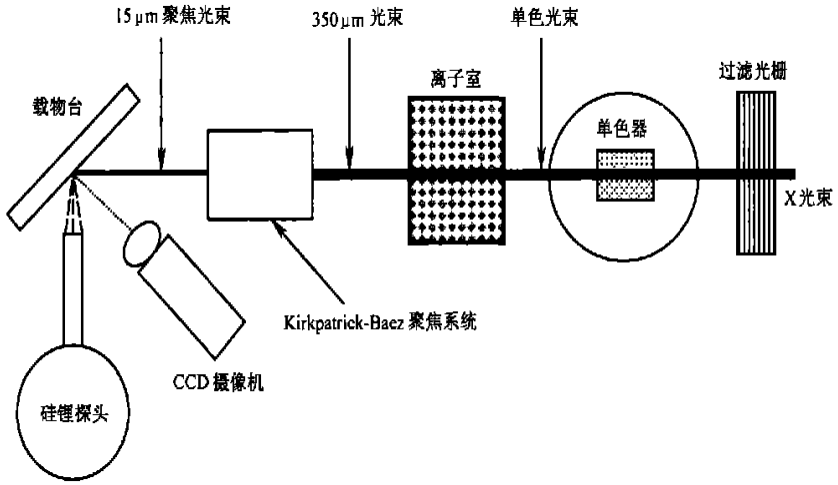


图 1　X 光—同步加速器透视物体结构的工作示意图[10]

可以使用附加探头对元素含量进行测定。

2　土壤微结构三维透视技术

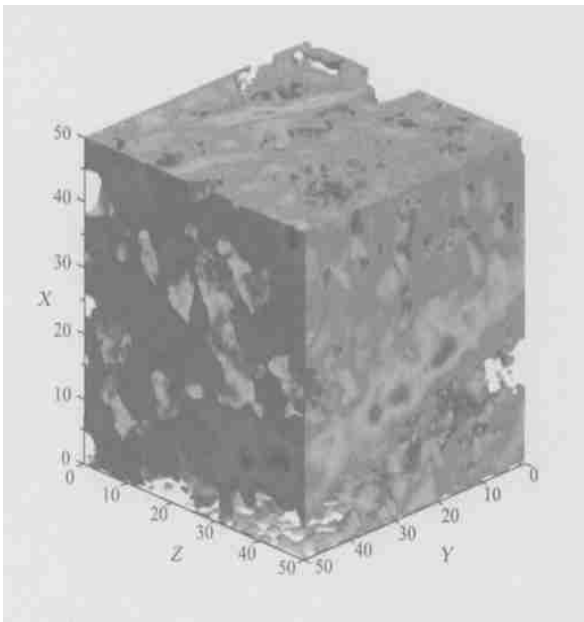
将X 光—同步加速器内 CCD 摄像机采集的数据通过特殊的计算机软件(3DMA) [10] 处理后, 可合成三维影像。其具体可分为三步来实现: 第一步, 数据的标量化, 将每一个剖面或水平像素组的数据写在一个文件里; 第二步, 对每一个剖面或水平像素组的数据进行必要的处理, 包括各种噪音的过滤, X 光透视图像的形成和图像中心旋转轴的计算; 第三步为将水平像素组数据进行三维组建和可视化及不同像元的假彩色化。

3　研究案例

图 2 是 S1 黄土土块原状土样的三维影像的一部分, 体积为 0. 050 mm × 0. 050 mm × 0. 050 mm。不同的灰度代表不同的矿物或物质成分对 X 光的不同吸收特性。进一步图像分析可以计算土体的空隙度、渗透性、紧实度等特征, 结合显微 X 光的吸收特征及其衍射图谱可以对矿物组成, 结构体的化学成分进行分析。

4　应用前景

由同步加速器产生的高强度的显微 X 光束可以获得探测对象的高分辨率 X 线断层影像, 经过计



坐标单位: μm; 不同的灰度代表不同的矿物或物质成分对 X 光的不同吸收特性

图 2　S1 黄土的 X 光—同步加速器计算机三维透视影像

算机软件的处理可以建立探测实物的数字三维图像, 形成的三维图形可以清晰地展示实物的内部结构, 还可以根据衰减系数把数字转换成二进制的图像, 使部分结构独立地显示出来。数字分析功能可以对实物的空隙度, 渗透性和弯曲度以及液体的流态进行分析和计算, 使得在不同空间分辨率上透视土体的三维结构并进行定量分析成为可能。结合探针技术, 还可以对微观结构体的物质组成进行分析, 揭示物体的结构 —物质组成 —功能之间的相互关

系。可见,有关技术在生物、地学和环境科学中有广泛的应用潜力。

参 考 文 献

[1] 曹升赓. 土壤和非固结物质薄片的系统制备方法. 土壤专报, 1989, 4(3): 42~45

[2] 龚子同. 面向二十世纪的土壤地理学. 土壤学进展, 1995, 23(1): 1~8

[3] 唐克丽. 武功黄土沉积中埋藏古土壤的微形态及其发生学. 科学通报, 1981, 26(3): 177~179

[4] 贺秀斌. 图像处理技术在土壤微形态定量研究中的应用. 土壤通报, 1997, 2: 110~111

[5] 顾新运. 土壤超微形态在土壤研究中的应用. 土壤专报, 1989, 4(3): 21~26

[6] 李德成, 张桃林, Velde B. CT分析技术在土壤科学研究中的应用. 土壤, 2002, 6: 328~332

[7] Miedema R, Chartres C J. Soil micromorphology: Towards analytical and quantitive tool for assessing anthropogenic influences on soils. Transations of 15th World Congress of Soil Science, Mexico. 1994. 342~349

[8] Jones K W, Feng H, Lindquist W B, *et al*. Study of the microgeomrtry of porous materials using synchrotron computed microtomography. Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences, 2003, 215: 39~49

[9] Martin R R, Sham T K, Wong Won G, *et al*. Synchroton X-ray flurorescence and secondary ion mass spectrometry in tree ring microanalysis: Applications to dendroanalysis. X-ray Spectrum, 2001, 30: 338~341

[10] Huan F, Keith W J, Michael M, *et al*. High-performance computer for the study of earth and environmental science materials using synrchroton X-ray computed microtomography. *In:* Antoniou G, Deremer D. eds. Computing and Information Technologies Exploring Emerging Technologies. New Jersey: World Scientific, 2001. 471~480

[11] Jones K W, Feng H. Microanalysis of materials using synchrotron radiation. *In:* Sham T K. ed. Chemical Applications of Synchrotron Radiation, Volume 12B, Chapter 22. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2002. 1 010~1 054