

CT 扫描确定土壤大孔隙分布

冯 杰, 郝振纯

(河海大学水资源开发利用国家专业实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 对含有各种大孔隙的原状土柱和已知直径大孔隙的填充土柱进行 CT 扫描实验, 阐明 CT 扫描原理和过程, 对 CT 图像进行处理, 得到大孔隙数目、大小、形状和连通性在土柱横断面和纵断面上的分布。采用图像处理软件 Photoshop、地理信息系统软件 ARC/INFO 和 Mapinfo 分析结果表明: CT 扫描是一种有发展前景的、非破坏性的确定土壤大孔隙分布的方法。

关 键 词: 大孔隙; CT 扫描; 图像

中图分类号: S 152. 5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2002)-05-611-07

为了评价大孔隙对水流和溶质运移特性的影响, 必须确定土壤中大孔隙的大小、数目、形状和连通性。然而, 过去田间和室内研究证明, 由于缺乏充足的非破坏性的定量技术, 测量大孔隙是非常困难的。X-射线 CT 扫描仪, 作为医学领域的诊断工具, 可用于非破坏性的测量小尺度非透明物体内容重的三维变化, 因此利用 CT 直接测量非扰动土柱内大孔隙结构的分布是一个很好的想法。Warner^[1]对 CT 扫描图像进行可视化解释, 说明 CT 可准确揭示大孔隙的数目、大小和位置; Anderson^[2]介绍了一种简单的确定大孔隙直径的方法, 分析了容重统计参数在土柱中的分布规律; Peyton^[3]指出 Anderson^[2]所用确定大孔隙直径的方法是不正确的, 他采用迭代方法确定大孔隙的孔隙周长、等效直径和孔隙度; Peyton^[4]提出使用 CT 结合分形维数来描述大孔隙结构; Zeng 和 Gantzer^[5]进一步用 CT 结合分形维数和分形非均匀性来描述土壤大孔隙结构。我国在这方面的研究还是一个空白, 河海大学水资源开发利用国家专业实验室对取自南京郊区农场的非扰动土柱和回填土柱进行 CT 扫描实验, 描述土壤大孔隙结构。

1 材料和方法

1.1 土柱

用于 CT 扫描实验的土壤物理性质见表 1, 实验土柱分为两类: 一类为含有各种直径大孔隙的原状土柱, 取自南京郊区农场中的耕地; 另一类为含有已知直径大孔隙的填充土柱。该耕地有半年多没有耕种, 土壤含水量接近田间持水量。装土柱所用的容器为长为 47cm, 内径为 13.1cm 的 PVC 管。原状土柱直接从田间挖取; 填充土柱是将一部分土壤筛分, 除去各种杂质

收稿日期: 2001-07-16; 修订日期: 2001-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59779022)

作者简介: 冯 杰(1972-), 男, 山东聊城人, 博士, 主要从事水文物理规律研究。

和比较大的颗粒,准备一根已知直径的表面光滑的不锈钢条,直立在 PVC 管的中央,其周围装入与原状土柱相同容重的土壤,管子装满以后慢慢将不锈钢条旋转地从管子中拔除,制作成一个已知直径的大孔隙。

表 1 土壤的物理性质

Table 1 Soil physical properties

颗粒组成/%			干容重 γ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比重 ρ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙度 ϕ /%	土样质地
砂粒	粉粒	粘粒				
2.3	83.4	14.3	1.55	2.67	42	粗粉砂

1.2 CT 扫描

实验用的是江苏省人民医院 CT 扫描中心的西门子 SOMATOM AR 型 CT 扫描仪。由于 CT 扫描仪主要用于医学领域的人体扫描,而现改为对土壤进行扫描,因此必须重新设定扫描系数。经调整峰值电压定为 130kV,电流为 63mA,每次扫描的时间为 1.9s,扫描厚度为 2mm。参数设定以后,将土柱放入 CT 扫描仪的 X-射线管和探测器之间,X-射线管和探测器围绕着土柱在 1.9s 内旋转 360°,这时将峰值为 130kV 的电压输送到 X-射线管上,X-射线管发出扇形光束穿过厚度为 2mm 的土柱薄片,位于 X-射线管对面的探测器就可检测到已衰减的 X-射线,并形成投影,旋转 360°共形成 960 个投影,960 个投影值重新组合形成一个图像。图像由一定数量的图形元素组成,每一个图形元素对应扫描物体的一个位置,依据物体各个位置的 X-射线衰减系数把亮度值赋予图像中的每个图形元素,扫描物体不同容重区就可在图像中以不同亮度表示,土壤大孔隙就可清晰地显示。考虑到土柱表面到中间所含的大孔隙较多,而且大孔隙的分布随土壤深度的变化比较大。因此,土柱各扫描断面间隔距离对于土柱的前半部分为 12mm,后半部分为 30mm。除了可以对土柱横断面进行扫描外,还可对土柱某一段进行纵向扫描,揭示大孔隙的连通性。

1.3 图像分析

将得到的土柱横断面 CT 扫描图像利用扫描仪输入到计算机中,得到以 * .JPG 文件形式存在的灰度图像,在软件 Photoshop 中选择“阈值”命令,设定一个阈值,将图像转换为只有黑白两种色调的灰度图像,在转化的过程中,需要注意的是“阈值”的设定,它直接关系到计算机将多少灰色区域转化为黑色区域,将多少灰色区域转化为白色区域,这对计算机所得的大孔隙面积有一定影响,阈值的确定可通过以下实验确定:对含有已知大小的大孔隙的填充土柱进行 CT 扫描,然后假定一阈值,进行图像分析,计算大孔隙的大小,与已知大孔隙大小进行比较,如相差太大,再重新假定一阈值进行计算,直到相差值与已知值的比值很小为止。通过“模式转换”将黑白两种色调的灰度图像转换为以 * .BMP 文件形式存在的位图模式的图像,其中黑色区域表示大孔隙,白色区域表示土壤基质。用地理信息系统软件 ARC/INFO 对以 * .BMP 文件形式存在的黑白色图像进行处理,得到的图形如图 1 所示,整个土柱断面为一近似圆形的封闭曲线,黑色的大孔隙域用多边形表示,识别标志为“1”,一些松散的土壤团粒也用多边形表示,但识别标志为“0”。从 CT 扫描图像中可以看出,土柱边缘存在许多土壤团粒,它们以多边形的形式分布于封闭曲线之外,在处理过程中应将其除掉。另外在取土柱的过程中,可能会截断土柱边缘侧向分布的大孔隙,其区域被看成封闭曲线之外的区域,在处理过程中应将其区域补上,变为封闭区域,这样才能被认为是大孔隙区域。经 ARC/INFO 处理生成 * .e00 形式的输出文件。利用桌面地图信息系统软件 MapInfo 中的 ArcLink 工具将 ARC/INFO 输

出文件转化为 * .TAB 形式的 MapInfo 文件, 运行这些文件可得到显示土柱断面大孔隙位置和形状的图形(图 1), 以及统计各大孔隙面积 A 、周长 P 的表格。最后将表格转化为 Excel 文件。

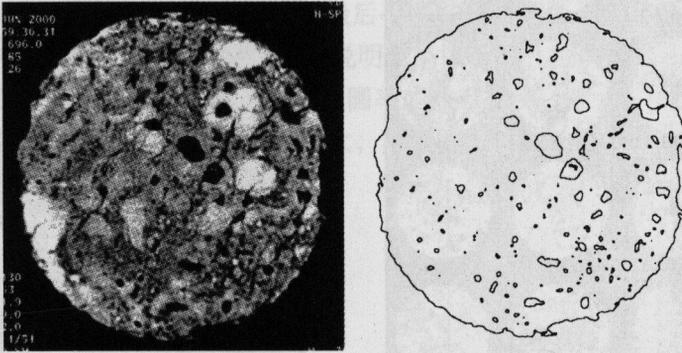


图 1 断面 CT 图像及经 ARC/INFO 和 MapInfo 处理后的图形

Fig.1 CT image in the section and graph dealt with ARC/INFO and MapInfo

1.4 数据处理

根据得到的统计横断面各大孔隙面积 A 、周长 P 的表格, 计算横断面大孔隙的成圆率 C , 成圆率 C 采用公式 $C = 4\pi A / P^2$ 计算, 其中 A 是孔隙面积; P 是孔隙周长; 成圆率的值在 1 和 0 之间, $C = 1$ 表示圆形孔隙。

计算大孔隙总数目、不同大小的孔隙的数目和大孔隙度, 统计断面大孔隙面积和成圆率的最大值、最小值、平均值、标准差和变异系数, 分析这些参数在土壤深度上的分布规律。绘制断面大孔隙面积常用对数频率密度直方图。

2 结果分析

2.1 断面 CT 扫描图像

CT 扫描仪对非扰动土柱进行扫描后, 得到土柱不同深度横断面图像(图 2), 横断面图从左到右、从上到下在土柱中的位置逐渐加深。图像中黑色区域代表土壤大孔隙, 白色区域代表土壤基质, 从黑色区域过渡到白色区域的是灰色区域, 灰色区域代表有机质、松散的土壤颗粒等。从图 2 可看出, 土壤中的确存在许多大小和形状各异的大孔隙, 随着土壤深度的不同, 大孔隙的大小、形状和位置都在发生变化。纵断面扫描如图 3 所示, 从四次纵断面扫描图像可看出, 大孔隙在纵向的走向并不是垂直向下的, 而是弯曲向下, 而且大孔隙并不是贯穿整个土层, 延伸一定深度就停止或转向。

2.2 大孔隙参数分析

横断面上不同直径的大孔隙数、大孔隙总数和大孔隙度列于表 2, 从表 2 中可看出, 每一横断面中, 等效直径大于 3mm 的大孔隙的数目明显比等效直径小于 3mm 的大孔隙的数目少, 说明较大的大孔隙在整个大孔隙中所占比例不大, 平均为 13%。大孔隙度的平均值为 10.756%。

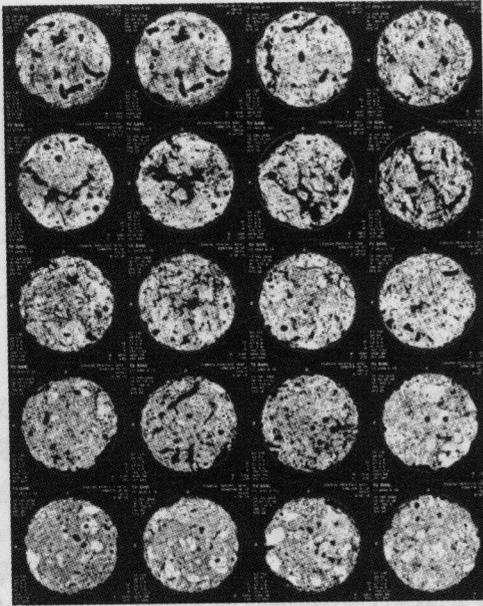


图 2 不同深度横断面 CT 图像

Fig.2 CT images of transverse sections in the different depths

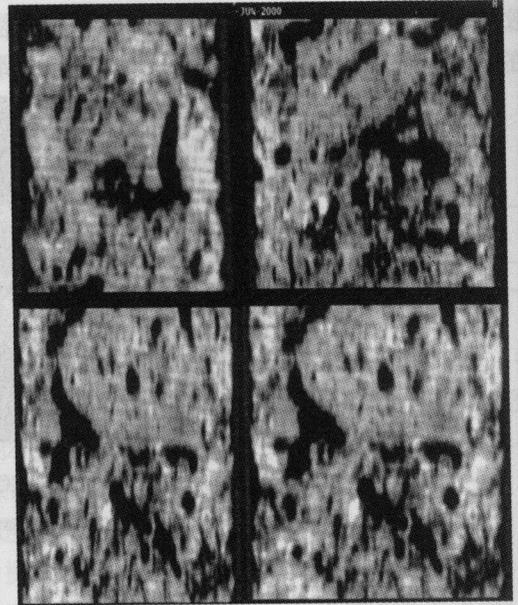


图 3 纵断面 CT 图像

Fig.3 CT images of the vertical section

表 2 横断面不同直径的大孔隙数、大孔隙总数和大孔隙度

Table 2 Number of macropores in different diameters, total number of macropores and macroporosities in the transverse section

扫描深度 /mm	大孔隙数					总和	大孔隙度
	等效直径 < 0.5mm	等效直径 0.5 ~ 1mm	等效直径 1 ~ 3mm	等效直径 3 ~ 5mm	等效直径 > 5mm		
25	51	57	64	9	13	194	0.11992
27	53	54	77	10	13	207	0.12232
39	37	36	53	5	10	141	0.10571
51	40	57	91	13	13	214	0.10481
63	32	31	58	5	14	140	0.10654
75	16	32	58	13	14	133	0.19368
87	31	31	62	11	13	148	0.19591
99	38	41	67	15	14	175	0.20217
111	63	63	83	31	19	259	0.12641
123	53	52	78	21	21	225	0.14439
135	76	39	85	14	16	230	0.08053
147	33	38	64	10	8	153	0.06908
159	66	55	90	15	11	237	0.07779
171	38	59	84	13	16	210	0.14803
201	67	69	101	24	19	280	0.12277
231	57	36	77	7	11	188	0.05118
261	65	58	86	18	6	233	0.05072
291	69	55	66	13	7	210	0.04284
321	61	70	77	12	8	228	0.05860
351	73	56	44	13	3	189	0.02776
平均值	50.95	49.45	73.25	13.60	12.45	200	0.10756

大孔隙度在深度为 36cm 的土柱纵断面内的分布曲线如图 4 所示。从图中可以看出, 随着土壤深度的不断加深, 大孔隙度先是在较小范围内波动, 从 63mm 开始快速增大, 在 99mm 深度处取得最大值, 而后逐渐减少, 大孔隙度在最后一个扫描横断面处达到最小值。另外, 大孔隙度在 63~111mm 的深度范围内的数值较大, 说明该范围内大孔隙所占面积较大。

以 75mm 处横断面为例, 大孔隙的大小与成圆率的关系如图 5 所示。大孔隙越小, 其成圆率越大, 其形状越接近圆形; 反之, 大孔隙越大, 其成圆率越小, 其形状也不接近圆形。

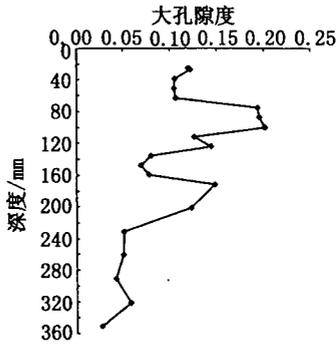


图 4 横断面大孔隙度在土柱纵断面上分布
Fig.4 Vertical section distribution of macroporosity

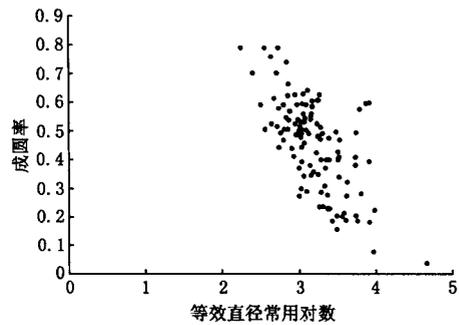


图 5 75mm 深处横断面大孔隙大小与成圆率关系
Fig.5 Relationship between macropore size and circularity index in transverse section at 75mm depth

各横断面大孔隙面积分布参数如表 3 所示。从表 3 中可看出, 各横断面大孔隙面积的最小值是相同的, 但其最大值、平均值、标准差和变异系数不同, 这些参数在纵断面上有一个共同的变化趋势, 都是开始时快速增大, 在 75mm 深度时达到最大值, 而后逐渐减小, 到 231mm 深后, 数值在较小范围内波动, 最后一个横断面大孔隙面积的最大值、平均值和标准差都达到最

表 3 横断面大孔隙面积分布参数

Table 3 Distribution parameter of macropore area in transverse section					μm^2
扫描深度/mm	最小	最大	平均	标准差	变异系数
25	2.77×10^4	$3.20\text{E} + 08$	$8.14\text{E} + 06$	$3.53\text{E} + 07$	4.331
27	2.77×10^4	$2.84\text{E} + 08$	$7.77\text{E} + 06$	$3.00\text{E} + 07$	3.862
39	2.77×10^4	$3.67\text{E} + 08$	$9.99\text{E} + 06$	$4.24\text{E} + 07$	4.244
51	2.77×10^4	$1.89\text{E} + 08$	$6.58\text{E} + 06$	$2.15\text{E} + 07$	3.269
63	2.77×10^4	$7.24\text{E} + 08$	$1.02\text{E} + 07$	$6.18\text{E} + 07$	6.053
75	2.77×10^4	$1.72\text{E} + 09$	$1.91\text{E} + 07$	$1.49\text{E} + 08$	7.775
87	2.77×10^4	$1.08\text{E} + 09$	$1.67\text{E} + 07$	$9.38\text{E} + 07$	5.605
99	2.77×10^4	$6.77\text{E} + 08$	$1.47\text{E} + 07$	$6.89\text{E} + 07$	4.678
111	2.77×10^4	$1.75\text{E} + 08$	$6.34\text{E} + 06$	$1.73\text{E} + 07$	2.736
123	2.77×10^4	$2.96\text{E} + 08$	$8.52\text{E} + 06$	$2.90\text{E} + 07$	3.398
135	2.77×10^4	$9.36\text{E} + 07$	$4.66\text{E} + 06$	$1.18\text{E} + 07$	2.537
147	2.77×10^4	$1.77\text{E} + 08$	$5.97\text{E} + 06$	$2.12\text{E} + 07$	3.549
159	2.77×10^4	$1.13\text{E} + 08$	$4.16\text{E} + 06$	$1.19\text{E} + 07$	2.849
171	2.77×10^4	$4.38\text{E} + 08$	$8.97\text{E} + 06$	$3.74\text{E} + 07$	4.174
201	2.77×10^4	$2.52\text{E} + 08$	$5.82\text{E} + 06$	$1.94\text{E} + 07$	3.329
231	2.77×10^4	$6.21\text{E} + 07$	$3.60\text{E} + 06$	$8.91\text{E} + 06$	2.479
261	2.77×10^4	$7.86\text{E} + 07$	$2.86\text{E} + 06$	$7.55\text{E} + 06$	2.638
291	2.77×10^4	$4.92\text{E} + 07$	$2.69\text{E} + 06$	$6.07\text{E} + 06$	2.256
321	2.77×10^4	$7.82\text{E} + 07$	$3.28\text{E} + 06$	$9.32\text{E} + 06$	2.841
351	2.77×10^4	$4.40\text{E} + 07$	$1.92\text{E} + 06$	$4.79\text{E} + 06$	2.497

小值, 变异系数也较小。在深度 51 ~ 111mm 处, 其最大值、平均值、标准差和变异系数都较大, 而且在纵断面上的变化也较大, 说明横断面存在许多较大的大孔隙, 大孔隙分布相当离散, 横断面间大孔隙的大小存在较大差异。但从总体上讲, 土壤深度越大, 较大的大孔隙越少, 横断面大孔隙分布的离散程度越小, 横断面间大孔隙大小存在的差异程度越小。

横断面大孔隙成圆率分布参数如表 4 所示。从表中可以看出: 横断面大孔隙成圆率的最大值相同, 说明最小大孔隙的形状是一致的。横断面成圆率最小值和平均值在土柱纵断面上的变化趋势是一致的, 随着土壤深度的不断加深, 先是快速减小, 达到最小值后, 再逐渐增加, 只是成圆率平均值减小的幅度没有成圆率最小值大。63 mm 至 135 mm 深度范围内横断面成圆率最小值和平均值较小, 说明该深度范围内存在形状与圆形相差较大的大孔隙。横断面成圆率标准差和变异系数在土柱断面上的变化趋势基本上与成圆率最小值和平均值相反, 63 mm 至 135 mm 深度范围内各横断面成圆率标准差和变异系数较大, 说明横断面大孔隙形状的离散程度较大。但从总体上讲, 土壤深度越大, 形状与圆形相差较远的大孔隙越少, 横断面大孔隙形状分布的离散程度越小。

表 4 横断面大孔隙成圆率分布参数

Table 4 Distribution parameter of macropore circularity in the transverse section

扫描深度/mm	最小	最大	平均	标准差	变异系数
25	0.133	0.785	0.525	0.160	0.304
27	0.110	0.785	0.524	0.156	0.298
39	0.097	0.785	0.523	0.152	0.290
51	0.089	0.785	0.497	0.158	0.318
63	0.050	0.785	0.510	0.157	0.307
75	0.034	0.785	0.475	0.163	0.342
87	0.047	0.785	0.497	0.173	0.348
99	0.027	0.785	0.477	0.169	0.354
111	0.059	0.785	0.497	0.176	0.354
123	0.049	0.785	0.492	0.169	0.344
147	0.114	0.785	0.513	0.158	0.308
159	0.163	0.785	0.528	0.153	0.289
171	0.119	0.785	0.519	0.148	0.286
201	0.104	0.785	0.511	0.169	0.331
231	0.090	0.785	0.537	0.158	0.295
261	0.177	0.785	0.542	0.140	0.258
291	0.125	0.785	0.540	0.160	0.296
321	0.098	0.785	0.518	0.159	0.307
351	0.173	0.785	0.553	0.152	0.276

2.3 大孔隙频率分布

建立各横断面大孔隙面积对数频率密度直方图, 以 201mm 处横断面为例, 其大孔隙面积频率密度直方图如图 6 所示。发现大孔隙面积的分布相当离散, 面积取常用对数后, 其频率密度分布仍然呈偏态分布, 说明存在大量较小的大孔隙和广泛分布的较大的大孔隙, 随着大孔隙大小的不断减小, 其数目并不是逐渐增加, 而是在某一大小范围内数目最多。Vermeul

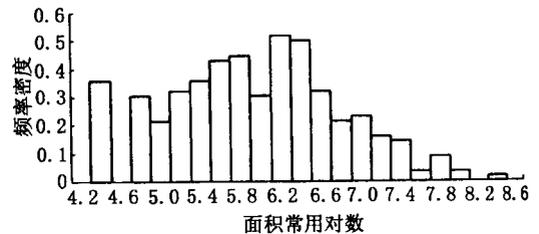


图 6 大孔隙面积常用对数频率密度直方

Fig.6 Frequency density of macropore area common logarithm

等^[6]将非扰动土柱放入石蜡中浸泡,在紫外线光下对土柱断面进行拍照,照片进行数字处理,得到的耕作和免耕土壤大孔隙面积常用对数的频率密度直方图与图6一致。

3 结 论

(1) CT扫描是一种有发展前景非破坏性的研究土壤大孔隙结构的方法,与其它一些观测方法相比,CT扫描快速方便,而且精确地揭示大孔隙的数目、大小、形状以及连通性。

(2) 实验土壤中存在大量大小和形状各异的大孔隙,通过大孔隙分布参数和频率分析,得到了大孔隙数目、大小和形状在土柱横断面和纵断面上的分布。通过纵断扫描,揭示了大孔隙的连通性。

参考文献:

- [1] Warner G s, Nieber J L, Moore I D, Geise R A. Characterizing macropores in soil by computed tomography[J]. Soil Sci Am J, 1989, 53:653 - 660.
- [2] Anderson S H, Peyton R L, Gantzer C J. Evaluation of constructed and natural soil macropores using X-ray computed tomography[J]. Geoderma. 1990, 46:13 - 29.
- [3] Peyton R L, Anderson s H, Gantzer C J. Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores [J]. Geoderma. 1992, 53:329 - 340.
- [4] Peyton R L, Gantzer C J, Anmderson S H, *et al.* Fractal dimension to describe soil macropore structure using x-ray computed tomography[J]. Water Res, 1994, 30:691 - 700.
- [5] Zeng Y, Gantzer C J, Payton R L, *et al.* Fractal dimension and lacunarity determined with X-ray computed tomography [J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60:1718 - 1724.
- [6] Vermeul V R, Istok J D, Flint A L, *et al.* An improved method for quantifying soil macroporosity[J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57:809 - 816.

Distribution of soil macropores characterized by CT*

FENG Jie, HAO Zhen-chun

(*Water Resources Development & Utilization Laboratory, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Undisturbed soil core which has many macropores and disturbed soil core which has macropore (its diameter is known) are probed by CT. The theory of CT scanning is stated. CT scanning images are dealt with by using software photoshop and geographical information system software ARC/INFO and Mapinfo. The size, number, shape and continuity of macropores in transverse and vertical section of soil are characterized. The results indicate that CT scanning is a nondestructive method for characterizing macropores in soils, which is a promising method.

Key words: macropores; CT scanning; image

* The project is supported by National Natural Science Fund of China (No.59779022).