

风化花岗岩坡地土壤剖面大孔隙特性的空间分布*

张丽萍 陈儒章 邬燕虹 邓龙洲

(浙江大学环境与资源学院水土资源与环境研究所, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058)

摘要 为了揭示侵蚀性风化花岗岩坡地不同部位土壤剖面大孔隙特性的空间分布, 在浙江嵊州市水土保持监测站, 同一坡面不同侵蚀强度的坡顶、坡中、坡底选取3个土壤剖面, 进行了原状土柱(70cm)样品采集, 用CT分层扫描与ArcGIS10.1图像解译技术, 获得了系列数据, 并计算了分析指标, 研究了3个剖面大孔隙的分布规律和影响因素。结果表明: (1) 3个土壤剖面均以大孔隙为主, 1~3 mm孔径占比最大, 5~7 mm占比最小。大孔隙个数的排序: 坡中>坡底>坡顶。(2) 大孔隙度与总孔隙度的差值随深度递减。大孔隙度大于均值的层位分布在0~30 cm之间。(3) 成圆率影响大孔隙度与总孔隙度的关系。土壤黏粒和粉粒含量越多, 成圆率越大。大孔隙度与土壤粗砂粒呈显著正相关, 与黏粒和粉粒为显著负相关。(4) 土壤侵蚀强度越大, 大孔隙占比越大, 孔隙结构性越差, 漏水漏肥越严重。

关键词 侵蚀性坡地; 土壤剖面; 大孔隙; CT扫描; 阈值控制

中图分类号 S151⁺¹ **文献标识码** A

土壤侵蚀是一个严重的环境问题, 侵蚀会导致地表组成物质粗化, 颗粒大小混杂无规律, 土壤剖面结构变差, 保水保土性能降低^[1-3], 使得土壤发育不同于典型的地带性土壤, 尤其在一些风化残积坡地形成的粗骨性土和岩成土地区, 土壤剖面发育的理化特性与地带性土壤的差异非常明显^[3-4]。土壤孔隙是土壤体的主要组成要素, 是重要的土壤物理参数, 土壤孔隙特性对土壤水肥气热的比例以及再分配过程的影响很大^[5]。其中土壤大孔隙是引起土壤水肥渗漏的优先通道, 也是土壤污染物运移的主要通道, 其结果会造成养分的渗漏、灌溉水的浪费和地下水的污染。因此, 研究这些地区土壤大孔隙的数目、等级、分布和连通性对土体水分入渗、产汇流过程、土壤的改良和水肥的调控均具有重要的实际意义。

关于土壤孔隙结构和大孔隙的研究, 前提条件是不破坏土壤结构保持其原状, 以往的学者利用染色法^[6]、切片法^[7]、水分穿透法^[8], 图像滤波

技术^[9]和张力入渗仪法^[10-11]对土壤大孔隙进行了研究, 但是这些方法在操作过程中较为繁琐, 且易对原状土壤造成扰动, 不能很好地反映出土壤孔隙本身的性状, 而计算机断层扫描技术(CT)是一种专门用来无损检测和探伤的技术^[12]。随着计算机工业的发展, CT扫描系统性能的不断改进, 因此可以利用CT扫描直接测量非扰动土体内部大孔隙结构的分布^[13-17]。目前利用CT扫描技术对土壤孔隙度以及土壤孔隙空间分布状况等的研究, 已经成为研究土壤孔隙特征的趋势^[18-20], 对坡地土壤大孔隙的研究也有了一定的深入^[21-23]。但是, 关于坡地土壤侵蚀对土壤剖面大孔隙特征的研究还需进一步的深化。本文在总结前人研究的基础上, 利用计算机断层扫描技术, 结合土壤剖面不同深度多层次总孔隙度的实验室精确测量数据, 并将其作为CT图像处理的控制阈值, 进而提高了研究精度。在此基础上, 解译出孔径大于1 mm的各级孔隙所占的比例, 进而研究侵蚀性风化花岗岩坡地

* 国家自然科学基金项目(41471221)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41471221)

作者简介: 张丽萍(1959—), 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、水污染与水环境和环境地质方面的工作。E-mail: lpzhang@zju.edu.cn

收稿日期: 2017-09-07; 收到修改稿日期: 2017-11-26; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-01-19

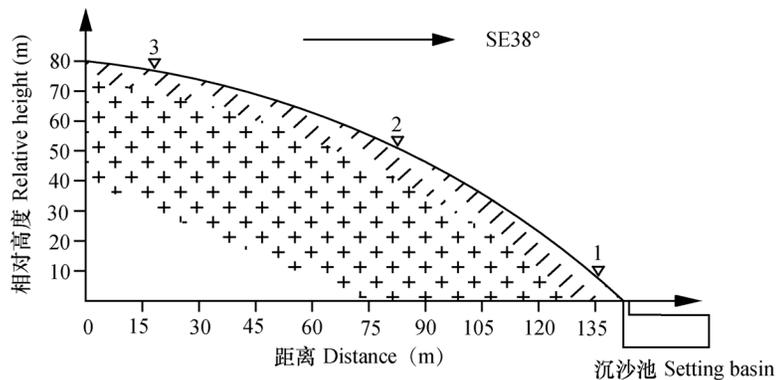
不同地貌部位大孔隙的空间分布特征, 为坡地土壤养分渗漏和污染物的迁移以及壤中流的水动力学特征提供研究基础。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

本研究所用的土柱样品取自浙江省嵊州市上东水库水土保持监测站。该监测站位于浙江省中部偏东, 曹娥江上游, 年平均气温 16.4°C , 1月平均气温 4.2°C , 7月平均气温 28.6°C 。年平均降水量 $1\ 446\ \text{mm}$, 日照 $1\ 988\ \text{h}$, 无霜期 $235\ \text{d}$, 地貌类型为浙东低山丘陵及台地。所属的地带性土壤为红壤, 土壤发育母质为风化花岗岩残积层。研究区属于典型的南方红壤水力侵蚀区, 整个坡面均以雨滴击溅侵蚀和片蚀为主, 侵蚀强度较大。土地利用类型为园地, 坡度 22° , 植被覆盖度 $<45\%$ 。根据实地勘查, 选择典型的侵蚀性地形坡面, 在所选的同

一坡面的坡顶、坡中、坡底分别选取3个剖面(均属于侵蚀型剖面, 土体中无堆积现象), 经过综合对比, 在每个地貌位置各选择1个最底层土壤风化程度目视相一致的剖面, 作为样品采集的剖面。土柱样品采集的地貌部位为该监测站4号径流小区, 坡顶, 坡中, 坡底(图1), 通过对土壤层与下伏母质层的区别鉴定, 根据3个坡段土壤层厚度对应层位的相对一致性, 土柱采样深度确定为 $70\ \text{cm}$ 。所用装载土柱的容器为长 $70\ \text{cm}$ 、内径 $11\ \text{cm}$ 的PVC管, 共采集土柱9根(每个剖面3个重复)并做好标记, 土柱取好后, 立即将每段土柱两端密封, 放在用泡沫填充的箱子里, 同时用支架固定好, 以减少在运输过程中的震动。在采集土柱的同时, 每个剖面对应应由下到上, 分层等间隔用环刀采集土壤样品(每个土样为同一层位平行位移后的三个重复), 混合装于同一样品袋中, 备用于测量土壤剖面各个层位的容重和颗粒组成, 进而计算每个层位的总孔隙度, 其中, 颗粒组成用吸管法测定。



注: 图中1, 2, 3代表坡底, 坡中, 坡顶采样剖面Note: in the figure, 1, 2 & 3 stands for the profile for soil sampling in the bottom, the middle and the top of the slope, respectively

图1 不同地貌部位样品采集剖面分布示意图

Fig. 1 Distribution of the soil profile for soil sampling in the studied slope

1.2 CT扫描

本研究土柱中土壤孔隙特征扫描所采用的是德国西门子双排螺旋CT扫描仪, 扫描方式为双层螺旋扫描, 每层数据采集率为 $1\ 000\ \text{个}\ \text{s}^{-1}$, 每排探测器通道 $1\ 344$ 个, 扫描电压的峰值为 $120\ \text{kV}$, 扫描电流为 $110\ \text{mA}$, 扫描时间为 $1\ \text{s}$, 扫描间距为 $3\ \text{cm}$, 扫描层厚为 $2\ \text{cm}$, 扫描方向由土柱底部向顶部, 每个土柱共扫描图像 23 幅, 共计 207 幅图片。

1.3 阈值确定

目前扫描图像阈值的确定方法可大致归为以

下五类^[24-28]: (1) 采用目视解译与原状图像对比的方法确定解译标准。(2) 采用多人解译, 协调核准的方法。(3) 采用的是人为制定已知大孔隙, 根据在CT影像上的灰度, 确定解译标准。(4) 在提取二值化孔隙图像时结合试验测定的孔隙率采用逆分析法确定出分割阈值。(5) 类间方差最大准则法, 该方法以图像分类后的两类之间方差取得最大为准则。本研究在吸取前人研究精华的基础上, 为了提高研究精度, 设想由实际剖面不同深度总孔隙度的实测值作为确定阈值的标准。通过

实测值计算得到了每个土柱剖面总孔隙度随深度变化的函数关系式。根据此关系式计算出CT各个扫描深度处的土壤总孔隙度。由此,根据每层总孔隙度就可以确定出各个扫描影像的阈值,由此系列阈值利用ArcGIS10.1对扫描图片进行处理,确定各扫描层的灰度图像,之后利用ArcGIS就可以统计出不同孔径的孔隙。具体步骤为:首先,对圆孔进行矢量化处理;第二,利用剪切工具批量剪切圆孔;第三,选择阈值,利用栅格计算器对孔洞进行黑白二值阈值分割;第四,孔隙后处理,最后分析孔洞面积和周长比,判断适宜性,若合适,结束。否则,转至第三步,重新选择阈值。再根据大孔隙直径的确定,统计出大孔隙的数目,周长,面积及各级大孔隙所占的比例。

1.4 大孔隙划分

土壤大孔隙是指能够提供优先水流和溶质运移通道的孔隙,但它只是一个相对概念,研究者由于对其理解和定义的不同,使得在对其确定和划分时存在较大分歧。郝振纯等^[29]对粉砂壤和粗粉砂黏壤土原状土柱和回填土柱进行CT扫描,将孔径大于187.8 μm的孔隙定义为大孔隙。Warner等^[30]则将孔径大于1 mm的孔隙定义为大孔隙。Luxmoore^[31]根据大孔隙的毛管势定义,将毛管势≥300 Pa的孔隙定义为大孔隙,并根据表面张力与毛管上升力方程计算得到了大孔隙的有效孔径为>1 mm。Beven和Germane^[32]则认为当量直径大于0.03 mm的孔隙为大孔隙,孙龙等^[33]将大孔隙界定为田间持水量到饱和含水量之间的土壤孔隙,根据土壤水分穿透曲线理论得出大孔隙半径范围,并且认为等效直径大于1 mm的土壤大孔隙是能导

致优先流发生的优先路径。杨永辉等^[34]根据CT扫描结果,将统计出来的最小孔径作为大小孔隙的界限。在综合对比以往研究成果的基础上,本次研究将>1 mm的孔径定义为大孔隙,并将孔隙等效直径划分为5个等级:<1 mm、1~3 mm、3~5 mm、5~7 mm、>7 mm。大孔隙等效直径 R 计算方法为:

$$R = \frac{4A}{P} \quad (1)$$

式中, A 为大孔隙面积; P 为大孔隙周长。

为了分析大孔隙个数与大孔隙度的关系,在等效直径计算的基础上,计算了大孔隙的成圆率 C :

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (2)$$

式中, C 为成圆率, A 为大孔隙面积, P 为大孔隙周长。孔隙成圆率上限为1,下限为0。

根据所确定的阈值,经过ArcGIS10.1对扫描图像的处理和统计,以及依据式(1)和式(2)计算出了3个土柱不同深度的大孔隙度、各等级的等效直径及大孔隙的成圆率。

2 结果

2.1 大孔隙度随剖面深度的变化特征

在上述测试、图像处理和计算设计的基础上,计算出了研究坡面不同地貌部位土壤剖面的大孔隙度、总孔隙度以及大孔隙度占总孔隙度的百分比(表1)。

表1 坡地不同地貌部位土壤剖面大孔隙度、总孔隙度统计结果

Table 1 Statistics of macro-porosity and total porosity in soil profiles relative to position on the slope (%)

Profile depth (cm)	坡顶 The top			坡中 The middle			坡底 The bottom		
	大孔隙度 Macro porosity	总孔隙度 Total porosity	比值 Ratio (%)	大孔隙度 Macro porosity	总孔隙度 Total porosity	比值 Ratio (%)	大孔隙度 Macro porosity	总孔隙度 Total porosity	比值 Ratio (%)
	0~3	39.23	45.31	86.58	37.30	40.87	91.26	35.65	42.81
3~6	38.90	43.30	89.84	35.00	40.36	86.72	35.98	39.89	90.20
6~9	35.10	42.13	83.31	37.56	39.85	94.25	36.49	38.19	95.55
9~12	35.85	41.29	86.82	35.98	39.34	91.46	33.18	36.98	89.72

续表

Profile depth (cm)	坡顶 The top			坡中 The middle			坡底 The bottom		
	大孔隙度 Macro porosity	总孔隙度 Total porosity	比值 Ratio (%)	大孔隙度 Macro porosity	总孔隙度 Total porosity	比值 Ratio (%)	大孔隙度 Macro porosity	总孔隙度 Total porosity	比值 Ratio (%)
	12~15	36.56	40.65	89.94	37.25	38.83	95.93	31.32	36.05
15~18	36.44	40.12	90.83	33.36	38.32	87.06	33.73	35.28	95.61
18~21	35.38	39.67	89.19	34.44	37.81	91.09	30.83	34.63	89.03
21~24	34.79	39.28	88.57	32.20	37.30	86.33	28.56	34.07	83.83
24~27	35.50	38.94	91.17	34.69	36.79	94.29	32.15	33.58	95.74
27~30	32.97	38.64	85.33	35.33	36.28	97.38	29.16	33.13	88.02
30~33	33.67	38.36	87.77	35.05	35.77	97.99	28.22	32.73	86.22
33~36	33.92	38.11	89.01	35.20	35.26	99.83	27.09	32.37	83.69
36~39	34.55	37.88	91.21	32.66	34.75	93.99	30.57	32.03	95.44
39~42	34.32	37.66	91.13	34.07	34.24	99.50	30.26	31.72	95.40
42~45	33.30	37.46	88.89	33.71	33.73	99.94	29.34	31.43	93.35
45~48	34.20	37.27	91.76	31.11	33.22	93.65	28.37	31.16	91.05
48~51	33.11	37.10	89.25	29.26	32.71	89.45	30.01	30.91	97.09
51~54	34.63	36.93	93.77	29.48	32.20	91.55	30.42	30.67	99.18
54~57	34.64	36.78	94.18	30.49	31.69	96.21	29.70	30.44	97.57
57~60	34.63	36.63	94.54	31.12	31.18	99.81	30.02	30.22	99.34
60~63	34.06	36.48	93.37	29.08	30.67	94.82	28.27	30.02	94.17
63~66	35.36	36.35	97.28	29.84	30.16	98.94	29.43	29.82	98.69
66~69	36.10	36.22	99.67	29.00	29.65	97.81	25.95	29.64	87.55
平均值Mean	35.10	38.81	90.82	35.18	35.26	94.32	30.64	33.38	92.03

由表1可知,整体而言,在3个土壤剖面中,均以大孔隙为主。大孔隙度占总孔隙度的比值分布在83.3%~99.7%之间,大于90%以上的数值占到了62%。就孔隙特征随剖面变化规律而言,大孔隙度和总孔隙度均具有随着土壤剖面深度的加深而减小的趋势,最大值均出现在0~10 cm深度范围内。但是,从大孔隙度与总孔隙度的比值来看,随着土壤剖面深度的加深而加大,说明总孔隙度随剖面深度加深而减小的幅度大于大孔隙度减小的幅度,进而可以推测,随着土壤剖面深度的加深,孔径小于1 mm的孔隙所占的比重很小,几乎全是大孔隙。根据土壤质地和结构的组合特征,砂土的总孔隙度一般分布在30%~45%,而且孔径粗,大孔隙比重大,说明整个坡面均处于侵蚀粗化严重的阶段。

为了能直观了解大孔隙度随着剖面深度的变化规律,根据表1大孔隙度随深度变化的数据,求出了不同地貌部位土壤剖面中不同深度的大孔隙度的距平值,并绘制了图2。

由表1和图2可以看出(图中X轴的正负值表示与平均值的差值),就坡顶土壤剖面而言,大孔隙度在土壤剖面中的分布介于32%~39%之间,整个剖面大孔隙度值的变幅并不大,大于平均值的层位占到了43%,而大孔隙度与总孔隙度的差值随着深度的增加而减小,说明随着深度的增加,小孔隙度所占的比例在明显地减小。在坡中土壤剖面中,大孔隙度在土壤剖面中的分布介于29%~37%之间,大孔隙度与总孔隙度的差值的较大值出现在土壤表层0~10 cm,较小值则是出现在剖面中下部,但总

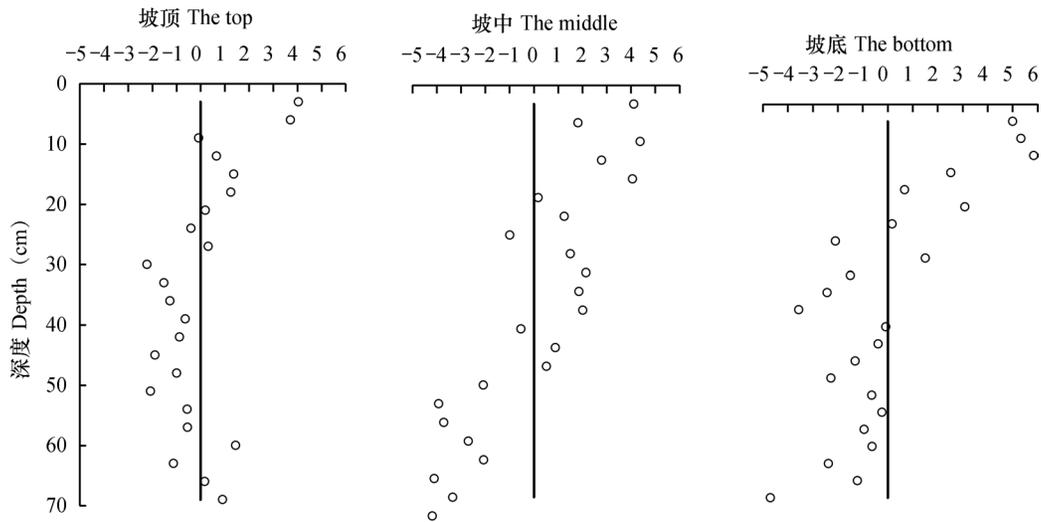


图2 大孔隙度距平随剖面深度变化趋势

Fig. 2 Variation trend of macro porosity anomaly in soil profiles with depth in the profile

体上大孔隙度与总孔隙度的差值随着剖面的增加有减小的趋势，这也就意味着随着土壤剖面深度的增加，小孔隙度也在减小。而在坡底剖面中，大孔隙度在土壤剖面中的分布介于25%~37%之间，但是大孔隙度与总孔隙度的差值随土壤剖面深度的增加而变化的规律较为复杂，没有一定的规律性。从整体上看，在3个剖面中大孔隙度大于平均值的层位主要分布在0~30 cm深度之间，表现为正距平，而

大孔隙度小于平均值的层位主要分布在30~70 cm深度之间，表现为负距平，只是在坡顶60~70 cm范围出现两个畸点。

2.2 大孔隙个数比例及等效直径级数随剖面深度的变化特征

基于ArcGIS10.1对扫描图片不同孔径等级个数及总孔数的统计计算，得出了大孔隙中不同等效孔径级别所占的比重（表2）。

表2 坡地不同地貌部位剖面大孔隙等效直径各等级个数比例

Table 2 Proportion of macro-pores of equivalent diameter in number in the soil profile relative to position of the profile on slopes (%)

剖面深度 Profile depth (cm)	大孔隙等效直径各等级个数比例Proportion of classes of macro-pores of equivalent diameter (mm) in number											
	坡顶The top				坡中The middle				坡底The bottom			
	1~3	3~5	5~7	>7	1~3	3~5	5~7	>7	1~3	3~5	5~7	>7
0~3	66.67	18.18	3.03	12.12	76.47	9.80	3.92	9.80	73.58	13.21	5.66	7.55
3~6	78.79	9.09	0.00	12.12	81.33	9.33	2.67	6.67	65.71	17.14	0.00	17.14
6~9	73.33	6.67	0.00	20.00	81.33	9.33	2.67	6.67	78.95	7.89	5.26	7.89
9~12	73.08	13.46	5.77	7.69	77.03	13.51	2.70	6.76	76.09	4.35	2.17	17.39
12~15	66.07	17.86	7.14	8.93	80.56	12.50	1.39	5.56	73.33	8.89	2.22	15.56
15~18	68.18	15.91	4.55	11.36	85.33	9.33	1.33	4.00	70.45	9.09	0.00	20.45
18~21	68.29	19.51	4.88	7.32	84.31	9.80	0.00	5.88	75.38	12.31	3.08	9.23
21~24	63.27	24.49	2.04	10.20	79.03	12.90	1.61	6.45	69.23	21.54	4.62	4.62
24~27	74.29	8.57	2.86	14.29	78.79	13.64	1.52	6.06	79.25	9.43	1.89	9.43
27~30	73.53	11.76	0.00	14.71	76.92	13.46	0.00	9.62	61.70	23.40	4.26	10.64
30~33	64.10	15.38	2.56	17.95	68.57	11.43	10.00	10.00	56.25	12.50	0.00	31.25
33~36	73.81	7.14	7.14	11.90	78.72	8.51	0.00	12.77	68.42	5.26	0.00	26.32

续表

剖面深度 Profile depth (cm)	大孔隙等效直径各等级个数比例 Proportion of classes of macro-pores of equivalent diameter (mm) in number											
	坡顶 The top				坡中 The middle				坡底 The bottom			
	1~3	3~5	5~7	>7	1~3	3~5	5~7	>7	1~3	3~5	5~7	>7
36~39	71.43	11.43	8.57	8.57	81.48	7.41	1.85	9.26	80.00	6.67	0.00	13.33
39~42	76.92	5.77	5.77	11.54	67.39	10.87	2.17	19.57	72.73	11.36	4.55	11.36
42~45	73.68	10.53	3.51	12.28	82.00	6.00	4.00	8.00	75.71	14.29	2.86	7.14
45~48	70.18	7.02	12.28	10.53	57.14	19.05	4.76	19.05	71.79	7.69	5.13	15.38
48~51	71.70	13.21	5.66	9.43	62.50	16.67	0.00	20.83	67.31	11.54	5.77	15.38
51~54	75.81	11.29	4.84	8.06	59.09	13.64	4.55	22.73	59.52	14.29	7.14	19.05
54~57	70.00	14.00	2.00	14.00	46.67	6.67	6.67	40.00	68.00	18.00	4.00	10.00
57~60	67.57	13.51	5.41	13.51	50.00	14.29	0.00	35.71	72.73	11.36	0.00	15.91
60~63	60.61	12.12	3.03	24.24	88.41	8.70	0.00	2.90	68.09	17.02	0.00	14.89
63~66	73.21	8.93	5.36	12.50	69.44	8.33	0.00	22.22	69.70	6.06	6.06	18.18
66~69	68.75	14.58	4.17	12.50	80.56	9.72	1.39	8.33	50.00	13.64	9.09	27.27
平均值 Mean	70.58	12.63	4.37	12.42	73.61	11.08	2.31	12.99	69.74	12.04	3.21	15.02

由表2数据可知, 在3个土壤剖面中, 均以1~3 mm孔径的大孔隙所占比例最大, 3个土柱的平均值分别为: 坡顶70.58%, 坡中73.61%, 坡底69.74%。在3个土柱各层的69个数据中, 最小比值也在50%以上, 最大可达到88%。3~5 mm孔径的大孔隙所占比重次之, 排在第3位的是>7 mm孔径的大孔隙, 5~7 mm所占比例最小。经统计在总孔隙个数中, 对于3个剖面整体而言, 大孔隙个数所占比重均很大, 大部分的比重大于70%, 并呈现出随着深度的增加而减少的趋势(图3)。

就大孔隙个数而言, 在坡顶土壤剖面中, 大孔隙个数所占的比例为24%~92%之间, 最大值出现在表层, 但绝大部分层位的大孔隙个数所占的比例均大于平均值(68.9%)。深度36cm以上层位均为正离均差, 而且变幅不大, 正离均差的层位大约占到总层位数的70%。在坡中土壤剖面中, 大孔隙个数所占的比例分布在45%~96%之间, 绝大部分层位的大孔隙个数所占的比例均接近于平均值(81.65%), 幅度不大, 较为稳定, 但正离均差的层位占总层位数的57%, 其小于坡顶, 说明大孔隙个数在剖面的分布差异不大。在坡底土壤剖面中, 大孔隙个数所占的比例分布在24%~96%之间, 大于平均值(72.49%)的层位数占到了65%, 但大孔隙个数的比例在剖面中变幅较大, 出

现了2个比例较小的层位。

就坡顶整个剖面而言, 大孔隙个数所占的比例总体上呈现的趋势是随着剖面深度的增加而减小, 直线相关系数为0.62。在63~66 cm处最小, 在3~6 cm处最大, 36~69 cm范围是大孔隙个数比例分布较小的区域。但坡中剖面不同于坡顶, 大孔隙个数所占的比例在48~51 cm处最小, 在3~6 cm处最大, 但是大孔隙个数所占的比例在坡中整个剖面深度的变化不大, 基本上围绕80%波动。对于坡底而言, 大孔隙个数所占的比例在33~36 cm处最小, 同样也是在3~6 cm处最大, 但是大孔隙个数所占的比例在整个剖面变化起伏较大。

2.3 大孔隙度与大孔隙个数比例的关系

大孔隙度与大孔隙个数比例的比值在坡顶、坡中、坡底均围绕0.40波动, 说明整体上坡顶、坡中、坡底三个剖面位置处大孔隙度与大孔隙个数比例有一定的规律。从理论上而言, 大孔隙度个数比例与大孔隙度应该呈正比例关系, 但是分别对坡顶、坡中、坡底三个剖面位置处的大孔隙个数比例与大孔隙度进行相关性拟合, 发现三个位置处的相关系数分别为0.37、0.31、0.52, 相关性并不好。因为, 大孔隙度不仅与大孔隙的个数有关, 而且还与大孔隙的直径和成圆率有关, 本次试验将大孔隙分为四个等级(表2), 但是由于每个等级大孔隙

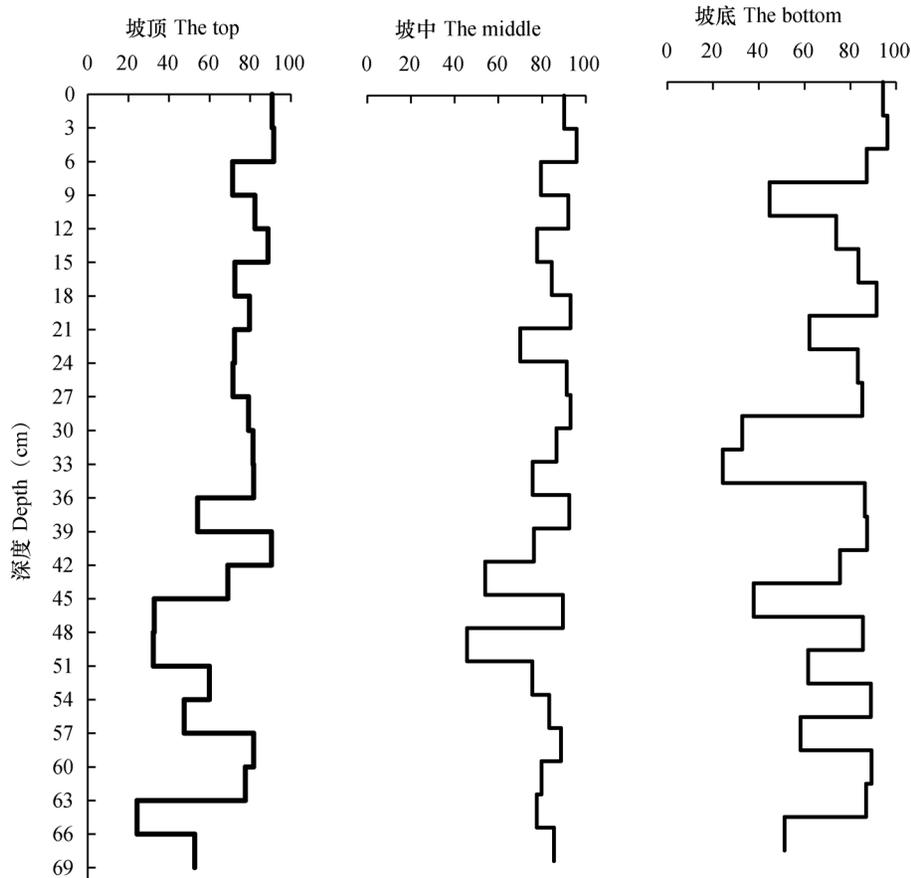


图3 大孔隙个数占总孔隙个数比例随剖面深度的变化趋势

Fig. 3 Variation trend of the ratio of macro-pores / total pores in number with depth in the profile (%)

的个数是不同的，所以总体上而言，大孔隙与大孔隙度的关系不存在绝对的正比例关系，导致了它们之间的相关性不好。

3 讨论

由结果分析可知，在不同地貌位置的土壤剖面中，大孔隙度与大孔隙个数比例的关系、大孔隙度与总孔隙度的关系、大孔隙等效直径等级的配比等，随剖面深度的变化并不一致，而且变化比较复杂，相互之间的相关性也并不好，其主要原因是受大孔隙等效直径大小、各等级孔径的成圆率、土壤的颗粒组成，以及外部强烈的侵蚀作用所致。

3.1 坡面侵蚀特征对大孔隙成圆率的影响

孔隙成圆率上限为1，下限为0。数值越接近于1，孔隙形态越接近于圆，数值越小，孔隙形态越不规则。土壤孔隙成圆率可以反映出土壤的水分渗透性能，因为，在不同形状孔隙中运移的水分和空气与孔隙周围土壤的接触面积不同，对土壤通气

性能和水分传输所产生的影响就不同。根据几何原理，在同等面积的条件下，规则的圆形周长最小，即成圆率最大，其与土壤水分和空气的接触面积最小，有利于水分运移。成圆率越小，水分在渗漏过程中受到的阻力相对要大，越不利于水分的运移。

由式(2)所计算的3个剖面不同深度的大孔隙成圆率(表3)可知，就剖面整体而言，坡中的平均成圆率最大(为0.23)，坡底的平均成圆率次之(为0.22)，坡顶的平均成圆率最小(为0.13)。对于坡顶而言，在剖面6 cm和36 cm处出现两个异动较大值，分别为0.46、0.44，而其他各个层位的大孔隙成圆率几乎不会超过0.2。对于坡中而言，其成圆率在整个剖面均有逐渐减小的趋势，只是在剖面底部70 cm处出现了一个较为明显的异动值。对于坡底而言，其成圆率在整个剖面几乎均呈现Z形变化趋势，尤其在剖面0~13 cm变化幅度明显，但大孔隙成圆率最大值还是出现在土壤表层。

表3 坡地不同地貌部位土壤剖面大孔隙成圆率统计结果

Table 3 Statistics of circular of macro-pores in soil profile relative to position of the profile on the slope

剖面深度 Profile depth(cm)	大孔隙成圆率 Macro-pore circularity		
	坡顶 The top	坡中 The middle	坡底 The bottom
0~3	0.20	0.44	0.46
3~6	0.46	0.43	0.14
6~9	0.07	0.07	0.40
9~12	0.09	0.27	0.05
12~15	0.11	0.14	0.10
15~18	0.14	0.38	0.27
18~21	0.17	0.36	0.32
21~24	0.06	0.19	0.04
24~27	0.08	0.31	0.17
27~30	0.21	0.38	0.40
30~33	0.09	0.35	0.05
33~36	0.44	0.12	0.07
36~39	0.04	0.22	0.28
39~42	0.16	0.27	0.30
42~45	0.14	0.07	0.20
45~48	0.04	0.25	0.03
48~51	0.05	0.05	0.21
51~54	0.07	0.08	0.29
54~57	0.05	0.21	0.38
57~60	0.13	0.08	0.06
60~63	0.11	0.07	0.33
63~66	0.04	0.05	0.40
66~69	0.04	0.44	0.03
平均值Mean	0.13	0.23	0.22

从本次试验研究来看，就整个土壤剖面而言，坡顶的平均成圆率要低于坡中与坡底，这也反映出坡顶在整个土壤剖面的水分平均入渗能力要弱于坡中与坡底，坡中的平均入渗能力与坡底相近，但是整体而言，坡顶、坡中、坡底平均入渗能力与坡顶、坡中、坡底的土壤侵蚀强度相符合。这主要是由于在研究区未受侵蚀的土壤，黏粒含量比重大，土壤水分渗透性较小；相反，受到侵蚀的坡面土壤黏粒含量减少，粗颗粒所占的比重加大，土壤水分的渗漏加快。从土壤侵蚀原理出发，坡顶由于产汇流面积小，单纯遭受雨滴击溅的侵蚀，所以侵蚀强度弱，坡中与坡底产汇流面积大，侵蚀强度大。

3.2 土壤颗粒组成对土壤剖面大孔隙分布规律的影响

土壤质地是决定土壤孔隙性好坏的主要因素之一。根据国际制标准，将所采集的与土柱剖面位置相同的对应层位的土壤样品进行了颗粒组成测试，其结果分为4级：粗砂粒（2~0.2 mm）、细砂粒（0.2~0.02 mm）、粉粒（0.02~0.002 mm）和黏粒（<0.002 mm）。就本研究的坡地而言，整体坡地均以粗砂粒所占比重最大，坡中最大平均值为63.18%，坡底与坡顶相接近，分别为59.48%和58.33%，属于重砂土。坡面黏粒含量的平均值以坡底最大为11.84%，坡顶次之为9.99%，坡中最小为9.59%，粉粒含量的平均值仍然以坡底最大为

17.28%，坡顶和坡中分别为15.16%和11.04%。为了能定量明确土壤剖面大孔隙与土壤质地组成的关系，用SPSS20.0将各个粒级与大孔隙度进行相关性分析（表4）。由表4可见，大孔隙度与粗砂粒呈显著的正相关，与黏粒和粉粒呈显著的负相关。在

12个相关系数中，坡顶大孔隙度与粗砂粒的相关性最好，坡底大孔隙度与细砂粒的相关性最差。从3个坡位来看，坡顶大孔隙度与各粒级的相关性均大于其他2个坡位，坡底的大孔隙度与各粒级的相关性均小于其他2个坡位。

表4 坡地不同地貌部位土壤剖面大孔隙度与粒度组成的相关性

Table 4 Correlation between macro-porosity and particle size composition relative to position of the profile on the slope

地貌部位 Geomorphic sites	粗砂粒 Coarse sand	细砂粒 Fine sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
坡顶The top	0.874**	0.21	-0.689**	-0.827**
坡中The middle	0.843**	0.137	-0.865**	-0.840**
坡底The bottom	0.776**	-0.017	-0.685**	-0.238

注：**表示在0.01水平（双侧）上显著相关Note: **indicates significant correlation significant at the 0.01 level (bilateral)

就3个不同地貌部位的3个土壤剖面的平均值而言，土壤剖面中大孔隙度值大对应的粗砂粒含量高，其中，坡底土壤剖面中大孔隙度的平均值最小对应的黏粒含量的平均值最大，而粗砂粒含量的平均值小于坡中；坡中土壤剖面中大孔隙度的平均值最大对应的粗颗粒含量的平均值最大，而黏粒含量的平均值最小。坡顶土壤剖面居于二者之间。

从大孔隙度与土壤颗粒组成的对应层位来看，大孔隙度值比较大的层位与粗砂粒含量高的层位相对应，在坡顶部和中部的土壤剖面中，主要分布在0~20 cm的表层，在坡底部的土壤剖面中其厚度较薄，在表层的0~12 cm之间。大孔隙度值较小的层位与黏粒含量值较大的层位相对应，在坡顶的土壤剖面中，主要分布在25~50 cm的土层深度，在坡中部土壤剖面中，分布在40~70 cm较深土层范围内，从20 cm到40 cm之间大孔隙度与土壤颗粒组成的对应关系较弱，具有层次波动的现象。在坡底土壤剖面中，总体趋势也是大孔隙度值小的层位对应的黏粒含量较高，大孔隙度值大的层位对应的粗颗粒含量较大，但在土壤剖面中分布的层位具有交错的特征。

分析表明，土壤颗粒组成越细，总孔隙度越大，而且小孔隙比重越大。以砂粒为主的砂质土（砂粒占50%以上），土壤剖面中松散的土壤固相骨架比重较大，颗粒棱角分明，土壤剖面中以不规则大孔隙为主。

3.3 坡面侵蚀特征对土壤剖面大孔隙分布规律的影响

一般地带性土壤剖面孔性特征表现为“上虚下实”，要求在土壤表层总孔度为50%~60%，通气孔隙度在10%~20%之间，下层的总孔隙度为50%左右，通气孔隙度在10%左右。本研究坡面由于受到强烈的水力侵蚀，坡面粗化现象严重，黏粒和部分粉粒在坡面径流的侵蚀和搬运作用下流失。土壤表层的黏粒和粉粒含量均最小，与3个土壤剖面表层大孔隙度最大相一致。在3个土壤剖面中总孔隙度均较小，而且主要是大孔隙（属于通气孔隙），虽然总孔隙度和大孔隙度均随土壤剖面深度的加深而减小，但大孔隙度所占的比重却是随着土壤剖面深度的加深而加大，几乎均在90%以上。

在同一坡面的不同地貌部位，由于侵蚀强度具有明显的差异，所以在坡顶、坡中和坡底土壤剖面的孔性特征也存在一定的差异。在降雨强度较小的情况下，坡面不会产生径流，整个坡面均遭受降雨的雨滴击溅侵蚀；当降雨强度较大时，坡顶由于汇水面积较小，仍然单纯地遭受降雨的雨滴击溅侵蚀，而坡中与坡底由于汇水面积较大，既有雨滴击溅侵蚀，同时还叠加坡面径流的侵蚀，所以从整体上而言，坡中与坡底的侵蚀强度较大。由此可得，在坡顶土壤剖面中，大孔隙度占总孔隙度的比例变化规律较好。坡底由于处于沉沙池的上端，坡面径流在此处容易汇集，使得坡底汇流面积最大，结果

导致了其侵蚀强度大于坡顶，使得坡底大孔隙度的比例变化幅度较大，最大值与最小值相差能达到16%以上，而且在剖面中的变化规律不明显，波动较大。这主要是因为，在侵蚀环境下，土壤表层松散颗粒易被坡面径流冲刷而流失掉，而导致表层土壤大孔隙比例变化幅度较大，即侵蚀强度越大，大孔隙比例变化幅度越大。在坡地中部侵蚀较坡顶严重，所以在坡中土壤剖面中，从上至下大孔隙度占总孔隙度的比重均很大（85%以上），大于90%的层位占到了83%，孔隙的结构性较差。

4 结 论

在侵蚀性风化花岗岩母质上发育的坡地土壤，土壤剖面大孔隙结构的特征受不同地貌部位差别性水力侵蚀的影响非常明显。土壤剖面中以大孔隙为主，大孔隙度占总孔隙度的比率均大于83%，在坡中土壤剖面中可达到90%以上，不同地貌位置3个土壤剖面的比率排序为：坡中>坡底>坡顶，这一比值并随深度的增加而增大。大孔隙度和大孔隙个数在土壤剖面中的分布以0~30 cm深度的表层为最大。大孔隙等效孔径的比例结构极不协调，1~3 mm的孔径个数占大孔隙个数的比例约占到了70%以上。由成圆率所表征的大孔隙形状，在一定程度上可以反映土壤剖面的机械组成，研究结果揭示了：细颗粒越多，成圆率越大，粗颗粒越多，大孔隙度越大这一规律。总之，严重的土壤侵蚀改变了典型地带性土壤剖面的孔隙结构，致使坡地土壤剖面水肥气热的协调运行受到了严重影响，大孔隙比率的异常增大和结构的不合理是导致坡地土壤漏水漏肥的关键所在。

参 考 文 献

- [1] 万勇善, 席承藩, 史德明. 南方花岗岩区不同侵蚀土壤治理效果的研究. 土壤学报, 1992, 29 (4): 419—426
Wan Y S, Xi C F, Shi D M. Study on soil conservation effect for different eroded soils in granite region of south China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29 (4): 419—426
- [2] 赵其国. 红壤物质循环及其调控. 北京: 科学出版社, 2002
Zhao Q G. The circulation of materials and control on red soli (In Chinese). Beijing: Science Press, 2002
- [3] 阮伏水, 朱鹤健. 福建省花岗岩地区土壤侵蚀与治理. 北京: 中国农业出版社, 1997
Ruan F S, Zhu H J. Soil erosion and treatment in granite area of Fujian Province (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1997
- [4] 龚子同, 张甘霖, 陈志成, 等. 土壤发生与系统分类. 北京: 科学出版社, 2007
Gong Z T, Zhang G L, Chen Z C, et al. Soil genesis and classification (In Chinese). Beijing: Science Press, 2007
- [5] 詹其厚, 袁朝良, 张效朴. 有机物料对砂姜黑土的改良效应及其机制. 土壤学报, 2003, 40 (3): 420—425
Zhan Q H, Yuan C L, Zhang X P. Ameliorative effect and mechanism of organic materialson vertisol (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (3): 420—425
- [6] Suzanne E A, Stéphanie R, Allan J C. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 2009, 378 (1/2): 179—204
- [7] 刘伟, 区自清, 应佩锋. 土壤大孔隙及其研究方法. 应用生态学报, 2001, 12 (3): 465—468
Liu W, Ou Z Q, Ying P F. Soil macro-pores and its research methods (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12 (3): 465—468
- [8] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macro-pore size distribution from water breakthrough curves. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 556—559
- [9] 华珊, 陈研, 梁露焘, 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. 农业工程学报, 2014, 30 (3): 78—85
Hua S, Chen Y, Liang L T, et al. Studying soil pore structure by using image filtering technology based on partial differential equation model (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (3): 78—85
- [10] Beven K, Germann P. Macro-pores and water flow in soils. *Water Resource Research*, 1982, 18 (5): 1311—1325
- [11] Germann P F, Pietro L D. Scales and dimensions of momentum dissipation during preferential flow in soils. *Water Resources Research*, 1999, 35 (5): 1443—1454
- [12] 程亚南, 刘建立, 吕菲, 等. 基于CT 图像的土壤孔隙结构三维重建及水力学性质预测. 农业工程学报, 2012, 28 (22): 115—122

- Cheng Y N, Liu J L, Lü F, et al. Three-dimensional reconstruction of soil pore structure and prediction of soil hydraulic properties based on CT images (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (22): 115—122
- [13] Gantzer C J, Anderson S H. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. Soil and Tillage Research, 2002, 64 (1): 101—111
- [14] Sander T, Gerke H H, Rogasik H. Assessment of Chinese paddy-soil structure using X-ray computed tomography. Geoderma, 2008, 145 (3/4): 303—314
- [15] Udawatta R R, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Influence of prairie restoration on CT-measured soil pore characteristics. Journal of Environmental Quality, 2008, 37 (1): 219—228
- [16] 郭晓明, 马腾, 陈柳竹, 等. 污水灌溉下土壤孔隙特征的CT定量分析. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40 (11): 1896—1903
- Guo X M, Ma T, Chen L Z, et al. The quantitative analysis on soil pore characteristics under sewage irrigation by CT (In Chinese). Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2015, 40 (11): 1896—1903
- [17] 李宗超, 胡霞. 小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响. 土壤学报, 2015, 52 (1): 242—248
- Li Z C, Hu X. Effects of shrub (*Caragana microphylla* Lam) encroachment on soil porosity of degraded sandy grassland (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (1): 242—248
- [18] 吴华山, 陈效民, 陈黎. 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
- Wu H S, Chen X M, Chen C. Study on the macropore in main paddy soil in tai-lake region by using CT (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21 (2): 175—178
- [19] 赵世伟, 赵勇钢, 吴金水. 黄土高原植被演替下土壤孔隙的定量分析. 中国科学: 地球科学, 2010, 40 (2): 223—231
- Zhao S W, Zhao Y G, Wu J S. Quantitative analysis of soil pores under natural vegetation successions on the Loess Plateau (In Chinese). Science of China: Earth Science, 2010, 40 (2): 223—231
- [20] 周虎, 李文昭, 张中彬, 等. X射线CT研究多尺度土壤结构. 土壤学报, 2013, 50 (6): 1226—1230
- Zhou H, Li W Z, Zhang Z B, et al. The research of multi-scale soil structure by X-ray CT (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (6): 1226—1230
- [21] 王慧妮, 倪万魁. 基于计算机X射线断层术与扫描电镜图像的黄土微结构定量分析. 岩土力学, 2012, 33 (1): 243—247, 254
- Wang H N, Ni W K. Loess microstructure quantitative analysis based on CT and SEM pictures (In Chinese). Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (1): 243—247, 254
- [22] 张小娜, 冯杰, 邵伟, 等. 土壤大孔隙对坡面溶质流失的影响. 农业机械学报, 2013, 44 (6): 117—121, 147
- Zhang X N, Feng J, Shao W, et al. The influence of soil macropores for slope solute loss (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44 (6): 117—121, 147
- [23] 张治伟, 朱章雄, 王燕, 等. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素. 农业工程学报, 2010, 26 (6): 71—76
- Zhang Z W, Zhu Z X, Wang Y, et al. Soil infiltration capability and the influencing factors of different utilization style in karst slope (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26 (6): 71—76
- [24] 易珍莲, 梁杏, 李福民, 等. ERDAS软件在土体微观结构研究中的应用. 水文地质工程地质, 2007 (1): 113—115, 119
- Yi Z L, Liang X, Li F M, et al. The application of ERDAS software soil microstructure research (In Chinese). Hydrogeology & Engineering Geology, 2007 (1): 113—115, 119
- [25] 陶高梁. 岩土多孔介质孔隙结构的分形研究及其应用. 武汉: 武汉理工大学, 2010
- Tao G L. The research and application of the fractal of rock and soil porous media pore structure (In Chinese). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010
- [26] 冯杰, 郝振纯. CT扫描确定土壤大孔隙分布. 水科学进展, 2002, 13 (5): 611—617
- Feng J, Hao Z C. Distribution of soil macro-pores characterized by CT (In Chinese). Advances in Water Science, 2002, 13 (5): 611—617
- [27] 彭瑞东, 杨彦从, 鞠杨, 等. 基于灰度CT图像的岩石孔隙分形维数计算. 科学通报, 2011, 56 (26): 2256—2266
- Peng R D, Yang Y C, Ju Y, et al. The calculation of rock pore fractal dimension based on CT pictures (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 2011, 56

- (26): 2256—2266
- [28] 陈超, 魏彪, 梁婷, 等. 一种基于工业CT技术的岩芯样品孔隙度测量分析方法. 物探与化探, 2013, 37(3): 500—507
- Chen C, Wei B, Liang T, et al. Pore measurement analysis method of rock core samples based on industry CT technology (In Chinese). Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(3): 500—507
- [29] 郝振纯, 冯杰, 罗健. 两种土壤大孔隙分布的比较. 水文地质工程地质, 2002(2): 1—5, 24
- Hao Z C, Feng J, Luo J. The comparison of two kinds of soil macro-pores distribution (In Chinese). Hydrogeology & Engineering Geology, 2002(2): 1—5, 24
- [30] Warner G S, Nieber J L, Moore I D, et al. Characterizing macro-pores in soil by computed tomography. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(3): 653—660
- [31] Luxmoore R J. Micro-, meso-, and macro-porosity of soil. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(3): 671—672
- [32] Beven K, Germane P. Water flow in soil macro-pores. IIA combined flow model. Journal of Soil Science, 1981, 32(1): 15—29
- [33] 孙龙, 张洪江, 程金花, 等. 柑橘地土壤大孔隙与优先流的关系研究. 水土保持通报, 2012, 32(6): 75—79
- Sun L, Zhang H J, Cheng J H, et al. The study of the relationship between soil macro-pores and preferential flow in citrus field (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 75—79
- [34] 杨永辉, 武继承, 毛永萍, 等. 利用计算机断层扫描技术研究土壤改良措施下土壤孔隙. 农业工程学报, 2013, 29(23): 99—108
- Yang Y H, Wu J C, Mao Y P, et al. Study on soil pore of measures of soil improving by using CT (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 99—108

Spatial Distribution of Macro-pore Properties in Soil Profile on a Slope of Weathering Granite

ZHANG Liping CHEN Ruzhang WU Yanhong DENG Longzhou

(Institute of Soil and Water Resource and Environment Sciences, College of Environment and Resource Sciences, Zhejiang University, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Hangzhou 310058, China)

Abstract 【Objective】Strong soil erosion affects profoundly soil porosity of slope lands. On slopes the same in parent material but different in erosion intensity, soil pore properties in soil profile vary sharply. This study was oriented to explore spatial distribution pattern of macro-pore properties in soil profile relative to landform positions and soil erosion intensity, a slope of weathered granite under erosion in Shengzhou, Zhejiang Province was taken as the study area. 【Method】This study in oriented to characterize macro-pore in soil profiles at different landform positions on the slope, with the help of the Shengzhou Soil and Water Conservation Monitoring Station. Along the slope where the station sits, three typical sites, different in erosion intensity, were selected separately, at the top, middle and bottom. A soil profile or soil column, 70 cm in length, was sampled at each site using PVC pipes with known inner diameter. The columns were then CT-scanned layer by layer with high intensity and their CT images were interpreted with the ArcGIS10.1 image processing technology for analysis of macro-pore distribution and its influencing factors. The pore characteristics indices studied include macro-porosity proportion of macro-porosity to total porosity, anomaly of macro-porosity, circularity of macro-pores, proportion of different classes of macro-pores of equivalent diameter in number, and ratio of macro-pores to total pores. 【Result】The following conclusions were drawn from the analysis and calculation: (1) Macro-pores dominated all the three soil profiles, and pores between 1~3 mm in diameter were the highest in proportion and pores between 5~7 mm were the lowest. In terms of number of macro-pores, the three typical soil profiles

exhibited a decreasing order of the one at the middle > the one at the bottom > the one on the top; in the soil profiles on the top and at the middle of the slope, the proportion of macro-pores number is comparatively small. (2) The difference between macro-porosity and total porosity was very small in all the three soil profiles and decreased with soil depth. The soil layer with macro-porosity higher than the average was distributed mainly in the upper part of the profiles between 0 cm and 30 cm. The difference between soil layers was not obvious and never exceeded 10%, but the deep in the soil profile, the greater the difference. (3) Circularity of macro-pores was a factor affecting the relationship between macro-porosity and total porosity, while the higher the content of clay and silt, the higher the circularity. (4) The proportion of coarse sand was the highest in all the three profiles, amounting to 50% or more, while the proportion of clay the lowest, being no more than 12%. Correlation of macro-porosity with soil particle size was analyzed with SPSS 20.0, revealing that soil macro-porosity was significantly and positively related to content of coarse sand, but negatively to content of clay and silt. The finer the soil particles, the greater the total porosity and the smaller the proportion of macro-pores. 【 Conclusion 】 In a word, severe soil erosion alters the characteristics of soil structure, being porous in the upper and layer and compact in the lower layer. Affected by erosion, the soil profiles are dominated with macro-pores, poor in pore structure. The distribution of macro-pores in the soil profiles is obviously affected by the intensity of erosion. The more serious the erosion, the higher the proportion of macro-pores and the more serious the phenomenon of soil water and nutrient loss. All the findings in this study provide a train of thought for evaluation of soil evolution under erosion and contents of the research on soil evolution.

Key words Eroded slope; Soil profile; Macro-pore; CT scanning; Threshold controlling

(责任编辑: 檀满枝)