

DOI: 10.11766/trxb201712230496

黄土沟壑区不同地形部位土壤大孔隙特征研究*

鞠忻倪¹ 贾玉华^{1, 2†} 甘 淼¹ 金 珊¹ 肖 波³

(1 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

(3 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要 切沟沟底、沟缘和坝地侵蚀发生和发展的过程不同, 通过采集三种地形条件的原状土柱, 利用CT扫描手段揭示土壤大孔隙随地形和深度变化的规律。结果表明: (1) 三种地形条件对土壤大孔隙参数具有显著影响; 与已有结果相比, 地形条件对土壤大孔隙参数的影响弱于植被的作用; (2) 不同土层(厚50 mm)大孔隙参数差异显著, 沟缘土壤大孔隙度均值和变异系数在102 mm深度具有上下分异明显的特点; (3) 大孔隙数分别与黏粒含量和饱和导水率呈显著和极显著负相关关系, 沟底土壤大孔隙的连通性较沟缘和坝地更好。沟底和沟缘土壤的大孔隙通道主要受植物根系作用影响, 坝地土壤大孔隙受长期淤积和水分渗透作用影响, 上述因素造成三种地形条件土壤大孔隙特征产生差异。

关键词 黄土高原; 切沟; CT扫描; 土壤结构; 土壤孔隙

中图分类号 S152.5 **文献标识码** A

土壤大孔隙是固相土壤颗粒与团聚体之间容纳水分和气体的空间, 它既是土壤中物质和能量交换的通道, 又是植物根系、土壤动物和微生物活动的场所。土壤大孔隙的数目、大小和空间结构对土壤的透气性、持水保水性能以及植物根系在土壤空间的伸展有着重要影响。利用CT扫描技术研究土壤大孔隙特征, 孔隙分辨率可达mm和 μm 尺度, 便于对土壤结构进行定量评价; 同时在不破坏土壤内部结构的情况下, 通过对连续断面图像进行重组, 能够实现土体内部结构的三维重建。凭借其对原状土体结构研究具有无损性、精确性、全面性和快速性等优点, CT扫描技术已成为土壤大孔隙研究的主要方法之一^[1-4]。

黄土高原是沟蚀引发环境威胁与地貌演变的代表性区域。沟蚀在吞噬土地和大量产沙的同时,

塑造了黄土高原地形破碎和沟谷密布的地表形态。作为黄土高原常见的一种沟谷形态, 切沟是坡面径流输移泥沙从而引起物质迁移的主要通道, 又是侵蚀物质的来源之一。坝地是以淤地坝作为沟道治理措施从而拦截泥沙、淤积而成的可利用土地。切沟沟底、沟缘和坝地在流域地形地貌和坡沟系统水文过程中扮演不同的角色, 不同地形条件发生的水文过程很大程度上决定于降水的入渗和产流以及土壤水分状况, 其中土壤大孔隙对于相关结果、过程和机理解释的能力尤为突出^[5-6]。土壤大孔隙体积相对于总孔隙体积而言通常比例较小, 其饱和与否及程度对径流属性起主要的作用。此外, 土壤大孔隙内发生的优先流和重力水下渗还影响降水的分割比例。土壤大孔隙的数量、形态和连通性等特征受外界物理过程影响, 存在细颗粒堵塞大孔隙, 渗透水

* 国家自然科学基金项目(41571221, 41571130081) 资助 Supported by the National Natural Foundation of China (Nos. 41571221, 41571130081)

† 通讯作者Corresponding author. E-mail: jiayuhua@163.com

作者简介: 鞠忻倪(1996—), 女, 辽宁大连人, 专业为水土保持与荒漠化防治。E-mail: juxinni96@163.com

收稿日期: 2017-12-23; 收到修改稿日期: 2018-04-03; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-05-30

流、压实效应和胀缩过程引起孔隙变形等现象。对黄土高原切沟沟底、沟缘和坝地土壤大孔隙特征利用CT扫描开展相关研究，是探索流域径流、泥沙和土壤水分过程与机理，描述不同地形条件和土壤侵蚀演变之间关系的重要途径之一。此外，大孔隙是黄土结构的本质特性之一^[7]，因对水分具有储存和调节功能，其形态特征对黄土高原植被恢复下的土壤水库重建具有重要意义^[4]，大孔隙特征还关系到土壤渗透性和湿陷性等工程地质性质^[8]。

目前，黄土高原不同植被演替阶段^[4]、不同植被类型^[2,9]和土地利用类型^[10]下土壤孔隙特征的定量分析已相对深入，但大孔隙参数随深度的变化揭示得不够细致。在东北黑土区^[11-12]、南方红壤区^[13-14]以及内蒙古浑善达克沙地^[15]，基于CT扫描技术的土壤孔隙特征研究亦同步展开，然而地形条件对土壤大孔隙特征的影响尚未见报道。本文选定神木县六道沟流域，在典型切沟和坝地采集原状土柱，利用CT扫描技术分析土壤大孔隙特征，拟描述并比较沟底、沟缘和坝地土壤的大孔隙特征，揭示土壤大孔隙参数随深度的变化规律，结果可丰富砂质土壤孔隙结构研究，为黄土区坡沟系统土壤水分过程、土壤水库调蓄降水及流域土壤干层缓解等提供重要信息。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木县窟野河流域支流六道沟（ $110^{\circ} 21' \sim 110^{\circ} 23' E$ ， $38^{\circ} 46' \sim 38^{\circ} 51' N$ ）西侧，地处毛乌素沙地和黄土高原的过渡地带，属于典型片沙覆盖的黄土丘陵沟壑地貌。地面起伏较平缓，但切割破碎，沟谷密度 $6.45 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ ，海拔 $1 081 \sim 1 274 \text{ m}$ ，相对高差 $68 \sim 107 \text{ m}$ 。气候特征为：中温带半干旱草原季风气候；年均蒸发量 785.4 mm ，干燥度 1.8 ，年均降水量 437.4 mm ，其中6—9月降水占全年降水量的 77.4% ；年平均大风日 13.5 d ，最多可达 44 d ，主要发生在春季；年平均气温 8.4°C ，大于等于 10°C 积温 $3 200^{\circ}\text{C}$ ，无霜期 135 d 。土壤类型主要有绵沙土、新黄土、红土以及在沙地上发育起来的风沙土和坝地淤土。土壤结构为轻壤—中壤，结构疏松，抗蚀性差，水土流失严重。流域自然植被破坏

殆尽，现存的森林资源全部以人工林为主。

1.2 原状土柱采集

本试验主要设计3个处理：切沟沟底、沟缘和坝地，3次重复。选择坡面上一典型切沟作为样地1，原状土柱的采集地点确定为沿切沟沟底上游、中游和下游及沟缘坡上、坡中和坡下的6个样点。该样地海拔 $1 198 \sim 1 230 \text{ m}$ ，沟底主要植被为长芒草和冰草，沟缘主要植被为长芒草、铁杆蒿和胡枝子。再选取切沟附近的一块典型坝地作为样地2，沿对角线选取3个样点，样点附近生长有少量芦苇。原状土柱的采集时间为2016年8月，具体方法为：先除去样点表层的枯枝落叶，然后将内直径 110 mm 、长度 250 mm 的PVC硬质管材垂直压入表层土壤（该端提前打磨好刃口），管口上方放置胶垫，用胶质锤将PVC管缓缓敲入土壤，直至管口与地面接近齐平。然后通过挖掘将原状土柱小心取出，下端削平后将两端密封并标记上下方向，采集完成后将原状土柱运至医院CT室，运输过程中采用棉垫缓冲和尽量避免颠簸等方式减小土体的扰动与破坏。

1.3 土柱扫描与分析

原状土柱CT扫描所用仪器为Philips 16通道螺旋CT机，该仪器主要用于医学领域的人体扫描，因此在进行土壤扫描时重新设定扫描参数。经调整设置峰值电压为 140 kV ，电流为 316 mA ，扫描时间为 15.5 s ；扫描厚度为 2 mm ，每隔 2 mm 扫描一个横断面，9个土柱各获取124个横断面图像。

利用Image J软件对CT扫描图像进行分析。居中选择分析图像的尺寸为 $62.5 \text{ mm} \times 62.5 \text{ mm}$ ，先将切割后的图像转换为8-bit图像，然后结合实际土壤孔隙情况设置其分割阈值，小于阈值部分判断为土壤孔隙，图像分割后得到黑白二值图像。为避免土柱表层和底部受扰动而影响实验结果，从两端 10 mm 开始进行数据分析，提取当量直径大于 1 mm 的大孔隙。分析得到的特征参数有土壤大孔隙的数目、面积、大孔隙度、成圆率和当量直径。利用Invert反选，使白色部分变为土壤孔隙，黑色部分为土壤，将单个土柱的连续切片图像拟合成3D影像，利用bonej插件计算孔隙三维量化结果，得到孔隙连通度、连通密度、孔隙内表面积、分支点密度和连接点密度。

考虑土壤质地和饱和导水率与大孔隙特性具有

一定联系, 本试验在原状土柱扫描结束后, 将每个土柱去除两端可能干扰部分, 从中间切割并定义为表层 (1~13 cm) 和亚表层 (13~25 cm) 两层, 用环刀再取样, 利用定水头法测定土样的饱和导水率。同时收集土柱上下层土样, 利用Mastersizer 2000激光粒度仪测定土壤黏粒 (<0.002 mm)、粉粒 (0.002~0.02 mm) 和砂砾 (0.02~2 mm) 的组成, 每个土柱各做两次, 取其平均值得到土壤机械组成。

1.4 数据统计与分析

为比较不同深度范围之间的土壤大孔隙参数, 对土壤深度进行分层, 具体为10~50 mm记作为L1, 52~100 mm记作L2, 102~150 mm记作L3,

152~200 mm记作L4, 202~250 mm记作L5。

利用SPSS 18.0对数据进行单因素方差分析和Duncan's多重比较 ($P<0.05$), 对土壤大孔隙参数以及土壤质地和饱和导水率进行Pearson相关分析。

2 结果

2.1 不同地形条件土壤的大孔隙特征

切沟沟底、沟缘和坝地三种地形条件下土壤大孔隙参数的基本统计值如表1所示。经K-S检验、方差分析和多重比较 (表2), 结果显示, 地形对土壤大孔隙度、大孔隙数、当量直径、成圆率和单个大孔隙平均面积均具有显著影响。

表1 土壤大孔隙参数的统计值

Table 1 Statistics of soil macropore parameters

大孔隙参数 Macropore parameters	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准误差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S检验 K-S test
大孔隙度Macroporosity/%	0.89	15.26	5.39	0.13	0.47	0.02	N (0.09)
大孔隙数Count	11.00	110.00	46.35	0.89	0.78	1.24	NN (0.05)
当量直径Equivalent diameter/mm	1.49	7.47	2.49	0.04	2.54	10.00	NN (0.00)
成圆率Roundness	0.66	0.95	0.84	0.00	-0.20	1.10	N (0.25)
单个大孔隙平均面积Mean size per macropore/mm ²	1.60	9.15	3.77	0.06	1.15	1.84	NN (0.01)

注: (1) 样本数为358; (2) N 为正态分布, NN 为非正态分布, 括号内数值若大于0.05, 表示数据资料符合正态分布 Note: (1) The number of samples is 358; (2) N stands for normal distribution and NN for non-normal distribution. If the value in the brackets is > 0.05, it means that the corresponding data conforms to normal distribution

表2 不同地形条件土壤大孔隙参数的多重比较

Table 2 Multiple comparisons of soil macropore parameters relative to terrain

地形 Terrain	样本数 N	大孔隙度 Macroporosity	大孔隙数 Count	当量直径 Equivalent diameter	成圆率 Roundness	单个大孔隙平均面积 Mean size per macropore
沟底 Gully bottom	120	4.97 b	46.33 b	3.16 a	0.83 b	3.56 b
沟缘 Gully costa colpi	118	5.21 b	38.49 c	2.16 b	0.85 a	3.77 ab
坝地 Damland	120	5.98 a	54.09 a	2.12 b	0.84 a	3.99 a

注: 小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$) Note: Different lowercase letters indicate significant difference at level of 0.05

三种地形条件下土壤大孔隙度均值的从小到大排序为: 沟底、沟缘、坝地, 其中坝地土壤大孔隙度的均值 (5.98%) 高于研究区均值 (5.39%), 且显著大于沟底和沟缘, 后二者土壤大孔隙度的均值分别为4.97%和5.21%。坝地土壤大孔隙数显著高于沟底和沟缘, 沟底土壤大孔隙数与研究区均值

接近, 且显著高于沟缘。坝地和沟缘土壤大孔隙当量直径均低于研究区均值 (2.49 mm), 均与沟底土壤大孔隙当量直径 (3.16 mm) 具有显著性差异。对于成圆率和单个孔隙平均面积而言, 尽管三种地形条件下的均值在数值上比较接近, 但其差异仍在 $P<0.05$ 水平上显著。三种地形土壤大孔隙特征

差异显著的原因为：沟底主要受侵蚀作用而下切，埋藏较深且结构紧实的土壤不断出露；沟缘受植物生长（铁杆蒿和胡枝子）和明显的干湿交替影响，土壤易于产生相对复杂的大孔隙通道；坝地土壤主要为淤积土，坡面土壤细颗粒经分选、输移和沉积后，结构致密，大孔隙分布较为均匀。

赵世伟等^[4]对黄土高原子午岭不同植被演替阶段土壤孔隙特征的研究表明，土壤大孔隙度的变化范围为5.82%~28.93%，大孔隙数为21~43，成圆率则为0.70~0.86。Li等^[2]对六道沟流域柠条林地和苜蓿草地土壤大孔隙的研究结果表明，大孔隙度低于20.22%，大孔隙数低于100，孔隙成圆率变化范围为0.5~1。与赵世伟等^[4]相比较，本研究中大孔隙度数值相对偏低，大孔隙数的数值区间却明显较宽，孔隙成圆率范围也相对较广。与Li等^[2]的研究结果相比较，本研究中大孔隙度、大孔隙数和孔隙成圆率的最大值偏低，3个孔隙参数的最小值则相对偏高。这是因为赵世伟等^[4]研究的是包括弃耕地、草本、灌丛、早期森林和乔木五个群落下的土壤大孔隙，Li等^[2]关注的是生长22 a和40 a的柠条林地与一块苜蓿草地影响下的大孔隙。与地形影响相比，包含灌木在内的植被生长作用下土壤大孔隙度相对较高。本研究大孔隙度和成圆率的数值范围相对较窄，在一定程度上表明地形条件对土壤大孔隙参数的影响弱于植被影响的作用。

孔隙分级的依据一般为当量直径，例如周虎等^[14]将当量直径大于0.5 mm的所有孔隙定义为大孔隙，冯杰和郝振纯^[16]进一步将大孔隙分为小于0.5 mm、0.5~1 mm、1~3 mm、3~5 mm和大于5 mm 5个组别。目前土壤大孔隙分级未见统一标准，本研究根据当量直径将大孔隙以1 mm为间隔进行组别划分。由不同组别土壤大孔隙频率分布图（图1）可知，当量直径范围在1~3 mm之间的大孔隙较多，在数量上可占80%以上。Hu等^[1]在内蒙古太仆寺旗草原的相关研究中，当量直径1~3 mm大孔隙可占所有组别的15%~50%，且土壤大孔隙的平均当量直径范围为1.24~3.77 mm。太仆寺旗草原地处浑善达克沙地南缘，神木县位于毛乌素沙地南缘，本研究平均当量直径在Hu等^[1]的数值范围之内，两地土壤中当量直径1~3 mm的大孔隙所占比例均高，与两地土壤质地相似、沙粒含量均较高有关。

2.2 不同深度范围土壤的大孔隙特征

不考虑地形条件，土层深度对土壤大孔隙度、

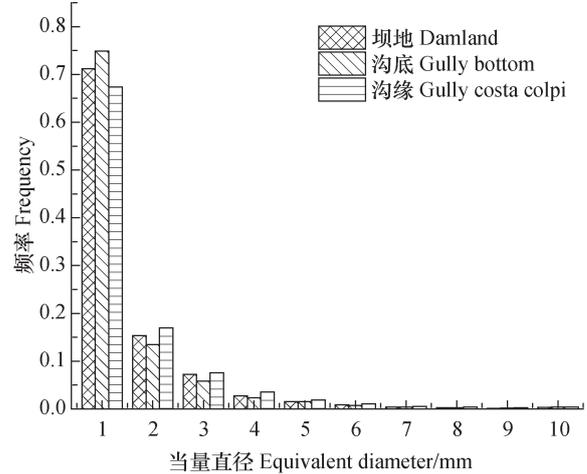


图1 不同当量直径土壤大孔隙的频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of macropores relative to equivalent pore diameter

大孔隙数、当量直径、成圆率和单个大孔隙平均面积等具有显著影响，5个深度分层之间土壤孔隙参数的多重比较结果见表3。

在10~50 mm即L1深度范围，土壤大孔隙度均值为5.89%；随土层深度增加，土壤大孔隙度呈现先显著减小（L2）、然后连续增加（L3和L4）和最后减小（L5）的变化趋势。本研究五个深度范围土壤大孔隙度的均值变化范围为4.52%~5.89%。赵世伟等^[4]对17~57 mm深度范围按6 mm间隔划分土层，8个深度范围土壤大孔隙度的均值变化范围为13.35%~23.14%，亦发现土层深度对土壤大孔隙度有显著性影响。周虎等^[12]研究发现，黑土区3个深度范围（0~5 cm, 10~15 cm和20~25 cm）土壤大孔隙度的数值变化范围为19.26%~29.96%，尽管试验处理和土壤类型与本试验不同，亦可见大孔隙度随深度的起伏变化。

土壤剖面大孔隙数多重比较结果显示，L2土层大孔隙数显著低于其它土层；土层变化对当量直径也有显著影响，L2与L3土层的大孔隙当量直径在数值上相互接近且显著低于其它土层；L2与L3土壤大孔隙成圆率显著高于其它土层，即在L2和L3土层，大孔隙的几何形态最接近于圆；单个大孔隙平均面积也随土层不同而差异显著，L2和L3土层与L1和L5土层大体相近，L4与其它土层的单个大孔隙平均面积差异显著。总体而言，在L2土层，土壤大孔隙特征与其它土层相比表现出一定差异性，大孔隙度、大孔隙数、当量直径及单个大孔隙平均面积均显著低于其它土层，土壤大孔隙成圆

表3 不同深度范围之间土壤大孔隙参数的多重比较

Table 3 Multiple comparisons of soil macropore parameters relative to soil layer

土层 Soil layer	深度范围 Depth range/mm	样本数 Sample size	大孔隙度 Macroporosity	大孔隙数 Count	当量直径 Equivalent diameter	成圆率 Roundness	单个大孔隙平均面积 Mean size per macropore
L1	10 ~ 50	63	5.89 a	46.41 a	2.54 ab	0.83 b	4.22 a
L2	52 ~ 100	75	4.52 c	40.94 b	2.22 b	0.85 a	3.35 c
L3	102 ~ 150	75	5.11 bc	47.12 a	2.25 b	0.85 a	3.32 c
L4	152 ~ 200	75	5.87 a	50.80 a	2.67 a	0.83 b	3.84 b
L5	202 ~ 250	70	5.63 ab	46.47 a	2.77 a	0.83 b	4.23 a

注：不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Note: Different lowercase letters indicated significant difference at level of 0.05

率显著高于其它土层。原因可能为L2土层相对于L1土层具有一定的压实效应。

考虑到划分深度范围和忽略地形条件差异不利于揭示土壤大孔隙度随不同深度变化的细节，图2进一步显示了三种地形各个深度（2 mm间隔）土壤大孔隙度的均值和标准差。在2 ~ 100 mm深度，沟缘土壤大孔隙度数值范围始终偏低，多数深度表现为沟缘 < 坝地 < 沟底，且沟缘大孔隙度的变异程度始终最小。但在102 mm以下深度，多数深度土壤大孔隙度表现为沟底 < 坝地 < 沟缘，沟缘大孔隙度的变异程度始终整体最大。在102 mm ~ 250 mm以下深度，沟底土壤大孔隙度整体偏小，介于0.02% ~ 16.28%；而沟缘土壤大孔隙度整体偏大，介于9.57% ~ 29.66%。

土壤大孔隙度随深度变化的曲线反映了地形条件差异的影响。沟缘上层（102 mm以上）侧面即近沟道一侧土层薄，双面蒸发作用下，土壤极易缺水，导致土体收缩和紧实；沟缘下层（102 mm以下）土层逐渐变厚，水分条件有所改善，植物根系可穿插其中，土壤结构相对疏松。因此，沟缘上层大孔隙度均值和变异程度均低于沟底和坝地，下层大孔隙度均值和变异程度均高于沟底和坝地。沟底上下层大孔隙度波动幅度小，上层变异程度高于下层，与下层土壤相对紧实和沟底小气候作用有关。坝地上下层间变异程度相对一致，则为长期淤积导致土壤质地和结构均匀所致。

基于二维平面土壤大孔隙特征的描述不能反映其连通性。由于欧拉特征值对土壤大孔隙的变化较为敏感，通过测量欧拉特征值可得到孔隙连通度和连通密度，借此可描述土壤大孔隙的三维连通结构。从表4看出，沟底土壤大孔隙的连通度和连通密度显著高于沟缘和坝地，说明沟底土壤大孔隙的

连通性较沟缘和坝地更好。孔隙内表面积、分支点密度和连接点密度是表征土壤孔隙连通复杂程度的参数，其值越大则孔隙连通越复杂。分支点密度和连接点密度的大小关系均表现为沟底 > 沟缘 > 坝地，孔隙内表面积表现为沟底 > 坝地 > 沟缘，结果反映出坝地土壤大孔隙分布较为均匀分散，不连通的大孔隙数量较多，连通性较差。从形成大孔隙通道的成因上分析，由土壤生物活动引起的大孔隙通道一般具有连通性好，平均直径相对较大和呈管状的特点；由根系引起的大孔隙通道一般具有连通性好、圆形，随深度增加大孔隙直径呈下降趋势的特点；由水分入渗的携带作用、土壤团聚体的间隙及土壤干层造成的细缝等原因形成的大孔隙通道一般很小，分散分布，连通性较差。比较而言，沟底和沟缘土壤的大孔隙通道主要受植物根系作用影响，坝地土壤的大孔隙通道形成原因则较为复杂：由于长期的淤积作用和水分入渗的携带作用，土壤颗粒黏性大，较为密实，因此不利于大孔隙通道的形成。

2.3 大孔隙参数与土壤质地和饱和导水率的相关性

根据美国农业部制土壤质地划分标准，沟底、沟缘和坝地原状土柱的土壤类型主要为壤砂土和砂壤土，土壤机械组成和饱和导水率结果如图3所示。在沟底和沟缘，亚表层（13 ~ 25 cm）土壤饱和导水率约为表层（1 ~ 13 cm）的二分之一；坝地土壤饱和导水率在数值上则远小于沟底和沟缘。对土壤大孔隙参数（大孔隙度、大孔隙数、成圆率、当量直径和单个大孔隙平均面积）以及土壤质地（黏粒含量、粉粒含量和沙粒含量）和饱和导水率进行Pearson相关分析，不同参数间的相关关系结果见表5。

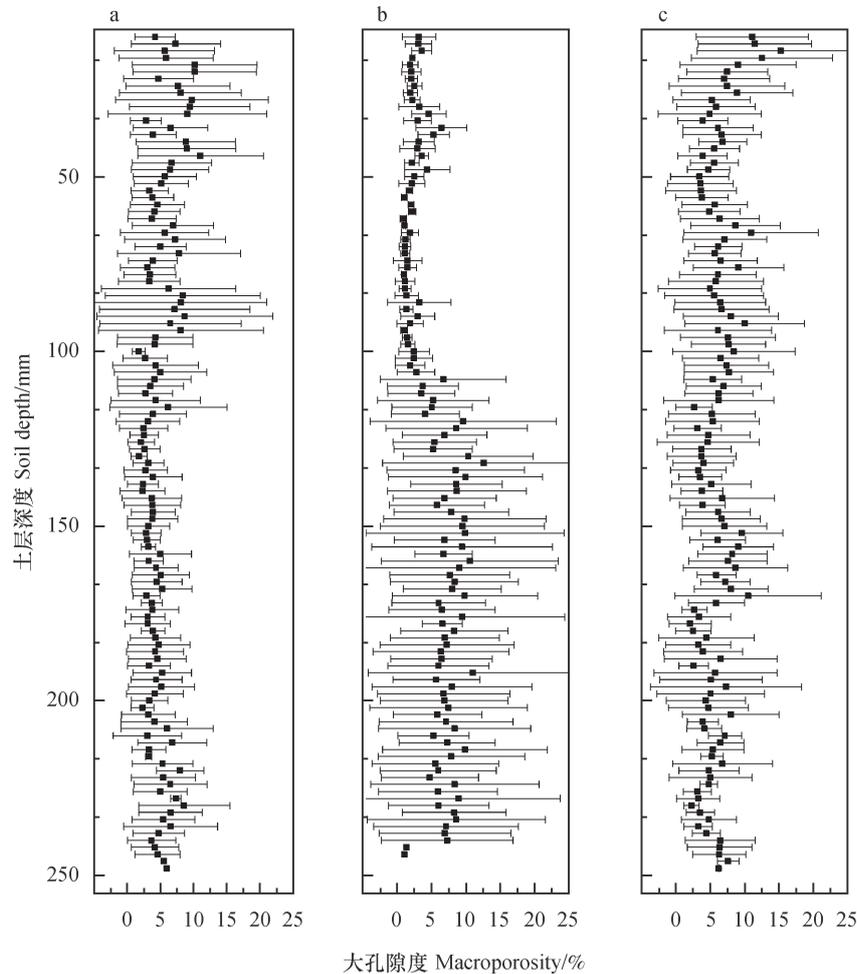


图2 不同地形条件土壤大孔隙度随深度的变化 (a. 沟底; b. 沟缘; c. 坝地)

Fig. 2 Variation of soil macroporosity with depth relative to terrain (bottom, costa colpi and damland)

表4 不同地形条件土壤大孔隙的三维量化特征

Table 4 Three-dimensional characteristics of soil macropores relative to terrain

地形 Terrain	连通度 Connectivity	连通密度 Connectivity density/ mm^{-3}	孔隙内表面积 Bone surface/ mm^2	分支点密度 Branches density/ mm^{-3}	连接点密度 Junctions density/ mm^{-3}
沟底Gully bottom	17 210	0.017 3	4 660.00	0.013 2	0.001 7
沟缘Gully costa colpi	3 809	0.003 9	566.90	0.006 6	0.001 2
坝地Damland	3 344	0.003 4	1 410.00	0.003 0	0.000 4

大孔隙度与大孔隙数和单个大孔隙平均面积呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 说明研究区土壤大孔隙发达, 这与测得土壤质地以砂质壤土和壤质砂土为主的结果是一致的。大孔隙数与黏粒含量呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与饱和导水率呈极显著负相关。刘目兴等^[17]通过水分穿透试验对三峡库区森林土壤大孔隙特征研究发现, 各样地土壤饱和导水

率与孔径 $> 1.0 \text{ mm}$ 的大孔隙密度呈高度的线性关系。陈效民等^[18]研究发现, 太湖地区水稻土土壤大孔隙度与饱和导水率具有显著的正相关关系。与上述结果不同, 本研究中大孔隙数与饱和导水率呈极显著负相关关系。类似负相关结果可见Ahmad^[19]对挪威Skuterud流域原状土进行CT分析, 研究发现在各种土壤大孔隙参数中, 土壤饱和导水率主要

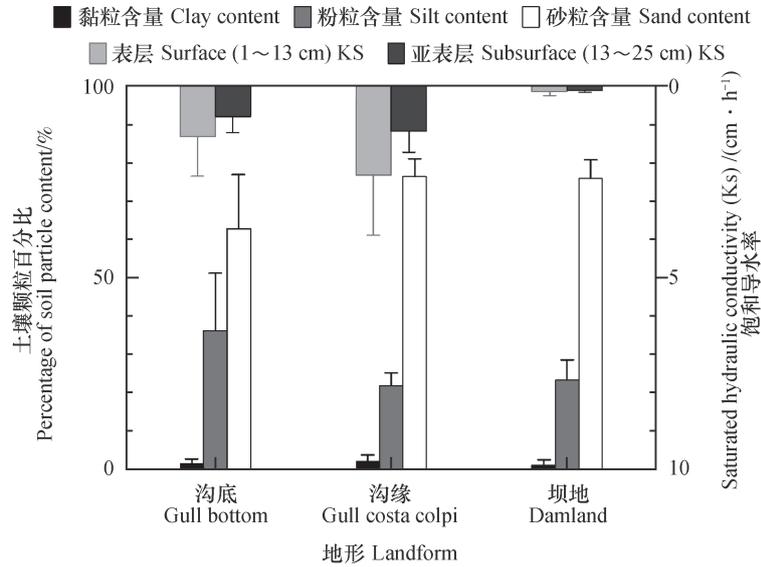


图3 不同地形条件土壤颗粒机械组成和饱和导水率的结果比较

Fig. 3 Soil particle size distribution and saturated hydraulic conductivity relative to terrain

表5 土壤大孔隙参数与土壤质地和饱和导水率之间的相关性

Table 5 Pearson correlations of macropore parameters with soil texture and saturated hydraulic conductivity

	大孔隙度 Macroporosity	大孔隙数 Count	当量直径 Equivalent diameter	成圆率 Roundness	单个大孔隙平均面积 Mean size per macropore	粉粒含量 Silt content	砂粒含量 Sand content	黏粒含量 Clay content
大孔隙数Count	0.76*							
当量直径 Equivalent diameter	-0.11	0.14						
成圆率Roundness	-0.61	-0.70	-0.70					
单个大孔隙平均面积 Mean size per macropore	0.89**	0.42	-0.23	-0.41				
粉粒含量Silt content	-0.16	0.02	0.79*	-0.57	0.07			
砂粒含量Sand content	0.21	0.06	-0.75*	0.51	-0.28	-0.99**		
黏粒含量Clay content	-0.50	-0.84*	-0.33	0.60	0.29	-0.01	-0.08	
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	-0.53	-0.94**	-0.06	0.52	-0.11	0.02	-0.09	0.76*

注：*表示在 0.05 水平上显著，**表示在 0.01 水平上显著 Note: * and ** indicate significant difference at the level of 0.05 and 0.01, respectively

是由临界孔径决定, 大孔隙度与其它参数主要影响非饱和导水率。饱和导水率反映土壤的入渗和导水能力, 是高度变异的土壤水力学参数^[20], 本文的研究结果说明大孔隙特征解释饱和导水率变异的能力有限。此外, 在试验操作方面, Anderson等^[21]建议原状土柱饱和后再扫描一次, 否则容易引入误差; 而本研究扫描后切割土柱并利用环刀再次取样, 没有进行饱和后再扫描比较的试验。对于大孔隙数与饱和导水率呈极显著负相关关系, 期望后续研究结果能够进一步解释。

土壤大孔隙当量直径与粉粒含量显著正相关, 与沙粒含量显著负相关。此外, 本研究成圆率与当量直径为负相关关系 ($P>0.05$), 各样地土壤大孔隙的成圆率均随当量直径的增大而减小, 在一定程度上可反映大孔隙直径越大, 其形态特征越复杂。

3 结 论

在陕北黄土沟壑区, 切沟沟底、沟缘和坝地三种地形条件对土壤大孔隙参数均具有显著影响, 其中坝地大孔隙度、大孔隙数和单个大孔隙平均面积均显著高于沟底和沟缘, 当量直径1~3 mm的大孔隙所占比例达80%以上, 这与壤砂土和砂壤土中砂砾含量较高有关。土壤大孔隙参数随深度的变化也具有一定规律, 不同土层土壤大孔隙参数差异显著, 52~100 mm土层大孔隙度、大孔隙数、当量直径及单个大孔隙平均面积均显著低于其他土层, 土壤大孔隙成圆率显著高于其他土层。同时, 大孔隙数对于黏粒含量和饱和导水率的影响十分显著, 且大孔隙数目越多, 黏粒含量越低, 饱和导水率也越小; 沟底土壤大孔隙的连通性较沟缘和坝地更好。从大孔隙的成因来看: 沟底和沟缘土壤的大孔隙通道主要受植物根系作用影响, 坝地土壤的大孔隙通道则是由于长期淤积和水分渗透的作用。

致 谢 感谢李同川和赵春雷博士在土柱采集时提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] Hu X, Li Z C, Li X Y, et al. Influence of shrub encroachment on CT-measured soil macropore characteristics in the inner mongolia grassland of Northern China. *Soil & Tillage Research*, 2015, 150: 1—9
- [2] Li T C, Shao M A, Jia Y H. Application of X-ray tomography to quantify macropore characteristics of loess soil under two perennial plants. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67 (3) : 266—275
- [3] 王恩姮, 赵雨森, 夏祥友, 等. 冻融交替后不同尺度黑土结构变化特征. *生态学报*, 2014, 34 (21) : 6287—6296
Wang E H, Zhao Y S, Xia X Y, et al. Effects of freeze-thaw cycles on black soil structure at different size scales (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (21) : 6287—6296
- [4] 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 (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). *Scientia Sinica Terrae*, 2010 (2) : 223—231
- [5] Weiler M. Macropores and preferential flow—A love-hate relationship. *Hydrological Processes*, 2017, 31 (1) : 15—19
- [6] Menichino G T, Ward A S, Hester E T. Macropores as preferential flow paths in meander bends. *Hydrological Processes*, 2014, 28 (3) : 482—495
- [7] 张建丰, 林性粹, 王文焰. 黄土的大孔隙特征和大孔隙流研究. *水土保持学报*, 2003, 17 (4) : 168—171
Zhang J F, Lin X C, Wang W Y. Characteristics of macropore and macro-pore flow in loess soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17 (4) : 168—171
- [8] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性. *中国科学: B 辑*, 1987, 17 (12) : 1309—1318
Lei X Y. The loess collapsibility and pore types in China (In Chinese). *Science in China: Series B*, 1987 (12) : 1309—1318
- [9] 赵冬, 许明祥, 刘国彬, 等. 用显微CT研究不同植被恢复模式的土壤团聚体微结构特征. *农业工程学报*, 2016, 32 (9) : 123—129
Zhao D, Xu M X, Liu G B, et al. Characterization of soil aggregate microstructure under different revegetation types using micro-computed tomography (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (9) : 123—129
- [10] 高朝侠, 徐学选, 宇苗子, 等. 黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响. *应用生态学报*, 2014, 25 (6) : 1578—1584
Gao Z X, Xu X X, Yu M Z, et al. Impact of land

- use types on soil macropores in the loess region (In Chinese). *Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (6): 1578—1584
- [11] 王恩姘, 卢倩倩, 陈祥伟. 模拟冻融循环对黑土剖面大孔隙特征的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (3): 490—496
Wang E H, Lu Q Q, Chen X W. Characterization of macro-pores in mollisol profile subjected to simulated freezing-thawing alternation (In Chinese). *Journal of Soil Science*, 2014, 51 (3): 490—496
- [12] 周虎, 李保国, 吕贻忠, 等. 不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征. *土壤学报*, 2010, 47 (6): 1094—1100
Zhou H, Li B G, Lü Y Z, et al. Multifractal characteristics of soil pore structure under different tillage systems (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (6): 1094—1100
- [13] 李文昭, 周虎, 陈效民, 等. 基于同步辐射显微CT研究不同施肥措施下水稻土团聚体微结构特征. *土壤学报*, 2014, 51 (1): 67—74
Li W Z, Zhou H, Chen X M, et al. Characterization of aggregate microstructures of paddy soils under different patterns of fertilization with synchrotron radiation micro-CT (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1): 67—74
- [14] 周虎, 彭新华, 张中彬, 等. 基于同步辐射微CT研究不同利用年限水稻土团聚体微结构特征. *农业工程学报*, 2011, 27 (12): 343—347
Zhou H, Peng X H, Zhang Z B, et al. Characterization of aggregate microstructure of paddy soils cultivated for different years with synchrotron based micro-CT (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (12): 343—347
- [15] 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 (*Caraganamicrophylla Lam*) encroachment on soil porosity of degraded sandy grassland (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (1): 242—248
- [16] 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 macropores characterized by CT (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2002, 13 (5): 611—617
- [17] 刘目兴, 吴丹, 吴四平, 等. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响. *生态学报*, 2016, 36 (11): 3189—3196
Liu M X, Wu D, Wu S P, et al. Characteristic of soil macropores under various types of forest coverage and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Three Gorges Reservoir Area (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (11): 3189—3196
- [18] 陈效民, 黄德安, 吴华山. 太湖地区主要水稻土的大孔隙特征及其影响因素研究. *土壤学报*, 2006, 43 (3): 181—183
Chen X M, Huang D A, Wu H S. Characteristics of macropores and their affecting factors of major paddy soils in Taihu lake region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (3): 181—183
- [19] Ahmad M A. Quantifying relationships between x-ray imaged macropore structure and hydraulic conductivity. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, 2016
- [20] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征. *水土保持学报*, 2004, 18 (3): 53—56
Zheng J Y, Shao M A, Zhang X C. Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in Loess region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (3): 53—56
- [21] Anderson S, Wang H, Peyton R, et al. Estimation of porosity and hydraulic conductivity from X-ray CT-measured solute breakthrough. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 215 (1): 135—149

Characteristics of Soil Macropores in the Gully Area of Loess Plateau as Affected by Terrain

JU Xinni¹ JIA Yuhua^{1,2†} GAN Miao¹ JIN Shan¹ XIAO Bo³

(1 College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

(2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(3 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract 【Objective】 Soil macropores play an important role in hydrologic processes, such as rainfall infiltration, runoff occurrence, soil water movement and sediment deposition. As soil erosion varies with terrain (bottom and costa colpi of gully and the damland) in generation and development process, the soil forms under soil erosion vary too in soil texture and soil porosity. However, so far little has been done on effect of terrain on characteristics of soil macropores. 【Method】 In this study, undisturbed soil columns were collected at the three different landforms for analysis of macroporosity and rules of its variation with terrain and soil depth using the computerized tomographic scanning method. 【Result】 (1) Terrain did have a significant effect on macropore parameters. Damland was much higher than gully bottom in soil macroporosity, number and roundness of macropores and mean area per macropore. However, the effect of terrain on macropores was lower than that of vegetation as documented in previous studies. (2) Macropores also varied significantly in parameter with soil layer (50 mm each). Mean macroporosity and variation coefficients of the macropores in the soil at costa colpi varied sharply around the depth of 102mm. Macroporosity in the soil at the bottom of gullies fluctuated slightly, but did more significantly in the upper layer than in the lower layer. However, in the soil of damland, macropores varied in a similar trend in the upper and lower layers. (3) Soil macroporosity was significantly or extra-significantly and positively related to the number of soil macropore number and mean size per macropore, while the number of macropores was significantly and negatively related to clay content and saturated hydraulic conductivity. Equivalent diameter of the macropores was positively related to silt content and negatively to sand content. And (4) the macropores in the bottom of gullies were much higher in pore connectivity than those in the costa colpi and damland. From the point of view of reasons of the formation of macropores, those in the bottom and costa colpi of gully were formed under the impact of plant root systems, while those in damland were under the impact of long-term sedimentation and water infiltration. 【Conclusion】 CT scanning showed that the differences in characteristic between soil macropores in the bottom, costa colpi and damland of gullies may be attributed to soil erosion and deposition processes.

Key words Loess Plateau; Gully; CT scanning; Soil structure; Soil pore

(责任编辑：檀满枝)