

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0514

冯璐, 丁康, 屈媛媛, Farhat Ullah KHAN, 杜峰, 徐学选. 黄土塬边坡植被类型对土壤孔隙的影响. 草业科学, 2020, 37(4): 625-634.

FENG L, DING K, QU Y Y, KHAN F U, DU F, XU X X. The influence of Loess Tableland slope vegetation type on soil pore characteristics. Pratacultural Science, 2020, 37(4): 625-634.

黄土塬边坡植被类型对土壤孔隙的影响

冯璐¹, 丁康², 屈媛媛¹, Farhat Ullah KHAN², 杜峰^{2,3}, 徐学选^{1,2,3}

(1. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 黄土塬边坡植被建设以固坡为目的, 不同植被的土壤孔隙结构有利于增加降水入渗, 从而减少坡面产流的水蚀危害。本研究以长武塬黄土塬边坡的侧柏 (*Platycladus orientalis*) 林地、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 灌丛、草地和农地 4 种植被为研究对象, 采集 0–30 cm 的原状土柱, 利用 CT 扫描和图像处理技术, 对其土壤孔隙度、孔隙数目、孔隙成圆率和孔隙分形维数进行定量分析, 结合土层样品的理化性质, 研究影响土壤孔隙结构的主要因素。结果表明, 农地、侧柏孔隙的孔径大小分异不大, 而草地、沙棘自身根系互动穿插生成的根孔扩展了孔径分布范围, 不仅增加了孔隙度和大孔隙数目, 也降低了孔隙成圆率。草地、沙棘有利于降水入渗, 是固坡的优先选择。土壤有机质、粘粒含量等性质与孔隙参数之间具有极显著 ($P < 0.001$) 或显著 ($P < 0.05$) 相关关系, 它们的改变对土壤孔隙特征变化和增加蓄水保土能力具有重要影响。

关键词: 黄土塬边坡; 植被类型; CT 扫描; 土壤孔隙; 性质参数

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2020)04-0625-10

The influence of Loess Tableland slope vegetation type on soil pore characteristics

FENG Lu¹, DING Kang², QU Yuanyuan¹, Farhat Ullah KHAN², DU Feng^{2,3}, XU Xuexuan^{1,2,3}

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Vegetation was planted on the Loess Tableland slope with the aim of solidifying the slope. The soil pore structure under the influence of vegetation can help increase rainfall infiltration and reduce water erosion hazards caused by slope runoff. In this project, four types of vegetation located on the Changwu Loess tableland slope were chosen as research objects. Undisturbed soil columns were collected from the 0–30 cm soil layer. Quantitative analysis of soil porosity, pore number, pore rounding rate, and pore fractal dimension was carried out using computerized tomography scanning and image-processing techniques. The main factors affecting the structure of the soil pores were analyzed in combination with the physicochemical properties of the soil layer samples. The results showed that pore size did not differ significantly between cropland and *Platycladus orientalis* vegetation types. Grassland and *Hippophae rhamnoides* roots increased porosity and pore number and reduced pore-rounding rates. Grassland and *Hippophae rhamnoides* vegetation types are therefore favorable

收稿日期: 2019-10-12 接受日期: 2020-02-16

基金项目: 国家十三五研发专项“黄土高原生态修复模式的格局-结构-功能关系”(2016YFC0501602); 国家自然科学基金项目“黄土丘陵区土壤斥水性及其对降水入渗机制的影响研究”(41977426)

第一作者: 冯璐(1995-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 在读硕士生, 研究方向为草地生态。E-mail: fenglu0808@nwfafu.edu.cn

通信作者: 徐学选(1966-), 男, 陕西大荔人, 研究员, 博士, 研究方向为流域水文生态、草地生态学。E-mail: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn

<http://cykx.lzu.edu.cn>

for rainfall infiltration, making these the preferred choices for creating solid slopes. There was a significant ($P < 0.001$) or ($P < 0.05$) correlation among soil organic matter and clay content and pore parameters, and changes in these parameters had an important effect on soil pore characteristics.

Keywords: loess tableland slope; vegetation types; CT scanning; soil pores; property parameters

Corresponding author: XU Xuexuan E-mail: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn

黄土塬边坡区域土地面积约占黄土高原沟壑区的 30%，长期以来土壤侵蚀和水土流失严重^[1]。引起严重水土流失的根源是塬边坡地在坡面径流带动下，水力、重力侵蚀叠加，大大加剧了水土流失，造成黄土塬的边坡后退，侵蚀塬面的基本农田^[2]。随着山水田林湖草综合治理的深入，沟坡整治进入新阶段^[3]，因此需要深入地对接生物措施减少水土流失的水力学机理进行研究，探索不同植被类型下的土壤结构，尤其是土壤孔隙结构的变化，并对引起这些变化的内在因素作进一步分析，充分发挥生物措施应有的拦蓄水土能力，进一步抑制塬边的水土流失危害^[4-6]。长武塬为黄土高原残塬区，具备塬、梁、沟等基本地貌类型，塬坡面积大，黄土堆积深厚，剖面土质疏松，水分入渗性能良好，利于植被根系生长^[7]。坡面现有植被类型多样，无灌溉条件，属典型的旱作雨养农业区，是比较理想的研究对象^[8]。

CT 扫描技术具有分析速度快、成像精度高、不受待测物体几何结构限制等优点。通过 CT 扫描进行孔隙分析得到的非扰动土柱内的孔隙度、孔隙数目、孔隙分形维数及孔隙空间分布等方面的测量数据与常规物理方法分析相比基本一致^[9-12]，已成为土壤孔隙性质测定的先进手段。本研究利用 CT 扫描技术对黄土塬边坡侧柏 (*Platycladus orientalis*) 林地、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 灌丛、草地和农地 4 种植被进行土壤孔隙结构的定量分析，结合土层的理化性质，研究影响土壤孔隙结构的主要因素，以期对塬坡植被类型选择提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区陕西省长武县王东沟村 (35°12′ - 35°16′ N, 104°40′ - 107°42′ E) 位于黄土高原南部残塬。该区所占面积 8.3 km²，海拔 940~1 220 m，为

暖温带半湿润、大陆性季风气候，年均气温 9.1℃，年均降水量 584 mm，多集中于 7 月 - 9 月，塬边土壤类型为黄绵土。试验样地选在研究区的塬坡部位，分别为侧柏林地、沙棘灌丛、草地和农地，林草植被生长年限约为 30 年，农地种植年限长。4 种样地详细信息如表 1 所列。

1.2 样品采集

选择能典型代表当地植被恢复类型的样地，用 PVC 管进行土样采集，内径 15 cm，壁厚 0.5 cm，高 35 cm。采样前，为减少夯击过程对原状土柱的影响，PVC 管一端应削磨为刀口形状，并将采样区地表的腐殖质层和周围土壤逐一铲除。将木板垫在 PVC 管上部，缓慢击打，完全没入土壤后挖出，两端盖上盖子，封好胶带，且外附气泡膜以缓冲运输途中的颠簸。4 种样地，每个样地随机取 3 个重复，总共 12 个原状土柱。

1.3 CT 扫描及图像处理

扫描试验在陕西省咸阳市杨陵区朝阳医院进行，使用西门子 16 排螺旋 CT 机进行扫描，扫描峰值电压 130 kV，电流 110 mA，扫描层厚 3 mm。平躺放置原状土柱，对土柱中心进行定位，使其与 CT 机的螺旋射线管中心重合。从距土柱顶端 30 mm 处开始扫描，每个土柱连续扫描 100 张 CT 图片。扫描前，在土柱外围分别固定装有水、根系、砾石、土壤的玻璃容器，共同扫描后获得已知土壤孔隙。

使用 Image J 软件 (1.48 版本) 对 CT 图片进行处理分析。Image J 软件由美国国家心理健康研究所 (National Institutes of Health) 开发，是基于 Java 的公共的图像处理工具^[13]。本研究图像扫描视野为 200 mm × 200 mm，矩阵为 512 × 512，故图像的像素大小为 0.39 mm × 0.39 mm，所能辨别的最小当量孔径为 0.39 mm。首先将 CT 扫描图像转化为 8 bite / JPG 格式的图像，并以土柱圆心为中心将其剪切为 70 mm ×

表 1 4 种样地详细信息
Table 1 Basic characteristics of the four experimental plots

样地 Plot	群落组成 Community components	树高 Tree height/m	胸径 DBH/cm	坡度 Slope/(°)	林冠层郁闭度 Canopy class density/%	灌草层盖度 Grass layer coverage/%	林分密度 Stand density/(tree·hm ⁻²)
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	侧柏 + 花椒 + 铁杆蒿 + 蛇葡萄 <i>Platycladus orientalis</i> - <i>Zanthoxylum bungeanum</i> + <i>Artemisia gmelinii</i> + <i>Ampelopsis sinica</i>	6.0 ± 1.1	9.0 ± 1.8	22.6	80	35	2 667
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	沙棘 + 蛇葡萄 + 花椒 + 铁杆蒿 <i>Hippophae rhamnoides</i> + <i>Ampelopsis heterophylla</i> + <i>Zanthoxylum bungeanum</i> + <i>Artemisia gmelinii</i>	-	-	24.2	-	86	-
草地 Grassland	糙隐子草 + 铁杆蒿 + 旱地芦苇 + 草地风毛菊 <i>Cleistogenes squarrosa</i> + <i>Artemisia gmelinii</i> + <i>Phragmites australis</i> + <i>Saussurea amara</i>	-	-	21.5	-	97	-
农地 Cropland	玉米 <i>Zea mays</i>	-	-	18.9	-	5~10	-

70 mm 的正方形图像。降噪处理后，分割选定图像。根据已知土壤孔隙，将阈值设为 42 进行处理，使原图像转化为只有黑白色的二值图像，黑色部分为土壤孔隙，灰度值为 255；白色部分为土壤基质，灰度值为 0^[14]。随后对二值图像进行 Analyze Particle 分析，得到土壤的孔隙度、数目、周长、面积等特征参数，并使用 FracLac 插件计算其分形维数。

1.4 土壤理化性质参数测定

4 种样地，每种样地随机取 3 个采样点，对采样点表层土壤 (0 - 30 cm) 每 10 cm 分别进行采集。

将土样自然风干，用 0.149 mm 筛子筛取土样，称重 0.5 g 采用重铬酸钾法测量土壤有机质含量；用 2 mm 筛子筛取土样后称重 4~5 g，加入双氧水 (20 mL，浓度 10%) 浸泡土样 24 h，倒掉上清液后加入稀盐酸静置 24 h，将上清液倒掉后加入蒸馏水静置 24~48 h，而后用马尔文激光粒度仪测量土壤机械组成；用直径 100 mm、高 63.7 mm 的大环刀采集土壤样品，将其根系挑出洗净，装入牛皮纸袋，用 80 °C 烘箱烘至恒重后称其干重得到根系生物量 (root biomass, RB)。最后测得，4 种样地土壤理化性质如表 2 所示。

表 2 4 种样地土壤理化性质
Table 2 Physicochemical properties of the soil in the four plots

样地 Plot	根系生物量 Root biomass/(g·kg ⁻¹)	有机质含量 Soil organic matter/%	砂粒含量 Sand/%	粉粒含量 Silt/%	粘粒含量 Clay/%
农地 Cropland	0.50 ± 0.03a	0.98 ± 0.22ab	47.33 ± 4.21ab	29.99 ± 2.54a	22.68 ± 2.33a
草地 Grassland	1.04 ± 0.23ab	1.35 ± 0.32b	53.93 ± 4.85b	27.62 ± 2.76a	18.44 ± 1.88a
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	1.85 ± 0.39b	1.05 ± 0.18ab	49.74 ± 4.18ab	31.25 ± 1.66a	19.01 ± 2.07a
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	3.72 ± 0.89c	0.84 ± 0.14a	41.75 ± 3.44a	40.82 ± 3.24b	17.43 ± 3.85a

同列不同小写字母表示相同测定指标不同土地类型间差异显著 (P < 0.05)；下同。

Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between the different land types for the same measurement index at the 0.05 level; similarly for the following tables.

1.5 数据处理

目前大孔隙还未有统一的界定标准，主要有孔隙当量孔径、孔径毛细势、孔隙导水率、孔隙功能等界定方式^[15]。CT 扫描技术孔隙研究中，Luxmoore^[16]

将孔径 > 1 mm 的孔隙定义为大孔隙，李同川^[17]分析了等效直径 > 1 mm 的大孔隙特征，冯杰和郝振纯^[18]分别对等效直径 < 0.5 mm、0.5~1 mm、1~3 mm、3~5 mm、> 5 mm 的大孔隙进行分析。本研究所能

辨别的最小当量孔径为 0.39 mm, 结合前人的划分依据, 选取 $\Phi \geq 0.39$ mm、 $\Phi \geq 1.00$ mm 和 0.39 mm $< \Phi < 1$ mm 3 种孔隙结果。孔隙成圆率根据公式成圆率 = $4\pi \times S/A^2$ 计算, 式中: S 为孔隙面积, A 为孔隙周长。图像处理采用 Image J, 数据处理采用 Excel 2013, 统计分析采用 SPSS 20, 制图使用 Sigma plot。采用 Duncan 新复极差法进行多重比较, 最小显著差异法 (LSD) 进行差异显著性检验, Pearson 相关分析法进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同植被土壤的孔隙度差异性比较

不同植被土壤的孔隙度有不同差异, 孔隙度值表现为沙棘 > 草地 > 侧柏 > 农地 (表 3)。多重比较结果显示, 4 种样地间 $\Phi \geq 0.39$ mm 孔隙度和 $\Phi \geq 1$ mm 孔隙度具有一定差异。 $\Phi \geq 1$ mm 孔隙度占 $\Phi \geq 0.39$ mm 孔隙度的 96.9%~97.8%, 且两者变化趋势基本一致; 0.39 mm $< \Phi < 1$ mm 孔隙度仅占 $\Phi \geq 0.39$ mm 孔隙度的 2%~3%; 除农地 0.39 mm $< \Phi < 1$ mm 孔隙度与草地、沙棘差异显著 ($P < 0.05$) 外, 其他样地间 0.39 mm $< \Phi < 1$ mm 孔隙度差异性均不显著 ($P > 0.05$)。

4 种样地表层土壤 $\Phi \geq 0.39$ mm 孔隙度和 $\Phi \geq 1$ mm 孔隙度大于其他土层。随着土壤深度的增加, 除沙棘外均呈降低趋势 (图 1), 下降幅度表现为草地 > 侧柏 > 农地, 说明 $\Phi \geq 1$ mm 孔隙在土壤

中所占比例随着土壤深度的增加而不断降低。0 - 10 cm 土层中, 草地 $\Phi \geq 1$ mm 孔隙度处于较高水平, 土壤深度在 10 - 30 cm 时, 沙棘 $\Phi \geq 1$ mm 孔隙度明显高于其他样地, 而农地各土层的孔隙度始终处于较低水平。

2.2 不同植被土壤的孔隙数目差异性比较

孔隙数目与孔隙度在不同植被土壤中有大致相同的表现 (表 3), 均表现为沙棘 > 草地 > 侧柏 > 农地。 $\Phi \geq 1$ mm 孔隙数目占 $\Phi \geq 0.39$ mm 孔隙数目的 66.67%~85.71%, 0.39 mm $< \Phi < 1$ mm 孔隙数目仅占 14.29%~33.33%。比较不同土层深度的孔隙数目平均值得出, $\Phi \geq 0.39$ mm 孔隙数目和 $\Phi \geq 1$ mm 孔隙数目除草地与沙棘间差异不显著 ($P < 0.05$) 外, 所有样地类型间均有显著差异 ($P < 0.05$)。而 0.39 mm $< \Phi < 1$ mm 孔隙数目草地与沙棘间相近且显著 ($P < 0.05$) 高于其他样地, 侧柏与农地间无显著差异 ($P > 0.05$)。

随着土壤深度的增加, 各样地孔隙数目总体上表现为减少的趋势 (图 2)。沙棘孔隙数目始终位于较高水平的降低过程中, 尽管在表层 (0 - 10 cm) 数目低于草地, 但 10 cm 以下层明显高于草地。草地在土壤深度 0 - 5 cm 层和 5 - 10 cm 层内 $\Phi \geq 0.39$ mm 孔隙数目和 $\Phi \geq 1$ mm 孔隙数目高于沙棘, 但其他层低于沙棘, 表现孔隙的表聚明显。尽管 0.39 mm $< \Phi < 1$ mm 孔隙数目很少, 一般对总孔隙度、孔隙数目影响不大, 但 4 种植被的规律性

表 3 不同植被 0 - 30 cm 土层孔隙参数

Table 3 Mean value of pore parameters of $\Phi \geq 0.39$ mm for all soil depths under different vegetation types

样地 Plot	孔隙度 Porosity/%			孔隙数目 Pore number/(70 mm × 70 mm)			成圆率 Pore rounding rate	分形维数 Pore fractal dimension
	$\Phi \geq 0.39$ mm	$\Phi \geq 1$ mm	0.39 mm $< \Phi < 1$ mm	$\Phi \geq 0.39$ mm	$\Phi \geq 1$ mm	0.39 mm $< \Phi < 1$ mm		
农地 Cropland	1.95 ± 0.45a	1.89 ± 0.28a	0.06 ± 0.02a	9 ± 2a	6 ± 2a	3 ± 2a	0.94 ± 0.21b	1.23 ± 0.12a
草地 Grassland	9.36 ± 0.66c	9.15 ± 1.16c	0.21 ± 0.08b	48 ± 9c	39 ± 10c	9 ± 3b	0.87 ± 0.17a	1.37 ± 0.17b
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	10.74 ± 0.75d	10.47 ± 0.63d	0.27 ± 0.03b	54 ± 7c	42 ± 6c	12 ± 4b	0.88 ± 0.16a	1.36 ± 0.21b
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	4.95 ± 0.30b	4.83 ± 0.41b	0.12 ± 0.04ab	21 ± 4b	18 ± 4b	3 ± 2a	0.91 ± 0.17ab	1.31 ± 0.18ab

每种样地 3 个取样点, 对取样点表层土壤 (0 - 30 cm) 进行扫描, 扫描层厚 3 mm, 样本量 (n) = 300。同列不同字母表示同一孔隙度或孔隙数目不同样地之间差异显著 ($P < 0.05$)。

There were three sampling sites per plot. The top soil (0 - 30 cm) of the sampling sites was sampled. The thickness of the scanning layer was 3 mm. Sample size (n) = 300. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between the different plot at the 0.05 level.

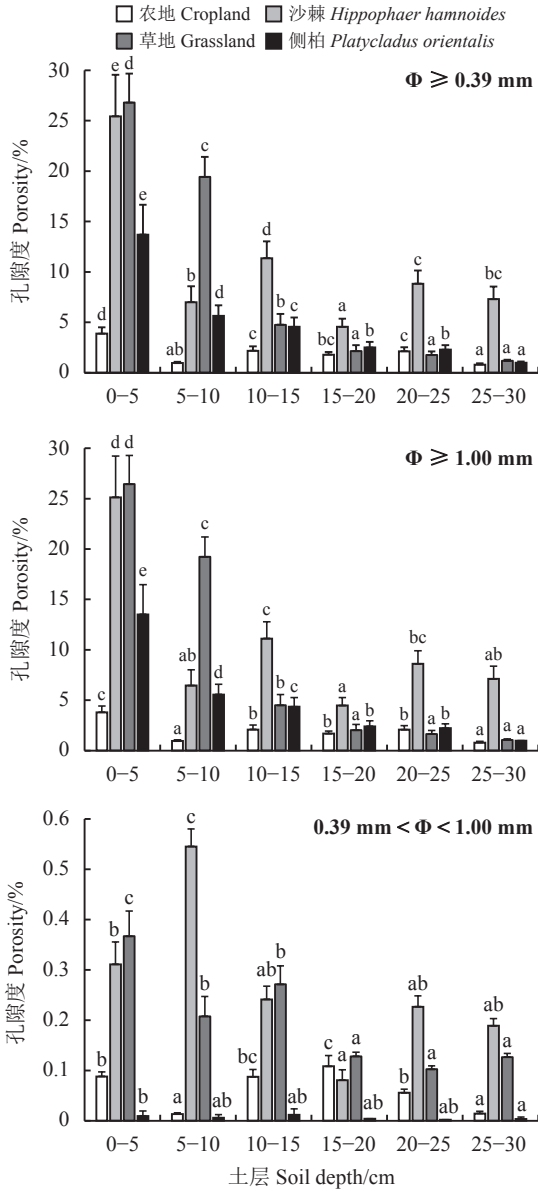


图 1 不同植被土壤中孔隙度随土壤深度变化特征
Figure 1 Variation in porosity with soil depth under four vegetation types

不同小写字母表示相同土地类型不同土壤深度间差异显著 ($P < 0.05$); 下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between the different soil depths for the same land type at the 0.05 level; similarly for the following figures.

差异依然保持, 不仅随土层深度增加而减少, 而且大致维持沙棘和草地优于侧柏和农地的表现。侧柏孔隙数目处于缓慢减少状态, 农地各土层的孔隙数目始终较低。

2.3 孔隙成圆率

成圆率是反映孔隙形态特征的重要参数。成圆

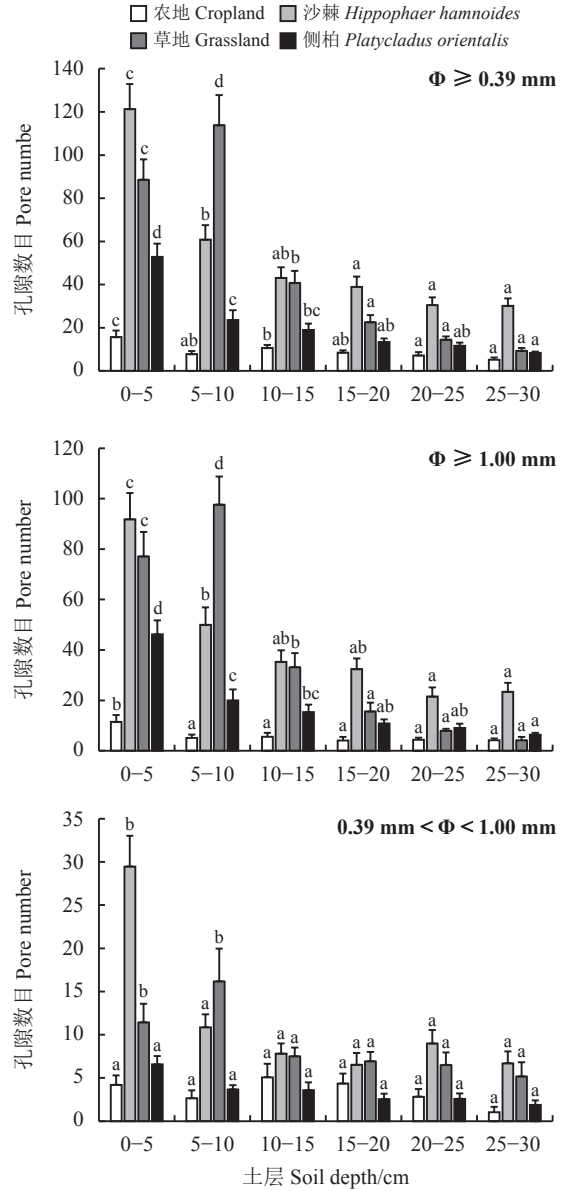


图 2 不同植被土壤中 70 mm² 孔隙数目随土壤深度变化特征
Figure 2 Variation pore(70 mm²) number with soil depth under four vegetation types

率的值介于 0~1, 值越大代表孔隙形状越趋近于圆形, 值越小说明孔隙形状越不规则。不同植被土壤间的孔隙成圆率差异明显(表 3), 变化趋势表现为农地 > 侧柏 > 沙棘 > 草地。土壤剖面孔隙的成圆率平均值表现为农地(0.94)与草地(0.87)、沙棘(0.88)的孔隙成圆率差异显著 ($P < 0.05$) 外, 其他样地间的孔隙成圆率无显著差异 ($P > 0.05$)。这表明, 农地的孔隙形态更接近于圆形, 侧柏次之, 草地和沙棘的孔隙形态较差。

不同土壤深度孔隙成圆率有所差异(图 3), 各

样地孔隙成圆率介于 0.81~0.97。随着土层加深,沙棘的孔隙成圆率表现为先增大后减小的趋势,在 15-20 cm 处达到峰值,变化幅度为 0.86~0.90,说明其上下土层的孔隙成圆率波动较小。草地孔隙

成圆率为 0.81~0.92,其随着土层的深入呈上升趋势,深层土壤的孔隙形态要优于浅层土壤。侧柏和农地的孔隙成圆率为 0.83~0.97,孔隙形态要好于沙棘和草地。

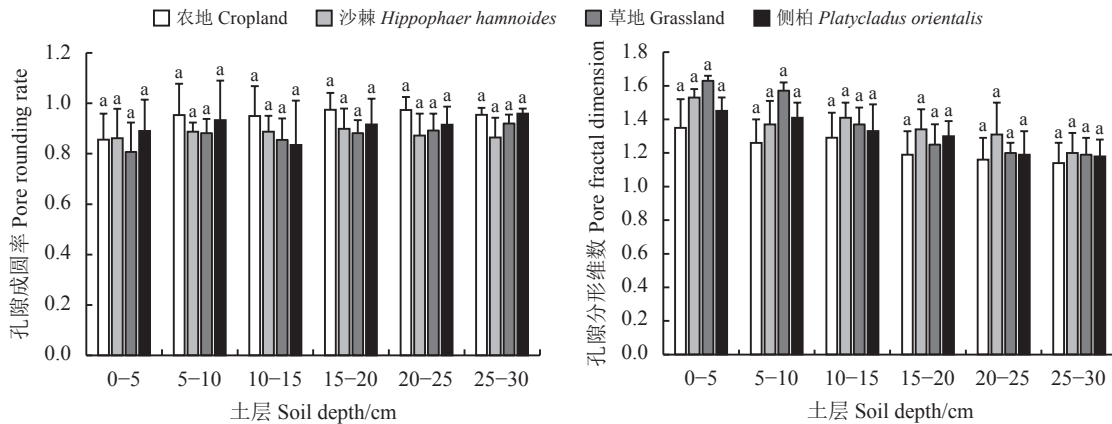


图 3 不同植被土壤中孔隙成圆率和分形维数随土壤深度变化特征

Figure 3 Variation in pore rounding rate and fractal dimension with soil depth under four vegetation types

2.4 孔隙分形维数

分形理论是定量研究物体结构特征和处理图形复杂现象的重要手段,是孔隙与固体颗粒接触界限不规则性的体现^[19-21]。土壤孔隙分形维数反映了土壤的肥力状况、水力特征及侵蚀退化程度。对研究区不同类型土壤孔隙分形维数进行分析(表 3)。不同类型土壤的孔隙分形维数有明显的区别,表现为草地>沙棘>侧柏>农地。对土壤剖面孔隙分形维数平均值进行多重分析得出,除农地孔隙分形维数与草地、沙棘有显著($P < 0.05$)差异外,其他样地间孔隙分形维数差异性均不显著($P > 0.05$)。

土壤深度对孔隙分形维数具有一定影响(图 3)。各样地孔隙切面分形维数在 1.14~1.63,下降幅度表现为草地>沙棘>侧柏>农地。表层土壤草地的分形维数最高,中间层土壤的沙棘略占优势,深层土壤各样地差别不大,且农地的孔隙分形维数始终处于较低水平。随着土壤深度的增加,4 种样地孔隙分形维数均表现出下降趋势,说明土壤表层孔隙状况要优于下层。

2.5 土壤孔隙特征指标与性质参数的相关性分析

影响土壤孔隙状况的因素众多,除自然裂缝、植物根系和动物活动等因素外,还与土壤的物理性质及参数密切相关^[22-23]。对土壤孔隙特征指标与

性质参数的相关性进行分析(表 4)得出,土壤 $\Phi \geq 0.39$ mm 孔隙度和孔隙数目与土壤有机质含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与粘粒含量呈极显著负相关关系,与砂粒含量呈显著正相关关系($P < 0.05$)。

土壤孔隙成圆率与粘粒含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与有机质含量、砂粒含量呈极显著负相关关系。土壤孔隙分形维数与有机质含量呈极显著正相关关系,与粘粒含量呈极显著负相关关系。

3 讨论

不同植被类型会对各土层的土壤孔隙特征产生一定影响^[24]。本研究结果显示,4 种植被的土壤大孔隙度和大孔隙数目有显著差异,表现为沙棘>草地>侧柏>农地,并随着土壤深度的增加而衰减,这与一些研究结果^[25-26]一致。一方面主要由于浅层土壤的水气状况良好,有机质含量较多,利于土壤团粒结构的塑造,对于透水性大孔隙的形成具有促进作用。另一方面,表层土壤的穴居动物活动强烈,形成了较多动物孔洞,且受植物根系活动的影响,孔隙连通性增加^[27-28]。

已有学者利用 CT 扫描技术对不同植被土壤的孔隙特征进行分析得出,林地的孔隙参数要明显

表4 土壤孔隙特征指标与各性质参数相关性分析
Table 4 Correlation analysis between soil pore characteristics and various soil property parameters

指标 Parameter	根系生物量 Root biomass	有机质含量 Soil organic matter	砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
孔隙度 Porosity($\Phi \geq 0.39$ mm)	0.255	0.783**	0.310*	-0.106	-0.450**
孔隙数目 Pore number($\Phi \geq 0.39$ mm)	0.222	0.839**	0.332*	-0.144	-0.410**
孔隙成圆率 Pore rounding rate	-0.049	-0.500**	-0.494**	0.206	0.631**
孔隙分形维数 Pore fractal dimension	0.246	0.751**	0.278	-0.041	-0.528**

*表示显著相关($P < 0.05$), **表示极显著相关($P < 0.01$)。

* and ** indicate significant correlations at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

优于草地和农地^[29-30]。本研究中0-10 cm表层土壤草地的孔隙状况发育良好,侧柏的孔隙度在15-30 cm土壤深度时才略优于草地,其原因主要是侧柏表层土壤容重较大,相对紧实,孔隙发育程度较低。侧柏虽属于浅根乔木,须根较多^[31],但与草地、农地相比根系更为粗深,纵向生长的根系腐烂死亡后易于大孔隙度的提升。沙棘灌丛根系下伸将有机残体输入土壤,使土壤动物获得充足食物,大量的碳源和能源促进了微生物的快速繁殖^[32]。同时灌木地的植被盖度与枯落物储量也比较大^[33-34],因此孔隙度和孔隙数目要优于其他样地。农地的孔隙数量和孔隙度始终处于最低水平,其原因一方面是人类耕作会改变土壤的物理性质,土壤结构被破坏,造成孔隙堵塞;另一方面,农地的粘粒含量偏多,土壤透气性差,不利于较大孔隙的形成和发育^[35]。

农地以玉米地根系为主,无其他杂草存在,不存在横向穿梭破坏,因而成圆率较高、孔隙分型维数低。而草地和沙棘群落则含有较多其他物种,根系互相穿插使得土壤孔隙大小混杂,成圆率降低、分型维数上升。沙棘表层土壤动物活跃程度高,侧根和不定根向四周延伸,孔隙形状不规则^[36]。中间土层孔隙主要受沙棘直根的影响,孔隙多呈圆形,且连通性较好。草地根系主要分布在土壤浅层,根系侧向生长量大,分枝数增加,孔隙形状多样化。但随着土层深度的增加,草地根系在10 cm以下减少较快,成圆率开始上升,分形维数下降^[37-38]。与草地、沙棘相比,侧柏孔隙成圆率相对较高,分形维数相对较低,可能与侧柏林下缺少根系穿插对成孔的扰乱,这与耕地的情形

类似。

草地和沙棘有机质含量高于其他样地(表2),其孔隙发育程度较好,孔隙结构优良,表明有机质含量的增多利于土壤孔隙的形成,同时可使土壤孔隙形状更加复杂化,形成更多的团聚类孔隙或孔隙组合,从而影响成圆率。农地粘粒含量偏多,其孔隙度和孔隙数目水平较低,表明土壤越偏黏重, $\Phi \geq 0.39$ mm的较大孔隙状况越差,但其成圆率显著高于草地和沙棘,表明较黏重的土壤孔隙形状更规则。

草地表层孔隙状况优良,沙棘随土层加深孔隙发育整体较好,侧柏根系相对粗深,利于深层孔隙的塑造。因此,实际种植时应采取林、灌、草相结合的方式,将更利于土壤孔隙状况的改善和孔隙通道的形成。

4 结论

本研究通过CT扫描技术对陕西省长武县王东沟小流域4种样地的0-30 cm土柱样品进行分析,从扫描图像分析得到的 $\Phi > 0.39$ mm的土壤孔隙度、孔隙数目、孔隙成圆率以及孔隙分形维数4个方面综合比较。

不同植被土壤的孔隙状况差异显著($P < 0.05$),孔隙度和孔隙数目表现为沙棘 > 草地 > 侧柏 > 农地,孔隙分形维数和成圆率的规律几乎相反。说明草地、沙棘的根系互动穿插,不仅增加了孔隙度和孔隙数目,也扩展了土壤孔径分布范围,新形成的大孔隙受穿插缠绕的影响,成圆率降低。总体上,草地和沙棘有利于降雨入渗,是固坡的优先选择。随着土层的加深,土壤孔隙度和孔隙数

目除沙棘外均呈明显降低趋势, 孔隙分形维数的下降幅度则较为缓慢, 孔隙成圆率无明显变化规律。

土壤的部分性质参数与孔隙特征之间存在极显著 ($P < 0.001$) 或显著 ($P < 0.05$) 相关性。有机质含量、根系生物量的提高利于土壤孔隙形成和其状况的改善; 粘粒含量过多会阻碍大孔隙的发育,

但对土壤孔隙形状的塑造具有促进作用。

本研究较系统地描述了不同样地间的孔隙特征差别及其随土层深度的变化规律, 并讨论了孔隙参数与土壤性质之间的相关性, 下一步将对各性质影响孔隙特征的变化机理进行深入研究。

参考文献 References:

- [1] 李相儒, 金钊, 张信宝, 周卫健. 黄土高原近 60 年生态治理分析及未来发展建议. 地球环境学报, 2015, 6(4): 248-254.
LI X R, JIN Z, ZHANG X B, ZHOU W J. Analysis of ecosystem management of the Loess Plateau during the past 60 years and suggestions for the future development. Journal of Earth Environment, 2015, 6(4): 248-254.
- [2] 史志华. 土壤水蚀过程研究回顾. 水土保持学报, 2016, 30(5): 1-10.
SHI Z H. Water erosion processes: A historical review. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5): 1-10.
- [3] WU G L, LIU Y, FANG N F, DENG L, SHI Z H. Soil physical properties response to grassland conversion from cropland on the semi-arid area. Ecohydrology, 2016, 9(8): 1471-1479.
- [4] 鞠忻倪, 贾玉华, 甘淼, 金珊, 肖波. 黄土沟壑区不同地形部位土壤大孔隙特征研究. 土壤学报, 2018, 55(5): 61-70.
JU X N, JIA Y H, GAN M, JIN S, XIAO B. Characteristics of soil macropores in the gully area of Loess Plateau as affected by terrain. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(5): 61-70.
- [5] 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 pore under vegetation succession in the Loess Plateau. Science China: Earth Sciences, 2010(2): 223-231.
- [6] HU X, LI X Y, GUO L L, LIU Y, WANG P, ZHAO Y D, CHENG Y Q, LYU Y L, LIU L Y. Influence of shrub roots on soil macropores using X-ray computed tomography in a shrub-encroached grassland in Northern China. Journal of Soils and Sediments, 2018, 19(4): 1970-1980.
- [7] 程立平, 刘文兆, 李志, 韩晓阳. 长武黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响. 水科学进展, 2016, 27(5): 670-678.
CHENG L P, LIU W Z, LI Z, HAN X Y. Land use change affects groundwater recharge in the Changwu Loess Tableland of China. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 670-678.
- [8] 李鹏展, 王力, 王棣. 黄土旱塬区冬小麦土壤水库动态. 应用生态学报, 2017, 28(11): 3653-3662.
LI P Z, WANG L, WANG D. Dynamics of soil water reservoir of wheat field in rain-fed area of the Loess Tableland, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(11): 3653-3662.
- [9] 刘勇, 胡霞, 李宗超, 孙贞婷, 程亚倩, 吕艳丽. 基于 CT 的青海湖流域芨芨草草地土壤大孔隙特征分析. 土壤, 2017, 49(1): 184-188.
LIU Y, HU X, LI Z C, SUN Z T, CHENG Y Q, LYU Y L. Soil macropore characteristics of *Achnatherum splendens* steppe in the Qinghai Lake watershed. Soils, 2017, 49(1): 184-188.
- [10] 刘勇, 胡霞, 李宗超, 孙贞婷. 基于医学 CT 和工业 CT 扫描研究土壤大孔隙结构特征的区别. 中国农学通报, 2016, 32(14): 106-111.
LIU Y, HU X, LI Z C, SUN Z T. Difference of soil macropore structure scanned by medical CT and industrial CT. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(14): 106-111.
- [11] WANG J M, QIN Q, BAI Z K. Characterizing the effects of opencast coal-mining and land reclamation on soil macropore distribution characteristics using 3D CT scanning. Catena, 2018, 171: 212-221.
- [12] GUO X, ZHAO T, LIU L, XIAO C, HE Y. Effect of sewage irrigation on the CT-measured soil pore characteristics of a clay farmland in Northern China. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2018, 15(5): 1043.

- [13] 李荣. 基于 Java 语言和 Image J 平台的数字图像处理实验教学方案. 电脑知识与技术, 2016, 12(36): 146-148.
LI R. Digital image processing experimental teaching scheme based on Java language and Image J platform. Computer Knowledge and Technology, 2016, 12(36): 146-148.
- [14] 丁康. 长武塬边坡不同植被对土壤物理性质的影响研究. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2018.
DING K. Influence of different vegetation types on soil physical properties in Changwu tableland slope. Master Thesis. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [15] 华瑞. 黄土丘陵区不同退耕年限林草地土壤结构及大孔隙研究. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2016.
HUA R. The research of soil structure and macropores of forestlands and grasslands under different vegetation restoration years in Loess hilly area. Master Thesis. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [16] LUXMOORE R J. Micro-, meso-, and macroporosity of soil. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(6): 1246.
- [17] 李同川. 黄土高原土壤大孔隙特征及其对土壤水分的影响. 杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2017.
LI T C. Characteristics of soil macropore on the loess plateau and their effects on soil water. PhD Thesis. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [18] 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. Advances in Water Science, 2002, 13(5): 611-617.
- [19] HUANG Z S, FU Y H, YU L F, YANG R. Studies on organic carbon content and fractal features of soil aggregates with the process of natural restoration of karst forest vegetation forest research. Forest Research, 2015, 28(2): 277-283.
- [20] 王卫华, 龙小军. 土壤粒径分布单重分形与孔隙单重分形. 中国土壤与肥料, 2018, 276(4): 55-59.
WANG W H, LONG X J. Soil particle single fractal and porosity single fractal. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2018, 276(4): 55-59.
- [21] 张佳瑞, 王金满, 祝宇成, 李博, 王平. 分形理论在土壤学应用中的研究进展. 土壤通报, 2017(1): 227-234.
ZHANG J R, WANG J M, ZHU Y C, LI B, WANG P. Application of fractal theory on pedology: A review. Chinese Journal of Soil Science, 2017(1): 227-234.
- [22] 张家明, 徐则民, 裴银鸽. 植被发育斜坡非饱和带大孔隙. 山地学报, 2012, 30(4): 439-449.
ZHANG J M, XU Z M, PEI Y G. Macropores in vadose zone of well vegetated slopes. Journal of Mountain Science, 2012, 30(4): 439-449.
- [23] 张维俊, 李双异, 徐英德, 刘旭, 安婷婷, 朱平. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展. 水土保持学报, 2019, 33(4): 1-9.
ZHANG W J, LI S Y, XU Y D, LIU X, AN T T, ZHU P. Advances in research on relationships between soil pore structure and soil microenvironment and organic carbon turnover. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 1-9.
- [24] 高朝侠, 徐学选, 宇苗子, 张少妮, 赵传普. 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, ZHANG S N, ZHAO C P. Impact of land use types on soil macropores in the Loess region. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1578-1584.
- [25] 邱治军, 曾震军, 周光益, 杨松, 谭斌. 流溪河小流域 3 种林分的土壤水分物理性质. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2010, 34(3): 62-66.
QIU Z J, ZENG Z J, ZHOU G Y, YANG S, TAN B. Soil moisture physical characteristics of three types of forest in Liuxi River small watershed. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2010, 34(3): 62-66.
- [26] 李宗超, 胡霞, 刘勇, 孙贞婷, 吕艳丽. 青海湖流域土壤大孔隙特征与理化性质的相关性研究. 土壤, 2017, 49(2): 371-378.
LI Z C, HU X, LIU Y, SUN Z T, LYU Y L. Correlations between soil physical-chemical proprieties and soil macropore characteristics in Qinghai Lake basin. Soils, 2017, 49(2): 371-378.
- [27] 丁康, 徐学选, 陈文媛, KALHORO S A. 长武塬边坡不同植被下土壤团聚体及入渗特征. 北京林业大学学报, 2017, 39(12): 44-51.
DING K, XU X X, CHEN W Y, KALHORO S A. Soil aggregates and infiltration characteristics under different vegetations in

- Changwu Tableland slope of northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(12): 44-51.
- [28] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 秦倩, 吕春娟. 基于 CT 分析露天煤矿复垦年限对土壤有效孔隙数量和孔隙度的影响. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 229-236.
- WANG J M, GUO L L, BAI Z K, QIN Q, LYU C J. Effects of land reclamation time on soil pore number and porosity based on computed tomography (CT) images in opencast coal mine dump. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 229-236.
- [29] UDAWATTA R P, ANDERSON S H. CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils influenced by agroforestry and grass buffers. *Geoderma*, 2008, 145(3/4): 381-389.
- [30] UDAWATTA R P, ANDERSON S H, GANTZER C J, GARRETT H E. Agroforestry and grass buffer influence on macropore characteristics. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1763-1773.
- [31] 王勋曜, 孙宏彦, 于辉, 游捷, 王茂良. 天坛公园油松、侧柏大树根系分布特征. *北京农学院学报*, 2018, 33(1): 89-98.
- WANG X Y, SUN H Y, YU H, YOU J, WANG M L. The root distribution characteristics of big trees of *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* in the Temple of Heaven Park. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2018, 33(1): 89-98.
- [32] 张丽娜, 许丽, 秦儒, 史芮嘉, 杨宇平. 基于模糊物元模型的 3 种灌木林水源涵养能力评价: 以内蒙古黑岱沟露天煤矿排土场为例. *中国水土保持科学*, 2019, 17(1): 31-38.
- ZHANG L N, XU L, QIN R, SHI R J, YANG Y P. Evaluation of water conservation capacity of three shrub forests based on fuzzy matter-element model: A case study of Heidaigou open pit mine dump in Inner Mongolia. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(1): 31-38.
- [33] 杨寒月, 张光辉, 张宝军. 黄土丘陵沟壑区沟坡典型植物群落生长特征. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 62-67.
- YANG H Y, ZHANG G H, ZHANG B J. Growth characteristics of typical plant communities on gully slopes in the loess hilly-gully region. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2): 62-67.
- [34] 张伟华, 张昊, 李文忠, 周心澄. 青海大通中国沙棘人工林对土壤有机质和含氮量的影响. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(1): 154-158.
- ZHANG W H, ZHANG H, LI W Z, ZHOU X D. Effects of artificial *Hippophae rhamnoides* forest on the content of soil organic matter and total nitrogen in Datong of Qinghai. *Journal of Arid Land Resources and Environmen*, 2005, 19(1): 154-158.
- [35] 杜文正. 长江三峡森林土壤大孔隙特征及其优先流效应研究. 武汉: 华中师范大学硕士学位论文, 2014.
- DU W Z. Research on characteristics of soil macropore and its preferential flow effect in three gorges of yangtze river. Central China Normal University. Master Thesis. Wuhan: Central China Normal University, 2014.
- [36] 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 黄懿梅, 安韶山. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响. *生态学报*, 2013, 33(18): 5615-5622.
- ZHAO T, YAN H, JIANG Y L, HUANG Y M, AN S S. Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly area. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5615-5622.
- [37] 侯晓娟, 李志, 崔诚, 李凯, 余飞, 袁颖丹. 武功山芒根系垂直分布及其与土壤养分的关系. *草业科学*, 2017, 34(12): 2428-2436.
- HOU X J, LI Z, CUI C, LI K, YU F, YUAN Y D. Vertical distribution characteristics of *Miscanthus sinensis* roots and its relationship to soil nutrients in the Wugong Mountains. *Pratacultural Science*, 2017, 34(12): 2428-2436.
- [38] BOECK H J D, LEMMENS C M H M, GIELEN B, BOSSUYT H, MALCHAIR S, CARNOL M, MERCKX R, CEULEMANS R, NIJS I. Combined effects of climate warming and plant diversity loss on above- and below- ground grassland productivity. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60(1): 95-104.

(责任编辑 王芳)