

华北土石山区森林土壤大孔隙对土壤理化性质及根系的响应

孟晨^{1,2}, 牛健植³, 骆紫藤³, 尹正聪⁴

- (1. 宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复省部共建国家重点实验室培养基地, 银川 750021;
2. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021;
3. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 4. 德克萨斯 A&M 大学地理学院, 德克萨斯 77843)

摘要: 土壤大孔隙是土壤水分、空气、化学物质及污染物优先运移的主要通道, 对其形成机制的研究至关重要。以往对大孔隙的量化局限于传统方法, 大孔隙三维形态特征的量化分析及其影响因素是目前大孔隙的研究重点。利用 CT 扫描及图像处理分析技术量化大孔隙三维形态特征参数, 同时测定土壤基本理化性质及根长密度, 分析土壤大孔隙三维特征对土壤理化性质及根系的响应。结果表明: 土壤密度及土壤砂粒含量与大孔隙特征参数不存在相关关系; 土壤有机质含量、土壤根长密度与大孔隙体积密度、大孔隙表面积密度、大孔隙数量密度呈现显著正相关关系, 与大孔隙平均迂曲度呈现显著负相关关系。林木根系与土壤有机质对土壤大孔隙三维特征产生积极影响, 表现为根系及土壤有机质含量越多, 则大孔隙含量也越多, 并具有更差的弯曲度。在今后对山地森林抚育管理、土壤水分运动机理及地下水污染评估等研究过程中不能忽略根系及土壤有机质差异对土壤大孔隙的重要影响。

关键词: 山地森林; 大孔隙; 三维特征; CT 扫描; 土壤理化性质

中图分类号: S152.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)03-0094-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.015

Response of Soil Macropore to Soil Physicochemical Properties and Root in Forest in Rocky Mountain Area of North China

MENG Chen^{1,2}, NIU Jianzhi³, LUO Ziteng³, YIN Zhengcong⁴

- (1. Key Laboratory of Land Degradation and Ecosystem Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2. Key Laboratory of Rehabilitation and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021; 3. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 4. Department of Geography, Texas A&M University, College Station, TX 77843)

Abstract: Soil macropore is the main channel for preferential transport of soil moisture, air, chemical substances and pollutants, so the studies on its formation mechanism are of great importance. In the past, the quantification of macropore was limited to the traditional methods. But nowadays, quantitative analysis of three-dimensional morphological characteristics of soil macropore and its influencing factors are the research focus. In this paper, CT scanning and image processing techniques were used to quantify the 3-D characteristic parameters of macropore, and the basic physical and chemical properties of soil and root length density were also determined. The correlations between soil physicochemical properties, soil roots and the 3-D characteristics of soil macropore were analyzed. The results showed that there was no correlation between soil density, soil sand contents and characteristic parameters of macropore; soil organic matter contents and root length density were significantly positively correlated with volume density, surface area density and number density of macropore, and significantly negatively correlated with mean tortuosity of macropore. Soil organic matter and roots had a positive impact on the 3-D characteristics of soil macropore, the more roots and organic matter contents, the more macropore contents, and the worse bending degree of macropore. In the future, the effects of root system and organic matter should not be neglected in the studies of forest tending and management, soil water movement mechanism and groundwater pollution assessment.

Keywords: mountain forests area; macropore; 3-D characteristics; CT scan; soil physical and chemical properties

土壤大孔隙引起的大孔隙流现象,会显著影响水分^[1]、养分^[2]及化学物质^[3]在土壤中的迁移速率。土壤大孔隙的存在显著增强了土壤水分的入渗速率,从而对地表径流的减少及水土流失的防治具有积极作用,同时,大孔隙的存在有利于土壤通气性的增强,从而有利于土壤污染物及植物残渣的分解及土壤微生物的活动^[4];但大孔隙可使土壤养分、水分、化肥以及污染物快速通过土壤基质进入地下水,从而影响植被对养分的吸收,降低土壤肥料的利用率,影响植被生长,同时污染物、养分及肥料进入地下水及河流,会造成水环境污染,危害人类健康^[5]。

由于土壤大孔隙对植被生长及生态环境的重要作用,其是目前土壤领域研究的重点,但大孔隙三维特征量化的困难阻碍了对大孔隙影响因素的深入研究。近些年,CT扫描与图形分析技术被用于量化大孔隙三维特征^[6],其也为大孔隙影响因素的研究带来了机遇。大量研究发现植被根系^[7]、土壤动物活动^[8]以及干湿交替^[9]均是导致土壤大孔隙的主要因素,而大孔隙三维几何特征及拓扑结构,包括大孔隙数量、大孔隙体积、大孔隙表面积、大孔隙孔径、大孔隙连接度、大孔隙迂曲度、大孔隙角度等三维特征参数,均会影响土壤水分运动及溶质运移^[10]。虽然以往研究发现土壤类型及土地利用

差异会导致土壤大孔隙数量及分布的差异^[11],植被的差异同样是影响土壤大孔隙数量的主要因素^[12],但未有试验证据表明土壤类型、土地利用、植被等因素对土壤大孔隙三维特征产生何种影响。因此,多学科交叉融合,结合先进技术对不同植被覆盖条件的大孔隙三维结构进行量化,才能进一步分析影响大孔隙三维特征的影响因子。本文基于CT扫描技术及图像分析技术,量化了华北土石山区典型森林的土壤大孔隙三维特征,同时量化了土壤基本理化性质及根长密度,分析了土壤大孔隙三维特征对土壤理化性质及根系的响应,研究以期在今后大孔隙三维形态特征影响因素、土壤水分运动机理等研究提供科学支撑,为山地森林林木合理配置与抚育管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样点位于北京市密云县密云水库附近的五座楼林场。研究区属典型的半湿润半干旱气候,年平均气温10℃,年降水量661mm。采样点的岩石碎片主要来源于太古宙花岗岩,土壤的主要类型是薄层土^[13]。主要植被类型是55年左右的人工林,主要包括侧柏、栎树、松栎、板栗、榆树、核桃,植被覆盖率为40%~60%(表1)。

表1 样地基本情况

编号	林木群落类型	坐标	研究区域/ (m×m)	海拔/ m	树种 来源	平均 树高/m
P-C-U	油松+板栗+榆树混交林	40°30'42.66" N, 116°49'50.78" E	50×50	225	人工林	11.91
P-C	油松+板栗混交林	40°30'26.40" N, 116°49'13.66" E	50×50	227	人工林	10.29
U	榆树纯林	40°30'09.61" N, 116°48'46.30" E	50×40	225	人工林	12.63
C	板栗纯林	40°30'26.95" N, 116°49'02.02" E	40×40	219	人工林	8.64
J	核桃树纯林	40°30'33.72" N, 116°49'31.41" E	50×40	218	人工林	7.54
P	油松纯林	40°30'49.56" N, 116°50'15.70" E	50×50	217	人工林	11.25

1.2 土样采集

试验选取了2种混交林和4种纯林,共计6个样地,包括油松+板栗+榆树混交林(P-C-U)、油松+板栗混交林(P-C)、榆树纯林(U)、板栗纯林(C)、核桃树纯林(J)、油松纯林(P)。所有样地具有相似的海拔高度、相同的梯度和坡向。从各样地取直径为100mm、长度为300mm的3根PVC管,在6个不同样地分别利用对角线布点法布设3个土壤样品取样点,同时需要选取2个乔木中间的位置进行土柱采集,以减少主根对取样的误差。首先,去除土壤表面的枯落物层,再将PVC管底部平放在土壤,利用反铲小心的铲开PVC管外围的土壤,并同时另PVC管缓慢的垂直深入。为了避免土壤被破坏,在每根PVC管的上下两端固定各固定1块铁板,为了防止土壤的移动和渗漏。在铁板外用保鲜膜包裹,在固定铁板的同时,减少了土壤水分的蒸发。土柱采集完毕立即送往实

验室进行CT扫描,运输的过程中需要将土柱固定,避免运输途中颠簸造成的土体破坏,减少运输过程导致的误差。在每个样地取原状土柱的土体旁分别分3层(0—10,10—20,20—30cm)利用环刀在每层取得原状土样用于测量土壤密度,再利用激光粒度仪测定土壤颗粒组成。并用塑料原封袋在每层取土,采用重铬酸钾法测量土壤有机质^[14]。每个样地利用环刀分3层(0—10,10—20,20—30cm)取样,利用WinRHIZO^[15]计算土壤根长密度。以上所有取样在每层土壤均设置2个重复。

1.3 CT扫描及分析

CT扫描后每个土柱可得到1394张1024×1024pixels纵切截面图像,利用专业的商业CT图像处理软件VG Studio MAX 2.2(Volume Graphics GmbH, Heidelberg, Germany)处理CT扫描所得图像,对每个土柱的1394张切面图进行整合处理,得到体素为0.137

mm/pixel(X 方向)×0.137 mm/pixel(Y 方向)×0.2 mm/pixel(Z 方向)的三维立体图像。

在取得土柱时,由于土管边缘会反向给予土壤压力,从而使得土壤结构变化,因此需要去除这种边缘效应带来的误差,经过观察及分析,决定去除圆周 5 mm、上下两端 35 mm 的数据(由于扫描技术原因,上下边缘部分误差较大,因此去除较多数据以保证数据的可靠性),利用 VG Studio MAX 2.2 图形软件的 ROI 工具将边缘 5 mm 及上下两端 35 mm 的图像去除。最终得到 X、Y 轴-45~45 mm、Z 轴-35~-265 mm 的土柱三维立体图像,并进行下一步的量化计算(图 1)。

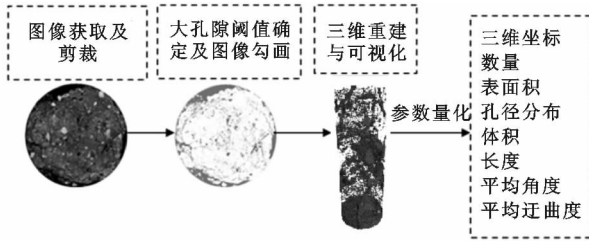


图 1 CT 图像处理过程

利用 VG Studio MAX 2.2 软件分析得到每个大孔隙的直径、体积、直线长度、空间位置,利用 ImageJ2x 软件的颗粒分析工具(Analyze Particles tool)分析大孔隙的表面积。

大孔隙角度是指大孔隙直线长度与平面的夹角,即为一个大孔隙的倾斜角度,其计算公式为:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (1)$$

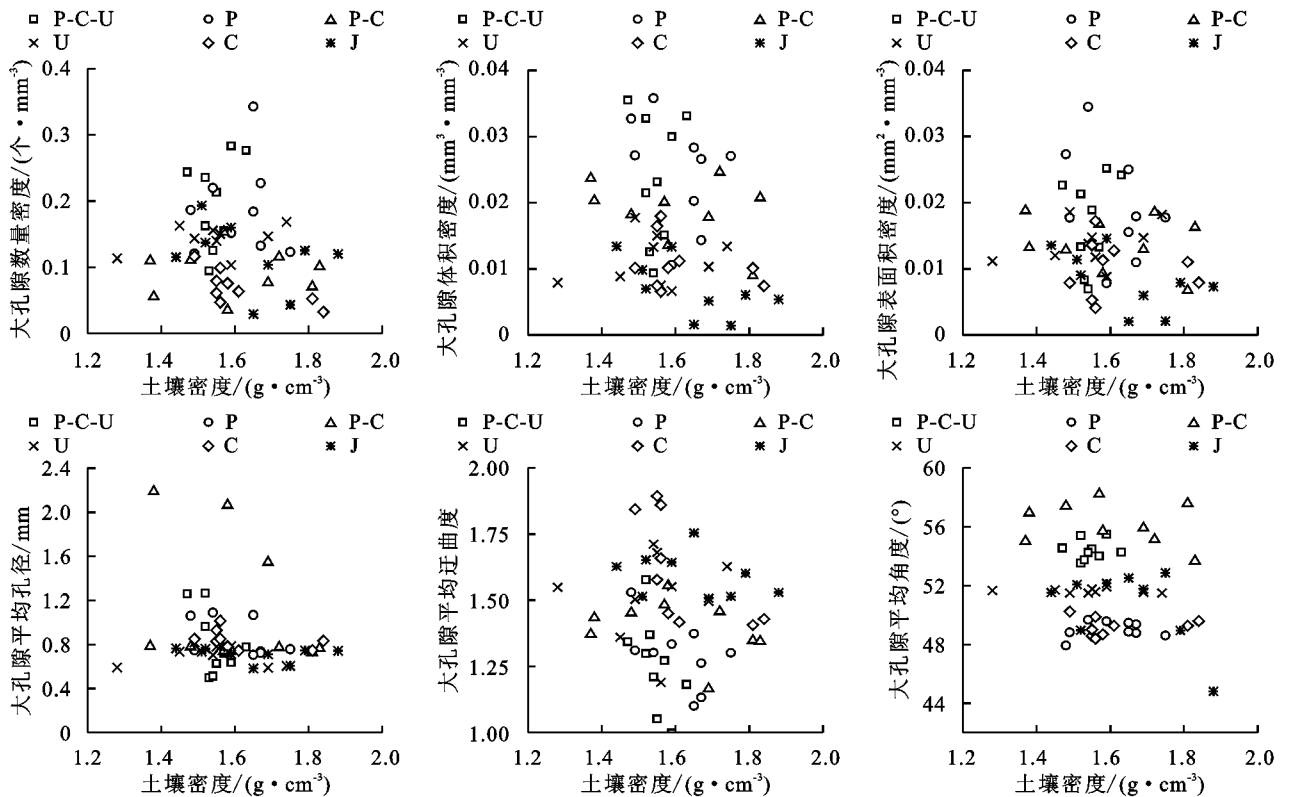


图 2 林地土壤密度与大孔隙特征参数的关系

式中: z 为大孔隙在 Z 轴方向上的长度(mm); x 为大孔隙在 X 方向上的长度(mm); y 为大孔隙在 Y 轴上的长度(mm)。

大孔隙迂曲度是指大孔隙的弯曲程度,计算公式为:

$$\infty = \frac{L_t}{L_l} \quad (2)$$

式中: ∞ 为大孔隙迂曲度; L_t 为大孔隙实际长度(mm); L_l 为大孔隙直线长度(mm)。

大孔隙实际长度无法通过软件分析得到,因为土壤孔隙多为圆柱状,假设每个大孔隙都是标准圆柱体,利用大孔隙体积和表面积计算得到大孔隙实际长度,计算公式为:

$$L_t = \frac{V}{S} \quad (3)$$

式中: L_t 为大孔隙实际长度(mm^3); V 为大孔隙体积(mm^3); S 为大孔隙表面积(mm^2)。

2 结果与分析

2.1 土壤密度对大孔隙特征的影响

土壤密度会对土壤的透气性、持水性、入渗性能及抗侵蚀能力产生影响^[16],但土壤密度与土壤大孔隙三维特征的关系还有待探讨。

由图 2 和表 2 可知,研究区林地土壤密度与大孔隙数量密度、平均孔径、表面积密度、数量密度、平均倾斜角、平均迂曲度的相关关系均不显著($p > 0.05$),可见土壤密度也不会对大孔隙三维特征产生影响。土壤密度不是山地森林土壤大孔隙特征的主要影响因素。

表2 土壤基本性质与大孔隙特征参数的相关关系分析

指标	土壤密度	土壤砂粒含量	土壤有机质含量	土壤根长密度
大孔隙体积密度	-0.236(0.086)	-0.127(0.359)	0.643(0 ^{**})	0.739(0 ^{**})
大孔隙平均孔径	-0.215(0.118)	-0.010(0.943)	0.099(0.478)	0.088(0.526)
大孔隙表面积密度	-0.232(0.091)	-0.016(0.910)	0.528(0 ^{**})	0.671(0 ^{**})
大孔隙数量密度	-0.180(0.192)	-0.200(0.147)	0.580(0 ^{**})	0.685(0 ^{**})
大孔隙平均倾斜角	-0.216(0.116)	-0.184(0.182)	0.102(0.462)	0.204(0.139)
大孔隙平均迂曲度	-0.128(0.356)	0.231(0.093)	-0.520(0 ^{**})	-0.519(0 ^{**})

注:表中数据为相关系数 r ;括号中的数据为 p 值; * * 表示显著相关($p < 0.01$)。

2.2 土壤有机质对大孔隙特征的影响

土壤有机质可以反映土壤的肥力状况,其对土壤的结构及植被的生长具有重要影响,但有机质对土壤大孔隙的三维特征有何种影响需要进一步研究探讨。

对研究区林地土壤有机质含量与大孔隙特征的关系进行分析(图3),可见,随着土壤有机质含量的增高,大孔隙数量密度呈现增高的趋势,大孔隙数量密度与土壤有机质含量呈现显著正相关关系($p < 0.01$);林

地土壤有机质含量与大孔隙体积密度呈显著正相关关系($p < 0.01$),土壤有机质含量与大孔隙表面积密度同样呈现显著正相关关系($p < 0.01$);土壤有机质含量与大孔隙平均孔径相关性不显著($p > 0.05$);大孔隙平均迂曲度会随着土壤有机质含量的增高而减小,土壤有机质含量与大孔隙平均迂曲度呈现显著负相关($p < 0.01$);土壤有机质含量与大孔隙平均倾斜角度相关性不显著($p > 0.05$)。

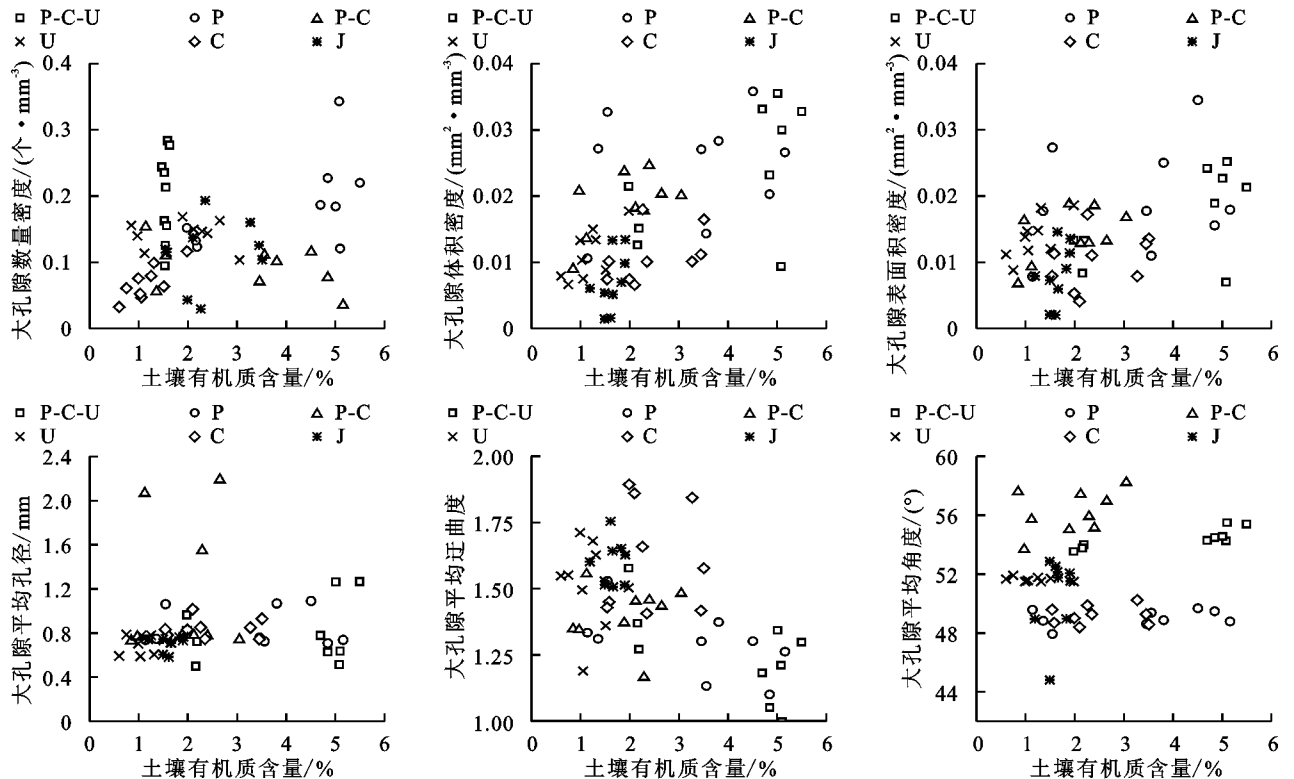


图3 林地土壤有机质与大孔隙特征参数的关系

综上所述,可见土壤有机质含量与土壤大孔隙特征参数存在显著相关性,表现为土壤有机质含量越高,土壤大孔隙数量密度、大孔隙表面积密度、大孔隙体积密度越大,大孔隙平均迂曲度越小。有机质含量高的土壤大孔隙发育更好,也更利于土壤的水分入渗,这与前人^[17-18]的研究结论一致。

2.3 土壤砂粒含量对大孔隙特征的影响

土壤颗粒组成反映了土壤结构特征,其会影响土壤中植被的发育以及养分的转换,并会对土壤的透气

性及透水性产生影响^[19],因此需要研究土壤颗粒组成与土壤大孔隙特征参数的关系,进一步分析颗粒组成对土壤大孔隙形成的影响。

对研究区林地土壤砂砾含量与大孔隙特征参数的关系进行分析(图4),可见土壤砂粒与土壤大孔隙数量密度、体积密度、表面积密度、平均孔径、平均迂曲度及平均倾斜角度均无显著的相关性($p > 0.05$),因此土壤砂粒含量并不会对土壤大孔隙特征产生显著影响,土壤砂粒含量不是土壤大孔隙三维特征的主要影响因素。

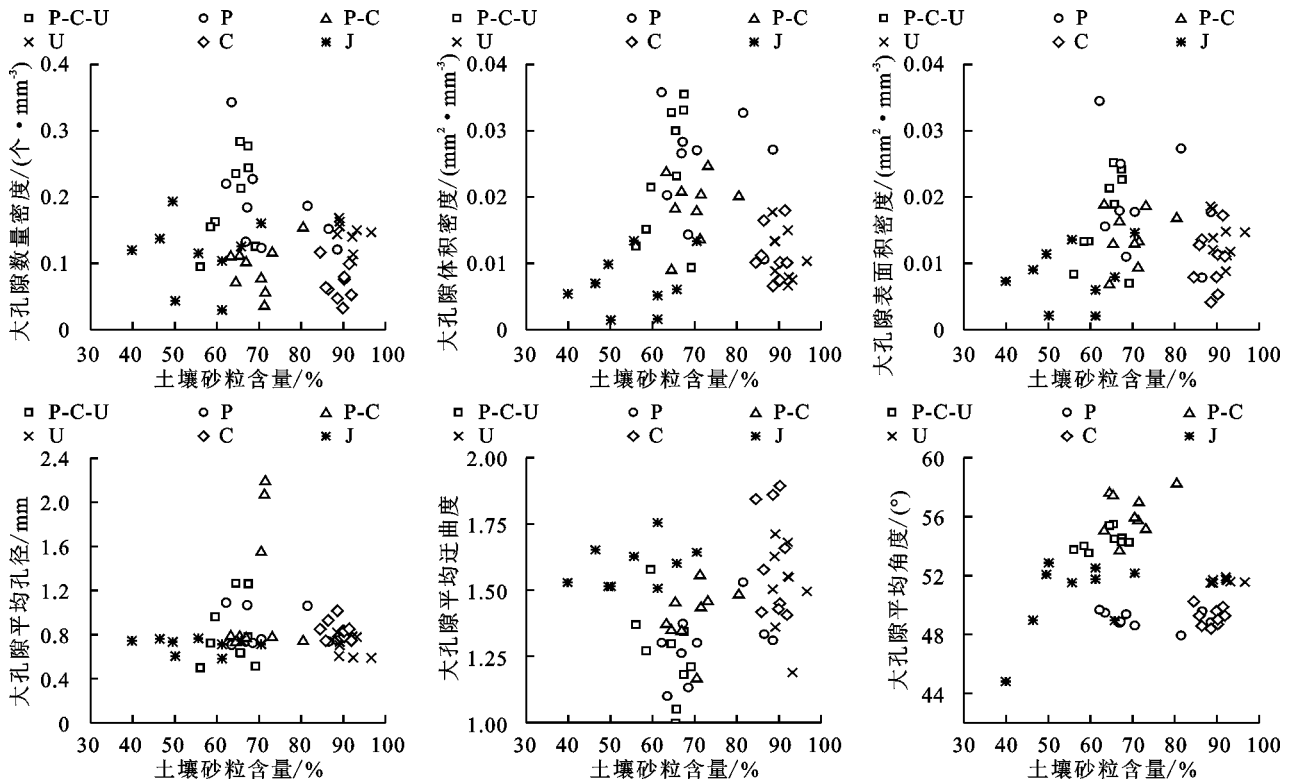


图 4 林地土壤砂粒含量与大孔隙特征参数的关系

2.4 土壤根长密度

土壤根系活动会对土壤大孔隙产生直接影响,根系在生长过程中或死亡后会在土壤中形成根孔^[20],虽然根系活动会导致土壤产生大孔隙,但根系会对土壤大孔隙的三维结构特征参数有何种影响有待进一步研究。

由图 5 可知,随着土壤根长密度的增大,大孔隙数量密度也有增大的趋势,土壤根长密度与土壤大孔隙数量密度、大孔隙体积密度、大孔隙表面积密度均呈现显著正相关关系($p < 0.01$);大孔隙平均孔径与土壤根长密度的关系不显著($p > 0.01$);土壤根长密度与大孔隙平均迂曲度呈现显著负相关($p < 0.01$),土壤根长密度越大,则大孔隙平均迂曲度越小。土壤根长密度与大孔隙平均倾斜角度的相关性不显著($p > 0.05$)。

可见,土壤根长密度会对土壤大孔隙特征有所影响,表现为土壤根长密度越大,土壤大孔隙数量密度、表面积密度、体积密度越大,大孔隙平均迂曲度越小。林地拥有丰富的根系活动,而根系活动是土壤大孔隙产生的最主要因素,根系活动越多,土壤会产生更多及更垂直的大孔隙,这与前人^[21-22]的研究结果一致。这可能是由于根系活动导致的大孔隙不仅连续性强,且更为垂直,弯曲程度很低,此类孔隙有利于土壤水分入渗及地表径流的减少,也有利于植物残渣的分解及微生物的活动,但不利于水分及溶质在土壤中的保存。

Zhang 等^[23]研究发现,大孔隙占到土壤总孔隙的很小一部分,但却会对土壤水分运移产生很大的影响;Yang 等^[24]认为,土壤中的大孔隙可以增加土壤水分入渗,从而减小地表径流;Saravanathiiban 等^[25]研究发现,越垂直的大孔隙越有利于优先流的产生。本研究证明根系及有机质会对土壤大孔隙三维特征产生积极影响,根据以往的研究,本文研究结论可以进一步解释植被根系及有机质对土壤水分造成积极影响的原因,即植被根系及更高的有机质含量会导致土壤产生更多且更垂直的大孔隙,从而对土壤水分入渗产生积极影响。

工业 CT 对大孔隙在土壤中的位置及结构特征的计算提供了一个更精确的方法,大孔隙特征参数,诸如大孔隙直线长度、大孔隙体积、大孔隙表面积、大孔隙平均孔径、大孔隙数量、大孔隙位置等都可以在基于 CT 扫描的基础上利用图像处理软件进行直接计算得到,而如大孔隙实际长度、大孔隙平均角度、大孔隙平均迂曲度等参数可以通过大孔隙的位置及其他已知参数进行进一步计算得到。然而,大孔隙实际长度是假设所有的大孔隙是一个圆柱体的基础上计算得到的,而大孔隙迂曲度又是利用大孔隙实际长度进一步计算得到,但并不是所有的大孔隙都是标准圆柱体,因此大孔隙平均迂曲度的计算过程中会产生一些误差。在今后的研究中,对大孔隙实际长度以及大孔隙迂曲度的计算方法有待进一步提升。此外,本

研究发现在图像处理的过程中,阈值的轻微变动就会对大孔隙的图像以及特征计算结果产生很大的影响,而由于设备、散射、环状伪影、扫描过程中以及肉眼检查过程中产生的误差,最终选择的阈值并不完全

准确,因此产生的图像以及最终的大孔隙特征参数的计算难免会有一些误差,在今后的研究中需要一个更为精准的确定阈值的方法,从而更精确的计算大孔隙的特征参数。

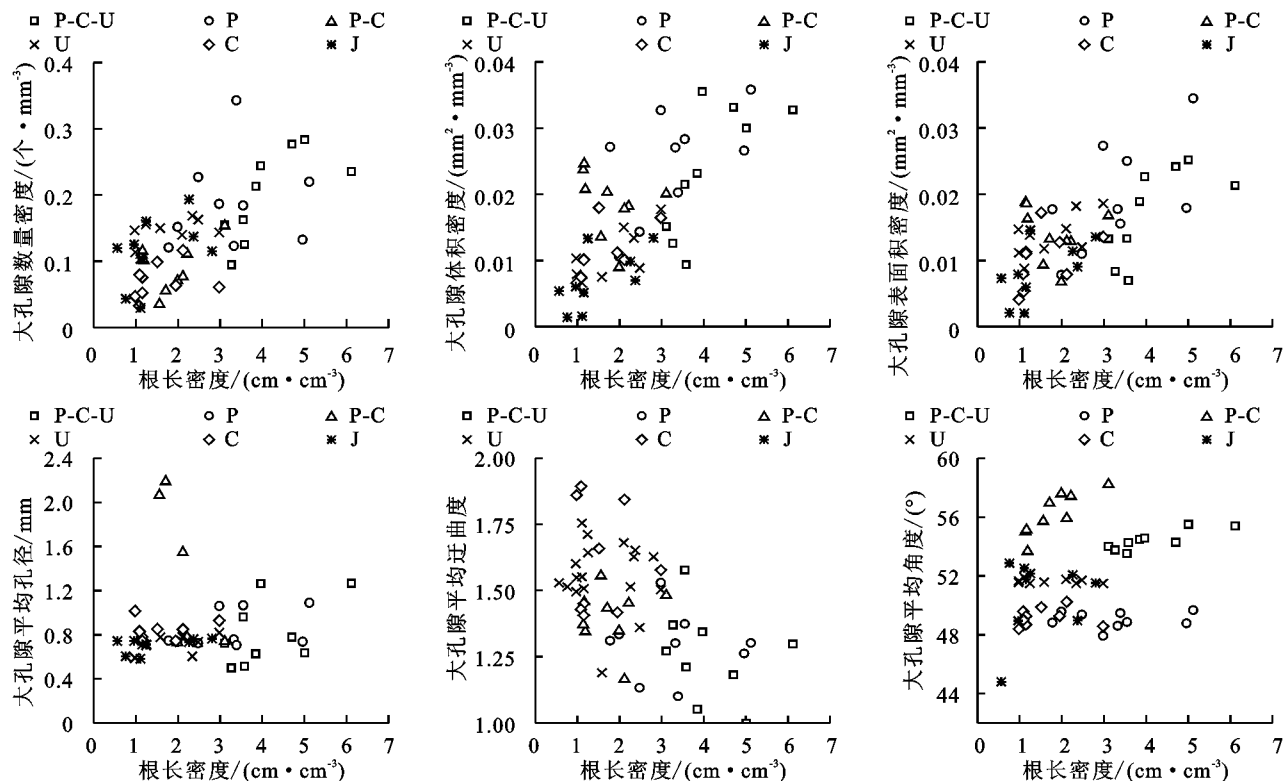


图5 林地土壤根长密度与大孔隙特征参数的关系

3 结论

(1)土壤密度及土壤砂粒含量与大孔隙特征参数不存在相关关系;土壤密度及颗粒组成不是土壤大孔隙三维特征的主要影响因素。

(2)土壤有机质含量、土壤根长密度与大孔隙体积密度、大孔隙表面积密度、大孔隙数量密度呈现显著正相关关系,与大孔隙平均迂曲度呈现显著负相关关系。

(3)林木根系与土壤有机质会对土壤大孔隙的形成产生积极影响,根系及有机质含量越多,则大孔隙含量也越多,并具有更差的弯曲度。在今后森林土壤大孔隙研究及林木配置与管理过程中,要重点考虑土壤根系及有机质对大孔隙的重要影响。

参考文献:

[1] Li T, Shao M, Jia Y, et al. Using the X-ray computed tomography method to predict the saturated hydraulic conductivity of the upper root zone in the Loess Plateau in China [J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82, (5): 1085-1092.

[2] Wang J, Qin Q, Bai Z. Characterizing the effects of opencast coal-mining and land reclamation on soil macropore distribution characteristics using 3 D CT scanning

[J]. Catena, 2018, 171: 212-221.

- [3] Jarvis N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality [J]. European Journal of Soil Science, 2007, 58(3): 523-546.
- [4] Hao Z C, Feng J. Recent advances in water and solute movement in macro-porous soil [J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(1): 67-71.
- [5] Grdencs A I, imunek J, Jarvis N, et al. Twodimensional modelling of preferential water flow and pesticide transport from a tile-drained field [J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3): 647-660.
- [6] Katuwal S, Norgaard T, Moldrup P, et al. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography [J]. Geoderma, 2015, 237: 9-20.
- [7] Zhang J, Xu Z. Dye tracer infiltration technique to investigate macropore flow paths in Maka Mountain, Yunnan Province, China [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(8): 2101-2109.
- [8] Lamande M, Labouriau R, Holmstrup M, et al. Density of macropores as related to soil and earthworm community parameters in cultivated grasslands [J]. Geoder-

- ma, 2011, 162: 319-326.
- [9] Fang H, Zhou H, Norton G J, et al. Interaction between contrasting rice genotypes and soil physical conditions induced by hydraulic stresses typical of alternate wetting and drying irrigation of soil [J]. *Plant and Soil*, 2018, 430(1/2): 233-243.
- [10] Luo L, Lin H, Schmidt J. Quantitative relationships between soil macropore characteristics and preferential flow and transport [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(6): 1929-1937.
- [11] Luo L, Lin H, Li S. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1/2): 53-64.
- [12] Meng C, Niu J, Li X, et al. Quantifying soil macropore networks in different forest communities using industrial computed tomography in a mountainous area of North China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(9): 2357-2370.
- [13] FAO, I I ASA, ISRIC, et al. Harmonized world soil database (version 1.1) [J]. FAO, Rome Italy and IIA-SA, Laxenburg, Austria, 2009.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[J]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Yan H, Li K, Ding H, et al. Root morphological and proteomic responses to growth restriction in maize plants supplied with sufficient N [J]. *Journal of plant physiology*, 2011, 168(10): 1067-1075.
- [16] 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[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 53-56.
- [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和导水率的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3189-3196.
- [18] 曾强, 徐则民, 官琦, 等. 不同植被条件下斜坡土体大孔隙特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增刊 1): 3343-3352.
- [19] 张洪江, 杜士才, 程云, 等. 重庆四面山森林植物群落及其土壤保持与生态水文功能[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [20] 荐圣淇, 赵传燕, 彭焕华, 等. 利用染色示踪与图像处理技术研究根系对土壤大孔隙的影响[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(5): 62-66.
- [21] 王彬俨, 程金花, 张洪江, 等. 北京市昌平区农地土壤大孔隙形成的影响因素分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(5): 81-86.
- [22] 官琦, 徐则民, 田林. 植被发育玄武岩斜坡土体大孔隙尺寸及其主要影响因素[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2888-2896.
- [23] Zhang Z B, Peng X, Zhou H, et al. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 53-65.
- [24] Yang J L, Zhang G L. Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(5): 751-761.
- [25] Saravanathiiban D S, Kutay M E, Khire M V. Effect of macropore tortuosity and morphology on preferential flow through saturated soil: A Lattice Boltzmann study [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 59: 44-53.
- (上接第 93 页)
- [20] 张久明, 迟凤琴, 韩锦泽, 等. 长期不同施肥黑土团聚体有机碳分布特征[J]. *土壤与作物*, 2017, 6(1): 49-54.
- [21] Zhao H, Shar A G, Li S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize wheat double cropping system [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178-186.
- [22] Huang R, Tian D, Liu J, et al. Responses of soil carbon pool and soil aggregates associated organic carbon to straw and straw derived biochar addition in a dryland cropping mesocosm system [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 265: 576-586.
- [23] 候晓静, 杨劲松, 王相平, 等. 不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 818-827.
- [24] 张章. 不同施肥方式对红壤团聚体稳定性及层级结构的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [25] Sun D, Li K, Bi Q, et al. Effects of organic amendment on soil aggregation and microbial community composition during drying rewetting alternation [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 735-743.
- [26] 管光玉, 范燕敏, 武红旗, 等. 不同利用方式土壤颗粒分形特征及其与土壤有机碳库稳定性的关系[J]. *草地学报*, 2016, 24(2): 258-262.