深圳典型城市人工林绿地表层土壤颗粒分形维数特征*

刘海霞[1] 史正军[2] 蔡 艳[1] 袁峰均[2] 罗 越[2]

1 四川农业大学资源学院 成都 611130

2 深圳市仙湖植物园 广东深圳城市生态系统国家定位观测研究站 广东深圳 518004

摘要：城市人工林是城市绿色基础设施的重要组成部分，是城市景观植被和土壤生态系统的高度复合体。为探究城市人工林绿地土壤颗粒组成及结构与植被群落等环境因素的关系，以深圳市建成区绿地表层 0~10 cm 土壤为研究对象，测定研究区植被覆盖度和土壤石砾含量、容重、有机质、颗粒组成并计算分形维数，分析土壤颗粒组成及分形维数与各指标的相关性；运用多水平线性混合模型（MLMs）确定土壤分形维数的影响因子，并分析影响因子与土壤分形维数的关系。结果表明：研究区绿地土壤以砂粒为主（62.09%~91.61%），其次是粉粒（0.97%~25.13%）和粘粒（0.82%~17.20%）；土壤分形维数变化范围为 2.52~2.76，土壤质地以砂质壤土（85.82%）为主，3 种质地类型的土壤颗粒分形维数差异显著（$P<0.01$），从高到低依次为砂质黏壤土（2.74）>砂质壤土（2.64）>砂土（2.59）；土壤颗粒分形维数与乔木郁闭度、草本盖度以及土壤有机质含量呈显著正相关（$P<0.05$），不同质地类型之间影响因子对土壤分形维数的影响程度不同，其中砂质壤土与总体规律一致，土壤分形维数随乔木郁闭度、草本盖度以及土壤有机质含量的增加呈上升趋势。综上可知，深圳城市人工林表层土壤分形维数受植被群落结构影响显著，并与土壤质地和土壤有机质关系密切，研究结果对指导城市人工林群落配置和改善土壤质量功能具有重要意义。

关键词：城市人工林；土壤颗粒组成；分形维数；多水平线性混合效应模型

DOI：10.12169/zgcsly.2024.03.01.0002

Fractal Dimension Characteristics of Surface Soil Particles of Typical Planted Urban Forest in Shenzhen

Liu Haixia[1] Shi Zhengjun[2] Cai Yan[1] Yuan Fengjun[2] Luo Yue[2]

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Fairylake Botanical Garden/National Positioning Observation and Research Station of Shenzhen Urban Ecosystem, Shenzhen 518004, Guangdong, China)

Abstract: Planted urban forest is an important component of urban green infrastructure, representing a highly integrated system of urban landscape vegetation and soil ecosystems. To investigate the linkage between the composition and structure of soil particles in planted urban forest and environmental factors like vegetation communities, the study take the surface soil from the layer of 0-10 cm deep in Shenzhen to measure the vegetation coverage as well as gravel content, bulk density, organic matter, and particle composition of the soil in the research area were measured and calculate the fractal dimension. The correlation between soil particle composition with fractal dimension and each index is analyzed. The

收稿日期：2024-03-01

* 基金项目：国家重点研发计划（2021YFE0193200）；深圳市科技计划项目（KCXST20221021111211025）；深圳城管科研项目（202018、202401）

第一作者：刘海霞（1999-），女，硕士生，研究方向为土壤与植物营养研究。E-mail：Lhaixia0320@163.com

通信作者：史正军（1976-），男，博士，教授级高级工程师，研究方向为城市土壤研究。E-mail：shizhengjun@szbg.ac.cn

蔡 艳（1976-），女，博士，副教授，研究方向为土壤培肥和养分调控研究。E-mail：caiyya@126.com

influencing factors of soil fractal dimension are determined using MLMs, and the relationship between influencing factors and soil fractal dimension is analyzed. The results show that the soil from the green space in the study area is dominated by sand (62.09%-91.61%), followed by silt (0.97%-25.13%) and clay (0.82%-17.20%). The fractal dimension of soil varies from 2.52 to 2.76, and the soil texture is mainly sandy loam (85.82%). The fractal dimensions of soil particles in the three texture types are significantly different ($P<0.01$), which could be ordered from high to low as sandy clay loam (2.74) > sandy loam (2.64) > sandy soil (2.59). The fractal dimension of soil particles is positively correlated with tree canopy density, herb coverage and soil organic matter content ($P<0.05$), and the influence factors of different texture types had different effects on the fractal dimension of soil, among which sandy loam is consistent with the general tendency, i. e., the fractal dimension of soil shows an upward trend with the increase of tree canopy density, herb canopy density and soil organic matter content. To sum up, the fractal dimension of surface soil of planted urban forest in Shenzhen is significantly influenced by vegetation community structure, and also closely related to soil texture and soil organic matter. The research is of great significance to guide the community configuration of planted urban forest and improve soil quality/function.

Keywords: planted urban forest; composition of soil particle; fractal dimension; MLM_S

城市化和土地利用变化对城市区域生态环境产生极大影响，以人工林为主构成的园林绿地是城市的基本生态设施，不仅对提升城市景观有着独特的贡献，而且在改善空气质量、缓解热岛效应、保持生物多样性等方面发挥着关键作用[1-2]，特别是在高度城市化地区，城市人工林成为绿地建设和城市生态体系中的关键因素。土壤是城市人工林生态系统的基础，土壤发育演化又受城市微气候环境、植被、人为干扰等因素影响，不同条件可导致土壤物理、化学和生物性状的显著性差异。土壤颗粒的组成和分布特性是影响其环境功能和植物生长的关键物理属性[3]。已有研究揭示了土壤颗粒大小分布的分形特征可以作为反映土壤物理化学状态和生态进程的一种指标[4-5]。分形维数不单关联土壤的孔隙度和渗透性[6]，还与土壤的水分保持能力和养分循环紧密相连[7-8]。因此，探究土壤颗粒的组成及其分形特征对于理解土壤的环境角色和维持植物生长至关重要。目前相关研究多关注自然森林或农田土壤，城市人工林绿地土壤的分形特性却鲜有报道。考虑到城市人工林绿地的树种多样性和林型结构差异，探索不同类型人工林绿地的土壤颗粒分形特征对城市土壤管理和生态保护具有深远的意义。

本研究基于深圳不同城市人工林绿地类型的土壤样本数据，采用多水平线性混合模型分析土壤颗粒分形维数影响因素，旨在揭示深圳城市化背景下人工林绿地土壤结构的差异性和复杂性，为进一步理解城市土壤的生态功能、指导城市绿地管理和优化城市人工林的规划设计提供科学依据。

1　研究区概况

深圳市地处中国广东省南部，地势东南高，西北低，大部分为低丘陵地，少数为平缓的台地，西部为滨海平原；属亚热带海洋性气候，炎热、湿润、干湿季分明，年平均气温 22.4 ℃，年降雨量 1 933.3 mm。风化淋溶作用强烈，多形成以赤红壤、红壤和黄壤为主的地带性土壤，该类土壤质地粘重、通透性差、易板结、自然土壤呈酸性，pH 值为 4.5~5.5，有机质含量低，易缺磷。截至 2022 年，深圳市建成各类公园 1 260 个，建成区绿地面积约 36 613.06 hm^2。城市人工林绿地土壤类型主要为赤红壤，受城市建设影响土壤 pH 值普遍呈中性，主要人工林树种包括凤凰木（*Delonix regia*）、小叶榄仁（*Terminalia neotaliala Capuron*）、木棉（*Bombax malabaricum*）、美丽异木棉（*Ceiba speciosa*）、大花紫薇（*Lagerstroemia speciosa*）、樟树（*Cinnamomum camphora*）、非洲楝（*Khaya senegalensis*）、秋枫（*Bischofia javanica*）、荔枝（*Litchi chinensis*）、榕树（*Ficus microcarpa*）等。

2 研究方法

2.1 样品采集与分析

本研究以深圳市内 10 个行政区作为调研区域，选取道路附属绿地、社区公园和城市公园 3 类人工林绿地的“乔灌草”“乔灌”和“乔草”3 类优势群落类型绿地作为调查对象，采用典型抽样方法共布置 134 块样地（表 1）。每块样地群落结构视为相对均匀一致，代表 1 个绿地植被类型，样地规格为 25 m×25 m。2022 年下半年开展样地调查和土壤取样工作。在每个样地内，详细记录乔木郁闭度、灌木覆盖度和草本覆盖度，依据主要乔木的种植年限将林龄划分为 4 类：幼龄林（≤10 年）、中龄林（11～15 年）、近熟林（16～20 年）和成熟林（21～30 年）。各样地按照五点采样法用土钻采集 5 处 0～10 cm 土壤，混合后带回实验室自然风干，剔除土壤中的侵入体和新生体后研磨过筛，使之全部通过 2 mm 孔径的筛子充分混匀后用四分法分成两份，一份用作土壤颗粒组成分析测定，另一份进一步研细通过 1 mm 孔径的筛子后测定土壤有机质含量；每块样地采集 3 个环状土样用于土壤容重测定。采用比重计法测定土壤颗粒组成中粘粒（<0.002 mm）、粉粒（0.002～0.02 mm）、砂粒（0.02～2 mm）的体积含量；土壤容重测定采用环刀法，土壤有机质含量测定采用重铬酸钾氧化-外加热法。

结合调查结果和研究目的，从土壤质地、绿地利用类型、群落植被类型和林龄类型 4 个不同角度对样地进行划分（表 2）。

表 1 采样区域及样点数量情况

序号	区域	样点数/个
1	大鹏新区	15
2	盐田区	9
3	坪山区	6
4	龙岗区	21
5	罗湖区	6
6	龙华区	21
7	光明区	10
8	南山区	15
9	福田区	16
10	宝安区	15
合计		134

表 2 样地类型及样点数量情况

类型划分角度	人工林绿地类型	样地土壤质地类型			合计
		砂土	砂质壤土	砂质黏壤土	
绿地利用类型	城市公园	8	59	4	71
	社区公园	1	29	2	32
	道路附属绿地	3	27	1	31
	合计	12	115	7	134
群落植被类型	乔灌草	8	71	5	84
	乔草	1	36	2	39
	乔灌	3	8	0	11
	合计	12	115	7	134
林龄类型	幼龄林	0	7	0	7
	中龄林	4	37	1	42
	近熟林	5	43	4	52
	成熟林	3	28	2	33
	合计	12	115	7	134

2.2 土壤分形维数计算方法

采用王国梁等[9]推导的土壤颗粒体积单重分形理论模型，建立土壤颗粒体积分形维数和土壤粘、粉、砂含量之间的关系，计算出土壤分形维数 D，公式为：

$$\frac{V(r < R)}{V_T} = \left(\frac{R}{\lambda_V}\right)^{3-D} \quad (1)$$

式（1）中：V（r<R）为所有小于 R 的土粒粒径体积之和；V_T为土壤颗粒的总体积，为定值 100%；R 为某一特定的粒径尺度；λ_V为最大粒级值，本实验中最大粒级值为 2 mm；D 为土壤颗粒的体积分形维数。将公式两边取对数，直线斜率为 3-D，从而计算出体积分形维数 D 值。

2.3 数据分析

应用 SPSS 28 软件对研究区域内的人工林绿地土壤指标进行描述性统计分析。由于调查数据集的嵌套性质，直接方差分析不完全适用不同类型之间的差异性，故对按质地类型划分的分形维数数据进行了差异性比较，对影响城市人工林绿地土壤颗粒分形维数的其他因素采用多水平线性混合模型（MLMs），该模型能够有效处理层次结构数据并考虑数据依赖性和多层变异性[10]。MLMs 分析通过 R 软件的 nlme 包中 lme 函数进行，其中绿地利用类型、植被群落类型、林龄等作为固定效应，行政分区作为随机效应，显著性判断依据为 P<0.05；在此基础上进一步通过线性回归探讨显著性因素与土壤颗粒分形维数之间的线性关系。

3　结果与分析

3.1　城市人工林土壤基本理化特征

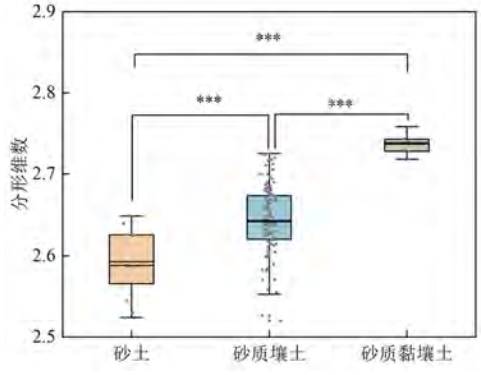
调查结果（表 3）显示，深圳城市建成区人工林绿地土壤颗粒分布以砂粒为主（62.09%～91.61%），其次是粉粒（0.97%～25.13%）和粘粒（0.82%～17.20%）；土壤分形维数 D 变化范围为 2.52～2.76，均值为 2.64。就土壤质地分布而言，深圳城市人工林土壤质地类型有砂土、砂质壤土和砂质黏壤土，其中砂质壤土占比最高，为 85.82%。土壤石砾含量变化范围为 2.03%～38.30%，分布不均。土壤容重变化范围为 1.05～1.79 $g \cdot cm^{-3}$，均值为 1.45 $g \cdot cm^{-3}$。根据《广东土壤》[11] 记载，土壤适宜的容重范围为 1.00～1.25 $g \cdot cm^{-3}$，表明深圳城市人工林绿地土壤容重部分偏高。此外，土壤有机质含量变化范围为 4.69～80.50 $g \cdot kg^{-1}$，变异系数为 0.62，变异程度高，故不同样地绿地土壤有机质含量差别较大。各指标的峰度、偏度绝对值分别小于 10 和 3，基本符合正态分布。

表 3　研究区绿地表层土壤性质及分形维数描述性统计

指标	粘粒/%	粉粒/%	砂粒/%	分形维数	石砾含量/%	土壤容重/($g \cdot cm^{-3}$)	土壤有机质/($g \cdot kg^{-1}$)
平均	8.35	13.95	77.33	2.64	19.01	1.45	29.30
标准差	3.34	4.35	5.69	0.05	8.03	0.14	18.19
方差	11.18	18.94	32.43	0	64.47	0.02	330.93
峰度	0.25	−0.21	0.21	−0.20	−0.07	−0.17	0.85
偏度	0.28	0.62	0.07	0.13	−0.49	−0.09	0.20
最小值	0.82	0.97	62.09	2.52	2.03	1.05	4.69
最大值	17.20	25.13	91.61	2.76	38.30	1.79	80.50
变异系数	0.40	0.31	0.07	0.02	0.42	0.10	0.62

3.2　不同质地人工林土壤分形维数的差异性

方差分析结果（图 1）表明，深圳人工林不同土壤质地的土壤颗粒分形维数大小存在显著差异（$P<0.001$）。具体来看，砂质黏壤土的分形维数最高，达到 2.74；其次是砂质壤土，分形维数为 2.64；而砂土则相对最低，为 2.59。



注：*** 表示 $P<0.001$。

图 1　不同土壤质地类型的分形维数

3.3　基于 MLMs 的人工林土壤颗粒分形维数影响因素

MLMs 分析结果（表 4）表明，深圳城市人工林土壤颗粒分形维数受多种因子制约。土壤颗粒分形维数与乔木郁闭度、草本盖度以及土壤有机质含量呈显著正相关（$P<0.05$），回归系数从大到小依次为草本盖度（0.064）>乔木郁闭度（0.062）>土壤有机质（0.001），但土壤颗粒分形维数与土壤石砾含量和容重的关系不显著。不同绿地利用类型、群落植被类型和林龄类型之间的土壤颗粒分形维数不存在显著差异（$P>0.05$）。

表 4　混合效应模型参数及分形维数与绿地类型、植被覆盖度、土壤指标之间的关系

模型参数					
随机效应	截距	残差			
标准差	0.016	0.044			
固定效应	回归系数	标准误	*df*	*t*	P
截距	2.558	0.054	111	47.179	0
社区公园 vs. 道路附属绿地	0.009	0.012	111	0.693	0.490
城市公园 vs. 道路附属绿地	0	0.012	111	−0.005	0.996
乔灌草 vs. 乔灌	−0.023	0.022	111	−1.024	0.308
乔草 vs. 乔灌	−0.035	0.027	111	−1.283	0.202
中龄林 vs. 幼龄林	−0.023	0.022	111	−1.067	0.288
近熟林 vs. 幼龄林	−0.017	0.022	111	−0.762	0.448
成熟林 vs. 幼龄林	−0.014	0.023	111	−0.628	0.531
乔木郁闭度	0.062	0.024	111	2.603	0.011
灌木盖度	−0.019	0.019	111	−0.978	0.330
草本盖度	0.064	0.022	111	2.937	0.004
石砾含量	0.001	0.001	111	1.810	0.073
土壤容重	−0.003	0.030	111	−0.116	0.908
土壤有机质	0.001	0	111	2.709	0.008

由表 5 可知，模型总解释力较小（R_c^2 = 0.299），主要为固定效应（R_m^2 = 0.204），其中影响显著的固定因子的解释度依次为乔木郁闭度（22.93%）＞草本盖度（22.44%）＞有机质（18.54%）。

表 5 固定效应方差分解结果

固定因子	解释方差	解释度/%
绿地利用类型	0.014	6.83
群落植被类型	0.014	6.83
林龄类型	0.014	6.83
乔木郁闭度	0.047	22.93
灌木盖度	0.009	4.39
草本盖度	0.046	22.44
石砾含量	0.023	11.22
土壤容重	0	0
土壤有机质	0.038	18.54
R_m^2	0.204	
R_c^2	0.299	

注：R_m^2为考虑固定因子和随机因子的 R^2，表征模型的总解释力；R_c^2为只考虑固定效应的 R^2。

3.4 影响因素与绿地土壤分形维数的关系

在 MLM_S分析基础上，对 3 类显著性影响因素和土壤分形维数之间进行线性回归分析的结果（图 2）表明，深圳城市人工林绿地乔木郁闭度与土壤颗粒分形维数呈显著线性关系（R^2 = 0.05，P = 0.014，n = 134，图 2A）。从不同土壤质地类型来看，随着乔木郁闭度增加，砂土的分形维数呈下降趋势，砂质壤土和砂质黏壤土的分形维数呈上升趋势，且砂质壤土分形维数上升速率最快（R^2 = 0.05，P = 0.013，n = 115）。草本盖度与土壤颗粒分形维数总体呈显著线性关系（R^2 = 0.04，P = 0.016，n = 134，图 2B），随着草本盖度的增加，3 种质地类型的土壤分形维数均呈上升趋势，但无显著相关性（P>0.05）。土壤有机质含量与土壤颗粒分形维数之间线性关系总体不显著（R^2 = 0.02，P>0.05，n = 134，图 2C），但随着土壤有机质含量的增加，砂土的分形维数呈上升趋势，两者相关性显著（R^2 = 0.03，P = 0.039，n = 115）。

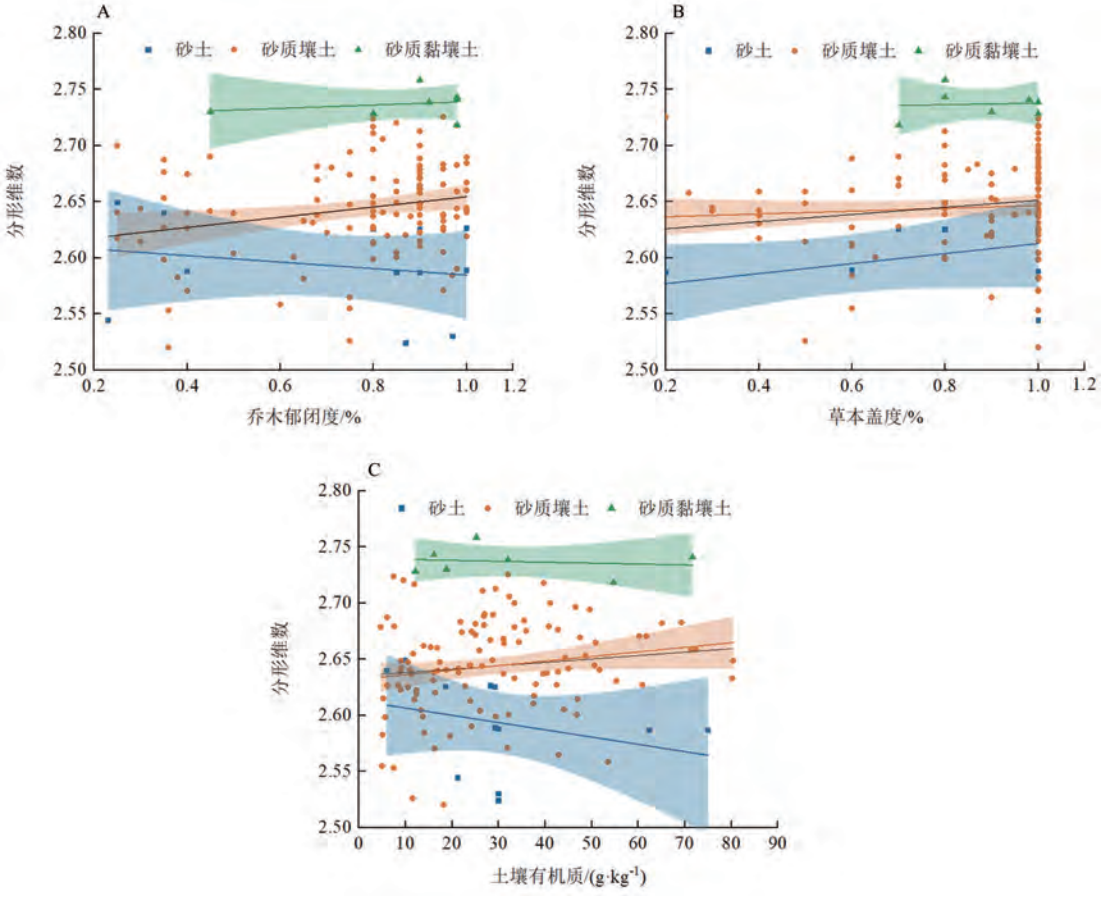


图 2 乔木郁闭度、草本盖度和土壤有机质与分形维数的线性回归分析

4　讨论

4.1　城市化对土壤颗粒组成及结构的影响

土壤的颗粒组成与其结构是影响土壤物理特性的关键因素，它们不仅决定土壤结构和孔隙度等性质，而且还对土壤的化学与生物特征乃至城市绿地生态功能的发挥产生间接影响[12]。城市树木通过其根系所构建的土壤微环境，对土壤颗粒的组成和结构产生显著作用[13]。此外，树木的生长状况、树种特性和树龄等因素都在不同程度上影响着土壤颗粒分布变化[14-15]。受城市建设影响，城市绿地土壤呈现出较粗的质地[16]。土壤颗粒含量的变化还受到绿地利用类型和植被群落类别的影响，而人为活动则赋予了绿地土壤高度的空间异质性[17-18]。例如，刘艳等[19]在对北京市崇文区不同类型绿地土壤的研究中发现，行道树绿带的土壤粘粒含量显著低于公园、街道和居住绿地，伍海兵等[20]则揭示在辰山植物园不同植被类型的土壤中，竹林地的砂粒含量显著高于灌木地。

本研究中，深圳城市人工林绿地土壤颗粒组成以砂粒为主，粉粒和粘粒次之；土壤质地分类以砂质壤土为主，占比为 85.82%。这与朱纯等[21]对广州市不同绿地类型表土颗粒组成的研究结果总体一致。深圳背景土壤为砂页岩母质发育而来的区域性赤红壤，该类土壤砂粒含量高、黏粒含量较低[22]。此外，深圳城市建成区绿地回填土分布较多，土层结构不完整，风化程度低，含有大量人为侵入体[23]，因此可以认为深圳城市绿地表层土壤砂粒含量高是因为成土母质和人为干扰。较高的砂粒含量利于增强土壤透气性，提高排水性能，但保水保肥能力弱，可能会成为限制园林植物生长的一个因素。

4.2　城市人工林绿地类型对土壤颗粒分形维数的影响

城市绿地土壤的分形维数受其环境条件如人为活动、植被覆盖和土壤管理等因素的显著影响[9]。通常，高分形维数意味着良好的土壤结构，表现为更高的孔隙率和水分保持性，而低分形维数可能暗示土壤结构简单，存在板结问题，这对植物根系生长及土壤水分养分的利用不利[24]。

在本研究中，土壤分形维数为 2.52 ~ 2.76，平均值为 2.64，显示了砂质黏壤土（2.74）的分形维数最高，其次是砂质壤土（2.64）和砂土（2.59）。这与中国砂质壤土分形维数的先前研究结果（2.359 ~ 2.839）相符，即土壤质地越细致，分形维数越大[25]。本研究结果表明，土壤的分形维数受植被覆盖和土壤有机质含量的显著影响，与乔木郁闭度和草本盖度正相关。植被与土壤间的正向互动效应表现为植物生长促使土壤粘粒含量增长以及结构和肥力的改善，进而土壤也支持了植被的繁茂[26]。乔木和草本植被的覆盖导致枯枝落叶在地表堆积分解，促进了土壤颗粒的团聚和分散，从而作用于土壤的分形维数[27]。表层土壤中，草本植物根系的分布使土壤更加疏松，土壤团聚体的稳定性更优[28]，进一步揭示了可通过提升土壤有机质含量来促成土壤颗粒的粘合，从而提高分形维数。此外，在植被种植管理上，通过复合种植、适度密植和选择冠幅大的树种，可以增加乔木郁闭度及草本盖度，从而改善土壤结构。本研究发现城市人工林绿地砂土的分形维数随着土壤有机质含量的增加而显著增加，这可能是因为在砂土中有机质的增加更易改善土壤结构，从而促进土壤颗粒的团聚和孔隙的形成。

5　结论

深圳城市人工林绿地表层土壤的砂粒含量最高，其次为粉粒和粘粒。土壤质地以砂质壤土为主，土壤分形维数 D 的变化范围为 2.44 ~ 2.76。不同质地类型的土壤在分形维数上表现出显著的差异性，具体为砂质黏壤土（2.74）>砂质壤土（2.64）>砂土（2.59）。土壤颗粒的分形维数与乔木郁闭度、草本植物盖度以及土壤有机质含量存在显著正相关关系。因此，通过合理增加绿地中乔木的郁闭度和草本植物的覆盖率，以及提升土壤的有机质含量并减少不必要的人为干预，可以有效促进土壤结构的改善，增强城市绿地土壤的生态功能和综合效益。未来研究应当考虑土壤类型的异质性，以深入理解植被与土壤之间的相互作用及其对土壤特性的影响；同时，还应深化研究如何通过提高植被覆盖度、改良土壤及优化植被种植结构等方式，有效提升土壤结构和功能，以实现城市土壤的可持续利用和生态效益最大化。

参考文献

[1]ESCOBEDO F J,KROEGER T,WAGNER J E.Urban forests and pollution mitigation:Analyzing ecosystem services and disservices[J].Environmental Pollution,2011,159(8/9):2078-2087.

[2]杨芹芹,杨立学,沈海龙.哈尔滨夏季水岸水曲柳和樟子松人工林的降温增湿效应[J].中国城市林业,2012,10(2):8-11.

[3]BRADY N C,WEIL R R.The nature and properties of soils[M].14th ed.New Jersey:Pearson Prentice Hall,2008.

[4]BITTELLI M,CAMPBELL G S,FLURY M.Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model[J].Soil Science Society of America Journal,1999,63(4):782-788.

[5]XU G C,LI Z B,LI P.Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River,China[J].CATENA,2013,101:17-23.

[6]PACHEPSKY Y A,GIMÉNEZ D,RAWLS W J.Bibliography on applications of fractals in soil science[M]// Fractals in Soil Science.Amsterdam:Elsevier,2000.

[7]PERRIER E M A,BIRD N R A.Modelling soil fragmentation:the pore solid fractal approach[J].Soil and Tillage Research,2002,64(1/2):91-99.

[8]RIEU M,SPOSITO G.Fractal fragmentation,soil porosity,and soil water properties:I.theory[J].Soil Science Society of America Journal,1991,55(5):1231-1238.

[9]王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].土壤学报,2005,42(4):545-550.

[10]KNOWLES T G,GREEN L E.Multilevel statistical models allow simultaneous consideration of both individual and group effects[J].Applied AnimalBehaviour Science,2002,77(4):335-336.

[11]广东省土壤普查办公室.广东土壤[M].北京:科学出版社,1993.

[12]张海廷,时延庆.山东省不同土地利用方式土壤颗粒组成及其分形维数特征[J].水土保持研究,2018,25(1):126-131,138.

[13]NERO B F.Woody species and trait diversity-functional relations of green spaces in Kumasi,Ghana[J].Urban Ecosystems,2019,22(3):593-607.

[14]KORTLEVE A J,MOGOLLÓN J M,HEIMOVAARA T J,et al.Topsoil carbon stocks in urban greenspaces of thehague,the Netherlands[J].Urban Ecosystems,2023,26(3):725-742.

[15]刘超华,李凤巧,廖杨文科,等.人工林对土壤地力的影响过程及其调控研究进展[J].土壤学报,2023,60(3):644-656.

[16]何兰,周维,代曦骄.我国城市绿地土壤研究进展[J].绿色科技,2017(20):81-84.

[17]NERO B F,ANNING A K.Variations in soil characteristics among urban green spaces in Kumasi,Ghana[J].Environmental Earth Sciences,2018,77(8):317.

[18]王小涵,黄绍敏,张浪,等.城市绿地土壤质量研究进展[J].中国园林,2022,38(3):96-100.

[19]刘艳,王成,彭镇华,等.北京市崇文区不同类型绿地土壤酶活性及其与土壤理化性质的关系[J].东北林业大学学报,2010,38(4):66-70.

[20]伍海兵,方海兰,彭红玲,等.典型新建绿地上海辰山植物园的土壤物理性质分析[J].水土保持学报,2012,26(6):85-90.

[21]朱纯,熊咏梅,贺漫媚.广州市不同绿地类型表土颗粒组成特征[J].广东园林,2009,31(4):26-28.

[22]冷暖,邓羽松,林立文,等.南亚热带不同母质发育土壤团聚体特征及其稳定性[J].水土保持学报,2021,35(5):80-86,93.

[23]秦娟,许克福.我国城市绿地土壤质量研究综述与展望[J].生态科学,2018,37(1):200-210.

[24]黄语芯,虞西尔,高若允,等.干热河谷植物沙丘形态及植物功能性状特征与土壤分形维数的关系[J].应用与环境生物学报,2022,28(4):1019-1026.

[25]江磊,秦富仓,李龙,等.基于分形维数的黄土丘陵沟壑区不同人工林对土壤结构和养分的影响[J].四川林业科技,2022,43(3):71-79.

[26]张晓娟,杨雪梅,王飞,等.甘肃民勤人工梭梭林土壤粒度特征研究[J].西北林学院学报,2023,38(4):82-89.

[27]桂东伟,雷加强,曾凡江,等.绿洲农田土壤粒径分布特征及其影响因素分析:以策勒绿洲为例[J].土壤,2011,43(3):411-417.

[28]张海欧,解建仓,南海鹏,等.冻融交替对复配土壤团粒结构和有机质的交互作用[J].水土保持学报,2016,30(3):273-278.