

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.05.025

张佛熠, 承勇, 阳雅荧, 等. 南昌不同城市化强度土壤粒度组成和分形特征及其影响因素. 土壤, 2023, 55(5): 1138–1145.

## 南昌不同城市化强度土壤粒度组成和分形特征及其影响因素<sup>①</sup>

张佛熠<sup>1,2</sup>, 承勇<sup>3</sup>, 阳雅荧<sup>1,2</sup>, 韦培<sup>1,2</sup>, 金涛涛<sup>1,2</sup>, 凌婉茹<sup>1,2</sup>, 尹婕<sup>1,2</sup>, 刘玮<sup>1,2</sup>, 王琼<sup>1,2\*</sup>

(1 江西农业大学林学院/园林与艺术学院, 南昌 330045; 2 江西省森林培育重点实验室, 南昌 330045; 3 江西井冈山国家级自然保护区管理局, 江西井冈山 343600)

**摘要:** 为探究南昌城市化强度对土壤粒度组成与分形特征的影响, 将南昌市建成区按不透水面面积占比区分城市化强度等级取样调查(184个样方), 测定土壤粒度组成、理化性质及植被指标, 通过土壤颗粒体积分形维数模型计算分形维数值。结果显示: ①南昌城市土壤颗粒以粉粒(46%~59%)和砂粒(40%~53%)为主, 高城市化导致土壤中砂粒含量增加, 粉粒含量减少。②南昌城市土壤分形维数的变化范围为2.69~2.97, 随城市化强度增加呈下降趋势。土壤粉粒与分形维数正相关, 砂粒与之相反, 粉粒对土壤分形维数的影响最大。③皮尔森相关分析与结构方程模型分析结果共同表明: 丰富的地上植被能够减少土壤颗粒的流失, 改善土壤物理性质, 缓解土壤退化。城市绿地中粉粒、极细砂粒等粒径适中的土壤颗粒保水、保肥更佳, 更能反映土壤的质量水平。

**关键词:** 城市化强度; 土壤粒度组成; 分形维数; 土壤质地

中图分类号: S152.3 文献标志码: A

### Particle Size Composition, Fractal Characteristics and Influencing Factors of Soils with Different Urbanization Intensities in Nanchang

ZHANG Foyi<sup>1,2</sup>, CHENG Yong<sup>3</sup>, YANG Yaying<sup>1,2</sup>, WEI Pei<sup>1,2</sup>, JIN Taotao<sup>1,2</sup>, LING Wanru<sup>1,2</sup>, YIN Jie<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1,2</sup>, WANG Qiong<sup>1,2\*</sup>

(1 College of Forestry/Landscape and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2 Jiangxi Provincial Key Laboratory of Forest Cultivation, Nanchang 330045, China; 3 Jinggangshan National Nature Reserve of Jiangxi Province, Jinggangshan, Jiangxi 343600, China)

**Abstract:** To investigate the effects of urbanization intensity on soil particle size composition and fractal characteristics in Nanchang, soils in the built-up areas of Nanchang were sampled according to the impervious surface area as a percentage of the urbanization intensity level (184 plots), soil particle size composition, physicochemical properties and vegetation indexes were determined, and fractal dimension values were calculated by soil particle volume fractal dimension model. The results showed that urban soil particles were dominated by silt particles (46%–59%) and sand particles (40%–53%), and high urbanization increased sand particles but decreased silt particles. The fractal dimension varied from 2.69 to 2.97, which showed a decreasing trend with increasing urbanization intensity. Silt particles were positively correlated with fractal dimension while sand particles were opposite, and silt particles showed the greatest influence on fractal dimension. Pearson correlation analysis and Structural Equation Model analysis showed that abundant vegetation reduced the loss of soil particles, improved soil physical properties, and mitigated soil degradation. In conclusion, soil particles of medium size, such as silts and very fine sands, in urban green spaces can preferably retain water and nutrients and reflect soil quality.

**Key words:** Urbanization intensity; Soil particle size composition; Fractal dimension; Soil texture

城市绿地土壤作为植被赖以生存的载体, 为植物提供水分、养分和矿物质等必备的生命元素, 其质量直接影响植被的生长以及景观功能、生态效益的发挥<sup>[1]</sup>。然而, 人类活动导致城市原始的土地覆盖类

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42007042)、江西省自然科学基金项目(20202BAB215008)和江西省研究生创新专项资金项目(YC2022-s422)资助。

\* 通讯作者(wangqiong881004@163.com)

作者简介: 张佛熠(1997—), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市景观生态。E-mail: zfy171205372022@163.com

型不断被工业建筑用地及人工景观所取代,土壤表面逐渐被硬化封实。城市人为扰动(踩踏、客土填埋、杂质入侵等)引起绿地土壤普遍板结、自然层次紊乱、物理性质变差。严重退化的城市土壤结构对土壤通气状况、水土保持及养分循环均存在不良影响<sup>[2]</sup>。这些负面影响已成为城市绿地健康可持续发展的重要限制因子,制约着城市景观生态功能的发挥。

土壤颗粒是土壤结构的基本单元,其粒度组成与土地利用方式、植被覆盖类型以及土壤退化程度等存在密切联系,并且对土壤的基本结构、理化性质及抗侵蚀性等具有较大影响<sup>[3]</sup>。土壤因其本身的结构特性,具有分形特征,能够满足分形理论适用的条件<sup>[4]</sup>。分形理论可用于描述土壤的物理性质,进而分析土壤空间的变异性。王国梁等<sup>[3]</sup>提出土壤颗粒体积分形维数的概念,通过土壤颗粒的自相关性判断其复杂的结构特征,合理阐释土壤体积分形维数与土壤粒度组成的关联。相较于传统土壤质地分类方法,分形维数与土壤物理性质的关联性更高;且分形维数可表征土壤肥力、结构特性及退化程度等<sup>[5]</sup>,作为综合评价土壤状况的指标之一。截至目前,分形理论已广泛应用于矿山复垦地土壤修复<sup>[6]</sup>、草地封育治理<sup>[7]</sup>及水土保持监测<sup>[8]</sup>等多个领域。但是,城市生态系统土壤粒度组成及其分形特征的研究却较为少见。通过区分不同城市化强度区域,研究快速城市化进程对土

壤结构变化的影响将有助于城市绿地土壤质量改善。

南昌作为江西省的省会城市,城镇常住人口 506.23 万人,城镇化率高达 78.64%(截至 2021 年)<sup>[9]</sup>,处于全省领先地位。土壤类型以红壤为主<sup>[10]</sup>,由于城市活动及城市化过程的强烈干扰,大部分红壤变得紧实、结构差、水土流失严重等,已威胁到城市生态环境的可持续发展<sup>[11]</sup>。因此,本研究选择南昌市建成区不同城市化强度的绿地土壤作为研究对象,旨在揭示南昌城市化对土壤粒度组成及分形特征的影响,探索影响土壤粒度组成及分形特征的关键因子,为城市绿地土壤质量提高和结构改善提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及研究设计

南昌位于江西省北部(28°09'N ~ 29°11' N, 115°27'E ~ 116°35' E),平均海拔 30 m,地势相对平坦,亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨,年均气温 17.5 °C,年均降水量为 1 600 ~ 1 800 mm。南昌用地类型中,绿地占比高达 63.37%,不透水面占比为 20.93%,而水体和裸地类型相对较少,仅占 13.08% 和 2.62%<sup>[12]</sup>。

研究区域位于南昌市建成区(505 km<sup>2</sup>)(图 1),根据城市化强度指标采用网格法均匀布设样地。首先应用光谱混合分析方法对 Landsat-8 影像进行分类,提

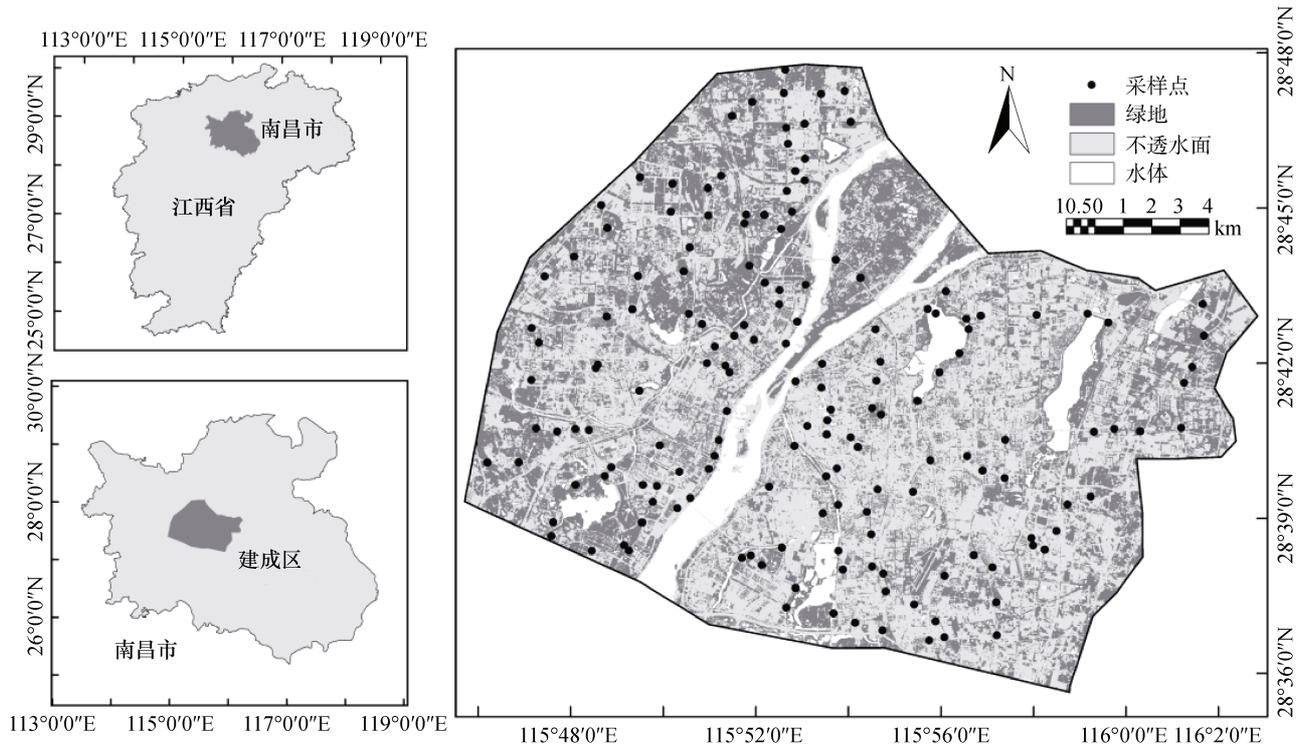


图 1 研究区和采样小区

Fig.1 Study area and sampling plots

取出研究区内不透水面面积(Impervious Surface Area, ISA)的空间分布。将研究区划分出 100 m × 100 m 的网格,计算出每一个网格 ISA 比例,作为城市化强度指标<sup>[13]</sup>,将所有网格内的城市化强度划分为 3 个梯度等级,分别为低(ISA<50%)、中(50%≤ISA<80%)、高(ISA≥80%)<sup>[14-15]</sup>。在不同城市化区域合计布设绿地样方(400 m<sup>2</sup>)184 个,同时在南昌梅岭地区 ISA<1%、受人为干扰极少的自然林地中取 10 份土样作为对照组,测定其土壤粒度并计算分形维数与城市土壤进行对比。样地之间至少间隔 1 km。

## 1.2 土壤样品采集与理化性质测定

2020 年 5—7 月,在研究区每个样方均匀布设 5 个采样点,采用环刀法采集地表 0~20 cm 土壤样品,将每个样方 5 份土壤混合后当场称量鲜重,带回实验室。使其自然风干,称重,记录。挑去石块、植物根系等杂物,按四分法取土壤混合样品,随后将土样分成两份,一份过 2 mm 筛用于土壤粒度组成及 pH

的测定,另一份过 0.2 mm 筛用于土壤养分测定。

土壤 pH 采用复合电极 pH 计(Sartorius PB-10, 德国 SartoriusAG 公司)测定(水土质量比 2.5:1);容重采用土壤干重/环刀容积的计算方法。

土壤养分测定:有机碳采用重铬酸钾外加热法测定;全氮采用半微量凯氏定氮法测定;全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定;全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定。土壤理化性质测定均参考鲍士旦<sup>[16]</sup>的测定方法,测定结果如表 1 所示。

## 1.3 土壤粒径测定及分形维数计算

土壤粒径测定参考管孝艳等<sup>[17]</sup>的测定方法,使用激光衍射粒度分析仪(MS3000, 英国 Malvern 公司)进行测定,设置 3 次重复。该仪器的测量范围为 0.02~2 000 μm,重复测量误差<2%,搅拌速度为 2 500 r/min,遮光范围 10%~20%。输出 7 个粒级的测试结果,土壤颗粒分级如表 2 所示。

表 1 不同城市化强度绿地土壤理化性质  
Table 1 Soil physiochemical properties of greenspace under different urbanization intensities

| 城市化强度 | 有机碳(mg/g)    | 全氮(mg/g)    | 全磷(mg/g)    | 全钾(mg/g)    | pH          | 容重(g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|
| 低     | 18.64 ± 0.96 | 0.98 ± 0.04 | 0.73 ± 0.04 | 9.75 ± 0.31 | 6.76 ± 0.09 | 1.31 ± 0.01            |
| 中     | 15.24 ± 0.86 | 0.84 ± 0.03 | 0.67 ± 0.02 | 9.67 ± 0.37 | 7.09 ± 0.09 | 1.35 ± 0.01            |
| 高     | 15.02 ± 1.39 | 0.82 ± 0.04 | 0.61 ± 0.03 | 9.65 ± 0.52 | 7.29 ± 0.16 | 1.39 ± 0.02            |

注:表中数值表示平均值 ± 标准误差,下同。

表 2 土壤颗粒分级(美国制)  
Table 2 Soil particle size fractionation (USDA)

| 土壤粒级     | 黏粒  | 粉粒   | 砂粒     |         |         |           |             |
|----------|-----|------|--------|---------|---------|-----------|-------------|
|          |     |      | 极细砂粒   | 细砂粒     | 中砂粒     | 粗砂粒       | 极粗砂粒        |
| 土壤粒径(μm) | < 2 | 2~50 | 50~100 | 100~250 | 250~500 | 500~1 000 | 1 000~2 000 |

分形维数的计算采用王国梁等<sup>[3]</sup>提出的计算方式,公式如下:

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

将式(1)等号两边取对数可得:

$$\lg(V_{(r<R)}/V_T) = (3-D) \lg(R/\lambda_V) \quad (2)$$

式中:  $V_{(r<R)}$  为粒径  $r$  小于  $R$  (土壤粒径分级中最大的粒径值(μm))的颗粒累积体积(%);  $V_T$  是土壤颗粒的总体积(%);  $\lambda_V$  是对所有粒级而言的上限值(μm);  $D$  则为土壤颗粒体积分形维数。

在计算时,分别将式(2)中  $\lg(V_{(r<R)}/V_T)$  与  $\lg(R/\lambda_V)$  作为纵、横坐标画散点图,根据最小二乘法拟和线性回归方程,所得直线的斜率即为  $3-D$ ,进而可求出分形维数  $D$  值<sup>[18]</sup>。

在南昌自然林地中的土壤黏粒、粉粒、砂粒占比分别为: 2.94%、63.23%、33.83%,土壤分形维数为 2.92。土质整体相对细腻。

## 1.4 植被调查

调查每个样方内植被组成及木本高度、木本冠幅,并通过如下公式(3)计算其 Shannon-Wiener 多样性指数(表 3)。

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (3)$$

式中:  $S$  为样方内的物种数目;  $P_i$  为物种  $i$  的相对重要值,  $P_i = N_i/N$ ;  $N_i$  为物种  $i$  的重要值;  $N$  为物种  $i$  所在样方的各个物种的重要值之和。

将样方内草本植物覆盖的区域用软尺量出其轮廓的长度,通过估算面积,得出草本盖度(表 3)。

表 3 不同城市化强度绿地植被特征

Table 3 Vegetation characteristics of greenspace under different urbanization intensities

| 城市化强度 | 木本高度(m)     | 木本冠幅(m <sup>2</sup> ) | Shannon-Wiener 多样性指数 | 草本盖度(m <sup>2</sup> ) |
|-------|-------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 低     | 9.49 ± 0.43 | 24.20 ± 1.70          | 1.22 ± 0.09          | 98.76 ± 13.07         |
| 中     | 8.31 ± 0.28 | 21.49 ± 1.62          | 1.28 ± 0.11          | 70.49 ± 10.74         |
| 高     | 6.81 ± 0.41 | 16.80 ± 2.42          | 1.16 ± 0.18          | 73.71 ± 22.48         |

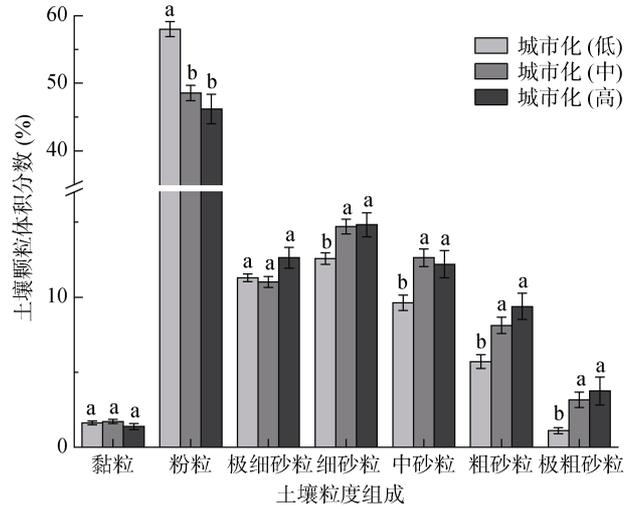
1.5 数据处理

采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA), Duncan 法进行多重比较(P<0.05), 相关性分析采用 Pearson 相关性检验.此外,采用 SPSS Amos Graphics(IBM, Armonk, NY)运行结构方程模型 (Structural Equation Model, SEM)探讨各因子间的直接或间接作用机制.运用 Origin 2018 和 ArcGIS 10.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同城市化强度土壤粒度分布特征

南昌绿地土壤粒度组成以粉粒(46.20% ~ 58.02%)和砂粒(40.32% ~ 52.33%)为主, 砂粒又以细砂粒(12.57% ~ 14.83%)居多, 其次为中砂粒(9.64% ~ 12.19%)和极细砂粒(11.01% ~ 12.16%), 粗砂粒、极粗砂粒较少, 黏粒含量(<1%)极低(图 2)。同时, 粉粒、细砂粒、中砂粒、粗砂粒和极粗砂粒的粒级特征在低城市化强度和中、高城市化强度区域表现出显著差异。粉粒体积分数为: 高、中强度城市化<低强度城市化(P<0.05), 依次为 46.20%、48.56%、58.02%。相反, 细砂粒、中砂粒、粗砂粒和极粗砂粒体积分数则表现为中、高强度城市化区域显著高于低强度城市化区域(P<0.05), 分别高出 2.26%、2.56%、3.68%、2.64%。不同城市化强度区域的黏粒和极细砂粒体积分数没有明显的差异变化(P>0.05)。此外, 城市绿地相较于自然林地, 土壤黏粒、粉粒显著减少, 砂粒则与之相反(P<0.05)。



(图中小写字母不同表示不同城市化强度下土壤粒度组成差异显著(P<0.05))

图 2 不同城市化强度土壤粒径分布

Fig. 2 Soil particle size distribution under different urbanization intensities

2.2 不同城市化强度土壤分形维数特征

根据土壤体积分形维数计算模型, 对不同城市化强度的土壤进行计算(表 4)。所有拟合方程决定系数 R<sup>2</sup> ≥ 0.80, 说明拟合效果较好, 分形维数值比较准确。由表 4 所示, 研究区土壤体积分形维数的变化范围为 2.69 ~ 2.97, 整体处于中上水平, 变化幅度较小。从城市化强度来看, 低强度城市化区域土壤分形维数显著高于中、高强度城市化区域(P<0.05)。与自然林相比, 城市绿地土壤分形维数值显著下降(P<0.05)。

表 4 不同城市化强度土壤体积分形维数及拟合方程的决定系数

Table 4 Soil volume fractal dimensions and fitting equation determination coefficients under different urbanization intensities

| 城市化强度 | 样品数 | 土壤颗粒分形维数 |      |        |       |       | 决定系数(R <sup>2</sup> ) |      |      |
|-------|-----|----------|------|--------|-------|-------|-----------------------|------|------|
|       |     | 最小值      | 最大值  | 均值     | 标准差   | 变异系数  | 最小值                   | 最大值  | 均值   |
| 低     | 84  | 2.71     | 2.97 | 2.86 a | 0.051 | 0.019 | 0.83                  | 0.98 | 0.94 |
| 中     | 73  | 2.70     | 2.92 | 2.82 b | 0.054 | 0.019 | 0.80                  | 0.98 | 0.95 |
| 高     | 27  | 2.69     | 2.94 | 2.80 b | 0.061 | 0.022 | 0.84                  | 0.99 | 0.95 |

注: 同列数据小写字母不同表示不同城市化强度下土壤分形维数差异显著(P<0.05)。

2.3 土壤粒度组成与分形维数的相关关系

土壤粒度组成与分形维数的回归分析如图 3 所

示, 土壤粉粒与极细砂粒的百分含量与分形维数呈极显著的正相关, 而细砂粒、中砂粒、粗砂粒与极粗砂

粒百分含量则与分形维数呈极显著的负相关,其中极细砂粒与分形维数的相关性较小。土壤粉粒百分含量与分形维数的回归方程决定系数  $R^2$  最大,为 0.98,其次是中砂粒、粗砂粒、细砂粒,最后是极粗砂粒。

### 2.4 土壤理化性质、植被指标与土壤粒度组成、分形维数的相关关系

由表 5 可知,南昌市绿地土壤有机碳、全氮与黏

粒显著负相关,容重、草本盖度与黏粒显著正相关 ( $P<0.05$ )。全磷与中砂粒显著正相关 ( $P<0.05$ )。全钾含量、含水量与黏粒、细砂粒、中砂粒和粗砂粒显著负相关,与粉粒、极细砂粒、分形维数显著正相关 ( $P<0.05$ )。土壤 pH 与粉粒、极细砂粒、分形维数极显著负相关,与细砂粒、中砂粒、粗砂粒和极粗砂粒显著正相关 ( $P<0.05$ )。木本高度与粉粒、分形维数显

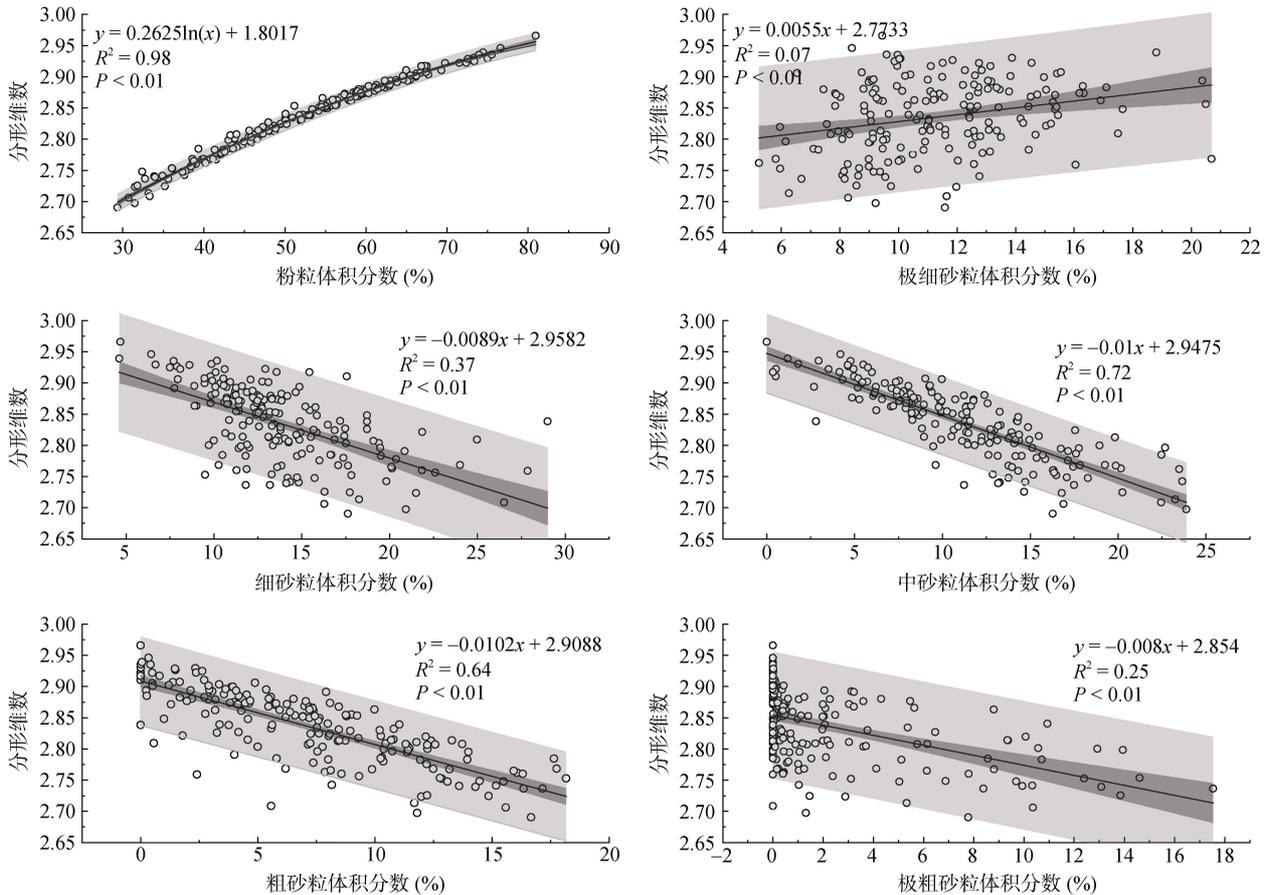


图 3 土壤粒径体积分数与分形维数的关系

Fig. 3 Relationship between soil particle volume fraction and fractal dimension

表 5 土壤理化性质、植被指标与土壤粒度组成、分形维数的相关关系

Table 5 Correlations between soil physicochemical properties, vegetation indices and soil particle size composition, fractal dimension

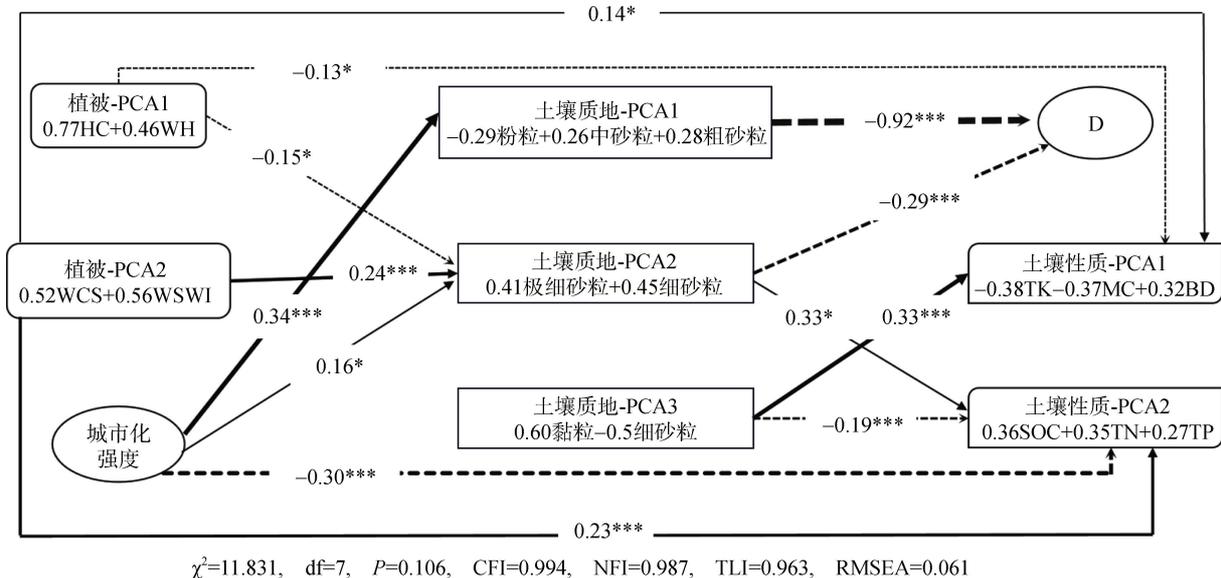
| 指标                   | 黏粒       | 粉粒       | 极细砂粒     | 细砂粒      | 中砂粒      | 粗砂粒      | 极粗砂      | 分形维数     |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 有机碳                  | -0.326** | -0.110   | 0.008    | 0.132    | 0.092    | 0.129    | 0.007    | -0.140   |
| 全氮                   | -0.379** | 0.051    | 0.050    | -0.049   | -0.052   | 0.067    | -0.033   | 0.020    |
| 全磷                   | -0.133   | -0.108   | -0.055   | 0.113    | 0.159*   | 0.100    | -0.044   | -0.127   |
| 全钾                   | -0.286** | 0.301**  | 0.304**  | -0.313** | -0.341** | -0.180*  | -0.047   | 0.301**  |
| 含水量                  | -0.217** | 0.410**  | 0.197**  | -0.261** | -0.403** | -0.284** | -0.157   | 0.401**  |
| 容重                   | 0.251**  | -0.118   | -0.130   | 0.054    | 0.179    | 0.033    | 0.040    | -0.107   |
| pH                   | -0.014   | -0.307** | -0.216** | 0.159*   | 0.314**  | 0.252**  | 0.199**  | -0.305** |
| 草本盖度                 | 0.165*   | 0.026    | -0.074   | -0.036   | 0.015    | 0.015    | -0.072   | 0.043    |
| 木本高度                 | -0.171   | 0.169*   | 0.085    | -0.091   | -0.155*  | -0.095   | -0.102   | 0.156*   |
| 木本冠幅                 | -0.112   | -0.100   | 0.193**  | 0.243**  | 0.137    | -0.035   | -0.208** | -0.115   |
| Shannon-Wiener 多样性指数 | 0.007    | 0.067    | 0.117    | 0.073    | 0.022    | -0.136   | -0.233** | 0.076    |

注: \*\*表示在  $P<0.01$  水平(双侧)显著相关, \*表示在  $P<0.05$  水平(双侧)显著相关。

著正相关，与中砂粒显著负相关( $P<0.05$ )。木本冠幅与极细砂粒、细砂粒显著正相关，与极粗砂显著负相关( $P<0.05$ )。Shannon-Wiener 多样性指数与极粗砂粒负相关( $P<0.05$ )。

如图 4 所示，城市化可以通过降低粉粒、增加中砂粒和粗砂粒降低分形维数( $0.34 \times (-0.92) =$

$-0.31$ )；黏粒增加和极粗砂粒降低不利于养分(有机碳、全氮、全磷)储存，反而增加容重、降低含水量；木本冠幅和 Shannon-Wiener 多样性指数可以提升土壤有机碳、全氮、全磷，或通过增加极细砂粒和细砂粒间接降低分形维数( $0.24 \times (-0.29) = -0.07$ )。



(实线箭头代表正向影响；虚线箭头代表负向影响；\*表示  $P<0.05$ ，\*\*\*表示  $P<0.001$ 。HC：草本盖度；WH：木本高度；WCS：木本冠幅；WSWI：Shannon-Wiener 多样性指数；D：分形维数；SOC：土壤有机碳；TP：全磷；TN：全氮；TK：全钾；MC：含水量；BD：容重)

图 4 结构方程模型

Fig. 4 Structural equation model

### 3 讨论

#### 3.1 城市化对土壤粒度组成及分形特征的影响

南昌市建成区不同城市化强度土壤粒度组成存在显著差异，随着城市化强度增加，土壤中大颗粒占比呈上升趋势，粉粒则与之相反。同时，本研究发现城市绿地中土壤粉粒含量降低，中砂粒及粗砂粒含量升高使分形维数值降低，即土壤质地越细腻，分形维数值越高，这与前人的研究结果基本一致<sup>[19]</sup>。受土壤粒度的影响，分形维数在城市化过程中呈下降趋势，土壤质地逐渐粗化，且城市绿地与自然林相比土壤显著变粗。说明城市化是影响土壤粒度组成和分形特征的重要因素，在城市建设过程中土方调配及客土填埋等强烈的人为扰动使其土质发生显著变化，原有自然土层被扰动，土体中混入大量客土、生活及建筑垃圾，这些杂物分布无规律，使土壤成分异常复杂<sup>[20-21]</sup>，在高城市化强度区域中此类影响更为突出。相关研究表明，苏州园林绿地土壤中均含有较

多大于 2 mm 粒径的砾质颗粒，这些大颗粒物质主要由碎石、瓦块与石灰核等建筑废弃物侵入土壤造成<sup>[22]</sup>。同时，随着城市扩张，不透水面积占比也相应提高，植被覆盖率减少，而南昌城市化进程推进使城区降雨更加集中，强降雨(尤其是大暴雨)发生概率增加<sup>[23]</sup>。这使得降水引起的地表径流变大，水土流失严重，土壤中细小颗粒随雨水冲刷而流失。城市绿地土壤质地的变化也与城市建设前原土壤性状密切相关，母质类型对土壤粒径分布及分形特征影响显著<sup>[24]</sup>。江西省东北部一带的红壤由红砂岩发育而来，其质地以粉粒、砂粒为主，黏粒含量较低<sup>[25]</sup>。本文中，城市绿地土壤质地与其基本一致。而黏粒受成土母质、城市化及水土流失等因素影响含量极少，不足以探讨分形维数与其的相关性，故无法得出黏粒与分形维数的相关性结果。

#### 3.2 植被指标、土壤理化性质与土壤粒度组成及分形维数的关系

土壤粒度组成是土壤物理性质的重要方面，不

仅与城市化有关,同时也与植被生长状况有密切联系<sup>[26]</sup>。本研究发 现木本冠幅和 Shannon-Wiener 多样性指数能够增加土壤细砂粒;同时 Pearson 相关分析发现草本盖度和木本高度分别有利于缓解土壤中黏粒、粉粒的流失,即近地面草本地被植物对土壤中极细颗粒的固持能力更强,木本植物次之。城市绿地因容重高、不透水面比例较大导致雨水不易下渗,地表径流较大,雨水的冲蚀能力较强<sup>[27]</sup>。研究表明地上植物的生长对土壤质地具有改良作用,植物具有截留降水,减缓降水冲蚀地表的作用<sup>[28]</sup>。较大的盖度、冠幅和植物丰富度有利于减弱雨滴的动能,降低流速,缓解雨水对地表的冲蚀,减少水土流失。流速对径流过程中沉积物的浓度及分离具有重要影响,较大的草本盖度使土粒不易被分散并且有利于增大土壤表面的粗糙度从而延缓地表径流的速度,减弱流水冲刷及搬运土壤颗粒的力量从而降低黏粒的流失<sup>[29]</sup>。但林冠对缓解土壤侵蚀的意义远小于地被及凋落物,虽然根系能够固结土壤,但多数树木根系在表层少有分布,且其贴地面覆盖度相对较低,未形成乔、灌、草立体防护体系,水土保持效果较差<sup>[30]</sup>。土壤黏粒、粉粒粒径极小,易在径流过程中随悬浊液而流失,极细砂粒与细砂粒在林冠截留、根系的固持及茎干阻滞作用下流失较少且易产生一定沉积。植被生长在改善土壤结构的同时能够促进养分截留与积累<sup>[31]</sup>。然而植被对细砂粒的固持却导致分形维数降低。因此,未来可以考虑通过增加植被覆盖面积,重视植被高度、冠幅和植物丰富度对水土保持的贡献,缓解水肥流失,改善土壤理化性质。

土壤粒度组成和分形特征受城市化及植被影响进而使土壤理化性质产生重大变化。SEM 分析发现黏粒增加和极粗砂粒降低不利于养分储存,反而增加容重、降低含水量。这可能与黏粒含量及土地利用方式有关。相关研究表明:土壤颗粒越细,土壤的水肥保持能力越强,但受颗粒含量的影响<sup>[32]</sup>,城市绿地土壤普遍存在压实、板结的现象<sup>[1]</sup>。土体在外力作用下,土粒被严重挤压,土壤孔隙比例降低,原有结构被破坏,土壤中有机、无机胶体减少,黏粒因粒径极小、空间填充能力极强、极易板结使土壤容重升高,不利于土壤中营养元素的分解及转运,同时也不利于水分的下渗<sup>[33]</sup>。本文中黏粒含量极低且受城市化的影响,不利于水肥保持,而土壤中少量的极粗砂粒则能够使土壤孔隙变大,透气性提升缓解其负面影响<sup>[34]</sup>。另外, Pearson 分析发现全钾、含水量与土壤粉粒、极细砂粒和分形维数呈极显著正相关关系,而

与土壤细砂、中砂的关系则相反,这与桑巴叶等<sup>[35]</sup>的研究结果相似。土壤各粒径之间对营养元素表现出不同的作用力,土壤粉粒作为与有机质胶结的主要无机胶体,能够维持土壤结构的稳定性,即土壤中大量含量的细颗粒百分占比更能反映土壤质量水平<sup>[35]</sup>,土壤中粉粒等稍大细颗粒越多,分形维数值越高,土壤的保水、保肥能力越强。

## 4 结论

1)南昌城市绿地土壤颗粒以粉粒和砂粒为主,高强度城市化引起土壤质地粗化,细颗粒流失。

2)绿地土壤分形维数变化范围(2.69 ~ 2.97)整体处于中上水平,城市化可以通过降低粉粒、增加中砂粒和粗砂粒降低分形维数,其中粉粒对分形维数的影响最大。

3)城市绿地土壤中粉粒、极细砂粒等粒径适中且含量较大的土壤颗粒保水、保肥更佳。保护现有绿地植物并提高地上植被覆盖率和丰富度可减少水土流失、改善土壤质地,有利于土体发育,在一定程度上可缓解城市土壤退化。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Pouyat R, Groffman P, Yesilonis I, et al. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems[J]. Environmental Pollution, 2002, 116: S107-S118.
- [3] 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.
- [4] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 987-996.
- [5] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [6] 王舒菲, 曹银贵, 白中科, 等. 黄土露天矿区排土场重构土壤质地空间特征研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 40-51.
- [7] 张昊, 李建平, 王誉陶, 等. 封育与放牧对黄土高原天然草地土壤化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 251-258.
- [8] 李松阳, 林静远, 潘佳虹, 等. 泥石流频发区不同土地利用类型土壤粒径分布多重分形特征[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(4): 893-900.
- [9] 胡梓璇, 黎姿. 一年净增 18.25 万人口释放出哪些信号[N]. 南昌日报, 2022-03-08(1).
- [10] Fan J, Wang J Y, Hu X F, et al. Seasonal dynamics of soil nitrogen availability and phosphorus fractions under urban forest remnants of different vegetation communities in

- Southern China[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(3): 576–585.
- [11] Chen F S, Yavitt J, Hu X F. Phosphorus enrichment helps increase soil carbon mineralization in vegetation along an urban-to-rural gradient, Nanchang, China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 75: 181–188.
- [12] 何佳君, 刘向铜, 涂梨平, 等. 南昌地区不透水面信息自动提取[J]. *测绘通报*, 2020(8): 1–4.
- [13] Hutya L R, Yoon B, Alberti M. Terrestrial carbon stocks across a gradient of urbanization: A study of the Seattle, WA region[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 783–797.
- [14] Jin T T, Liu W, Wang Y, et al. Effects of urbanization intensity on glomalin-related soil protein in Nanchang, China: Influencing factors and implications for greenspace soil improvement[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 318: 115611.
- [15] Wang Q, Zhang D, Zhou W, et al. Urbanization led to a decline in glomalin-soil-carbon sequestration and responsible factors examination in Changchun, Northeastern China[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 48: 126506.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(3): 44–50.
- [18] 孙凯, 王涵, 孙贵荣, 等. 库布齐沙地滴灌人工林土壤水分运移及其与土壤分形特征的关系[J]. *土壤*, 2022, 54(5): 1073–1084.
- [19] 王瑞东, 高永, 党晓宏, 等. 希拉穆仁天然草地不同群落土壤分形特征及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(3): 51–56.
- [20] Ellis E C. Anthropogenic transformation of the terrestrial biosphere[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1938): 1010–1035.
- [21] Ajmone-Marsan F, Biasioli M. Trace elements in soils of urban areas[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, 213(1): 121–143.
- [22] 张志明. 苏州古典园林绿地土壤浅析[J]. *土壤*, 1998, 30(3): 156–157, 142.
- [23] 傅春, 陈先明. 城市化对南昌市降雨变化的影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(4): 705–710.
- [24] 徐加盼, 李继洪, 魏玉杰, 等. 不同母质类型发育土壤颗粒组成分形特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1197–1205.
- [25] 王圣, 陈科希, 袁源远, 等. 江西省旱地土壤质地与土壤化学性状的相关性研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(6): 65–71.
- [26] 马文芳, 朱云鹏, 郭倩倩, 等. 黄土丘陵区典型植被土壤剖面的颗粒分形特征[J]. *土壤*, 2019, 51(3): 578–585.
- [27] 王晓黎. 城市绿地对地表径流的影响研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.
- [28] 熊沛枫. 黄土丘陵区草地群落冠层降雨截留特征及优势种对降雨的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [29] 梁娟珠. 南方红壤区不同植被措施坡面的水土流失特征[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(4): 95–99.
- [30] 陈奇伯. 森林枯落物阻滞地表径流和影响砂粒水力启动条件研究[J]. *人民黄河*, 1996, 18(5): 37–39.
- [31] 乐易迅, 胡敏杰, 肖琳, 等. 河口湿地红树林植被恢复对土壤养分动态的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 333–337.
- [32] 夏江宝, 顾祝军, 周峰, 等. 红壤丘陵区不同植被类型土壤颗粒分形与水分物理特征[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(5): 9–15.
- [33] 彭家顺, 雷开敏, 郭晓敏, 等. 不同刨花楠种植模式对土壤理化性质及分形维数的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(1): 111–119.
- [34] 贾昂元, 张勇勇, 赵文智, 等. 干旱区绿洲农田土壤大孔隙与水分入渗特征[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 486–497.
- [35] 桑巴叶, 朱玉伟, 刘康, 等. 伊犁河谷不同森林模式下土壤的养分特征和粒径组成[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(5): 328–332.