

基于 Micro-CT 的牛粪-麦秸好氧堆肥细观结构尺寸效应与 RVE 分析

邱荣斌 仲伟正 杨雪琦 杨增玲 韩鲁佳
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 代表性体积单元 (Representative volume element, RVE) 是量化非均质材料有效参数的基础,也是应用等效连续介质理论表征好氧堆肥细观行为的前提。本文采用微计算机断层扫描 (Micro-CT) 和 9 点立方体覆盖采样窗口法,测量牛粪-麦秸好氧堆肥原状堆体的多元结构特征 (包括总孔隙率、连通孔隙率、封闭孔隙率、分形维数、比表面积和连接密度),形成基于统计的细观结构 Micro-CT-RVE 分析方法。结果表明,堆体结构特征在边长 0~51.2 mm 范围内存在显著尺寸效应,且效应响应程度会随特征变化。当判定结构特征统计稳定时变异系数为 5%,样品尺寸 51.2 mm×51.2 mm×51.2 mm 可满足 RVE 技术要求。研究结果揭示了堆体结构细观异质性与宏观均匀性的关系,为好氧堆肥微环境互动机制多尺度研究提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 微计算机断层扫描; 好氧堆肥; 细观结构; 代表性体积单元; 尺寸效应

中图分类号: X705; S141.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0369-08 OSID: 

Size Effect and Representative Volume Element Analysis of Meso-structure in Dairy Manure-wheat Straw Aerobic Composting Based on Micro-CT

Qiu Rongbin Zhong Weizheng Yang Xueqi Yang Zengling Han Lujia
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The representative volume element (RVE) served as the foundation for quantifying the effective parameters of heterogeneous materials which was a prerequisite for characterizing the mesoscale behavior of aerobic composting by using equivalent continuum theory. Micro-computed tomography (Micro-CT) and the nine-point cubic coverage sampling window method were employed to measure the multiple structural characteristics (such as total porosity, connected porosity, enclosed porosity, fractal dimension, specific surface area, and connection density) of undisturbed aerobic composting piles composed of cow manure and wheat straw. A statistical-based mesoscale structure analysis method using Micro-CT-RVE was developed. The results indicated that the structural characteristics of the piles exhibited significant size effects within a range of 0~51.2 mm in edge length, and the degree of response to this effect varied with the characteristics. When the structural characteristics were determined to be statistically stable, the coefficient of variation was 5%, and a sample size of 51.2 mm×51.2 mm×51.2 mm met the technical requirements for RVE. The findings revealed the correlation between mesoscale heterogeneity and macroscale uniformity of the pile structure, providing theoretical basis and technical support for the multi-scale studies on microenvironmental interaction mechanisms in aerobic composting.

Key words: microcomputer tomography; aerobic composting; meso-structure; representative volume element; size effect

0 引言

好氧堆肥 (简称堆肥) 是一种实现畜禽粪污无

害化、减量化和资源化利用的有效技术途径^[1-2]。研究表明,堆肥作为一种农业有机废弃物的生物降解过程,其效果受堆肥原料组成、堆体结构特征以及

收稿日期: 2026-02-03 修回日期: 2026-04-06
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2002101) 和国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-36)
作者简介: 邱荣斌 (1992—), 男, 博士生, 主要从事农业生物质工程研究, E-mail: qiurongbin@cau.edu.cn
通信作者: 韩鲁佳 (1964—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生物质工程研究, E-mail: hanlj@cau.edu.cn

堆肥物理性质等因素的影响^[3-4]。而充气孔隙空间(简称孔隙)直接控制堆体内气体输运效率和路径,从而影响热量耗散、尾气排放、微生物活动及有机质降解等关键物理生化过程^[4],是非常重要的结构参数。但堆体通常由畜禽粪污和作物秸秆等农业废弃物混合堆积而成,其孔隙空间分布往往异常复杂,呈非连续性、非均质性、各向异性和松散性,给基于微观($0.1\text{ }\mu\text{m}\sim1\text{ mm}$)孔隙结构环境的好氧堆肥机理研究带来了挑战^[3-4]。

目前,已有堆体结构的表征研究包括基质颗粒尺度的形貌分析^[5]和好氧层厚度的量化^[6]、基质团聚体尺度的结构表征^[7]以及堆体整体尺度孔隙率^[8]、容重^[9]和沉降^[10]等。但这些分析方法存在难以准确描述堆体孔隙微观特征的局限性。

尺寸效应是指材料物理、化学、机械等性质随所研究样品尺寸变化而发生显著改变的现象。材料领域细观和多尺度建模通常将多孔基质视为由大量连续单元构成的多尺度复杂系统^[11],此时多孔介质材料特性跨越颗粒、团聚体、代表性体积单元(Representative volume element, RVE)和堆体整体等多个尺度。细观尺度 RVE 作为材料结构属性(如孔隙率)或物理性质(如渗透率)对样品体积或位置变化不敏感的最小解析域,被认为能有效表示材料宏观特性(或性能),从而大幅提高计算分析效率,已成为研究多孔介质多尺度性质的重要理论基础,并广泛应用于岩石^[12]、土壤^[13]和复合材料^[14-15]等领域的多孔介质研究。

RVE 依赖于细观结构自相似性,但由于研究材料性质与用途的多样性,其定义存在差异,形成了多种估算策略^[14,16]。若存在并能获得堆肥堆体 RVE 结构特征,可作为宏观堆体尺度性质研究输入参数,进而分析堆肥堆体传热传质,以预测整个堆肥系统

行为^[17]。目前针对堆肥堆体细观结构的 RVE 系统研究尚未见报道。

本文以牛粪-麦秸实验室好氧堆肥 5 个典型阶段(初始、升温、高温、降温和腐熟)的原状堆体为研究对象,分析堆体细观结构尺寸效应,以期为堆肥微环境互作机制多尺度研究提供科学数据和方法支撑。

1 材料与方法

1.1 好氧堆肥堆体单元结构数字样品构建

1.1.1 堆肥制备和取样

在相同原料、工艺和环境下,设置 4 组并行好氧堆肥试验,依次表示 1 个完整好氧堆肥过程 4 个不同阶段(升温、高温、降温和腐熟)。堆肥原料采用新鲜奶牛粪便和自然风干收获后小麦秸秆。牛粪采自北京首农畜牧金银岛牧场;麦秸源于河南省清丰县古城乡,采集时去除根部和顶部枝叶,取茎秆中部横向裁切至 $1.5\sim2.0\text{ cm}$ 。人工将牛粪与麦秸按质量比(湿重)12.5:1 充分混合,含水率接近 65%,C/N 为 20~25(图 1a)。

4 个堆肥反应器结构相同,有效容积约为 15 L(内径: $\Phi 25\text{ cm}\times30\text{ cm}$)^[18]。采用预埋采样器方法。堆肥时,逐步将麦秸和牛粪混合底物置于反应器中,并在反应器中心位置垂直、对称置入 2 组已填充堆肥底物采样器(图 1c)。轻微振动反应器筒仓,使 4 组反应器堆体质量(6 kg)、高度($277.02\text{ mm}\pm0.86\text{ mm}$)基本一致。根据前期研究,堆肥曝气采用通气 30 min/间歇 30 min 策略,供氧速率约为 $0.25\text{ L}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ ^[19]。其中,采样器设计为顶部开放、四周及底部镂空的圆桶型结构,底部直径 $\times$ 高度为 $\Phi 80\text{ mm}\times70\text{ mm}$ 、壁厚为 2 mm,有效容积为 0.34 L。使用聚酰胺(PA12,密度 $1.08\text{ g}/\text{cm}^3$,热变形温度

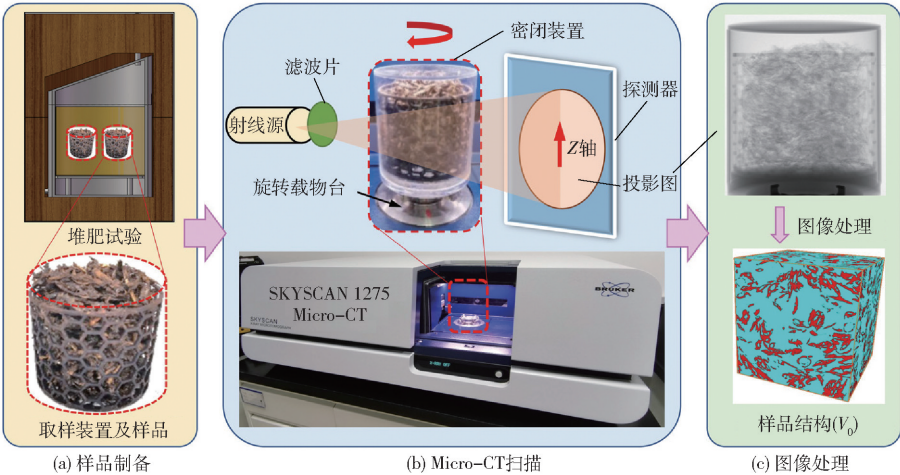


图 1 堆体单元结构数字样品构建流程

Fig. 1 Digital sample construction process of pile unit structure

HDT_(1.80 MPa) 为 130℃) 激光烧结而成, 整体倒圆角为 R0.5 mm, 质量约为 13 g (图 1a)。试验过程中, 每个堆肥反应器使用 2 个采样器, 以获得重复的堆体单元样品, 以增加代表性。

分别于堆肥 19 h、3 d、5 d 和 15 d 依次拨离采样器周围底物, 取出预埋采样器, 使用剪刀去除采样器外部多余底物, 置于圆柱体透明密封容器 (PMMA 材质, 内径: $\Phi 86\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 壁厚: 2 mm) 内, 用于 Micro-CT 扫描分析 (图 1b)。采样后, 停止相应反应器堆肥过程。

1.1.2 Micro-CT 原位成像

经前期预研, SKYSCAN 1275 Micro-CT 系统的优化扫描条件为: 对亮场和暗场进行平均场校正, 以降低图像采集过程的噪声; 管电压 90 kV、管电流 110 μA 、360° 步进扫描步长为 0.2°, 帧平均为 3, 曝光时间为 312 ms, 分辨率为 50 μm /像素。使用厚度为 1 mm 铜滤光片降低光束硬化效应; 采用随机移动工作模式消除环形伪影 (图 1b)。每个扫描样品生成 3 616 幅 16 位灰度投影图像。

1.1.3 样品图像处理

使用 NRecon 软件对 Micro-CT 扫描获得的灰度投影图像进行预处理和断层重建。采用二维混合滤波法进行图像处理: 环形伪影校正系数设置为 1, 杯状伪影修正值设置为 30%, 采用高斯方法 (矩形窗边长为 2 像素) 对投影图像进行线性平滑滤波。应用 Feldkamp 锥束重构算法, 生成灰度断层图像序列。

为了消除边界效应, 使用 CTan 软件从原始样品中心裁剪出 1 个尺寸为 1 024 像素 $\times$ 1 024 像素 $\times$

1 024 像素 (对应 51.2 mm $\times$ 51.2 mm $\times$ 51.2 mm) 的感兴趣体积单元, 作为参考样品 (图 1c 和图 2a), 标记为 V_0 , 边长为 ε_0 。使用 Otsu 三维全局二值化分割算法, 分割并提取 V_0 内孔隙和底物, 采用 6 连通方式和逻辑减运算从总孔隙空间中提取连通孔隙和封闭孔隙。如图 1c 所示, 红色区域表示基质, 淡蓝色区域表示孔隙。利用厘米级样品构建微米级分辨率数字模型的方法符合常规做法。堆肥试验过程及堆体单元结构数字样品构建细节请参考作者前期研究^[20]。

1.2 数字子样品分析域采样

基于采样窗口法获取不同尺寸的数字子样品进行研究^[16]。立方体被用于表示 RVE 几何形状, 其尺寸由边长定义。图 2b 为 9 点立方体覆盖采样法。在 V_0 三维像素矩阵内部, 以中心点 E 和 8 个顶点 (A 、 B 、 C 、 D 、 F 、 G 、 H 和 I) 为基点, 沿箭头方向以恒定梯度扩展立方体区域, 直到接近 V_0 边界。随着窗口扩展, 从 V_0 中依次裁剪出不同尺寸立方体区域作为子样品, 并监测所关注特征值的变化^[21]。

在每个尺寸梯度上, 子样品设 9 个重复 (图 2b), 标记为 V_{i-j} , 边长为 l_i (mm)。其中, i 为尺寸梯度, j 为位置标记, l_i 计算式为

$$l_i = \{3 + di \mid l_i \leq l_0, i \in \mathbf{N}^*\} \tag{1}$$

式中 d ——尺寸梯度, 取 1 mm

$\mathbf{N}^*$ ——正整数

每个 V_0 在 48 个尺寸梯度上累积裁剪 432 个子样品。由于 $l_0 = 51.2\text{ mm}$, 当 $l_i > 25.6\text{ mm}$ 时, 位于 8 个顶点方位的子样品不可避免地发生空间重合。重合发展过程示意图 2d 和图 2e。

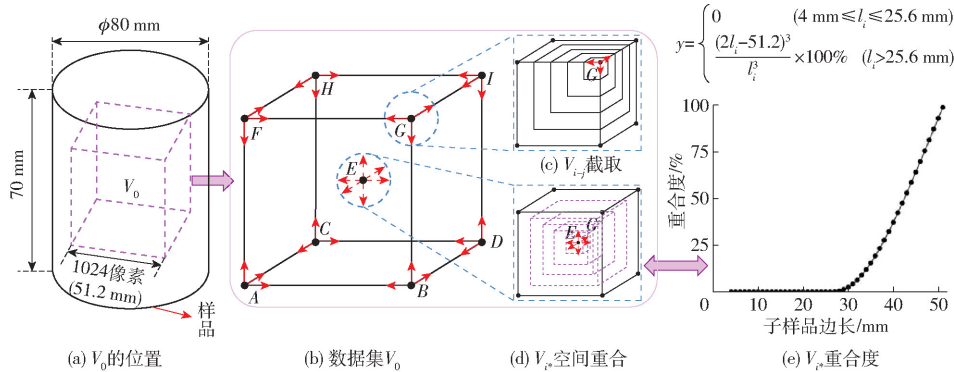


图 2 子样品采样方案示意图

Fig. 2 Schematics of sampling scheme for sub-samples

1.3 约束参数选取

RVE 估计方法和约束条件选择具有多样性。在基于三维成像的 RVE 研究中, 主流约束参数包括孔隙率^[22]、结构特征参数 (如迂曲度^[23]和分形维数^[24] (Fractal dimension, FD) 以及物理特性 (如渗

透率^[25]和结构强度^[26])。重点分析总孔隙率 (Total porosity, P_{Tot})、连通孔隙率 (Connected porosity, P_{Con})、封闭孔隙率 (Closed porosity, P_{Clo})、比表面积 (Specific surface area, SSA)、 FD 和连接密度 (Connectivity density, CD)。其中, P_{Tot} 、 P_{Con} 和 P_{Clo} 计

算式为

$$P_{Tot} = \frac{V_{Tot}}{V_{VOI}} \times 100\%$$

(2)

$$P_{Con} = \frac{V_{Con}}{V_{VOI}} \times 100\%$$

(3)

$$P_{Clo} = P_{Tot} - P_{Con}$$

(4)

式中 V_{Tot} ——总孔隙体积,mm³

V_{VOI} ——样品感兴趣体积,mm³

V_{Con} ——连通孔隙体积,mm³

孔隙表面是孔隙气体交换的边界,也是堆肥微生物作用的主要场所^[6,27]。 SSA (mm⁻¹)为单位体积孔隙表面积,计算式为

$$SSA = \frac{S_{Porosity}}{V_{Porosity}}$$

(5)

式中 $S_{Porosity}$ ——孔隙总表面积,mm²

$V_{Porosity}$ ——孔隙总体积,mm³

FD 用于度量基质表面几何形状不规则性和复杂性, FD 越大,孔隙形状越复杂^[28]。通过三维盒计数法计算 FD ,定义为孔隙表面体素立方盒数量与立方盒长度对数-对数回归曲线斜率,计算式为

$$FD = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\lg N(l)}{\lg (1/l)}$$

(6)

式中 l ——立方盒边长

$N(l)$ ——包含孔隙表面体素盒数

CD (mm⁻³)可度量三维复杂结构连通性,表示单位体积内孔隙冗余连接数,通过 ConnEulor 算法计算获得^[29],即

$$CD = \frac{\beta_{VOI}}{V_{VOI}}$$

(7)

式中 β_{VOI} ——孔隙所有独立连通路径数量

1.4 临界尺寸估算

RVE 尺寸量化受到样品特征、目标属性和测试条件等因素的影响,目前尚无统一标准。通常,通过统计分析目标属性随样品尺寸变化的收敛性,并在合理置信度下估算 RVE 尺寸。常用的估算方法包括直观判断、变化差值率、误差判别、变异系数(Coefficient of variation, CV)判别、假设检验、曲线拟合和灰色关联分析等。每种方法均有其适用条件及优缺点^[16, 30]。为定量确定 RVE 并减少人为主观判断误差,采用 CV 判别法,通过比较不同尺寸子样品属性之间的归一化差异,评估合理的 RVE 尺寸^[13, 26]。 CV 越小,数据离散程度越低,RVE 越大,样品同质性越强。当 CV 在可接受范围内时,认为样品结构特征测量值已达到稳定, V_{i-j} 符合有效表达结构参数条件。

1.5 数据分析处理

通过 CTan 1.19.4.0 (Bruker, 比利时)内置算

法模块完成 V_{i-j} 定量裁剪和结构参数 (x_{i-j}) 计算。使用 Excel 2019 (Microsoft, 美国) 和 OriginPro 2021 (OriginLab, 美国) 完成统计分析和图表绘制。

2 结果与讨论

2.1 堆肥试验结果

堆肥过程中堆体温度变化曲线如图 3 所示。由图 3 可见,堆肥过程呈典型的好氧堆肥升温(0~19 h)、高温(19 h~3 d)、降温(3~5 d)和腐熟(5~15 d) 4 个阶段。

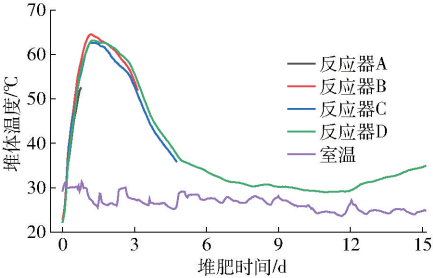


图 3 堆肥过程中堆体温度变化曲线

Fig. 3 Temperature changes curves during composting

2.2 堆体结构 RVE 存在性

已有研究指出,并非所有多孔介质材料都具备 RVE^[31]。图 4 为堆体细观结构特征参数随样品尺寸的变化曲线,6 个结构特征参数 (x_{i-j}) 随样品尺寸 (l_i) 的增加,不同尺寸样品间 x_{i-j} 的差异和同尺寸样品间 x_{i-j} 的偏差变得不显著,表现出明显的收敛趋势。表明在不同结构特征下存在统一的 RVE。在一定尺寸范围内,空间位置对样品代表性的影响大于样品尺寸的影响。

当样品尺寸较小时(边长为 4~25 mm),结构特

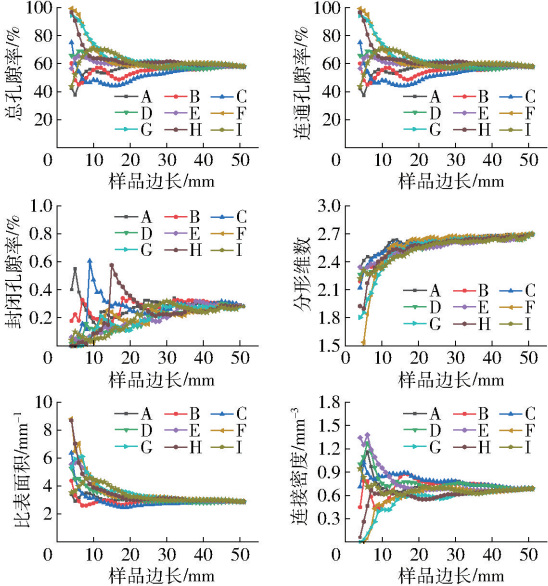


图 4 细观结构参数与初始阶段样品尺寸之间的关系

Fig. 4 Relationship between microstructure parameters and initial sample size

征参数的非均质性对样品尺寸变化更为敏感。此时,样品结构特征表现为细观、离散、随机和非均质,其参数值难以表示堆体整体结构。随着 l_i 增加,样品尺寸对结构特征的影响逐渐减弱并趋于不明显, x_{i-j} 离散程度逐渐降低并趋于某一稳定值,围绕该值存在小幅统计波动,满足统计均匀性。此时,样品被认为包含足够的细观结构信息。取所有结构特征参数 x_{i-j} 趋于稳定的最大样品边长 l_i 作为可表示堆体整体结构特征 RVE,此时,样品结构特征兼具宏观特征的统计均匀性和细观异质的遍历性,表现为连续、宏观和确定性。

综上所述,从已有研究结果和统计角度分析,堆

体结构的非均质性不仅存在于堆肥颗粒尺度^[5]和堆肥堆体整体尺度^[32],在细观尺度上也存在显著的尺寸依赖性。在所关注的样品尺寸范围内,存在能表示堆体结构宏观响应的 RVE。

2.3 不同结构特征尺寸效应

堆体细观结构尺寸效应源于基质结构内在的复杂性和多尺度性,以及在不同尺度上的空间异质性和样品边界效应。除了目视检查(图 4),还可使用数学模型估计 RVE。如图 5 所示,表征了堆体细观结构特征参数的 μ_i 、 σ_i 和 CV_i 随 l_i 动态变化情况,误差带表示每个尺寸梯度上 9 个测量值标准差。

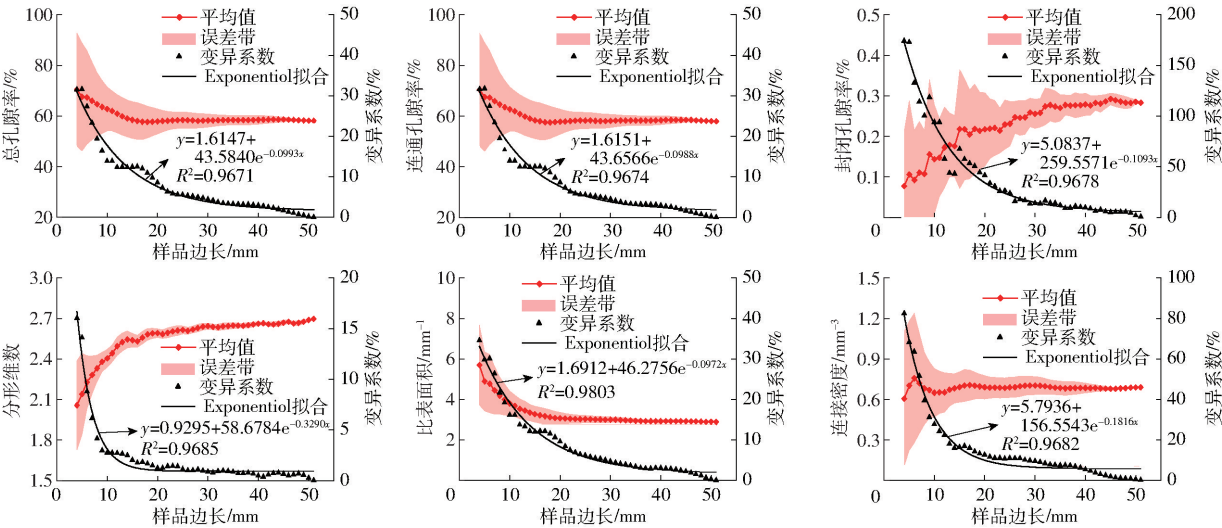


图 5 结构参数变异性与初始阶段样品尺寸之间的关系

Fig. 5 Relationship between variability of structural parameters and sample size in initial stage

由图 5 可知,结构特征变异性与样品尺寸呈负相关,即 σ_i 和 CV_i 均随着 l_i 的增加而显著减小,并逐渐以指数拟合关系降低至接近 0。不同结构特征参数的 CV_i 随 l_i 变化的趋势相似,均可用指数函数拟合。 CV 范围和误差带波动差异表明,不同结构特征尺寸效应(收敛性)存在显著差异,说明同一堆肥样品中不同结构特征变异性随尺寸变化程度不同。进一步佐证了,不同属性存在显著的尺寸依赖性差异,意味着相应 RVE 是不同的。

与观测测量值波动(图 5)相比,统计数据(图 6)在评估 RVE 方面提供了更高的准确性($LSD, p \leq$

0.05)。从图 5、6 可知,堆体细观结构特征尺度效应敏感程度排序依次为: $P_{Clo} > CD > P_{Tot} \approx P_{Con} \approx SSA > FD$ 。已有研究表明,对于具有复杂孔隙系统的多孔介质,RVE 会因所关注结构特征或物理性质不同而存在一定差异^[33]。因此,在相同精度要求下,多参数约束 RVE 综合评价有助于提高堆体结构 RVE 合理性和可靠性^[30-31]。

2.4 堆肥过程堆体尺寸效应

RVE 受到堆肥堆体结构特征尺寸效应影响,并且与堆肥堆体结构异质性程度正相关。比较堆肥过程不同结构特征参数 CV ,发现尺寸效应与所选结构特征参数密切相关。在堆肥过程中,堆体持续蠕变,结构异质性也随之变化。尽管图 7 显示,不同堆肥阶段样品总孔隙率、连通孔隙率、分形维数和连接密度等结构特征参数 CV 几乎没有显著性差异($p > 0.05$),但从箱体高度和虚线分布仍可以看出,在堆肥初始阶段和腐熟阶段,堆体结构异质程度相对较高,可能是因为在初始阶段,堆肥基质未压实填充,堆体处于蓬松状态,与堆肥初始阶段堆体总孔隙率

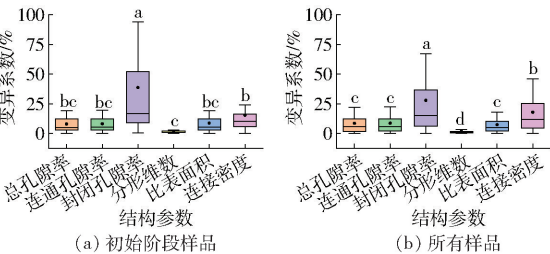


图 6 结构参数的尺寸效应差异

Fig. 6 Size effect difference of structural parameters

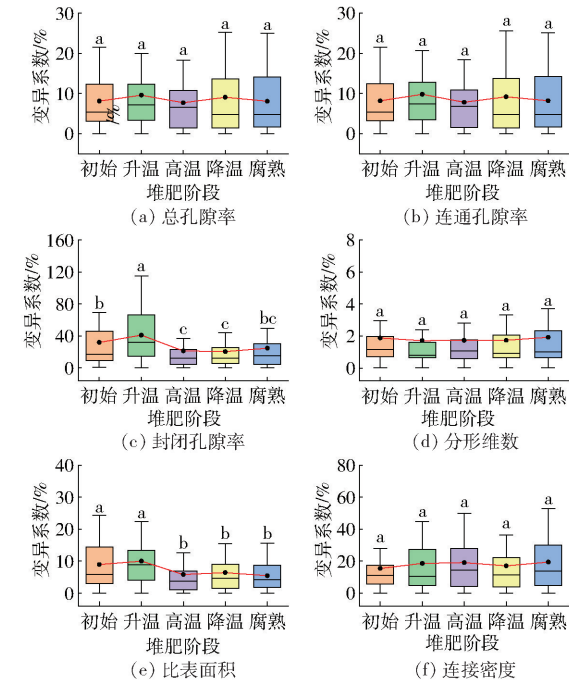


图7 堆肥过程堆体结构异质性差异

Fig. 7 Difference of pile structure heterogeneity in composting process

最大的情况相呼应^[20]。在堆肥升温、高温和降温阶段,由于堆体重力沉降和堆肥生物沉降的共同作用,堆体结构尺寸持续减小,结构异质性也降低;当堆肥进入腐熟阶段,堆体逐渐恢复蓬松,导致堆体的结构异质性略有增加^[20]。作者前期研究显示,整个堆肥过程封闭孔隙率占比均很小($<1\%$),且堆肥后期趋于稳定^[20]。封闭孔隙率变异系数在不同堆肥阶段呈一定差异($p<0.05$),可能是统计稳健性不足所致。而不同堆肥阶段比表面积变异系数存在差异的原因,与此有关,这需在今后的研究中深入解析。

2.5 堆体结构 RVE 演变

RVE 尺寸是介于细观和宏观尺度之间的一种过渡尺度,而非固定数值。其判定具有些许主观性,依赖于目标特征参数的稳定性,并受所关注属性的可容忍偏差影响。通过比较不同 ε 和不同结构特征参数 RVE 差异(图 8),发现 RVE 与所选结构特征参数密切相关,并受精度设定影响。根据研究对象和目的的不同,RVE 尺寸定量标准存在差异,变异系数 ε 设定主要有 50% ^[22, 34]、 20% ^[35-36]、 10% ^[22, 26]和 5% ^[23, 37]等。 ε 越小,RVE 越大,意味着样品结构特征准确性更高。由于 RVE 尺寸可能是多种因素(如原料配比、基质含水率和压实程度等)共同作用的结果,不同结构特征参数对 l_i 变化的敏感度不同(图 8),难以使用相同的 ε 确定同一材料在不同结构特征参数下 RVE 尺寸。因此,综合考虑样本多个结构参数,并选取最大估算值作为 RVE

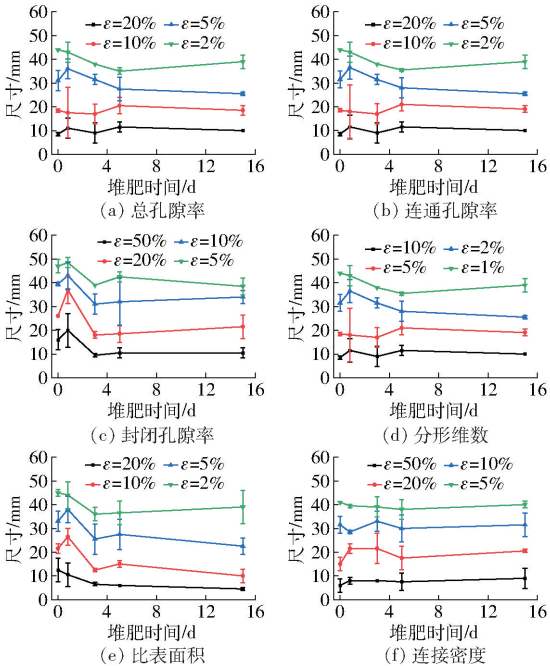


图8 堆肥过程堆体结构 RVE 尺寸变化

Fig. 8 Size change of pile structure RVE during composting

尺寸可能更为合适。

图 8 中最小 ε 对应绿色曲线,堆肥初始阶段和腐熟阶段,各结构特征 RVE 尺寸均较大,与 2.4 节堆体结构异质性差异相呼应。基于 $\varepsilon=5\%$,堆肥过程堆体结构的 P_{Tot} 、 P_{Con} 、 P_{Clo} 、 SSA 、 FD 和 CD 对应正方体 RVE 边长分别为 $(30.3 \pm 4.0) \text{ mm}$ 、 $(30.6 \pm 4.2) \text{ mm}$ 、 $(43.1 \pm 4.5) \text{ mm}$ 、 $(7.9 \pm 0.7) \text{ mm}$ 、 $(29.3 \pm 6.2) \text{ mm}$ 和 $(39.5 \pm 1.1) \text{ mm}$ 。由于堆体 P_{Clo} 平均值小于 1% ,相对于 P_{Tot} ,微小扰动将对 $CV_{P_{Clo}}$ 产生较大影响,导致精确度不足。同时,封闭孔隙对堆肥微曝气过程的影响有限,因此不考虑其 RVE。在相同 ε 下, RVE_{CD} 在所考虑的结构特征中尺寸相对最大,因此可将 CD 作为堆体结构 RVE 的评价依据,与拓扑连通性在多孔介质渗流中的重要性一致。考虑 9 点立方体覆盖采样窗口法的子样品重合性(图 2),以及堆体在宏观尺度上空间效应(如分层效应^[32]),在 $50 \text{ }\mu\text{m}/\text{像素}$ 条件下,可以认为参考样品尺寸 $(51.2 \text{ mm} \times 51.2 \text{ mm} \times 51.2 \text{ mm})$ 具有较强的统计代表性和冗余度,能够满足堆体结构 RVE 要求。此时 RVE_{V_0} 尺寸 $(1.342 \times 10^5 \text{ mm}^3)$ 远大于约 10^3 mm^3 的堆肥团聚体样品^[7],表明团聚体在表征整体堆体结构方面可能不够代表性。对于研究堆肥的均质行为和反映堆体整体结构特征,在堆体细观 RVE 解析域上获得宏观尺度响应,消除了细观尺度效应,可能比团聚体更有效性。

由于多孔介质性质很大程度上取决于其结构,包括孔隙度、比表面积和连接密度等。如果结构属性具有代表性,将导致物理属性的合理估计。在此

情况下,基于三维孔隙几何形状估算 RVE 可能比基于物理性质更为方便^[15]。随着成像技术不断进步,未来有望获得更高分辨率和更大视场的三维图像,使 RVE 能够包含样品的更多细观结构信息。

3 结束语

结合 Micro-CT 技术和统计方法,分析了牛粪-麦秸堆肥堆体的细观结构特征(包括 P_{Tot} 、 P_{Con} 、 P_{Clo} 、 SSA 、 FD 和 CD)及其尺寸效应。验证了堆体细观结

构 RVE 存在。分析了不同结构特征对样品尺寸的敏感性差异、 ε 对 RVE 临界尺寸的影响,以及不同堆肥阶段样品的 RVE 尺寸变化。结果显示,在 $\varepsilon = 5\%$ 条件下,51.2 mm × 51.2 mm × 51.2 mm 样品尺寸具有统计代表性。建立了堆体结构特征在细观异质性与宏观均匀性之间的联系。Micro-CT-RVE 模型和方法为堆肥细观过程研究提供了物理模型基础,并为堆肥细观机理和工艺优化的多尺度研究提供理论依据和技术工具。

参 考 文 献

[1] 李骅,朱振明,王居飞,等. 滚筒式堆肥反应器通风搅拌系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 395-404. Li Hua, Zhu Zhenming, Wang Jufei, et al. Design and test of aeration and mixing system for rotary composting reactor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 395-404. (in Chinese)

[2] 王丽丽,郑京克,徐名汉,等. 寒区农村户用好氧堆肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2026, 57(2): 364-374. Wang Lili, Zheng Jingke, Xu Minghan, et al. Design and experiment of aerobic composting system for rural households in cold regions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(2): 364-374. (in Chinese)

[3] Wang Y, Ai P. Integrating particle physical geometry into composting degradation kinetics[J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 514-520.

[4] Walling E, Trémier A, Vaneeckhaute C. A review of mathematical models for composting[J]. Waste Management, 2020, 113: 379-394.

[5] 葛金怡,黄光群,黄晶,等. 猪粪颗粒粒度、粒形的量化表征方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 192-196. Ge Jinyi, Huang Guangqun, Huang Jing, et al. Quantitative characterization of particle size and shape of pig manure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 192-196. (in Chinese)

[6] Ge J, Huang G, Yang Z, et al. Characterization of the dynamic thickness of the aerobic layer during pig manure aerobic composting by Fourier transform infrared microspectroscopy[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(9): 5043-5050.

[7] Guo X X, Wu S B, Wang X Q, et al. Impact of biochar addition on three-dimensional structural changes in aggregates associated with humus during swine manure composting[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280:124380.

[8] Ruggieri L, Gea T, Artola A, et al. Air filled porosity measurements by air pycnometry in the composting process: a review and a correlation analysis[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(10): 2655-2666.

[9] Huerta-Pujol O, Soliva M, Martínez-Farré F X, et al. Bulk density determination as a simple and complementary tool in composting process control[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(3): 995-1001.

[10] Illa J, Prenafeta-Boldú F X, Bonmatí A, et al. Empirical characterisation and mathematical modelling of settlement in composting batch reactors[J]. Bioresource Technology, 2012, 104: 451-458.

[11] Fish J, Wagner G J, Keten S. Mesoscopic and multiscale modelling in materials[J]. Nature Materials, 2021, 20(6): 774-786.

[12] Wang J, Zhang W, Tan C, et al. Multi-dimensional size effects and representative elements for non-persistent fractured rock masses: a perspective of geometric parameter distribution[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(9): 2339-2354.

[13] Koestel J, Larsbo M, Jarvis N. Scale and REV analyses for porosity and pore connectivity measures in undisturbed soil[J]. Geoderma, 2020, 366:114206.

[14] El Moumen A, Kanit T, Imad A. Numerical evaluation of the representative volume element for random composites[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2021, 86:104181.

[15] Zubov A S, Khlyupin A N, Karsanina M V, et al. In search for representative elementary volume (REV) within heterogeneous materials: a survey of scalar and vector metrics using porous media as an example[J]. Advances in Water Resources, 2024, 192:104762.

[16] 褚召祥,周国庆,饶中浩,等. 岩土孔隙率表征单元及其分形近似判据[J]. 中国科学:技术科学,2021,51(9):1107-1126. Chu Zhaoxiang, Zhou Guoqing, Rao Zhonghao, et al. Porosity-based representative elementary volume for geomaterials and its fractal theory-based approximate criterion[J]. Scientia Sinica Technologica, 2021, 51(9): 1107-1126. (in Chinese)

[17] Zhang X, Ma F, Yin S, et al. Application of upscaling methods for fluid flow and mass transport in multi-scale heterogeneous media: a critical review[J]. Applied Energy, 2021, 303: 117603.

[18] Ge J, Huang G, Huang J, et al. Mechanism and kinetics of organic matter degradation based on particle structure variation during pig manure aerobic composting[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 292: 19-26.

- [19] Xiong J, Ma S, He X, et al. Nitrogen transformation and dynamic changes in related functional genes during functional-membrane covered aerobic composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 332:125087.
- [20] Qiu R, Zhong W, Zhang H, et al. A novel Micro-CT approach for in situ visualization of the spatial dynamics of mesovoids in aerobic composting piles[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 369:122329.
- [21] Wu H, Yao Y, Zhou Y, et al. Analyses of representative elementary volume for coal using X-ray μ -CT and FIB-SEM and its application in permeability predication model[J]. *Fuel*, 2019, 254:115563.
- [22] Singh A, Regenauer-Lieb K, Walsh S D C, et al. On representative elementary volumes of grayscale Micro-CT images of porous media[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(15):2020GL088594.
- [23] Yio M H N, Wong H S, Buenfeld N R. Representative elementary volume (REV) of cementitious materials from three-dimensional pore structure analysis[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 102: 187-202.
- [24] Fang H, Sang S, Liu S, et al. Determination of representative elementary volume of digital coal based on fractal theory with X-ray CT data and its application in fractal permeability predication model[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2022, 16(3): 657-670.
- [25] Yu L, Zhang J, Liu R, et al. Estimation of the representative elementary volume of three-dimensional fracture networks based on permeability and trace map analysis: a case study[J]. *Engineering Geology*, 2022, 309: 106848.
- [26] Yang L, Xu W, Meng Q, et al. Numerical determination of RVE for heterogeneous geomaterials based on digital image processing technology[J]. *Processes*, 2019, 7(6):346.
- [27] Ge J, Huang G, Huang J, et al. Particle-scale modeling of oxygen uptake rate during pig manure-wheat straw composting: a new approach that considers surface convection[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 97: 735-741.
- [28] Wang G, Qin X, Shen J, et al. Quantitative analysis of microscopic structure and gas seepage characteristics of low-rank coal based on CT three-dimensional reconstruction of CT images and fractal theory[J]. *Fuel*, 2019, 256: 115900.
- [29] Gundersen H J G, Boyce R W, Nyengaard J R, et al. The conneneur Unbiased estimation of connectivity using physical disectors under projection[J]. *Bone*, 1993, 14: 217-222.
- [30] 王小明, 郑银河. 裂隙岩体表征单元体及尺寸效应研究进展[J]. *岩土力学*, 2015, 36(12):3456-3464.
Wang Xiaoming, Zheng Yinhe. Review of advances in investigation of respresentative elementary volume and scale effect of fractured rock masses[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(12):3456-3464. (in Chinese)
- [31] Gitman I M, Askes H, Sluys L J. Representative volume: existence and size determination[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, 74(16): 2518-2534.
- [32] 衣淑娟, 邵浩宸, 沈玉君, 等. 牛粪和玉米秸秆混合好氧堆肥过程分层规律[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(3): 180-189.
Yi Shujuan, Shao Haochen, Shen Yujun, et al. Stratification law of the mixed aerobic composting process of cow manure and maize stovers[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(3): 180-189. (in Chinese)
- [33] Fan M, Chen Y, Wan K. Representative elementary volume analysis of hardened cement paste during hydration using X-ray computed tomography[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 277: 122268.
- [34] Xia L, Zheng Y, Yu Q. Estimation of the REV size for blockiness of fractured rock masses[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 76: 83-92.
- [35] Zhang D, Zhang R, Chen S, et al. Pore scale study of flow in porous media: scale dependency, REV, and statistical REV [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(8): 1195-1198.
- [36] Li M, Zhou Z, Chen M, et al. Topological representative element volume of fractured rock mass[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(6): 2844.
- [37] Wang Z, Wang T, Wang W, et al. Size of representative elementary volume for heterogeneous rocks evaluated using distinct element method[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 18(4): 1883-1900.