

顾及属性相似性和空间异质性的滇中受污红土纳微过程模拟

潘青德

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2026年8月13日; 录用日期: 2026年9月16日; 发布日期: 2026年10月19日

摘要

空间复杂系统具有明显的空间结构异质性, 其时空过程模拟中, 属性相似性和空间异质性是过程模拟系统是否能正确表达过程中规律的两个重要影响因素。不同尺度不同逻辑域内的空间划分, 是空间聚类或分类的重要制约因素, 对属性相似性和空间异质性有关键影响。如何在确保特定空间场景基本格局的系统性与完整性合理表征的情况下, 确保属性相似性的精度和空间异质性的准确度, 以建立可靠模拟模型, 表征时空过程的不同尺度或不同程度的规律, 一直是跨域跨尺度复杂系统时空建模与模拟分析研究中亟待解决的一个重要科学问题。基于特殊红土纳微过程模拟, 对不同尺度上的空间异质性进行全局空间自相关分析和局部空间自相关分析, 同时采用核密度分析创建二维热力图对不同尺度上的空间异质性进行直观表达, 然后提出采用跨域尺度不变特征进行多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)建模, 通过在酸碱不同逻辑域内探查尺度不变特征, 然后查找跨域尺度不变特征, 最后利用尺度不变特征进行MAS模拟, 采取重构的特征图像与对应养护天数的原始特征图像进行有效性验证, 从而确定了采用跨域尺度不变特征构建MAS模型的有效性。

关键词

属性相似性, 空间异质性, 自相关分析, 跨域尺度不变特征, MAS时空模拟, 交叉熵, Wasserstein距离

Nano-Micro Process Simulation of Contaminated Laterite in Central Yunnan Considering Attribute Similarity and Spatial Heterogeneity

Qingde Pan

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: August 13, 2026; accepted: September 16, 2026; published: October 19, 2026

Abstract

Spatially complex systems have obvious spatial structural heterogeneity. In the simulation of their spatiotemporal processes, attribute similarity and spatial heterogeneity are two important factors affecting whether the process simulation system can correctly express the laws of the process. Based on the simulation of special laterite nano-micro processes, the project conducts global spatial autocorrelation analysis and local spatial autocorrelation analysis on spatial heterogeneity at different scales. At the same time, it uses kernel density analysis to create a two-dimensional heat map to intuitively express spatial heterogeneity at different scales. Then, it is proposed to use cross-domain scale-invariant features for Multi-Agent System modeling to take into account attribute similarity and spatial heterogeneity, by exploring scale-invariant features in different logical domains of acid and alkali, and then finding cross-domain scale-invariant features, and finally using cross-domain scale-invariant features for MAS.

Keywords

Attribute Similarity, Spatial Heterogeneity, Autocorrelation Analysis, Cross-Domain Scale-Invariant Features, MAS Spatiotemporal Simulation, Cross Entropy, Wasserstein Distance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

云南省滇中地区作为中国西南地区的重要组成部分，其独特的红土资源在农业生产和生态环境保护中扮演着重要角色。不断发展起来的关于土的理论运用在解决土的不同破坏情况仍然还有一些不足之处，大量事实表明了土的工程特性在很大程度上受到其微观结构系统的控制[1]。土体的微观结构是土体的一个重要质量指标，不仅反映了土体的形成条件，同时也是决定土体物理、力学及其它工程性质的一个重要因素[2]。由于影响土体性质的因素很多、很复杂，因此以时空模拟建模为主的时空模型在对土体纳微结构特征的分析更优于以数值分析为主的数学模型，在土体微观结构的研究上有更高的适用性。

当前研究在顾及属性相似性和空间异质性的空间划分、重构、时空模拟方面取得了一定的进展，但仍面临着如何处理更复杂、更大规模的时空数据的挑战。对于如何提高空间划分，重构以及时空模拟的准确性以及对异构数据的融合能力方面仍然没有得到解决。时空模拟在地质学和土壤科学领域的一个重要组成部分就是红土微结构研究，它关注红土这种特殊土壤类型的微观结构特征及其对土壤性质的影响。红土的微结构包括土壤颗粒的大小、形状、排列方式以及孔隙分布等等，这些红土微观结构的属性相似性和空间异质性对红土的物理以及其他一些特征性质都有或大或小的关系。

土体微观 SEM 图像的不同特征提取上在整个地球上不同国家都有一定的研究基础。王宝军等[3] (2004)利用 GIS 软件来完成土体扫描电镜图像的处理，并直接计算每一个颗粒的等效面积和周长。唐朝生等[2] (2008)等通过对灰度的 SEM 图像二值化，土样的表观孔隙率就根据统计一幅二值图中黑色像素个数与总像素(黑色像素 + 白色像素)个数之比得到。王宝军[4] (2008)等人利用 GIS 提供的面积和体积计算方法，分别研究了利用 SEM 图像计算图样孔隙度的二维和三维方法，并对其进行分析和比较。刘科，

钟志成[5] (2018)提出基于阈值筛选的扫描电子显微镜图像的特征提取方法。

国内对于基于 SEM 图像对土体微观特征的提取土体宏观和微观建模也取得了成果,李好好[6] (2020)以南沙软土为研究对象,在宏观层面上定性、微观层面上定量分析南沙软土的蠕变变形机理,并通过建立软土蠕变本构模型描述软土蠕变过程。朱铨雯[7] (2020)以珠海横琴软土作为研究对象,在不同荷载的作用条件下通过进行一系列宏观试验和微观试验分别系统地研究土体相应的宏观和微观参数与其蠕变变形特性的关系,分析其蠕变特性的宏观表现与微观蠕变机制的内在联系,并建立适合珠海软土的非线性蠕变本构模型,以指导工程设计和实践。郭叶霞[8] (2021)依托延安新区黄土高填方工程,系统研究了填方区黄土填料的微观结构、渗透和力学特性,分析了压实黄土初始干密度和含水率对其渗透和力学特性的影响,揭示了压实黄土渗透性和力学特性的微观机理。然而,上述国内对于土体纳微结构特征的时空建模大多是在对于软土、黄土的研究上。

国外研究的重点还是在基于 SEM 图像对土体微结构的研究上。Tovey [9]对土体结构的电子显微镜图像进行了定量分析尝试;Tovey 等应用计算机图像应用系统对土体结构的图像外貌进行了定量分析[10]。Prakongkep [11] (2010)等使用 ImageJ 软件定量评价了土壤中砂颗粒的 SEM 图像,用 Feret 值与圆度值来表示砂颗粒的大小和形状,得出来源于不同材质土壤中砂颗粒 Feret 值和圆度值的分布特征,并解释了呈现不同分布特征的原因。为了更准确地量化岩土体微观结构,国内外学者设计与开发出许多图像处理软件,并得出了大量的研究成果[12]。B. Shi [13] (1999)等人用扫描电子显微镜(SEM)制备土壤样品,用于制备土壤样品,实现冷冻后观察表面的冷冻还原,该方法能够保留土壤的初始微观结构,并最大限度地减少在其他技术制备的样品上获得的 SEM 图像上经常出现的人造空隙和错误取向等缺陷。申志福[14] (2021)等人提出了一种基于电镜扫描原理、从扫描图像中提取黏土微观结构局部几何信息的方法。

目前在土壤微观结构上所进行的研究,主要内容是纳米尺度下的土壤物理化学特性测定;借助高性能计算机,模拟土壤颗粒之间的相互作用力,以及其在不同环境因素影响下的变化,从而更好地理解红土的纳微结构和稳定性;结合宏观土壤力学模型和微观颗粒模型,构建能够描述红土在不同空间尺度下物理性质的综合模型;利用地质工程软件,对红土的力学行为、水热过程等进行模拟,模拟红土随时间变化的宏观与微观结构;研究红土结构在不同环境条件下的演变,进而揭示其在环境中的作用和变迁,利用机器学习算法分析土壤特性数据,预测土壤结构的变化趋势,优化模拟过程。但是土的微观结构具有明显的空间结构异质性,如何能确保土的微观结构系统性与完整性合理表征的情况下提取出关键特征这是一个非常重要的限制条件,这对于模拟模型构建和研究结果都存在重大影响。土的微观特征相似性和空间异质性的合理划分是土的微观结构能否能正确表达对土的宏观工程特性因果效应的两大关键因子。不同尺度或不同方法的空间划分,是空间聚类分类的重要制约因素,对属性相似性和空间异质性有关键影响。如何才能建立可靠的模拟模型,提取关键的特征,忽略混淆因素,探究表征土的微观结构及其工程特性的因果效应仍然是一个问题。

我们开展这个研究,一方面通过时空模拟查找一种合适的基于属性相似性和空间异质性的土体微结构划分重构机制,从而为土的微观结构时空模拟模型构建进行探索。另一方面,顾及属性相似性和空间异质性的约束条件下进行时空模拟框架探究,使得从土的微观结构对工程特性的因果效应更加精确和可靠,达到优化的目的,对空间智能模拟从相关关系到因果推断控制的错误发现率减少具有一定的影响。

2. 研究内容

2.1. 数据来源

在研究中,同一工况下进行不同尺度下的相似性和空间异质性分析比较,同时进行跨域在不同工况下分析,研究数据选择 8%碱浓度下养护 1 天、3 天、5 天、7 天、10 天的污染土 SEM 图像和在环境温度

20℃的5%酸浓度下养护1天、4天、7天、14天、30天的污染土SEM扫描电镜图像作为数据源。研究图像数据的尺度选择每个养护天数下1000X, 2000X, 5000X的污染土SEM图像总共30张作为数据源。

2.2. 技术路线

研究的技术路线具体如图1所示。

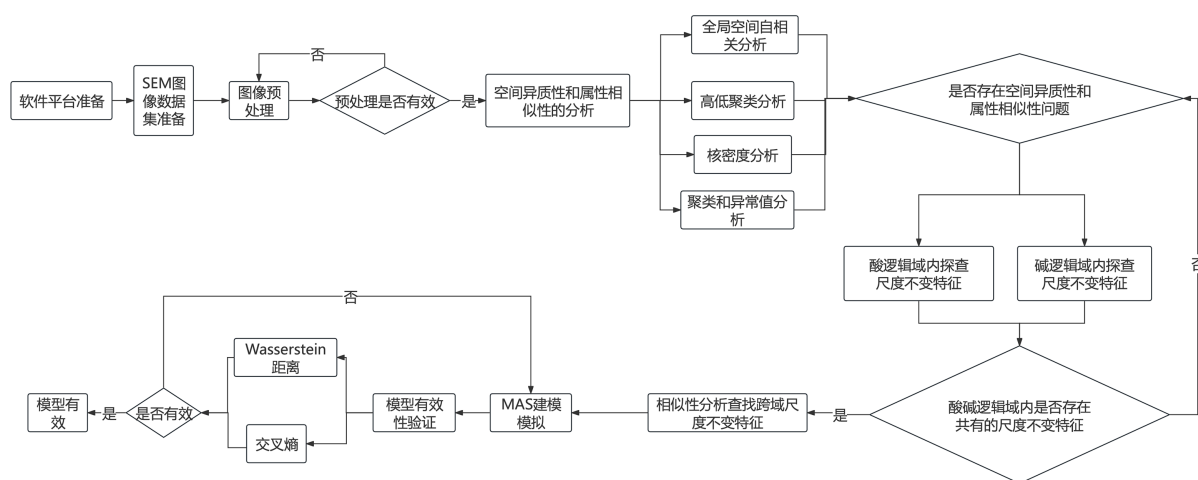


Figure 1. Technical roadmap of the study

图1. 研究的技术路线图

2.3. 属性相似性和空间异质性分析

在酸碱不同逻辑域内,使用GIS软件通过全局空间自相关分析、局部空间自相关分析和核密度分析,研究SEM图像的空间异质性和属性相似性。结果表明,红土微观结构在不同尺度上存在显著的空间异质性和相似性聚集特征。

8%浓度碱污染与5%浓度酸污染条件下的土体微观结构SEM图像在不同尺度下的全局莫兰指数均大于0,呈现正相关。所得的Z得分均非常大,所得P值都为0,小于0.05,且图像像元值的空间分布情况随机产生聚类结果的概率均小于1%。可以反映出土体微观SEM图像具有正的空间自相关性,像元值相似地倾向于聚集在一起,反映出土体微观结构的相似性聚集和空间异质性特征。

8%碱污染图像和5%酸污染图像,经过高低聚类分析后的z均值都为正值,且P值都为0,表明图像不同灰度值像元空间分布具有显著高聚集特征。据统计结果,从高低聚类结果可以看到,呈现出显著高值集聚。从全局来分析,污染土在不同养护天数的几组数据在不同放大倍率下空间分布均具有显著高值集聚特点。

8%浓度碱污染土和5%浓度酸污染土的SEM图像灰度分布均具有比较明显的倾向性,高灰度值和高灰度值集聚,低灰度值和低灰度值集聚,同时存在高低灰度值像元混合的区域情况,在此处存在隔离情况,高/高灰度集聚和低/低灰度集聚在不同尺度的图像上存在不同,根据灰度的聚集情况可以看出,土体微观结构孔隙和土颗粒等微观属性在不同尺度的图像上具有明显的空间异质性和相似性像元值分布的特点。

在实践中,栅格图像空间分布格局、空间结构属性等以及它们的空间异质性是通过图像像元值的空间密集或离散分布情况及其变化来体现的。在需要直观展示其具体状态,采用“热力图”的方式来实现可视化表达,采用核密度分析对栅格图像转换的矢量要素进行分析直观展示图像的空间异质性。通过分析可知,8%碱污染土SEM图像和5%酸污染土SEM图像在不同的尺度上的热力图分布不同,在不同尺

度上存在极大的空间变异性。在进行过程模拟建模分析中，尺度不同导致空间异质性对模型的影响较大，直接进行建模效果较差。同时对于模型的泛化适用性较差。为了解决这个问题，在建模中需要顾及同域的不同尺度的空间异质性和属性相似性以及跨域的模型泛化，在 MAS 过程模拟中采用跨域的尺度不变特征进行建模。

2.4. 跨域尺度不变特征探查

在酸碱不同逻辑域内进行 1000X 和 2000X，2000X 和 5000X 配准后，在 1000X 和 2000X 配准的图像上从 1000X 的图像中裁剪出 2000X 的同一区域；同时在 2000X 与 5000X 配准的图像上从 2000X 的图像上裁剪出 5000X 的同一区域，以此进行后期分析。尺度不变特征是指在不同放大倍率下保持稳定、无明显数值波动，能够客观反映目标本体变化规律的特征。在尺度不变地形模型特征查找中，提取地形结构三维特征以及纹理特征灰度共生矩阵参数来进行探查。地形结构三维特征包括坡度、坡向、剖面曲率、水平曲率、纵向曲率、横向曲率、最小曲率、最大曲率。灰度共生矩阵参数包括均值、方差、协同性、对比度、相异性、信息熵、二阶矩、相关性。根据不同尺度上同一特征的相关性大小来确定该特征受到尺度变化的影响，相关系数越大，说明该特征对尺度变化越不敏感，可以保持尺度影响小，从而确定其为尺度不变特征。对于酸碱不同污染域下的尺度不变特征，对于共有的尺度不变特征采用相似性分析来确定跨酸碱域的尺度不变。

在 8%碱污染条件下的 1000X 和 2000X 提取的同一特征相关性分析，2000X 与 5000X 的同一特征相关性分析中，相关系数均较高的是坡向、剖面曲率、均值和二阶矩，则确定其为 8%碱污染域内的尺度不变特征。

同理，在 5%酸污染条件下的 1000X 和 2000X 提取的同一特征相关性分析，2000X 与 5000X 的同一特征相关性分析中，相关系数均较高的是坡度、坡向、纵向曲率、横向曲率、最小曲率、最大曲率、均值、方差、协同性、对比度、相异性、信息熵、二阶矩，则确定其为 5%酸污染域内的尺度不变特征。

在跨酸碱域进行特征的相似性分析，1000X 和 2000X 配对下酸碱对应相同特征的相似性分析结果表 1 和表 2 中，坡向在 1000X 和 2000X 的相似性都为 1；均值在 1000X 下的相似度为 0.956，在 2000X 下为 0.946；二阶矩在 1000X 下相似性为 0.897，在 2000X 下的相似度为 0.873。

对应 2000X 和 5000X 配对下酸碱对应相同特征的相似性分析结果表 3 和表 4 中，坡向在 2000X 和 5000X 的相似性都为 1；均值在 2000X 下的相似度为 0.953，在 5000X 下为 0.966；二阶矩在 2000X 下相似性为 0.969，在 5000X 下的相似度为 0.901。综合来看，在跨酸碱逻辑域进行同一特征的相似性分析后确定坡向、均值和二阶矩为跨域尺度不变特征。

Table 1. 1000X and 2000X paired under 1000X approximate value matrix
表 1. 1000X 与 2000X 配对 1000X 下近似值矩阵

	坡向 1	均值 1	二阶矩 1	坡向 2	均值 2	二阶矩 2
坡向 1	1	0.968	0.92	1	0.983	0.994
均值 1	0.968	1	0.958	0.967	0.956	0.946
二阶矩 1	0.92	0.958	1	0.92	0.935	0.897
坡向 2	1	0.967	0.92	1	0.984	0.994
均值 2	0.983	0.956	0.935	0.984	1	0.964
二阶矩 2	0.994	0.946	0.897	0.994	0.964	1

Table 2. 1000X and 2000X paired under 2000X approximate value matrix**表 2.** 1000X 与 2000X 配对 2000X 下近似值矩阵

	坡向 1	均值 1	二阶矩 1	坡向 2	均值 2	二阶矩 2
坡向 1	1	0.974	0.9	1	0.974	0.977
均值 1	0.974	1	0.948	0.973	0.946	0.931
二阶矩 1	0.9	0.948	1	0.899	0.907	0.873
坡向 2	1	0.973	0.899	1	0.975	0.977
均值 2	0.974	0.946	0.907	0.975	1	0.926
二阶矩 2	0.977	0.931	0.873	0.977	0.926	1

Table 3. 2000X and 5000X paired under 2000X approximate value matrix**表 3.** 2000X 与 5000X 配对 2000X 下近似值矩阵

	坡向 1	均值 1	二阶矩 1	坡向 2	均值 2	二阶矩 2
坡向 1	1	0.989	0.991	1	0.979	0.983
均值 1	0.989	1	0.993	0.988	0.953	0.954
二阶矩 1	0.991	0.993	1	0.991	0.972	0.969
坡向 2	1	0.988	0.991	1	0.98	0.984
均值 2	0.979	0.953	0.972	0.98	1	0.972
二阶矩 2	0.983	0.954	0.969	0.984	0.972	1

Table 4. 2000X and 5000X paired under 5000X approximate value matrix**表 4.** 2000X 与 5000X 配对 5000X 下近似值矩阵

	坡向 1	均值 1	二阶矩 1	坡向 2	均值 2	二阶矩 2
坡向 1	1	0.987	0.974	1	0.979	0.948
均值 1	0.987	1	0.988	0.986	0.966	0.898
二阶矩 1	0.974	0.988	1	0.973	0.935	0.901
坡向 2	1	0.986	0.973	1	0.98	0.949
均值 2	0.979	0.966	0.935	0.98	1	0.943
二阶矩 2	0.948	0.898	0.901	0.949	0.943	1

3. MAS 模型构建

3.1. MAS 模型

多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)是由众多 Agent 组成的系统,通过智能体之间的交互机制而共同完成一个复杂任务。Agent 可以认为是“个人软件代理”,在较大的层面上讲,Agent 指具有智能的所有物体,Agent 可以认为是计算机硬件和软件。每个 Agent 都具有自己的感知、决策和行动能力,与其他 Agent 进行交互协作,能正确调用自身所具有的知识,对自身所处的环境要素做出调节。

3.2. 土体微观过程变化建模

使用 netlogo 软件平台, 通过设计多种 Agent 来模拟土壤的微观结构变化, 重点关注属性相似性、空间异质性以及土体微观结构完整性对模拟结果的影响。在模型构建中设置静态土体 Agent 来模拟土体三相中的固相土, 受碱溶液渗透后形成孔隙, 金属物质与碱反应生成沉淀物填充孔隙。碱因子 Agent: 动态 Agent, 模拟碱溶液的扩散, 采用随机扩散算法。侵蚀 Agent: 模拟碱液侵蚀作用, 导致孔隙增多、灰度值减小。水 Agent: 与酸分子一起控制酸溶液浓度, 对土壤侵蚀作用较小, 不改变灰度值。时间 Agent: 用于模拟时间变化。

模型中的世界大小基于特征图像大小通过 netlogo 软件中的世界大小手动来进行调整。瓦片设置为固定的 Agent, 模拟土壤颗粒粘聚体。移动 Agent 在其中移动, 模拟土壤孔隙变化。在模型中进行图像灰度映射, 灰度值通过 netlogo 的 pcolor 属性模拟, pcolor 范围为 0~9.9, 灰度值为 0~255。通过将灰度值分配到 pcolor 的 9.9 个等级, 每次 pcolor 变化对应灰度值的变化, 输出时通过乘以系数 25.76 来实现灰度值的精确控制。模型中的 ticks 滑条用于记录时间变化, 模拟现实时间, 通过设置能量和数量控制 Agent 的变化。静态土体 Agent 的灰度值变化采用最大灰度梯度算法规则转换。

3.3. 土体微观过程变化模拟

采用前期确定的跨域尺度不变特征图像作为模型的输入, 在经过处理后导入到模型中, 重复设置移动 Agent 的数量滑块, 设置对应的养护天数, 通过酸碱分子和侵蚀因子的作用改变瓦片的值。在设定的时间点导出灰度矩阵文本文件。将输出的模拟特征图像进行重建, 以此得到模型模拟对应天数后的特征图像。

4. 结果分析

4.1. 8%碱工况下相似性验证分析

模拟的图像特征是极端特殊的跨域尺度不变特征, 一般情况中, 酸、碱域特征图像数据集出现不重叠或者重叠度极少从而相似度极低情况可能性较大, 对于跨酸、碱域的信息熵、相对熵、J-S 距离、Wasserstein 距离等描述数据分布的数据指标, 它们的变动状态, 跨酸碱域是否存在“梯度消失”仍需要讨论。在进行 MAS 建模采用的是跨域尺度不变特征, 在建模后对应在酸碱域内应该都是有效的才能得到验证。因此采用交叉熵和 Wasserstein 距离进行验证其相似度。

对 MAS 模拟输出重建特征图与对应养护天数下未模拟所提取的原始特征图像进行交叉熵分析, 相应的结果和趋势变化如下:

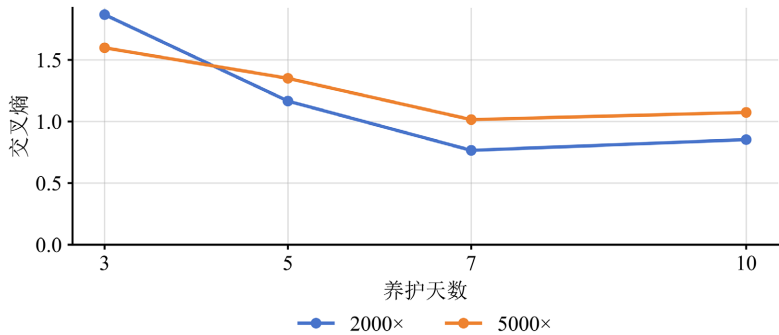


Figure 2. The cross entropy change of 8% alkali mean contrast
图 2. 8%碱的均值对比的交叉熵变化

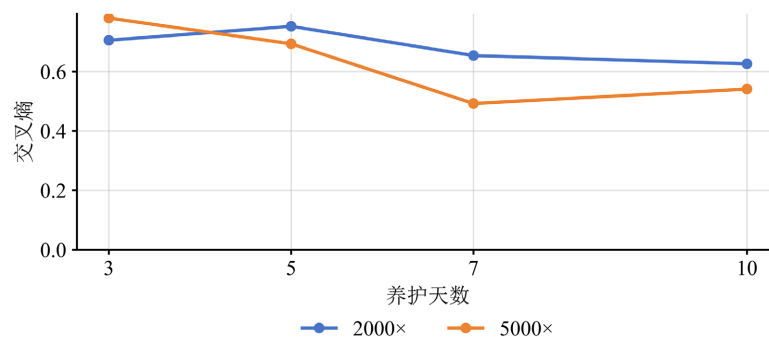


Figure 3. The cross entropy change trend of 8% alkali slope aspect contrast
图 3. 8%碱的坡向对比的交叉熵变化趋势

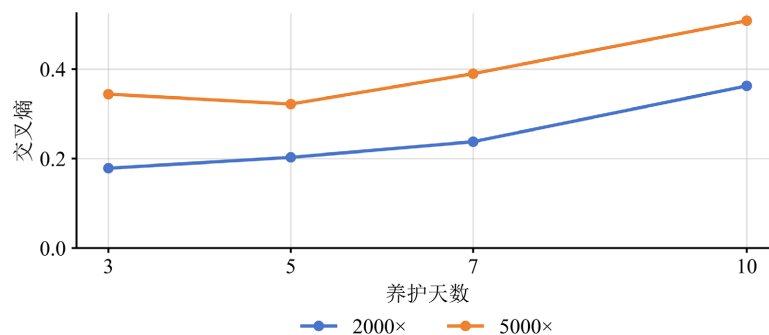


Figure 4. The cross entropy change trend of second moment contrast of 8% alkali
图 4. 8%碱的二阶矩对比的交叉熵变化趋势

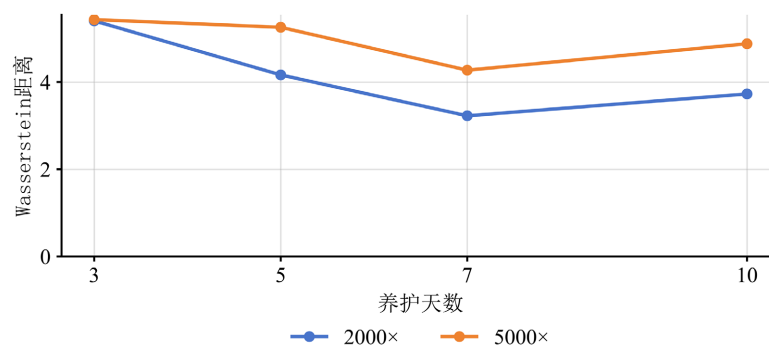


Figure 5. Wasserstein distance variation of mean contrast at different scales of 8% alkali
图 5. 8%碱不同尺度上均值对比的 Wasserstein 距离变化

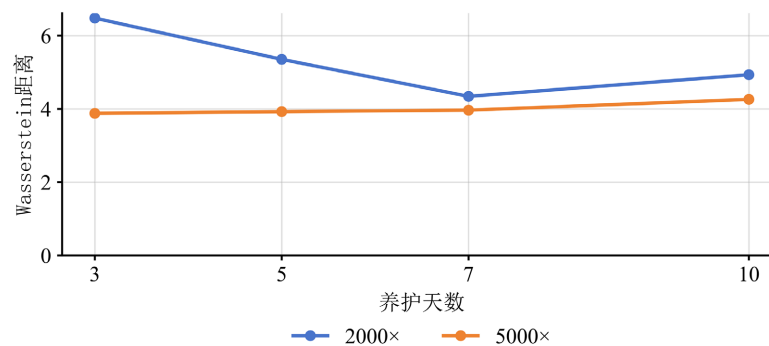


Figure 6. The Wasserstein distance change of aspect contrast on different scales of 8% alkali
图 6. 8%碱不同尺度上坡向对比的 Wasserstein 距离变化

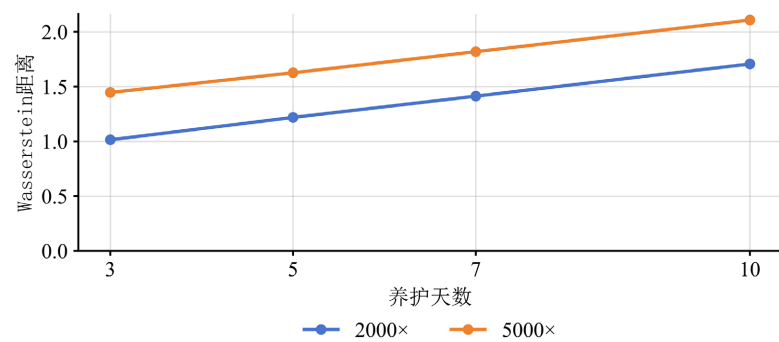


Figure 7. Wasserstein distance variation of second moment contrast at different scales of 8% alkali
图 7. 8%碱不同尺度上二阶矩对比的 Wasserstein 距离变化

经过分析可知，同一尺度上的特征图像交叉熵变化趋势都逐渐趋同，如图 2~4 所示，不同尺度上同一特征图像的变化趋势大致是相同的，不同特征在 2000X 和 5000X 的交叉熵做差分进行随养护天数变化可以发现，坡向和二阶矩的变化都逐渐趋于稳定，但是不同尺度上的均值交叉熵差分变化趋势明显不同。同一尺度上的特征图像 Wasserstein 距离变化趋势都逐渐趋于一致，不同尺度上同一特征图像的变化趋势逐渐趋同的，如图 5~7 所示，不同特征在 2000X 和 5000X 的 Wasserstein 距离做差分进行随养护天数变化可以看出，坡向和二阶矩的变化都逐渐趋于稳定，但是不同尺度上的均值 Wasserstein 距离差分变化趋势明显不同，通过对比均值的交叉熵差分变化趋势和均值 Wasserstein 距离差分变化趋势，发现两个的变化趋势具有一定的相似性。认为跨域尺度不变特征在 8%碱工况下是有效的。

4.2. 5%酸工况下验证分析

分析可知，在 2000X 和 5000X 上的特征图像交叉熵变化趋势具有一致性，不同尺度上同一特征图像的变化趋势大致是相同的，如图 8~10 所示，不同特征在 2000X 和 5000X 的交叉熵做差分进行随养护天数变化可以发现，坡向和二阶矩的变化都逐渐一致和稳定，但是不同尺度上的均值交叉熵差分变化趋势明显不同。同一尺度上的特征图像 Wasserstein 距离变化趋势都逐渐趋于一致，不同尺度上同一特征图像的变化趋势大致是相同的，如图 11~13 所示，不同特征在 2000X 和 5000X 的 Wasserstein 距离做差分进行随养护天数变化可以发现，坡向和二阶矩的变化都逐渐趋于稳定，但是不同尺度上的均值 Wasserstein 距离差分变化趋势明显不同，通过对比均值的交叉熵差分变化趋势和均值 Wasserstein 距离差分变化趋势，发现它们的变化趋势具有一定的相似性。认为跨域尺度不变特征在 5%酸工况下是有效的。

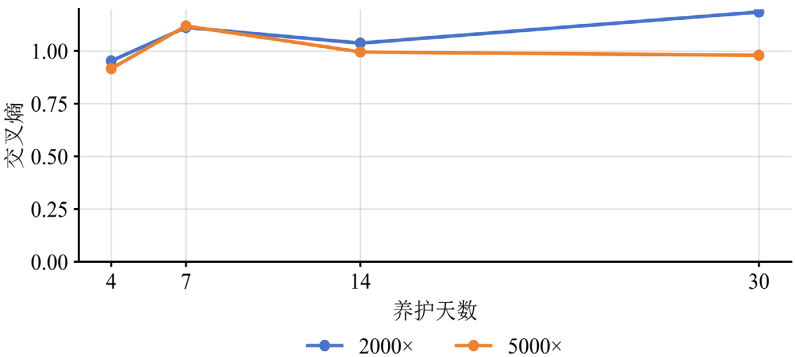


Figure 8. The cross entropy change trend of mean comparison at different scales of 5% acid
图 8. 5%酸不同尺度下均值对比的交叉熵变化趋势

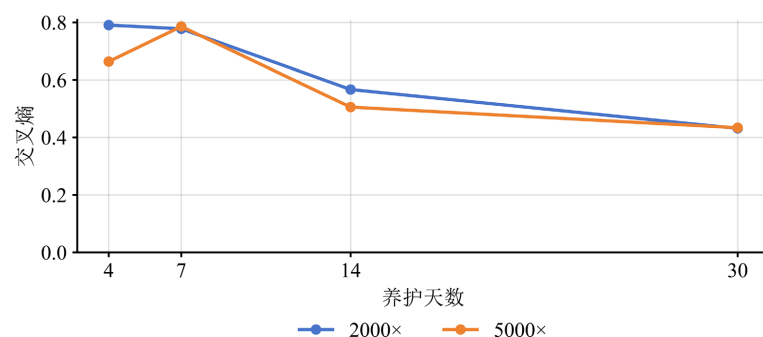


Figure 9. The change trend of cross entropy of slope aspect comparison at different scales of 5% acid
图 9. 5%酸不同尺度上坡向对比的交叉熵变化趋势

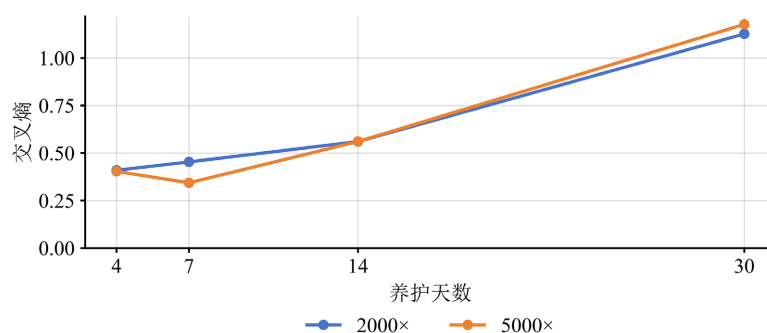


Figure 10. The cross entropy change trend of second moment contrast at different scales of 5% acid
图 10. 5%酸不同尺度上二阶矩对比的交叉熵变化趋势

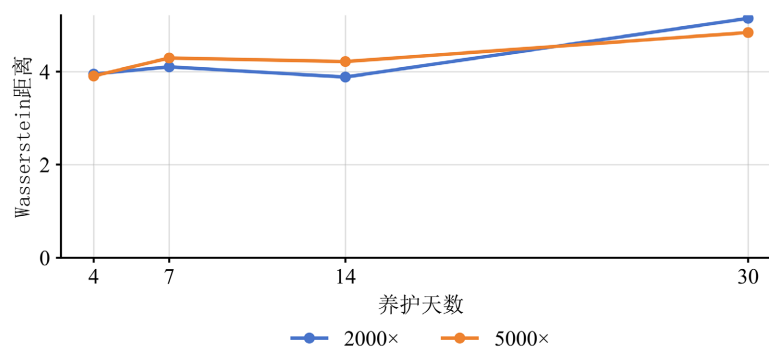


Figure 11. The Wasserstein distance variation trend of mean comparison at different scales of 5% acid
图 11. 5%酸不同尺度上均值对比的 Wasserstein 距离变化趋势

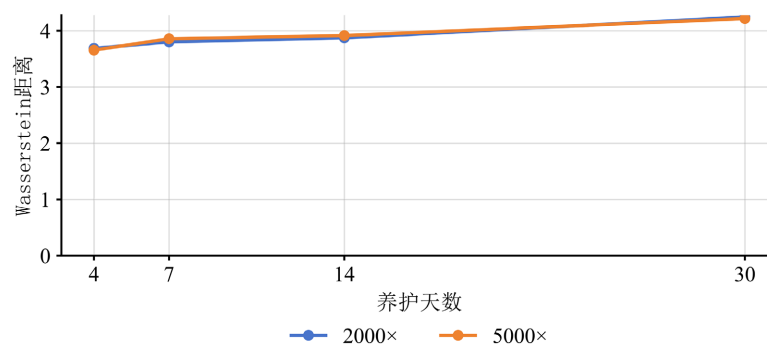


Figure 12. The Wasserstein distance variation trend of slope aspect comparison at different scales of 5% acid
图 12. 5%酸不同尺度上坡向对比的 Wasserstein 距离变化趋势

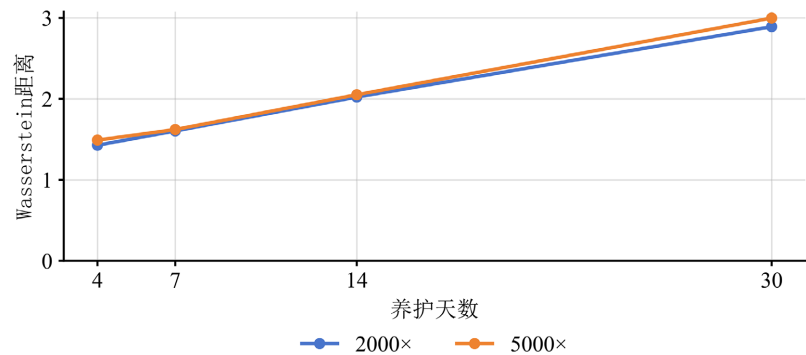


Figure 13. The Wasserstein distance variation trend of second moment comparison at different scales of 5% acid
图 13. 5%酸不同尺度上二阶矩对比的 Wasserstein 距离变化趋势

5. 结论与讨论

5.1. 结论

本文通过结合 SEM 图像分析和 MAS 建模,采用土体微观结构 SEM 图像,采用全局空间自相关分析、高低聚类分析、局部空间自相关分析对图像的空间自相关性进行分析,间接对图像属性相似性和空间异质性进行分析,同时采用核密度分析构建二维热力图直观展示空间异质性,创新地提出采用跨域尺度不变特征进行红土纳微过程时空模拟方法,最终输出重建特征图像,在酸碱域进行交叉熵和 Wasserstein 距离验证了有效性,为土体微观结构的时空模拟提供了新的思路。

5.2. 讨论

文章通过 MAS 模型输出的特征图像与原始 SEM 图像的对比分析,验证了模型的有效性。采用跨域尺度不变特征的 MAS 模型能够较好地模拟红土的纳微过程,模拟图像与原始图像在交叉熵和 Wasserstein 距离上表现出较高的相似性。虽然提出的方法在模拟红土纳微过程时,一定程度上考虑了属性相似性和空间异质性的影响。然而,模型的进一步优化仍需探索,Agent 行为规则的改进和更多尺度不变特征的挖掘仍然是一个问题。

均值是土体纳微结构多物理场耦合过程的综合响应指标,而 MAS 模型的 Agent 规则未能完全刻画完整的物理机制。首先酸和碱与土体矿物的反应速率并非是恒定的,而是随反应物浓度、温度、接触面积呈非线性变化。模型中侵蚀 Agent 的固定作用强度难以反映这种时变特性。其次均值作为零维统计量,丢失了所有空间位置信息。在不同养护天数下,空间异质性的高灰度聚集区或低灰度聚集区位置会发生迁移,这种迁移信息无法通过均值反映,导致基于均值的验证指标对模拟误差产生高度的敏感。然后存在跨域的特征影响,坡向和二阶矩描述的是几何和纹理结构,它们的结构方向性和纹理均匀性不会因为酸碱而改变;均值描述的是土壤的孔隙率,在酸碱域中存在差异。这些都可能均值的模拟效果不理想。

参考文献

- [1] 胡瑞林,王思敬,李向全,等. 21 世纪工程地质学生长点: 土体微结构力学[J]. 水文地质工程地质, 1999(4): 7-10.
- [2] 唐朝生,施斌,王宝军. 基于 SEM 土体微观结构研究中的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 560-565.
- [3] 王宝军,施斌,刘志彬,等. 基于 GIS 的黏性土微观结构的分形研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 244-247.
- [4] 王宝军,施斌,蔡奕,等. 基于 GIS 的黏性土 SEM 图像三维可视化与孔隙度计算[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 251-255.

-
- [5] 刘科, 钟志成. 扫描电子显微镜图像的特征提取方法研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(22): 68-71.
- [6] 李好好. 南沙软土宏微观蠕变试验及本构模型研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2020.
- [7] 朱铨雯. 珠海软土宏微观蠕变试验及非线性模型研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2020.
- [8] 郭叶霞. 压实黄土渗透性与力学特性的微结构效应研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2021.
- [9] Tovey, N.K. (1980) A Digital Computer Technique for Orientation Analysis of Micrographs of Soil Fabric. *Journal of Microscopy*, **120**, 303-315. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2818.1980.tb04150.x>
- [10] Tovey, N.K. and Krinsley, D.H. (1992) Mapping of the Orientation of Fine-Grained Minerals in Soils and Sediments. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, **46**, 93-101. <https://doi.org/10.1007/bf02595039>
- [11] Prakongkep, N., Suddhiprakarn, A., Kheoruenromne, I. and Gilkes, R.J. (2010) SEM Image Analysis for Characterization of Sand Grains in Thai Paddy Soils. *Geoderma*, **156**, 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.01.003>
- [12] Cox, M.R. and Budhu, M. (2007) A Practical Approach to Grain Shape Quantification. *Engineering Geology*, **96**, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.05.005>
- [13] Shi, B., Wu, Z., Inyang, H., Chen, J. and Wang, B. (1999) Preparation of Soil Specimens for SEM Analysis Using Freeze-cut-drying. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **58**, 1-7. <https://doi.org/10.1007/s100640050064>
- [14] 申志福, 孙天佑, 白宇帆, 等. 基于电镜成像原理的黏土微结构参数提取方法[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 933-939.