doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.05.032

基于 CT 扫描的滨海土壤孔隙空间网络表征与渗流模拟

佘冬立　韩　笑　孙枭沁　唐胜强　王洪德
（河海大学农业科学与工程学院，南京 210098）

摘要：以江苏省沿海地区不同围垦区剖面土层原状土样为研究对象，基于 CT 扫描技术，通过构建孔隙网络模型，对土壤孔隙分布及其拓扑关系进行定量表征，统计分析了土壤孔喉参数，包括孔径分布、配位数、喉道半径及喉道长度；运用提取的孔隙网络实现土壤中单相水的渗流模拟，分析土壤的绝对渗透系数（饱和导水率）及其主要影响因素。结果表明，围垦活动对改良土壤孔隙活动起到积极作用，随围垦年限的增加，连通孔隙的半径范围、平均配位数、喉道半径趋于增大，喉道长度趋于减小；浅层土壤的孔隙结构较为良好。单相水模拟中，模拟计算的土壤绝对渗透系数和试验测定的饱和导水率结果吻合度较好，呈现出一致的变化规律。灰色关联度显示喉道半径对土壤渗透性能的影响最大。

关键词：滨海土壤；CT 扫描技术；孔隙结构；孔隙网络模型；渗流模拟
中图分类号：S152.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2023)05-0308-08　　**OSID**：

Coastal Soil Pore Space Network Characterization and Seepage Simulation Based on CT Scanning

SHE Dongli　HAN Xiao　SUN Xiaoqin　TANG Shengqiang　WANG Hongde
(*College of Agricultural Science and Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: The undisturbed soil samples from the profiles of different reclamation areas in Rudong County, Dongtai City and Binhai County of Jiangsu Province were taken as the research objects. Based on CT scanning technology, through the construction of pore network model, the soil pore distribution and its topological relationship were quantitatively characterized, and the soil pore throat parameters, including pore size distribution, coordination number, throat radius and throat length, were statistically analyzed. Using the extracted pore network, the seepage simulation of single-phase water in soil was realized, the absolute permeability coefficient (saturated hydraulic conductivity) of soil and its main influencing factors were analyzed. The results showed that the reclamation activities played a positive role in improving soil pore activities. The specific performance was that with the increase of reclamation years, the radius range, average coordination number and throat radius of connected pores tended to increase, while the throat length tended to decrease. The pore structure of shallow soil layer was better. In single-phase water simulation, the simulated permeability coefficient was in good agreement with the measured saturated hydraulic conductivity, showing a consistent change trend. The grey correlation degree showed that the throat radius had the greatest influence on soil permeability.

Key words: coastal soil; CT scanning technology; pore structure; pore network model; seepage simulation

0　引言

土壤孔隙结构是土壤中水、气、养分等传输和贮存的场所[1]。在不考虑固液界面上其它复杂的物理化学过程时，土壤水分入渗等水力性能主要受到孔隙结构的影响[2-3]。孔隙微观结构通常能很好地解释宏观性能，孔隙尺度上的渗流模拟也成为联系微观结构和宏观性能的有效途径[4-5]。精准表征孔

收稿日期：2022-09-01　修回日期：2022-09-23
基金项目：国家自然科学基金项目(42177393)、江苏省自然资源科技项目(2022046)和南通市自然资源和规划科技创新项目(2022005)
作者简介：佘冬立(1980—)，男，教授，博士生导师，主要从事农业生态与水土过程模拟研究，E-mail：shedongli@hhu.edu.cn

隙内部微观结构，是预测土壤水分渗流等过程的基础。近年来，计算机断层扫描（CT）技术由于可以无扰动、多方位地获取土壤结构的无损图像，成为精细化获取土壤孔隙结构的可靠手段[6-9]。利用 CT 扫描技术，结合具有孔隙拓扑结构的网络模型，能够在孔隙尺度上模拟和预测多孔介质的渗流能力[2,10]。刘向君等[11]基于微 CT 技术，结合图像处理等算法，构建了等效孔隙网络模型，实现了孔隙尺度的渗流模拟并计算得到砂岩的绝对渗透率。闫国亮等[12]则利用过程模拟法和改进的最大球算法，结合逾渗理论开展储层岩石的孔隙结构研究及其渗透率模拟。FAN 等[13]利用微 CT 扫描和 Avizo 软件，建立了煤的等效孔隙网络模型，并用 Comsol 软件模拟了单相水渗流过程。WEI 等[14]利用等效孔隙网络模型定量分析了马兰黄土 3 种类型土壤的内部微观结构，并讨论了微观结构对土壤渗透率的影响。LI 等[15]同样以西北马兰黄土为研究对象，着重模拟研究了土壤渗透性能的各向异性。但现阶段该方法在土壤方面的应用多集中在黄土高原地区，在滨海土壤方面的应用还较少，而滨海围垦区土壤会受到海水浸渍的影响，土壤和地下水接触过程中会发生一系列的物理化学反应，使土壤的空间结构呈现出特殊性[16]。

本文基于 CT 扫描技术，结合孔隙网络模型，对沿海地区不同围垦区剖面土壤的孔隙结构进行统计分析，并模拟单相水的渗流过程，以利于从微观角度分析孔隙分布及拓扑关系，深入了解沿海围垦区土壤中水分渗流特征及其主要影响因素。

1　材料与方法

1.1　试验区概况及土样采集

试验于 2019 年 9—10 月开展。试验样品取自江苏省沿海地区，包括如东、滨海和东台 3 个县市（图 1，图中 Y1 ~ Y3 表示 3 个时期的围垦区，Y1 为 2000 年之后，Y2 为 1960—2000 年，Y3 为 1940—1960 年）。其中东台市试验区位于东台市东北角（32°33′ ~ 32°57′N，120°53′ ~ 121°07′E），区域年平均气温 14 ~ 15℃，年平均降水量 1 059.8 mm，降水量季节变化明显；如东县试验区位于如东县东北部（32°30′ ~ 32°40′N，121°00′ ~ 120°11′E），濒临黄海，年平均降水量为 1 026 mm，平均气温 15℃；滨海县试验区位于盐城市东北部（33°43′ ~ 34°23′N，119°37′ ~ 120°20′E），东濒黄海，平均气温为 14.4℃，年平均降水量 964.8 mm。

各垦区均选择 10 m × 10 m 样地作为每个研究区域的采样点，样地均采用稻麦轮作模式，采样时水稻处于黄熟期。利用 PVC 柱（直径 5.0 cm，高度 5.0 cm）采集样地 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层原状土样，采用 CT 扫描获得孔隙结构图像。PVC 柱在运输过程中用塑料薄膜包裹，置于防震包装袋中，以避免土壤扰动。采用标准环刀（直径 5.0 cm，高度 5.0 cm）采集各土层原状土样，利用定水头法测定土壤饱和导水率 K_s。

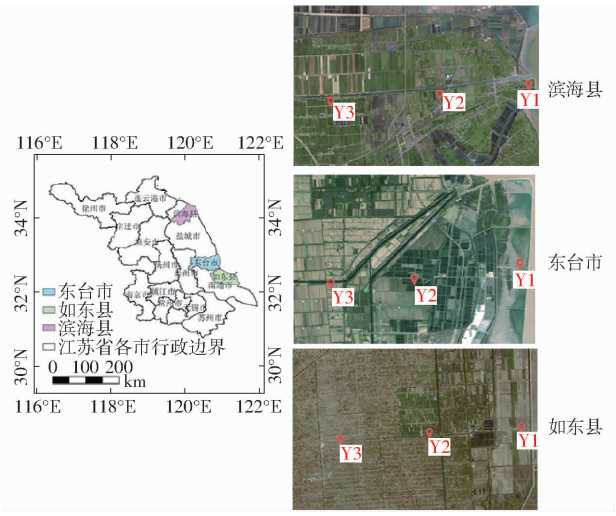


图 1　取样点位置图

Fig. 1　Location of sampling points

1.2　CT 扫描及图像处理

采用工业 CT 扫描仪（Phenix Nano tom S，GE，美国）进行图像扫描，像素分辨率为 25 μm，设置参数包括扫描电压 100 kV、扫描电流 100 μA 和曝光时间 1.25 s。CT 扫描各样本柱获约 2 018 幅二维切片图像。选用中值滤波算法对图像进行降噪处理。图像分割是 CT 技术应用中获取土壤孔隙结构的重要步骤[6]，在本研究中，通过对比处理后的图像与原始图像，根据实际孔隙条件手动确定阈值，获得最终的二值图像。

1.3　表征单元体确定

为保证提取的结构网络具有代表性，同时提高建模和计算效率，有必要确定表征单元体（REV）[17]。本文选取孔隙度作为确定 REV 尺寸的重要参数和约束条件[5]。当孔隙度变化受立方体尺寸影响不明显时，即可确定为 REV 的合理尺寸。通过对 27 组土样的 REV 进行“孔隙度-立方体尺寸”分析，得到 REV 尺寸为 300 体素 × 300 体素 × 300 体素。

1.4　孔隙网络模型

采用最大球算法提取孔隙网络模型[18]。孔隙网络模型将土壤孔隙结构简化为孔隙和喉道两部分，通过对网络结构参数定量分析，确定孔隙网络连通性，最终实现土壤渗透能力的模拟。其中不连通

的“死孔”在模拟过程中不起作用,为提高模拟效率,在提取网络模型时,只保留土壤中连通孔隙。通过对土样 REV 分别提取孔隙网络,土壤孔隙结构被简化成一个几何结构(图 2),其中球代表孔隙,棍则代表孔隙之间的喉道。

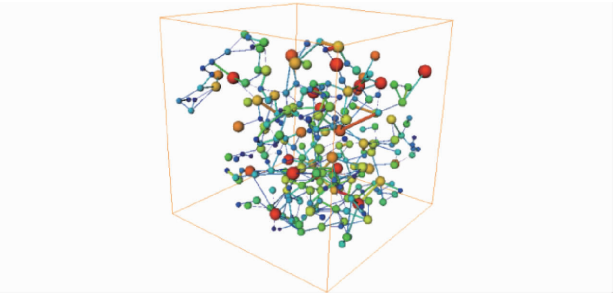


图 2 采集土样提取的孔隙网络模型

Fig. 2 Pore network model extracted from soil samples

1.5 单相水渗流模拟

绝对渗透率用于衡量饱和单相流体通过土壤孔隙的能力[11]。利用构建的孔隙网络结构,选用常态下水流进行土壤绝对渗透性模拟。渗流模拟时将土样相对的两面作为出入边界,假设流体在其余流动边界及孔隙空间内不产生滑移,且整个孔隙空间与外部隔离,流体不发生内外交换。对出入边界赋予压力梯度,设定流体的流入及流出端。本文将边界条件设置为入口压力 130 kPa,出口压力 100 kPa,水动力粘度为 0.001 Pa·s,进行 Z 轴向的渗流模拟。在模拟时,对出入边界上流体的流动速度进行积分可以得到流体流通体积,根据达西定律获得试样的绝对渗透率,计算式为

$$K=\frac{\mu QL}{10^5 A\Delta P} \tag{1}$$

式中 K——模拟得到的试样绝对渗透率,μm^2

μ——流体动力粘度,Pa·s

L——试样在模拟流动方向的长度,cm

A——试样垂直于流动方向的截面积,cm^2

ΔP——出入边界处的压力差,kPa

Q——流体流通体积,cm^3/s

为验证单相渗流模拟结果的可靠性,需要将其与实际试验结果进行对比,因此需要将绝对渗透率换算为绝对渗透系数(饱和导水率),换算关系为

$$K_s=\frac{3.6K\rho g}{\mu} \tag{2}$$

式中 ρ——流体密度,g/cm^3

g——重力加速度,取 10 m/s^2

模拟结果采用样本误差比几何平均数(GMER)、几何标准偏差(GSDER)、均方根误差(RMSE)进行评价[19]。

2 结果与分析

2.1 孔隙网络模型参数

2.1.1 孔隙半径

土壤微观结构是影响土壤渗透率的重要因素,其中孔径分布可以详细表征孔隙结构特征[20]。由图 3 可知,不同土壤孔径分布存在显著差异。随围垦年限的增加,滨海县土样各土层的连通孔隙半径均呈现增大的趋势,较大连通孔隙对孔隙体积的贡献率也相应提高。其中 Y3 处理除 40 ~ 60 cm 土层外,连通孔隙半径多集中在 100 ~ 500 μm 之间。如东县土样中 Y3 处理相较其他处理,各土层中大尺寸连通孔隙含量增加。在 Y1 处理中各土层中对总孔隙体积贡献率最大的孔隙集中分布在 400 ~ 500 μm、300 ~ 400 μm、200 ~ 300 μm 范围。东台市土样在 Y3 处理中,0 ~ 40 cm 土层土壤连通孔隙集中在 100 ~ 400 μm,40 ~ 60 cm 土层中连通孔隙多集中在 100 ~ 300 μm,表明沿着深度方向,土壤连通孔隙半径呈下降趋势。

2.1.2 配位数

孔隙空间中与单个独立孔隙相连的喉道数量被称为孔隙体配位数(CN)[21]。由图 4 可知,各土样孔隙配位数分布较为一致,均呈现较小配位数分布频率较高,随配位数增大其分布频率显著降低。滨海县土样 Y1 ~ Y3 处理,各深度土壤孔隙配位数频率分布曲线逐渐变缓,表明随围垦时间增加,土壤孔隙平均配位数有增加趋势,孔隙局部连通性增强。同样地,东台市土样在 0 ~ 20 cm 土层中,CN 大于等于 6 时配位数频率分布由大到小依次为 Y3、Y2、Y1。不同土层孔隙配位数呈现的规律为当 CN 大于等于 6 时,0 ~ 20 cm 土层的配位数频率分布最大,占孔隙总数的 10.91%;随土层深度增加,配位数频率分布降低,40 ~ 60 cm 土层的配位数频率分布最小,占孔隙总数的 2.56%,孔隙空间的局部连通性随土层深度增加而降低。

2.1.3 喉道尺寸

喉道是相连孔隙之间的狭窄通道,喉道半径表征流体迁移通道的大小,在一定程度上反映流体渗透的难易程度。随围垦时间的增加,较大半径喉道占比有所提高(图 5)。同时在 3 种深度处理中,0 ~ 20 cm 土层中半径大于 200 μm 的喉道占比在全部深度处理中均为最高。东台市 0 ~ 40 cm 土层相较于 40 ~ 60 cm 土层,土壤喉道半径分布范围更广。如东县土样除 Y1 处理外,半径大于 200 μm 的喉道占比随土层深度增加而降低。

图 6 为各 REV 的喉道长度频率分布及累积频

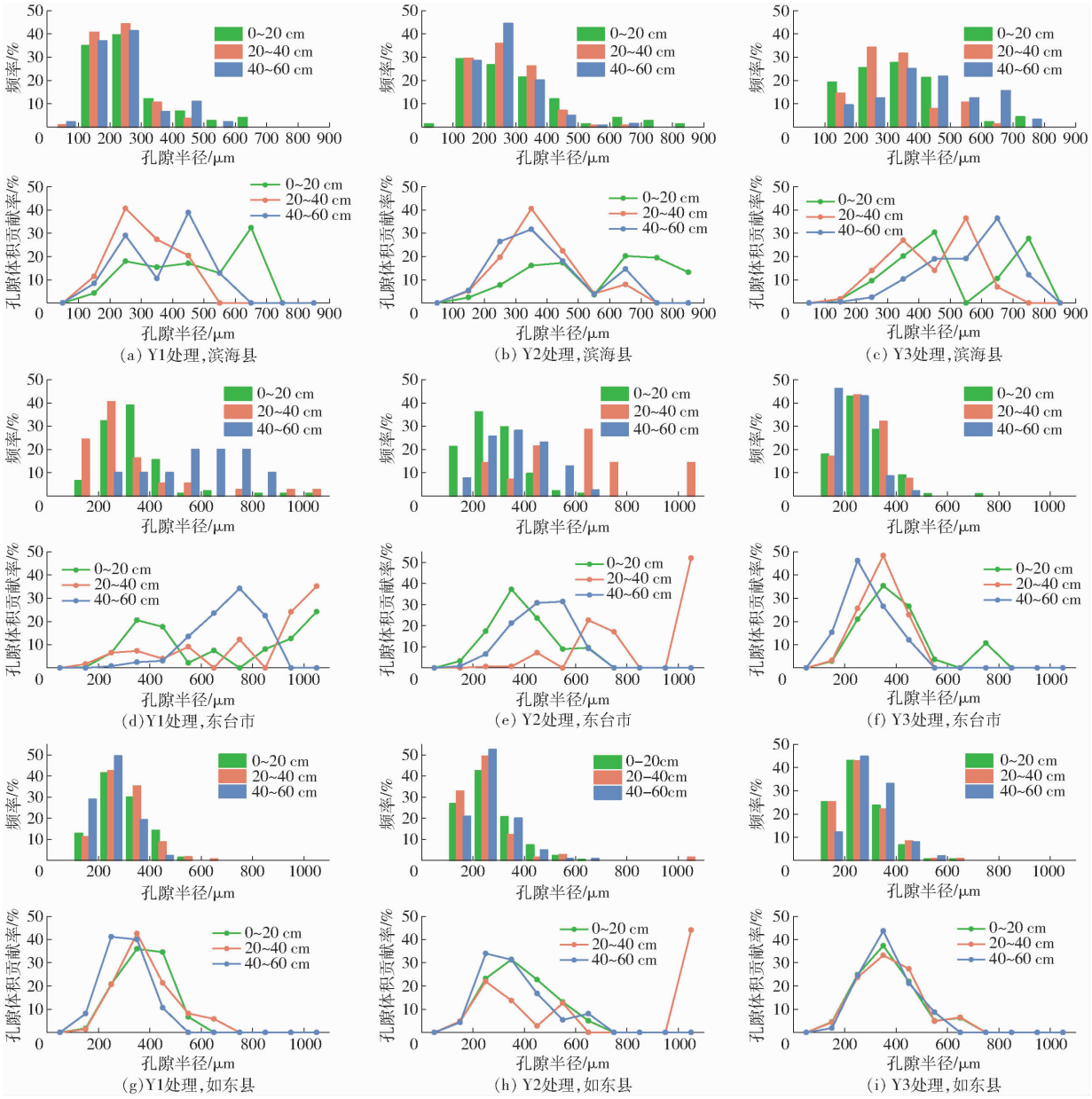


图 3　REV 连通孔隙半径分布及孔隙体积贡献率

Fig. 3　Radius distribution and volume contribution rate of connected pores of REV

率分布。各土样喉道长度频率分布呈现单峰曲线。滨海县土样随土层深度增加,喉道长度有增大的趋势,各土层的平均喉道长度为 964.08、991.81、1 206.63 μm。东台市土样随围垦时间的增加,各土层的平均喉道长度分别为 1 485.29、1 635.97、1 000.09 μm。如东县土样在不同土层深度下,孔隙空间内喉道长度大于 1 000 μm 的长喉道占比结果为:0 ~ 20 cm 土层占比最小,占喉道总数的 38.49%;40 ~ 60 cm 土层占比最大,占喉道总数 45.89%。

2.2　渗透性模拟

利用构建的孔隙网络模型,模拟饱和单相水在 REV 中的渗流过程,得到各土样的模拟渗透系数(饱和导水率)。由图 7a ~ 7c 可以发现,绝对渗透系数(饱和导水率)的模拟值基本保留了实测值的数据规律特点,大致呈现出随围垦年限增加而升高的趋势;而在土壤剖面上,则表现为随土层深度增加而降低。同时对绝对渗透系数(饱和导水率)的模拟值进行评价分析(图 7d),结果显示模拟值和实测值之间吻合度较高;GMER 小于 1,表明模拟结果低于实测值;具有较高绝对渗透系数(饱和导水率)的土样,其模拟得到的结果误差较大。

2.3　土壤渗透系数的主要影响因素

选取部分孔隙网络结构参数和绝对渗透系数模拟值进行灰色关联分析,定量描述孔隙结构各参数对土壤渗透能力的影响。关联度范围为 0 ~ 1,关联度越大,因素间关系越密切[22-23]。计算选取的 15 个孔隙结构参数及其与绝对渗透系数的关联度结果

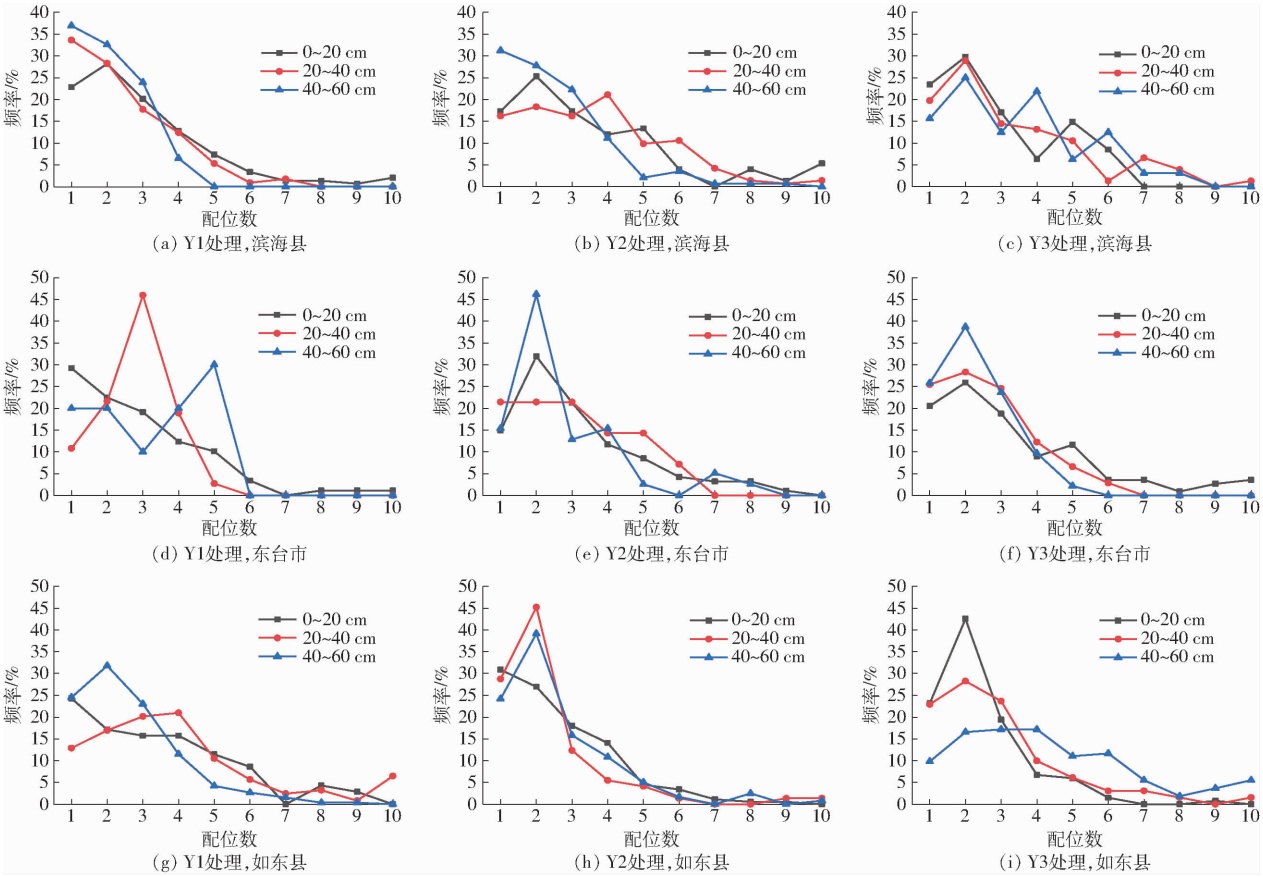


图 4 REV 孔隙配位数分布

Fig. 4 Distribution of coordination numbers of REV

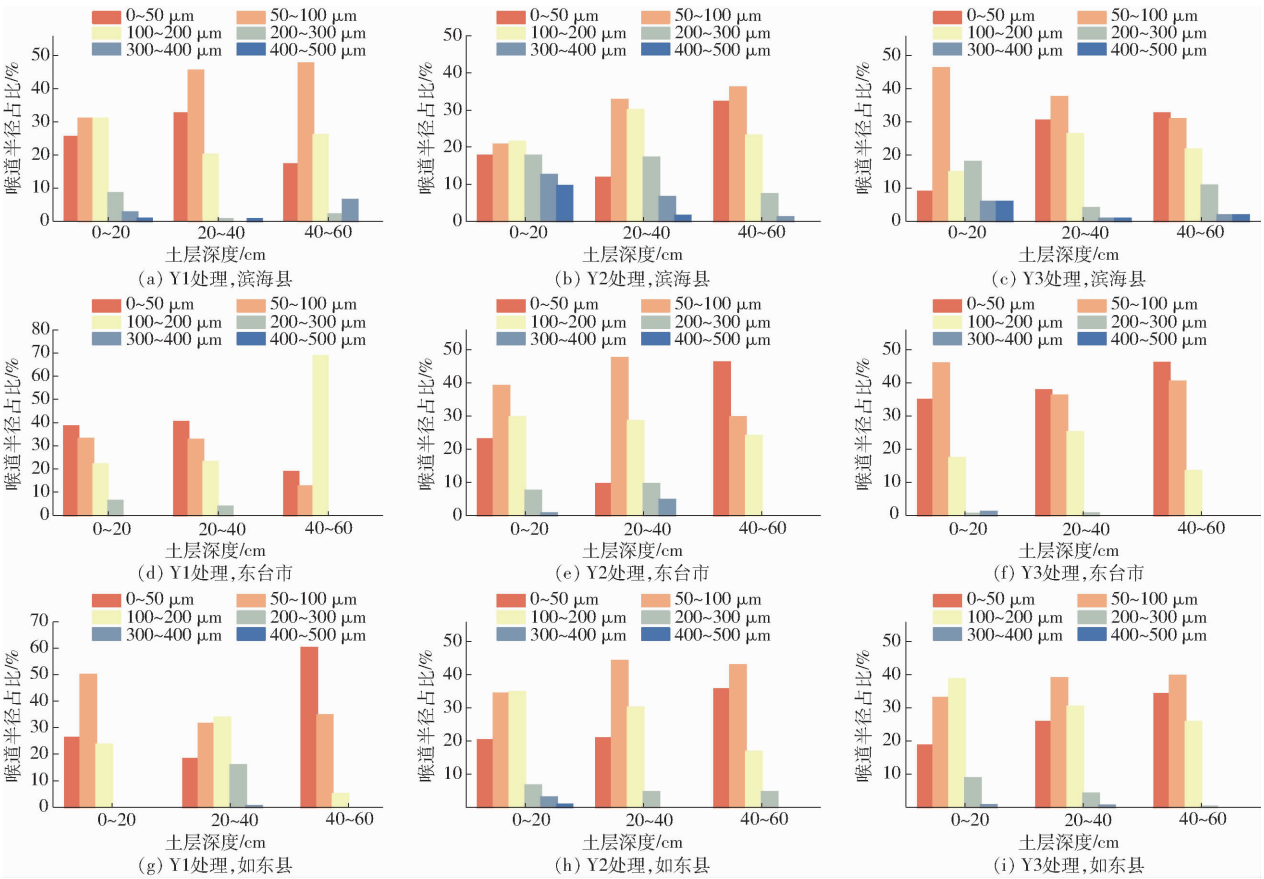


图 5 REV 喉道半径分布

Fig. 5 Throat radius distribution of REV

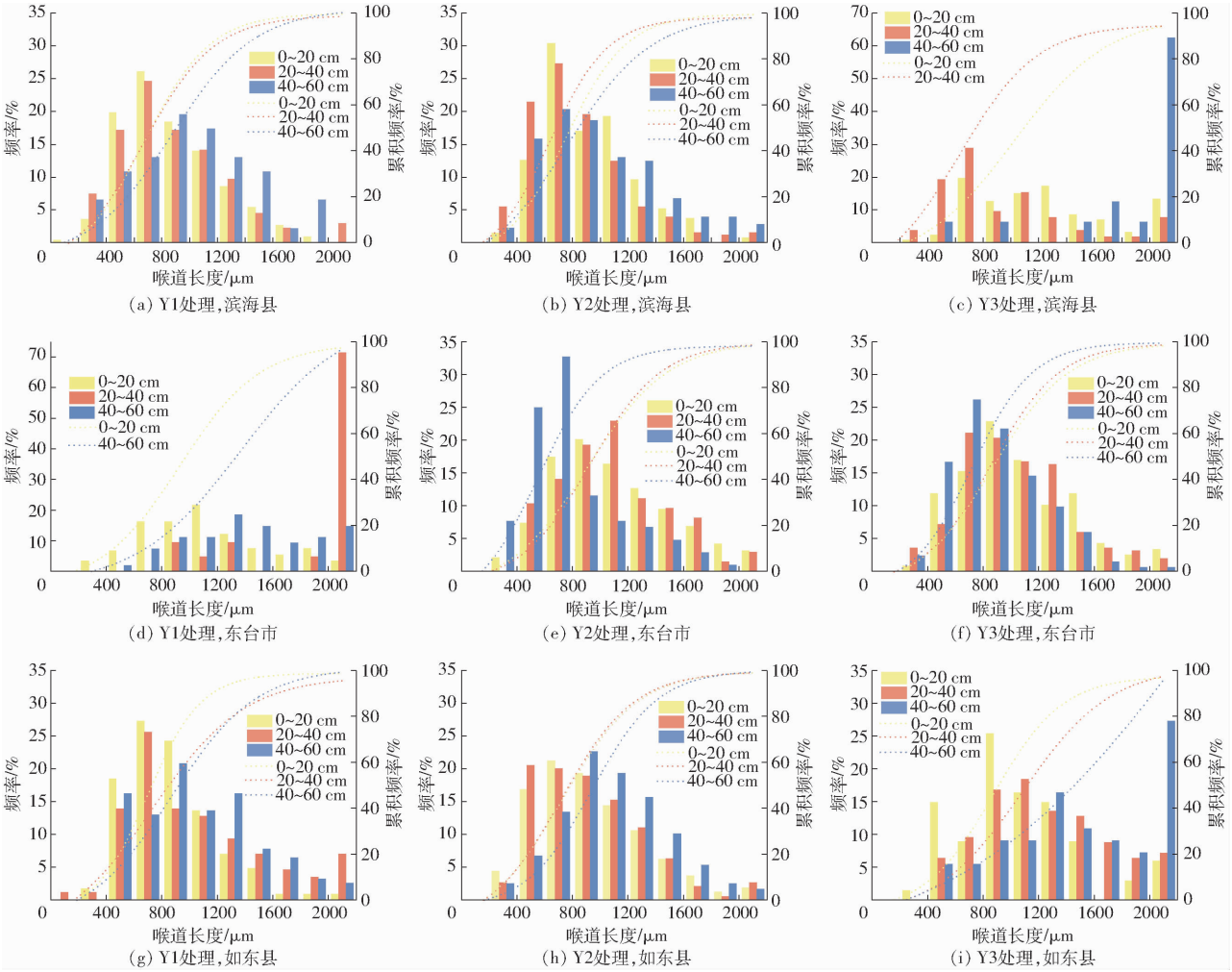


图 6　REV 喉道长度分布

Fig. 6　Throats length distribution of REV

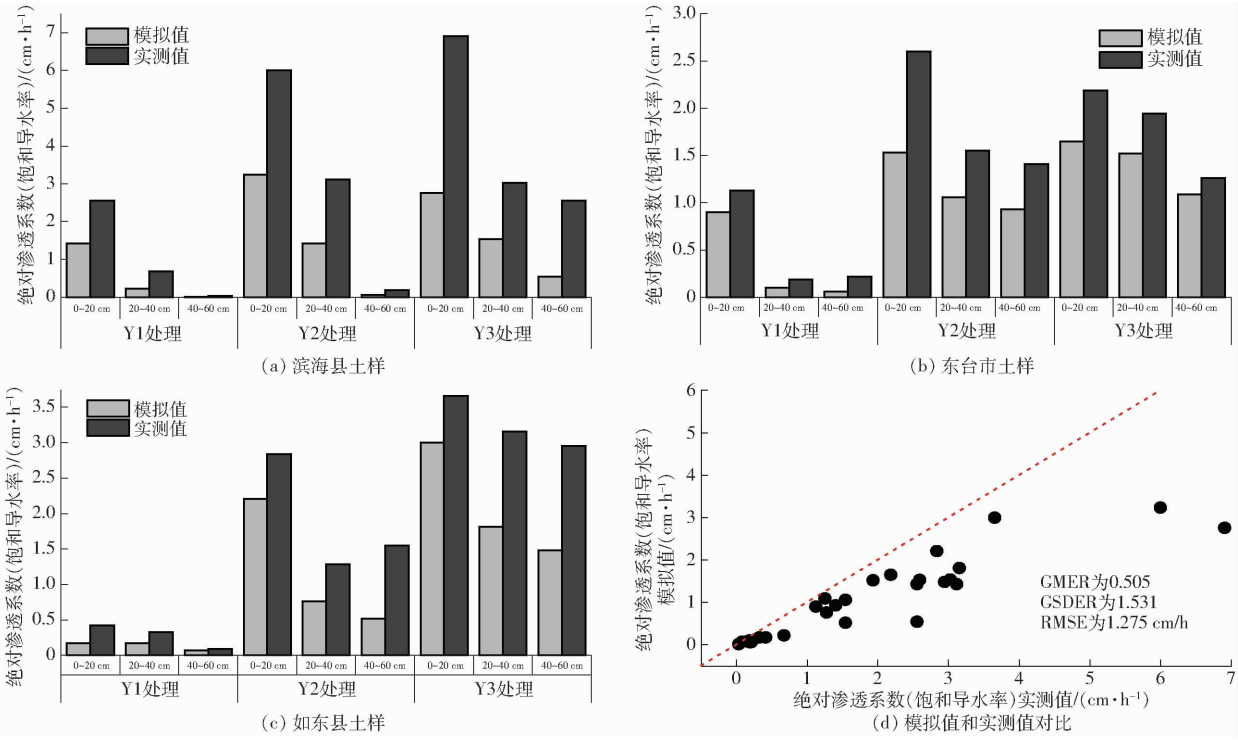


图 7　REV 模拟绝对渗透系数(饱和导水率)和实测结果对比

Fig. 7　Comparison of simulated permeability coefficient (saturated hydraulic conductivity) and measured results of REV

如表 1 所示。各参数与绝对渗透系数的关联度均在 0.78 以上。与土壤绝对渗透系数关联度排序前 5 的参数由高到低分别为:最大喉道半径、平均喉道半径、孔隙平均配位数、孔隙率、平均孔隙半径;喉道半径参数对土壤绝对渗透系数的影响最为明显。

表 1 各参数与模拟绝对渗透系数(饱和导水率)的关联度

Tab.1 Correlation analysis results of each parameter and simulated absolute permeability coefficient

参数	关联度	排序
孔隙率	0.844 9	4
平均孔隙半径	0.823 3	5
最大孔隙半径	0.823 2	6
最小孔隙半径	0.822 3	8
平均孔隙体积	0.789 8	14
最大孔隙体积	0.786 6	15
最小孔隙体积	0.794 1	13
孔隙平均配位数	0.850 7	3
平均喉道半径	0.853 5	2
最大喉道半径	0.865 0	1
最小喉道半径	0.816 0	11
平均喉道长度	0.818 1	9
最大喉道长度	0.823 1	7
最小喉道长度	0.812 1	12
孔喉比	0.816 3	10

3 讨论

本文通过构建孔隙网络模型,利用几何体来表示孔隙空间,在一定程度上简化了土壤结构,提高了模型的运行效率,减少了内存存储的计算压力[24]。LI 等[15]通过提取土壤孔隙网络结构,分析了马兰黄土的孔隙度、孔径分布及三维倾角等结构参数,深入了解了黄土内部微观结构。WEI 等[14]分析不同地层黄土孔隙网络结构,发现浅层土壤具有网络结构更加复杂、孔径范围更加宽泛等特征。在本研究中,通过网络结构提取,可以发现不同土层深度和围垦年限的土壤孔隙网络差异显著,浅层土壤孔隙拥有较大的连通孔隙尺寸范围、较大平均配位数、较大的喉道半径以及较小的喉道长度;同样地,围垦时间较长土壤的连通孔隙分布更为广泛、平均配位数及喉道半径均更大,喉道长度也相对较小,表明农业围垦活动在一定程度上改善了沿海围垦区土壤结构。对比 WEI 等[14]的研究,发现本试验中土样孔隙网络的平均孔喉半径均大于不同地层黄土,这可能归因于 CT 扫描的分辨率和选取 REV 尺寸的差异;但各土样的平均配位数却均远小于黄土,这是因为相较于黄土,滨海土壤含有较高的交换性钠离子,会对土壤胶体颗粒产生分散作用,导致土壤结构较为破碎、土壤连通性较差。

利用提取的孔隙网络进行单相水渗流模拟,各土样模拟绝对渗透系数和试验测得的饱和导水率之间呈现出相对一致的变化规律,模拟值略低于试验测定结果。原因可能为:①孔隙结构提取过程中受到图像分辨率的限制,小于分辨率的连通孔隙不能被识别,因此也不能参与模拟过程。②在试验过程中,土样中部分孔隙会在水流作用下相互连通,形成新的孔隙通道,进而在模拟和试验结果中产生差异[14-15]。

孔隙结构对多孔介质中流体体积、分布及运移有重要影响,是影响流体渗流的直接因素。孔隙网络参数能够帮助解释水分在土壤等多孔介质的传输特征。过去的研究也表明,在孔隙尺度上,孔隙尺寸分布及孔隙拓扑关系是影响土壤水力特性和溶质运移的两个主控因素[25]。灰色关联度分析显示,最大喉道半径与模拟绝对渗透系数的关联度最高,其次是平均喉道半径。同时本研究中平均喉道半径、最大喉道半径、最小喉道半径的关联度之和,大于平均孔隙半径、最大孔隙半径、最小孔隙半径的关联度之和。这一结果表明孔隙喉道半径对土壤渗透性的影响作用最大。这也验证了 WEI 等[14]的研究结论,其认为土壤中喉道半径对控制水分流动起到主要作用,同时大喉道的影响作用高于多个小喉道的叠加效果。闫国亮等[12]发现喉道半径对储层岩石渗透率的影响大于孔隙半径的影响。SONG 等[24]也认为孔隙喉道结构是影响油储层渗透能力的主要决定因素,较大的喉道以及良好的连通性可以为储层内致密油移动提供通道。配位数则是表征孔隙网络连通性的重要参数,而连通性会直接影响到土壤的渗透能力。因此通常认为平均配位数越大,土壤渗透系数越大。与此同时,水分传输移动的难易程度一般被认为与单位土壤中孔隙的体积密切相关,表现为孔隙率越大,土壤的水分运输能力越强[14]。

4 结论

(1)围垦年限和土层深度均会对土壤孔隙分布及其拓扑结构产生影响。随围垦年限的增加,土壤连通孔隙半径范围、平均配位数、喉道半径增加,喉道长度减小;浅层土壤连通孔隙分布较为广泛、平均配位数及喉道半径均较大,喉道长度也相对较小。

(2)基于孔隙网络模拟得到的绝对渗透系数和试验测定的饱和导水率结果吻合度高,呈现一致的变化趋势,孔隙网络模型在表征土壤孔隙结构方面具有较好适用性和可靠性。

(3)最大喉道半径与模拟绝对渗透系数的关联度最高,表明喉道半径对土壤渗透性能的影响作用最大。

参 考 文 献

[1] 许智隼,胡五龙.基于三维 X－CT 图像的结皮土壤孔隙结构特征与渗透率[J].农业工程学报,2021,37(14):89－97.
XU Zhisun, HU Wulong. Characteristics of pore structure and permeability in soil crust using 3D X－CT images[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(14):89－97. (in Chinese)

[2] 程亚南, 刘建立, 吕菲, 等. 基于 CT 图像的土壤孔隙结构三维重建及水力学性质预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 115－122.
CHENG Ya'nan, LIU Jianli, LÜ Fei, et al. Three-dimensional reconstruction of soil pore structure and prediction of soil hydraulic properties based on CT images[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 115－122. (in Chinese)

[3] 刘建立, 徐绍辉, 刘慧, 等. 预测土壤水力性质的形态学网络模型应用研究[J]. 土壤学报, 2004,41(2):218－224.
LIU Jianli, XU Shaohui, LIU Hui, et al. Determination of soil hydraulic properties using a morphology-based pore scale network model[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004,41(2): 218－224. (in Chinese)

[4] 元永国, 王瑞, 范楠. 基于 micro－CT 扫描的孔裂隙结构表征及渗流模拟[J]. 煤矿安全, 2021, 52(8): 15－20.
YUAN Yongguo, WANG Rui, FAN Nan. Characterization of pore-fracture structure and seepage simulation based on micro－CT scanning[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(8): 15－20. (in Chinese)

[5] 赵建鹏, 崔利凯, 陈惠, 等. 基于 CT 扫描数字岩心的岩石微观结构定量表征方法[J]. 现代地质, 2020, 34(6): 1205－1213.
ZHAO Jianpeng, CUI Likai, CHEN Hui, et al. Quantitative characterization of rock microstructure of digital core based on CT scanning[J]. Geoscience, 2020, 34(6): 1205－1213. (in Chinese)

[6] 周虎, 李文昭, 张中彬, 等. 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1226－1230.
ZHOU Hu, LI Wenzhao, ZHANG Zhongbin, et al. Characterization of multi-scale soil structure with X-ray computed tomography[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(6): 1226－1230. (in Chinese)

[7] 房焕,李奕,周虎,等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响[J].农业机械学报,2018,49(4):297－302.
FANG Huan,LI Yi,ZHOU Hu, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):297－302. (in Chinese)

[8] 孙枭沁,房凯,费远航,等.施加生物质炭对盐渍土土壤结构和水力特性的影响[J].农业机械学报,2019,50(2):242－249.
SUN Xiaoqin,FANG Kai, FEI Yuanhang, et al. Structure and hydraulic characteristics of saline soil improved by applying biochar based on micro-CT scanning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):242－249. (in Chinese)

[9] 张宏媛,逄焕成,宋佳珅,等.亚表层有机培肥调控盐渍土孔隙结构与水盐运移机制[J].农业机械学报,2022,53(2):355－364.
ZHANG Hongyuan,PANG Huancheng,SONG Jiashen,et al. Effects of pore structure and water-salt movement for saline soil under subsurface organic amendment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):355－364. (in Chinese)

[10] 吕菲, 刘建立, 何娟. 利用 CT 数字图像和网络模型预测近饱和土壤水力学性质[J]. 农业工程学报, 2008,24(5): 10－14.
LÜ Fei, LIU Jianli, HE Juan. Prediction of near saturated soil hydraulic properties by using CT images and network model [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(5):10－14. (in Chinese)

[11] 刘向君, 朱洪林, 梁利喜. 基于微 CT 技术的砂岩数字岩石物理实验[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1133－1140.
LIU Xiangjun, ZHU Honglin, LIANG Lixi. Digital rock physics of sandstone based on micro-CT technology[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(4): 1133－1140. (in Chinese)

[12] 闫国亮, 孙建孟, 刘学锋, 等. 储层岩石微观孔隙结构特征及其对渗透率影响[J]. 测井技术, 2014, 38(1): 28－32.
YAN Guoliang, SUN Jianmeng, LIU Xuefeng, et al. Characteristics of microscopic pore structure of reservoir rock and its effect on permeability[J]. Well Logging Technology, 2014, 38(1): 28－32. (in Chinese)

[13] FAN N, WANG J, DENG C, et al. Quantitative characterization of coal microstructure and visualization seepage of macropores using CT-based 3D reconstruction[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 81:103384.

[14] WEI T, FAN W, YUAN W, et al. Three-dimensional pore network characterization of loess and paleosol stratigraphy from South Jingyang Plateau, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(11):333.

[15] LI Y, HE S, DENG X, et al. Characterization of macropore structure of Malan loess in NW China based on 3D pipe models constructed by using computed tomography technology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 154: 271－279.

[16] CHAPPELL M, MIDDLETON M, PRICE C. Chemical and physical changes in tropical soils from seawater exposure and subsequent rainwater washes[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2013, 7: 131－134.

[17] 刘语, 张巍, 梁小龙, 等. 南京粉细砂空间孔隙结构表征单元体确定[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2723－2729.
LIU Yu, ZHANG Wei, LIANG Xiaolong, et al. Determination on representative element volume of Nanjing silty-fine sand for its spatial pore structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2723－2729. (in Chinese)

[18] DONG H, BLUNT M J. Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images[J]. Phys. Rev. E., 2009, 80(3): 036307.

[19] CAO T, SHE D, ZHANG X, et al. Pedotransfer functions developed for calculating soil saturated hydraulic conductivity in check dams on the Loess Plateau in China[J]. Vadose Zone Journal, 2022, 21(6):e20217.

[20] REZAEE M R, JAFARI A, KAZEMZADEH E. Relationships between permeability, porosity and pore throat size in carbonate rocks using regression analysis and neural networks[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2006, 3(4): 370－376.

(下转第 323 页)

LI Jiuhui, LU Wenxi, CHANG Zhenbo, et al. Risk prediction of groundwater pollution based on uncertainty analysis[J]. China Environmental Science, 2017,37(6):2270 - 2277. (in Chinese)

[10] THOMAS K, LARS G, UWE U. Perception and use of uncertainty in severe weather warnings by emergency services in Germany[J]. Atmospheric Research,2015,158 - 159:292 - 301.

[11] LI Huarui, LI Changgang, LIU Yutian. Machine learning-based frequency security early warning considering uncertainty of renewable generation[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2022,134:107403.

[12] XIE Y L, XIA D X, JI L, et al. An inexact stochastic-fuzzy optimization model for agricultural water allocation and land resources utilization management under considering effective rainfall[J]. Ecological Indicators,2018,92:301 - 303.

[13] 石小林,丁相毅,刘思然,等. 基于三角模糊数的贝叶斯供水管网评价模型改进及其应用[J]. 人民珠江,2020,41(10):66 - 74.
SHI Xiaolin, DING Xiangyi, LIU Siran, et al. Improvement of Bayesian water supply network evaluation model based on triangular fuzzy number and its application[J]. Pearl River, 2020,41(10):66 - 74. (in Chinese)

[14] 张瑾木子,徐海燕,陈璐. 基于模糊偏好的冲突决策共识模型研究[J]. 水利经济,2022,40(4):61 - 68,93 - 94.
ZHANG Jinmuzi, XU Haiyan, CHEN Lu. Research on consensus model of conflict decision based on fuzzy preference[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022,40(4):61 - 68,93 - 94. (in Chinese)

[15] GUO Jing, WEI Zhen, REN Jun, et al. Early-warning measures for ecological security in the Qinghai alpine agricultural area [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020,17:9792.

[16] ZHANG Xiaoyu, FAN Jinlong, YANG Xiaoguang, et al. A case study on the early warning of agricultural drought[J]. The International Society for Optics and Photonics, 2010,7824:101 - 108.

[17] LI Ronghui, CHEN Nengcheng, ZHANG Xiang, et al. Quantitative analysis of agricultural drought propagation process in the Yangtze River Basin by using cross wavelet analysis and spatial autocorrelation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020,280:107809.

[18] ROBERTS C, UDEN D, CADY S, et al. Tracking spatial regimes as an early warning for a species of conservation concern [J]. Ecological Applications, 2022,32(1):1 - 10.

[19] 陈先冠,冯利平,白慧卿,等. 小麦模型算法集成平台构建与算法比较[J]. 农业机械学报,2022,53(6):237 - 249.
CHEN Xianguan, FENG Liping, BAI Huiqing, et al. Establishment of wheat model algorithms integration platform and algorithm comparison[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 237 - 249. (in Chinese)

[20] 刘正春,徐占军,毕如田,等. 基于 4DVAR 和 EnKF 的遥感信息与作物模型冬小麦估产[J]. 农业机械学报,2022,52(6):223 - 231.
LIU Zhengchun, XU Zhanjun, BI Rutian, et al. Winter wheat yield estimation based on assimilated remote sensing date with crop growth model using 4DVAR and EnKF[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,52(6):223 - 231. (in Chinese)

[21] 陈宇翔,潘海泽. 基于模糊数学的水资源短缺风险综合评价[J]. 沿海企业与科技,2011(9):10 - 15.

[22] WANG Youzhi, GUO Shanshan, YUE Qiong, et al. Distributed AquaCrop simulation-nonlinear multi-objective dependent-chance programming for irrigation water resources management under uncertainty[J]. Agricultural Water Management, 2021, 247(31):206752.

(上接第 315 页)

[21] KATUWAL S, ARTHUR E, TULLER M, et al. Quantification of soil pore network complexity with X-ray computed tomography and gas transport measurements[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(6): 1577 - 1589.

[22] 孙月平,陈祖旭,赵德安,等. 池塘河蟹养殖精准投饵系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):291 - 301.
SUN Yueping, CHEN Zuxu, ZHAO Dean, et al. Design and experiment of precise feeding system for pond crab culture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):291 - 301. (in Chinese)

[23] 张智,杨志,黎景来,等. 基于灰色关联与 TOPSIS 耦合模型的甜瓜水肥灌溉决策[J]. 农业机械学报,2021,52(9):302 - 311,330.
ZHANG Zhi,YANG Zhi,LI Jinglai,et al. Water and fertilizer irrigation decision of melon based on grey relation analysis and TOPSIS coupling model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):302 - 311,330. (in Chinese)

[24] SONG L, NING Z, DUAN L. Research on reservoir characteristics of Chang7 tight oil based on nano-CT[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(16):472.

[25] VOGEL H J, ROTH K. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(3): 233 - 242.