

逾渗理论在多孔介质渗透性能研究中的应用

兰盈伯^{1,2},程东会^{1,2},项琳^{1,2},李超^{1,2}

(1. 长安大学水利与环境学院,陕西 西安 710054; 2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要: 逾渗现象广泛存在于自然界的各种物理过程中,逾渗理论已经在众多领域得到广泛的应用和研究.区别于传统的以渗透系数为主要参数渗流理论,用逾渗理论表征多孔介质的渗透性能,这可能是解决复杂渗流问题更合理的方法,如当气相侵入饱和多孔介质时,对非混溶的两相流动系统中气相运动的表征.多孔介质可以视为由孔隙与孔喉组成,它们分别对应逾渗网络模型里的节点与连接节点的键,在此概化的基础上逾渗理论可以应用于多孔介质,进而运用逾渗理论中关键路径分析的方法对饱和渗透系数与非饱和渗透系数进行理论推导.以泊肃叶方程为起点,结合连通性以及逾渗临界体积含量等概念,构建出了饱和渗透系数与孔隙临界半径的关系,并在此基础上将孔隙度以孔隙半径的概率密度函数的形式给出并引入平衡半径的概念,加入推导,最终得出非饱和渗透系数的表达式.并使用 Rijtema 数据库的两种土样实测数据与预测值对比,分析了非饱和渗透系数表达式的适用性.结果发现,给出的非饱和渗透系数的表达式只有在远离逾渗阈值的范围区间内,即饱和度大于0.9时,预测值才与实测值接近,而在小饱和度时,甚至产生了几个数量级误差.这些误差的产生与前述推导过程中的假设与近似处理以及接近逾渗时拓扑的复杂性有关,其结果是越接近临界饱和度,其预测值越不准确.

关键词: 逾渗理论; 逾渗阈值; 饱和渗透系数; 非饱和渗透系数; 关键路径分析

中图分类号: TV11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.12396/znsd.240001

兰盈伯,程东会,项琳,等. 逾渗理论在多孔介质渗透性能研究中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2024(8): 41-44+53. DOI: 10.12396/znsd.240001.

LAN Y B, CHENG D H, XIANG L, et al. Application of percolation theory in the study of hydraulic conductivity of porous media[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(8): 41-44+53. DOI: 10.12396/znsd.240001.

Application of Percolation Theory in the Study of Hydraulic Conductivity of Porous Media

LAN Ying-bo^{1,2}, CHENG Dong-hui^{1,2}, XIANG Lin^{1,2}, LI Chao^{1,2}

(1. School of Water Resources and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi Province, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi Province, China)

Abstract: Percolation phenomenon widely exists in various physical processes in natural world, and percolation theory has been widely used and studied in many fields. In contrast to traditional seepage theory taking hydraulic conductivity as the main parameter, percolation theory offers a distinctive approach to understanding the permeability of porous media. This may be a more reasonable approach to solve complex seepage problems such as when the gas phase invades the water-saturated porous medium, the characterization of gas phase motion in immiscible two-phase flow systems in porous media. Porous media, conceptualized as an interconnected network of pores and throats, can be likened to nodes and bond connections in the percolation model. This unique perspective allows the application of percolation theory to porous media, providing a theoretical framework for analyzing both saturated and unsaturated hydraulic conductivities using the critical path analysis method in the percolation theory. The derivation begins with Poiseuille's equation, a fundamental equation governing fluid flow. Hydraulic

收稿日期:2024-01-02 接受日期:2024-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41972248,42372291);陕西省自然科学基金项目(2019JM-146)。

作者简介:兰盈伯(1999-),男,硕士研究生,研究方向为逾渗理论在多孔介质中的应用。E-mail:310396040@qq.com。

通讯作者:程东会(1969-),男,教授,博士,主要从事水文地质相关的教学和研究。E-mail:chdhsb@chd.edu.cn。

conductance and critical volume fraction for percolation become essential concepts in this theoretical exploration. By integrating these concepts with Poiseuille's equation, the relationship between saturated hydraulic conductivity and critical pore radius is established. To further refine the theoretical framework, on this basis, the porosity is given in the form of a probability density function of the pore radius and the concept of equilibrium radius is introduced into the formula derivation process, this addition enhances the model's accuracy by accounting for the distribution of pore sizes within the porous media. As a result, the expression for unsaturated hydraulic conductivity finally obtained. The applicability of the unsaturated hydraulic conductivity expression was analyzed by comparing the measured data of two soil samples in the Rijtema database and predicted values. It was found that the expression of the unsaturated hydraulic conductivity given in this article is close to the measured value only in the range far away from the percolation threshold, that is, when the saturation is greater than 90 percent, while at small saturation, even errors of several orders of magnitude were produced. The generation of these errors is related to the assumptions and approximation processing in the aforementioned derivation process of unsaturated hydraulic conductivity and the complexity of the topology when approaching percolation. The result is that the closer to the critical saturation, the less accurate the predicted value is.

Key words: percolation theory; percolation threshold; saturated hydraulic conductivity; unsaturated hydraulic conductivity; critical path analysis

0 引言

自然界中广泛存在两种不同的宏观态,如浸透与不浸透、导通与不导通等,且宏观态可以用微观参数表征(如粒子占据概率或粒子浓度)。从一种宏观态到另一种宏观态表现为逐渐“渗透”的过程,故被称为“逾渗”。逾渗理论解决的基本问题是,从一种宏观态演变为另一种宏观态时,发生突变的临界值(逾渗阈值)是多少。自从逾渗理论提出后,在众多领域得到广泛的应用和研究,如地震活动^[1],溶胶的凝胶化^[2],材料导电路径^[3]等。

在渗流领域,已经建立了以渗透系数为主要参数的经典渗流理论,但在一些复杂的渗流问题上,仍然会碰到传统渗流理论无法解决的困难。如多孔介质中非混溶的两相流动系统中,当气相侵入到饱水多孔介质时,对于气相运动的表征,传统多孔介质两相流中采用气相扩散到水相中的简单概化,用两相的相对渗透系数来表征其渗透性能。这种扩散型的概化不符合水-气两相不混溶的性质,也不符合气相的真实运动特征,因此计算结果会出现较大的偏差^[4]。而逾渗理论则利用逾渗阈值这个核心参数定量刻画气相在饱水多孔介质中连通的必要条件,这似乎是解决这类问题更合理的方法^[5]。

本文使用逾渗理论对多孔介质中水的渗透性能进行了分析和表征,给出了用逾渗阈值表达的饱和渗透系数和非饱和渗透系数,并对其适用性进行了讨论。

1 逾渗理论

逾渗理论是处理强无序和具有随机几何结构系统常用的理论方法之一。在传统的随机逾渗网络模型里,每个节点以独立的概率 p 被占据,被占据的节点可以是单独的,也可以和其他被占据的节点相邻,相邻的被占据节点组成的群体被称为集团。随着概率 p 的不断增大,系统中被占据的节点会逐渐增加,当 p 增大到某一定值 p_c 时,首次出现了横跨整个网络的集团,整个网络被其贯通,此时即发生了逾渗,将 p_c 称为逾渗概率,将这个横跨整个网络的集团称之为关键路径^[6]。值得注意的是,关

键路径的大小是无限的,除非有限的系统本身对其进行限制。作为逾渗标志之一的关键路径的出现,意味着系统两端发生物质交换成为可能^[7]。

在多孔介质中,可以认为流体储存在孔隙和孔喉内,而流动阻力可以由孔喉计算。孔隙就像上述网络模型的节点,而孔喉就像连接节点的键。在此概化的基础上,逾渗理论就可以应用于多孔介质的渗流。在逾渗理论中用于计算多孔介质传导性质的主要方法是关键路径分析(critical path analysis),路径的多少本质上是衡量多孔介质渗透性能大小的参数^[7]。

2 饱和和渗透系数

在饱和多孔介质渗流中,一个简单的模型是毛管束模型,该模型把饱和和多孔介质概化成不同管径大小的毛管束,水的流动符合泊肃叶方程,简称为泊肃叶流,如式(1),

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8\mu l} \quad (1)$$

式中: ΔP 是压力损失, N/m^2 ; l 是管长, m ; μ 是水的动力学黏度, $N \cdot s/m^2$; Q 是流量, m^3/s 。

对于一个半径为 r ,长度为 l 的孔隙而言,假设通过的流量 Q 与其连通性 g (hydraulic conductance)成正比,联系泊肃叶方程并忽略数值常数则有式(2):

$$g \propto \frac{r^4}{\mu l} \quad (2)$$

假设多孔介质具有分形特征,那么孔隙的纵横比(即形状)总体上与大小无关,即孔隙长度 l 与孔隙半径 r 成正比。在这种情况下式(2)可以进一步简化为式(3):

$$g \propto r^3 \quad (3)$$

为了计算饱和条件下的渗透系数,首先需要根据逾渗时的临界体积含量 V_c 的表达式计算出孔隙临界半径 r_c 。 V_c 的含义是当被占用的单元体积达到 V_c 时,系统一定发生逾渗。 V_c 的表达式如式(4)^[6]:

$$V_c = \frac{3-D}{r_m^{3-D}} \int_{r_c}^{r_m} r^3 r^{1-D} dr \quad (4)$$

式中: r_m 是最大孔隙半径; D 是分形维数。将式(4)求解得到孔

隙临界半径 r_c 的表达式,如式(5):

$$r_c = r_m (1 - V_c)^{\frac{1}{3-D}} \quad (5)$$

在得到临界半径 r_c 的表达式(5)后,将其与式(3)联立得到式(6):

$$g_c \propto r_m^3 (1 - V_c)^{\frac{3}{3-D}} = r_c^3 \quad (6)$$

在得到临界连通性 g_c 与临界半径 r_c 的关系式(6)后,为进一步推导需要借用 Hunt 关于饱和和渗透系数的表达式,如式(7)^[6]:

$$K_s \propto \frac{g_c l}{\chi^2} \quad (7)$$

式中: l 是关键路径上孔隙之间的距离; χ 是关键路径的长度。

显然, l 与 χ 都与 r_c 成正比。由此,若忽略其中的比例系数,式(7)可以简化为式(8)^[6]:

$$K_s \propto \frac{g_c l}{\chi^2} \propto \frac{r_c r_c^3}{r_c^2} \propto r_c^2 \quad (8)$$

在很多研究中,研究者都得出了饱和渗透系数与临界半径的平方成正比这一结论。其中包括没有使用关键路径分析的 Katz 和 Thompson、Kozeny-Carman、Johnson 和 Schwartz、Bernabé 和 Revil 以及 Torquato 和 Lu 的研究,以及使用关键路径分析的 Banavar 和 Johnson、Le Doussal 的研究。与泊肃叶方程得到的渗透系数 $K_s = r^2/8\mu$ 相比,逾渗理论得到的渗透系数更深刻的表达了毛管半径与孔隙半径的物理含义。

3 非饱和和渗透系数

许多非饱和渗透系数的经典公式^[8,9]均写成了与饱和渗透系数 K_s 成比例的形式。但是 K_s 一般难以精确计算,因为 K_s 受到孔隙阻力分布的强烈影响,而孔隙阻力分布要从孔隙的孔径分布中获取,孔径分布的测量往往是不准确的。但在具有分形特征的多孔介质中,孔隙的形状总体上与它们的大小无关,所有半径的孔隙形状都是相同的,也就不再需要孔径分布的精确数据,因此用该比值表示的非饱和和渗透系数更加精确^[10]。

为了描述连续多孔介质中的孔径分布的特点,Hunt 将孔隙半径的概率密度函数表示为式(9)^[11]:

$$W(r) = \frac{(3-D)}{r_m^{3-D}} r^{-D-1} \quad (9)$$

式中: $(3-D)/r_m^{3-D}$ 是归一化常数,通过总孔隙体积 $(W(r))$ 和 r^3 的乘积的积分与总体积的比值获取。因此孔隙度 ϕ 的表达式可写成式(10)^[11,12]:

$$\phi = \left(\frac{3-D}{r_m^{3-D}} \right) \int_{r_0}^{r_m} r^3 r^{-D-1} dr = 1 - \left(\frac{r_0}{r_m} \right)^{3-D} \quad (10)$$

非饱和和土壤水的毛管束理论中概化非饱和问题时假设存在一个平衡孔隙半径 r_p ,当孔隙半径大于 r_p 时,该孔隙中的水被全部排干,而孔隙半径小于 r_p 时,孔隙是饱和的^[13,14]。水的饱和度 S 是半径小于 r_p 的孔隙中水的体积与总孔隙体积的比值^[6],表示为式(11):

$$S = \left(\frac{1}{\phi} \right) \left(\frac{3-D}{r_m^{3-D}} \right) \int_{r_0}^{r_p} r^3 r^{-D-1} dr = \frac{1}{\phi} \left[\frac{r_p^{3-D} - r_0^{3-D}}{r_m^{3-D}} \right] \quad (11)$$

当 $r_p = r_m$ 时, $S=1$,为饱水状态。如果要用逾渗理论推导出

非饱和渗透系数的表达式,则需要知道对应的多孔介质逾渗时的临界体积分 V_c 。由于逾渗路径上的最大孔隙等于平衡半径,即 $r_m = r_p$,临界体积分可以表达为式(12)^[6]:

$$V_c = \left(\frac{3-D}{r_m^{3-D}} \right) \int_{r_c}^{r_m} dr r^{2-D} = \left(\frac{r_p}{r_m} \right)^{3-D} - \left(\frac{r_c(\theta)}{r_m} \right)^{3-D} \quad (12)$$

方程(12)中,积分上限已从 r_m 降低到 r_p ,而 r_p 的取值与饱和度 S 有关,这反映了非饱和过程。由于临界含水率 θ_c 和临界体积分 V_c 都对逾渗阈值 p_c 这一点,为了得到作为含水率函数的渗透系数,可以使用临界含水率 θ_c 替换公式中的临界体积分 V_c 。联立方程(4)、(11)和(12)并使用 θ_c 代替 V_c ,可以求出饱和条件下 $r_c(\theta)$ 的表达式,如式(13):

$$r_c(\theta) = r_c(\theta = \phi) \left[\frac{1 - \phi + (\theta - \theta_c)}{1 - \theta_c} \right]^{\frac{1}{3-D}} \quad (13)$$

式(13)与式(3)联立,非饱和和临界连通性可表示为式(14),它是含水率的函数:

$$g_c(\theta) = g_c(\theta = \phi) \left[1 - \phi \frac{1-S}{1-\theta_c} \right]^{\frac{3}{3-D}} \quad (14)$$

将式(14)与式(7)联立,可以得到逾渗理论所建立起的非饱和和渗透系数表达式,如式(15):

$$K(S) = K_s \left[1 - \phi \frac{1-S}{1-\theta_c} \right]^{\frac{3}{3-D}} \quad (15)$$

4 讨论

4.1 饱和和渗透系数

虽然通过毛管束模型的概化,渗透系数可以与逾渗理论中的逾渗阈值建立理论上的关系。但是,在推导过程中使用了较多的假设以及近似,现对这些假设以及近似对结果的影响进行讨论。

关键路径分析所使用的临界体积分 V_c ,在上文中出于理论推导的需要仅给出了其定义公式,但由于孔径分布难以获取,在实际中临界体积分 V_c 可以从溶质扩散^[15]、导电系数^[16]和非饱和多孔介质的实验中获得^[17]。

还应注意,泊肃叶流中连通性是孔隙半径的幂函数,但在逾渗理论的体系中,连通性是孔隙半径的指数函数。这是一个很重要的差异,但目前对这种差异的含义尚未得到完全理解^[8,18]。

在对式(7)进行简化时,由于关键路径上孔隙之间的距离 l 和关键路径的长度 χ 都与 r_c 成正比,所以得出了饱和和渗透系数与临界半径的平方成正比的结论。但在其中忽略了 l 和 χ 中的比例系数,由于比例系数并非一个定值,这意味着忽略了比例系数导致的不确定性,可能导致误差扩大。

虽然 K_s 受到孔隙阻力分布的强烈影响,而精确的孔径分布信息难以获取导致其确切公式难以表征且在推导过程中接受了一些假设与近似,但对 K_s 进行基本讨论是至关重要的,因为 K_s 是表达非饱和渗透系数的基础。

对于逾渗理论中的关键路径分析适用性的问题,有一些学者开展了相应的理论研究,AMBEGAOKAR(1971)等人的研究表明在连通性分布足够广泛的三维随机系统中,传输是由临界

连通性所控制的,这证明了关键路径分析适用于三维孔隙网络渗透系数的求解^[19]。SHANTE(1997)和KIRKPATRICK(1979)在AMBEGAOKAR(1971)等的基础上将研究推广到求解多孔岩石渗透率^[20],随后其他人也使用不同形式的关键路径分析来研究非均质断裂介质的渗透率^[21-24]。但FRIEDMAN(1998)的工作也指出^[7],关键路径分析在估算非均质三维孔隙网络的渗透率时,预测值的精度随配位数的增加而降低。这方面的研究工作仍待进一步开展。

4.2 非饱和和渗透系数

将多孔介质中的孔隙视为点孔喉视为键,逾渗理论的引入是很自然的,而在多孔介质具备分形特征的假设下,所有半径的孔隙形状都是相同的,因此 l, χ 与 r_c 之间的比例系数在 $K(S)/K_s$ 的比值中消失了,比例系数导致的不确定性在 $K(S)/K_s$ 中被消去,这使非饱和渗透系数能够被更准确表达。

这也使得方程(15)在远离临界含水率的范围内是准确的,但在接近临界含水率,介质快达到逾渗时,由于拓扑复杂性,它并不准确^[25]。在 $\theta \rightarrow \theta_c$ 的极限下,方程(15)得出:

$$K(\theta_c) = K_s \left[\frac{1 - \phi}{1 - \theta_c} \right]^{\frac{3}{3-D}} \quad (16)$$

此时方程(16)中的 $K(\theta_c)$ 并不等于零;它是与系统中最小孔隙的临界连通性相关的渗透系数。逾渗理论要求渗透系数在逾渗阈值处消失。这个问题仍需更进一步的研究。而且,上述推导中没有充分考虑非饱和土壤水的迟滞效应,而迟滞性对于土壤水的吸湿过程是非常重要的。

为了论证式(15)的有效性,本文使用Rijtema数据库^[26]的2种代表性土样数据对非饱和渗透系数的逾渗模型式(15)进行测试。2种土壤的基本参数以及计算结果和实测结果的对比如表1。

表1 两个代表性土壤样品渗透系数实测值和计算值的比较

Tab.1 The measured and calculated values of hydraulic conductivity using 2 Soil Sample

样品	饱和渗透系数 K_s / ($m \cdot s^{-1}$)	孔隙度 ϕ	分形维数 D	临界饱和度 S_c / ($m \cdot s^{-1}$)	饱和度 S	实测渗透系数/ ($m \cdot s^{-1}$)	预测渗透系数/ ($m \cdot s^{-1}$)	相对误差/ %
粗砂	4.17×10^{-8}	0.301	2.955	0.07	0.600	1.512×10^{-10}	6.610×10^{-12}	95.6
					0.879	1.321×10^{-8}	3.314×10^{-9}	74.9
					0.935	2.966×10^{-8}	1.093×10^{-8}	63.1
					0.972	3.830×10^{-8}	2.329×10^{-8}	39.2
细砂质壤土	1.39×10^{-6}	0.504	2.934	0.17	0.539	9.853×10^{-9}	2.275×10^{-12}	99.9
					0.838	1.202×10^{-7}	1.992×10^{-8}	83.4
					0.953	6.257×10^{-7}	4.269×10^{-7}	31.8
					0.990	1.318×10^{-6}	1.078×10^{-6}	18.2

测试的结果表明,在饱和度大于0.9后,利用逾渗理论预测的渗透系数才与实测值接近,而在小饱和度时,甚至产生了几个数量级误差。这些误差的产生与前述的逾渗非饱和和渗透系数推导过程的中假设有关,其结果是越接近临界饱和度,其预测值越不准确。

5 结论

对于饱和和渗透系数,通过逾渗理论给出其表达式与经典渗流力学给出的表达式一致,这说明了逾渗理论基本上适用于饱水多孔介质。对于非饱和渗透系数,通过逾渗理论中关键路径分析的方法结合孔隙度的知识可以给出了精确的表达式,其优点是在远离临界连通性的大范围区间内与实测值有很高的近似度,但不足之处是在接近临界连通性时,拓扑的复杂性会对公式的精确度造成很大影响,越接近临界连通性误差越大。

参考文献:

[1] 柯善明,顾浩鼎,翟文杰.地震活动的逾渗模型及临界状态的研究[J].地震学报,1999(4):43-50. (KE S M, GU D H, ZHAI W J. Study on percolation model and critical state of seismic activity[J]. Acta Seismologica Sinica, 1999(4):43-50.)

[2] R.泽 仑.非晶态固体物理学[M].黄钧,译.北京:北京大学出版

社,1988.

[3] D.罗 伯.计算材料学[M].项金钟,译.北京:化学工业出版社,2002.

[4] ISHII M. Two-fluid model for two-phase flow[J]. Multiphase science and technology, 1990, 5(1-4).

[5] WILKINSON D, WILLEMSSEN J F. Invasion percolation: a new form of percolation theory[J]. Journal of physics A: Mathematical and general, 1983, 16(14):3 365.

[6] HUNT A G, GEE G W. Application of critical path analysis to fractal porous media: Comparison with examples from the Hanford site[J]. Advances in Water Resources, 2002, 25(2):129-146.

[7] FRIEDMAN S P, SEATON N A. Critical path analysis of the relationship between permeability and electrical conductivity of three-dimensional pore networks[J]. Water Resources Research, 1998, 34(7): 1 703-1 710.

[8] KATZ A J, THOMPSON A H. Quantitative prediction of permeability in porous rock[J]. Physical review B, 1986, 34(11):8 179.

[9] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil science society of America journal, 1980, 44(5):892-898.

[10] HUNT A, EWING R, GHANBARIAN B. Percolation theory for flow in porous media[M]. Springer, 2014.

(下转第53页)

- 128-138.)
- [16] 嵇晓雷, 杨 平. 基于根系形态的根系固坡作用数值分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(2): 113-117. (JI X L, YANG P. Numerical analysis of the slope-fixing effect of root system based on root morphology [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2013, 37(2): 113-117.)
- [17] ZHANG F, WANG G. Effect of irrigation-induced densification on the post-failure behavior of loess flowslides occurring on the Heifangtai area, Gansu, China [J]. Engineering Geology, 2017, 236 (11): 111-118.
- [18] RQZ A, XMM A, FYZ B, et al. Characterizing hydrological processes on loess slopes using electrical resistivity tomography—A case study of the Heifangtai Terrace, Northwest China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 742-753.
- [19] XING Q, QIANG X, LIU F. Analysis of retrogressive loess flowslides in Heifangtai, China [J]. Engineering Geology, 2017, 236.
- [20] XU L, DAI F C, GONG Q M, et al. Irrigation-induced loess flow failure in Heifangtai Platform, North-West China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(6): 1 707-1 713.
- [21] ZHANG Y, ZHANG X, BI Z, et al. The impact of land use changes and erosion process on heavy metal distribution in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 718(May20): 137 301-137 305.
- [22] LIKITLERSUANG S, KOUNYOU K, PRASETYANINGTIYAS G A. Performance of geosynthetic cementitious composite mat and vetiver on soil erosion control [J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(4). DOI:10.1007/s11629-019-5926-5.
- [23] 王 洁, 胡少伟, 周 跃. 人工模拟降雨装置在水土保持方面的应用[J]. 水土保持研究, 2005(4): 188-190. (WANG J, HU S W, ZHOU Y. Application of artificial rainfall simulation device in soil and water conservation [J]. Soil and Water Conservation Research, 2005(4): 188-190.)
- [24] 李姜瑶. 西宁盆地黄土区植物水文效应及其增强边坡稳定性评价[D]. 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2021. (LI J Y. Evaluation of phytohydrological effect and its enhancement of slope stability in loess area of Xining Basin [D]. University of Chinese Academy of Sciences (Qinghai Salt Lake Research Institute, Chinese Academy of Sciences), 2021.)
- [25] 刘 俊. 香根草边坡的水文效应与稳定性研究[D]. 湖南长沙: 中南林业科技大学, 2020. (LIU J. Hydrological effects and stability of vetiver slopes [D]. Changsha: Central South Forestry University of Science and Technology, 2020.)
- [26] MIYATA S, KOSUGI K, NISHI Y, et al. Spatial pattern of infiltration rate and its effect on hydrological processes in a small headwater catchment [J]. Hydrological Processes, 2010, 24(5): 535-549.
- [27] LOÁICIGA H A, JOHNSON J M. Infiltration on sloping terrain and its role on runoff generation and slope stability [J]. Journal of Hydrology, 2018: S1202879190.
- [28] MEI, XM, ZHU, et al. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a Loess hillslope [J]. Land Degrad Dev, 2018.
- [29] CHEN S. A method of stability analysis taken effects of infiltration and evaporation into consideration for soil slopes [J]. Rock And Soil Mechanics, 1997.

(上接第44页)

- [11] HUNT A G. Applications of percolation theory to porous media with distributed local conductances [J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(3-4): 279-307.
- [12] RIEU M, SPOSITO G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(5): 1 231-1 238.
- [13] BLUNT M J, SCHER H. Pore-level modeling of wetting [J]. Physical review E, 1995, 52(6): 6 387.
- [14] TOKUNAGA T K, WAN J. Water film flow along fracture surfaces of porous rock [J]. Water Resources Research, 1997, 33(6): 1 287-1 295.
- [15] MOLDRUP P, OLESEN T, KOMATSU T, et al. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(3): 613-623.
- [16] BALBERG I. Recent developments in continuum percolation [J]. Philosophical Magazine B, 1987, 56(6): 991-1 003.
- [17] BALBERG I. Limits on the continuum-percolation transport exponents [J]. Physical Review B, 1998, 57(21): 13 351.
- [18] LE DOUSSAL P. Permeability versus conductivity for porous media with wide distribution of pore sizes [J]. Physical Review B, 1989, 39 (7): 4 816.
- [19] AMBEGAOKAR V, HALPERIN B I, LANGER J S. Hopping conductivity in disordered systems [J]. Physical review B, 1971, 4(8): 2 612.
- [20] SHANTE V K S. Hopping conduction in quasi-one-dimensional disordered compounds [J]. Physical review B, 1977, 16(6): 2 597.
- [21] CHARLAIX E. Percolation threshold of a random array of discs: a numerical simulation [J]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1986, 19(9): L533.
- [22] CHARLAIX E, GUYON E, ROUX S. Permeability of a random array of fractures of widely varying apertures [J]. Transport in porous media, 1987, 2: 31-43.
- [23] BERMAN D, ORR B G, JAEGER H M, et al. Conductances of filled two-dimensional networks [J]. Physical Review B, 1986, 33 (6): 4 301.
- [24] DAVID C, GUEGUEN Y, PAMPOUKIS G. Effective medium theory and network theory applied to the transport properties of rock [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1990, 95 (B5): 6 993-7 005.
- [25] HUNT A G. Percolative transport in fractal porous media [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2004, 19(2): 309-325.
- [26] RIJTEMA P E. Soil moisture forecasting, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding [R]. Wageningen (Holland). Technical Report Nota 513, 1969.