

DOI: 10.11766/trxb202401040012

吴云博, 章智, 李晓非, 毛晓花, 张越, 蒋芳市, 黄炎和, 林金石. 离子界面反应对安溪县典型花岗岩崩岗砂壤红土层渗压特性的影响[J]. 土壤学报, 2024

WU Yunbo, ZHANG Zhi, LI Xiaofei, MAO Xiaohua, ZHANG Yue, JIANG Fangshi, HUANG Yanhe, LIN Jinshi. The Influence of Ion Interface Reaction on the Permeability Pressure Characteristics of Typical Granite Benggang Sandy Loam Red Soil Layer in Anxi Country[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024

离子界面反应对安溪县典型花岗岩崩岗砂壤红土层渗压特性的影响*

吴云博, 章智, 李晓非, 毛晓花, 张越, 蒋芳市, 黄炎和, 林金石[†]

(福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘要: 降雨会改变崩壁土壤中水分的运移进而影响土壤颗粒表面的离子界面反应, 同时大量雨水积累对下覆土层产生的极高渗透压力会导致土壤侵蚀。本研究以安溪县典型崩岗的崩壁红土层为研究对象, 利用不同价态和浓度的离子溶液来调控土壤颗粒表面的离子界面反应, 分析其对崩壁红土层渗压特性的影响。结果表明: 离子界面反应下土壤的渗压过程受土壤中离子价态和浓度的影响主要体现在其改变土壤内力进而影响土壤孔隙状况。 K^+ 和 Mg^{2+} 分别降低和提高土壤的渗透系数和孔隙比, 土壤渗透系数与电解质浓度间存在良好的单指数递增关系, 各级固结压力下的拟合方程均可表达为: $k=ae^{-x^t}+b$, $R^2>0.845$, $P<0.1$ 。

关键词: 崩岗; 离子界面反应; 渗压; 土壤结构; 土壤内力

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

The Influence of Ion Interface Reaction on the Permeability Pressure Characteristics of Typical Granite Benggang Sandy Loam Red Soil Layer in Anxi Country

WU Yunbo, ZHANG Zhi, LI Xiaofei, MAO Xiaohua, ZHANG Yue, JIANG Fangshi, HUANG Yanhe, LIN Jinshi[†]

(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: 【Objective】Rainfall can alter the movement of water in the soil of landslide-prone slopes, affecting the types and concentrations of ions in various soil layers, thereby influencing ion-interface reactions on soil particle surfaces. Additionally,

* 水利部重大科技项目 (SKS-2022073)、福建省安溪县现代农业产业园协同创新中心项目 (KMd18003A) 和自然资源部创新中心资助项目 (KY090000042021007) 共同资助 Co-supported by the Major Science and Technology Project of the Ministry of Water Resources (No. SKS-2022073), the Collaborative Innovation Center for Modern Agriculture Industry Park in Anxi County, Fujian Province, China (No. KMd18003A), and the Innovation Center of the Ministry of Natural Resources (No. KY090000042021007)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: linjs18@163.com

作者简介: 吴云博 (1999-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: wyb645944104@qq.com

收稿日期: 2024-01-04; 收到修改稿日期: 2024-06-20; 网络首发日期 (www.cnki.net):

moisture accumulation can exert high permeability pressure on the underlying soil layers, making them prone to deformation and instability. Soil with weaker resistance to permeability pressure, when closer to the surface, is more susceptible to soil erosion. Previous research has mainly focused on the influence of soil water stability and mechanical stability on landslide erosion, however, the impact of ion-interface reactions based on ion characteristics on the permeability characteristics of landslides is not well understood. **【Method】** This study focused on the red soil layer of a typical landslide in Anxi County and used ion solutions with different valences and concentrations to manipulate ion-interface reactions on the soil particle surfaces and analyzed their effects on the permeability characteristics of the landslide's red soil layer. **【Result】** K^+ reduced soil porosity and decreased the soil's permeability and conductivity, while Mg^{2+} increased soil porosity and enhanced the soil's permeability and conductivity. There was a good single exponential increasing relationship between the permeability coefficient and the electrolyte concentration, with the fitting equations for various consolidation pressures expressed as $k = ae^{-\lambda t} + b$, $R^2 > 0.845$, $P < 0.1$. Also, K^+ increased the electrostatic repulsion between soil particles, resulting in net repulsion forces between them, while Mg^{2+} reduced the electrostatic repulsion, leading to net attraction forces between soil particles. Higher electrolyte concentrations have a more significant impact on altering the internal forces within the soil. **【Conclusion】** Ion-interface reactions based on differences in ion characteristics can influence the internal forces of the soil, causing some degree of structural changes in landslide-prone soil.

Key words: Benggang; Ionic interface reaction; Permeability pressure; Soil structure; Soil internal forces

崩岗是我国南方红壤区常见的侵蚀类型, 集中分布在深厚花岗岩风化壳发育的丘陵区^[1]。崩岗土壤富含大量石英砂砾, 降雨后风化和半风化的土体吸水使得内聚力降低, 在水力和重力的综合作用下发展成为崩岗^[2], 对自然环境和人类社会造成了严重危害。水分运移是导致崩岗侵蚀发生的重要因素, 90%以上的边坡破坏与地下水渗透力作用有关, 地下水渗流以渗透压力作用于土体影响土体应力场和渗流场^[3]。崩岗不同土层的水分含量和土壤结构具有较大差异, 在强渗透压作用下其内部水分的运动情况也不同, 且水分运移会影响土壤表面的离子界面反应^[4]。因此, 有必要研究高渗压下离子界面反应对崩岗侵蚀的影响机制。

国内外众多学者的相关研究发现, 土壤剖面构型中上下各层的透水性能不一致时土壤渗透性常由透水性最小的一层决定, 透水性较小的一层距地面越近越容易引起比较强烈的水土流失^[5]。渗透系数 K 是综合反映土体渗透能力的一个定量指标, 在土壤的压缩过程中渗透系数并不是呈线性变化的^[6-8]。水分运移使得土壤带电物质的类型和浓度发生变化从而调节土体表面的静电场强度, 影响土壤内力作用^[4]。有研究表明, 对于同一类型的土壤, 离子价态和浓度不同引起的土壤团聚体稳定性差异是由土壤颗粒间相互作用力引起的^[9-10]。不同离子对土壤持水性能及其在失水过程中的轴向收缩和裂隙水平具有不同的作用效果且受离子浓度和离子价态等因素影响^[11]。土壤颗粒间的静电场是土壤团聚体失去稳定性的根本原因, 高电场强度下土壤团聚体受强静电斥力作用而发生爆裂, 释放出大量的微团聚体堵塞土壤孔隙^[12]。土壤孔隙的连通状态、几何形态和空间特征决定了土壤对水分的传导能力, 强烈影响着土壤水分和养分迁移等生态过程^[13-15]。水分进入土壤团聚体后土壤颗粒间相互作用力决定着土壤结构与孔隙的稳定性, 而颗粒间相互作用力是由离子界面反应过程决定的^[16]。可以看出, 离子界面反应是影响土壤理化性状的重要原因之一, 目前关于崩岗侵蚀受土体水稳定性、力学稳定性等方面因素已开展深入研究, 但有关崩岗土壤离子特性差异导致微观离子界面反应与渗压特性的关系还不明晰。然而确定高渗压下与崩岗土渗流相关的渗透参数, 从微观层面分析崩岗崩壁的稳定性的稳定性是尤为重要的。

红土层作为崩岗距离地表最近的土层, 其渗压特性对土壤侵蚀的发生具有重要影响。因此, 本研究针对典型崩岗红土层, 利用 K^+ 、 Mg^{2+} 盐溶液调控崩岗土壤的离子界面反应, 通过室内变水头渗压试验, 分析在高渗透压状态下经不同价态和浓度阳离子盐溶液饱和前后的崩岗红土层土壤渗压参数的变化, 明确渗压过程中渗透系数与电解质浓度之间的关系, 并尝试建立渗压过程中土壤内力与

渗压参数的拟合模型，分析离子界面反应下土壤内力对渗透系数的影响。研究进一步明确了降雨后崩岗发生、发展的内在机理，可为防治崩岗土壤侵蚀提供基础理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验区（图 1）位于福建省泉州市安溪县龙门镇洋坑村（24°57'N，118°03'E），该地区属于亚热带季风气候区，地势多为河谷小盆地且常年高温且降雨量丰富，是我国南方红壤区水土流失程度最严重的区域之一。安溪县目前共有崩岗 7 890 个，崩岗侵蚀总面积达到了 1 601 hm²，其中龙门镇拥有共计 1 228 个崩岗，崩岗侵蚀面积为 264.77 hm²，占安溪县总崩岗数量的 15.56%，且崩岗发生较为集中，崩岗侵蚀密度约为 7.8 个·km⁻²，因其崩岗发生的剧烈程度高和侵蚀面积较为集中，所以龙门镇的崩岗在我国南方崩岗侵蚀区具有一定的典型性和代表性。该地区崩岗土壤主要由酸性花岗岩风化发育而来，常年风化和半风化土壤富含大量石英砂砾，呈中-粗粒似斑状结构，土壤团聚体的水稳定性和力学稳定性均较差，具有强亲水性、弱抗蚀性和弱胶结性等特点。

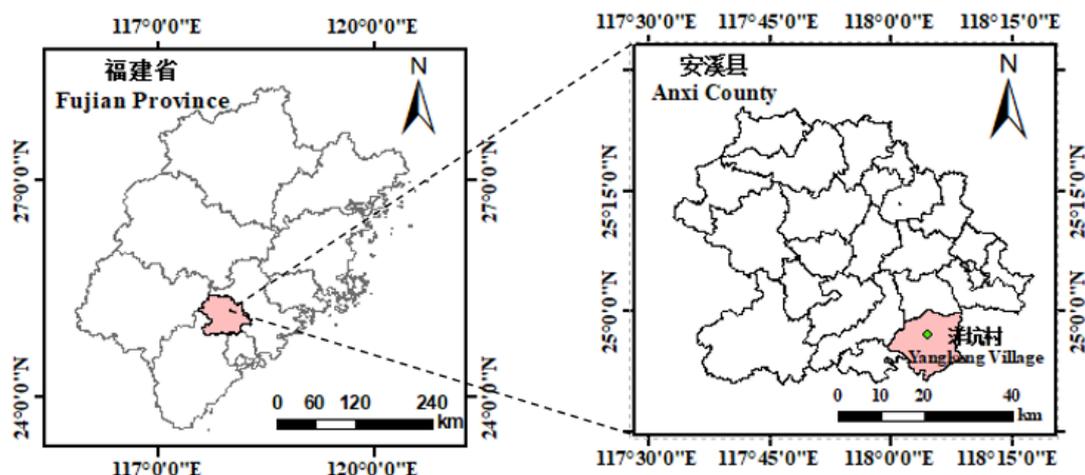


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

1.2 土样采集

选取侵蚀程度最严重之一且崩岗元素较为完整的崩岗崩壁（图 2）为研究对象。根据崩壁土层所在垂直高度和土层颜色，可将崩壁土层分为红土层、砂土层和碎屑层，红土层土壤一般为砖红色，土层紧实且含有较多植物根系；砂土层土壤一般为粉白色，土质疏松且土壤间分布着黑色斑点；碎屑层土壤一般为灰白色，土质疏松且含有大量风化不完全的石英砂砾。红土层作为崩壁最上层的土壤，其渗透性几乎决定着整个崩壁土层的渗透性，是最容易引起土壤侵蚀的土层。因此，本研究土样采集对象选取为质地为砂壤的红土层，按照多点混合取样法分别在红土层 0~0.4 m、0.4~0.7 m 和 0.7~1.0 m 3 个不同深度范围各采取 3 个重复样^[17]，将 9 个重复样混合为红土层的代表土样，同时装袋密封保存。



图 2 采样区典型崩岗

Fig. 2 Typical Benggang in the study area

1.3 试验设计

(1) 土样预处理。离子饱和样品的制备^[18]：将采集到的崩岗红土层土壤自然风干后，各取 2 kg 土于 5 个搅拌桶中，分别加入 2 L 的 1、0.1、0.01、0.001 和 0.0001 mol·L⁻¹ 的 K⁺和 Mg²⁺电解质溶液，搅拌 24 h 后将土样离心去除上清液，再将土样移入搅拌桶中，重复该操作 3 次后于搅拌桶中各加入 2 L 去离子水，搅拌 24 h 后离心，将土样置于烘箱 60 °C 烘干，过 2 mm 筛后装袋密封备用。

(2) 渗压试验。试验控制土样干密度为 1.5 g·cm⁻³，计算每个土样需要的干土质量，用击实的方法打入 61.8×40 mm 环刀（容积 120 cm³）中，将环刀试样的顶、底面贴上滤纸，放在两块透水石中间，用饱和架夹紧后放入饱和器中进行真空饱和（抽真空 1~2 h，饱水 12 h），使其接近含水层的天然饱和度。渗压试验采用南京泰克奥科技有限公司研发生产的双联变水头自动渗压仪（TKA-STC-2AP），将饱和后的试样放入渗压仪的渗压容器内，由小到大逐级向试样施加压力。参考崩岗土层土壤的前期固结压力，设置 50、100、150、200、250 kPa 五个固结压力梯度对试样进行固结，当每级固结压力稳定后进行渗压试验，渗压仪通过分析渗压过程水头高度与时间的变化曲线计算该固结压力下的渗透系数^[19]。同时，对同一样品另取一饱和试样称重，在试样上下两端贴上滤纸，再放入渗压容器内进行固结。当固结压力稳定后，取出试样，去掉滤纸后测量试样质量和高度，计算试样在不同压力条件下的土壤孔隙比^[20]。根据联合测定法^[21]，测定各土样胶体颗粒的 Zeta 电位、表面电荷密度、表面电位和比表面积等土壤表面电荷性质以定量计算土壤内力。

(3) 分析方法。以未经离子溶液饱和的原状土壤作为对照，分析在不同固结压力下经盐基阳离子(K⁺、Mg²⁺)溶液饱和和处理后崩岗红土层土壤渗透系数和孔隙比与电解质类型和浓度之间的关系；通过测定和计算经不同价态和浓度盐基阳离子饱和后崩岗各土层土壤的表面电势、Zeta 电位等参数，计算胶体扩散双电层的滑动层厚度、土壤颗粒间的电场强度、静电排斥力、水合斥力、范德华引力和净压力变化。利用电化学扩散双电层理论解析土壤界面的微观变化，研究其对渗压特性的影响，分析土壤内力作用与离子类型、强度之间的关系，探究离子界面反应对崩岗土壤内力作用的影响，进一步明确其对土壤渗压特性的影响机制。

1.4 数据处理与分析

(1) 土壤颗粒表面电场强度的计算。为求得静电斥力和范德华力，可以根据胶体扩散双电层理论和 DLVO 理论来计算土壤胶体颗粒的表面电位值^[22]：

$$\varphi_{0(i,1)} = \frac{RT}{F} \ln \left[4 \left(\frac{c_0 S}{CECk} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\varphi_{0(2:1)} = \frac{RT}{2F} \ln \left[3 \left(\frac{c_0 S}{CECk} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中, CEC 为阳离子交换量 ($\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$); C^0 为本体溶液中阳离子的平衡浓度 ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); S 为土壤颗粒比表面积 ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$); κ 表示德拜耳-休克尔常数。

根据上述计算得到的表面电位可进一步计算出距离土壤 x 处的电场强度和表面电位, 分析土壤颗粒表面的电位和场强分布, 公式如下:

$$E_{(x)} = -\sqrt{\frac{8\pi RT}{\varepsilon} \left[C_0 \left(e^{\frac{ZF\varphi_{(x)}}{RT}} - 1 \right) \right]} \quad (3)$$

$$b = \tanh(F\varphi_0/4RT) \quad (4)$$

$$\varphi_{(x)} = \frac{4RT}{F} \tanh^{-1}(be^{-\kappa x}) \quad (5)$$

式中, x 为双电层中距离颗粒表面的距离 (dm); b 为中间变量; $E_{(x)}$ 为 x 处的电场强度 ($\text{V} \cdot \text{dm}^{-1}$); $\varphi_{(x)}$ 为距离为 x 时的表面电位 (V)。

(2) 土壤颗粒间内力作用的计算。由上述公式进一步计算出土壤颗粒表面的静电斥力、范德华引力和水合斥力^[22], 公式如下:

$$P_E = \frac{2}{101} RTC_0 \left\{ \cosh \left[\frac{ZF\varphi_{(d/2)}}{RT} \right] - 1 \right\} \quad (6)$$

$$P_{vdw} = -\frac{Aeff}{0.6\pi} (10\lambda)^{-3} \quad (7)$$

$$P_h(d) = 3.33 \times 10^4 e^{-5.76 \times 10^9 d} \quad (8)$$

式中, P_E 为静电斥力 (atm); P_{vdw} 为范德华引力 (atm); $P_h(d)$ 表示水合斥力 (atm); d 为两个相邻土壤颗粒间距离 (dm); $Aeff$ 为有效 Hamaker 常数, 对于土壤而言, 在溶液中其值为 7.8×10^{-20} J^[22]; $\varphi_{(d/2)}$ 为土壤颗粒双电层重叠处的中点电位^[23] (V), 可由以下方程计算:

$$\frac{\Pi}{2} \left[1 + 0.25 e^{\frac{2ZF\varphi_{(d/2)}}{RT}} + \left(\frac{3}{8} \right)^2 e^{\frac{4ZF\varphi_{(d/2)}}{RT}} \right] - \arcsin e^{\frac{ZF\varphi_0 - ZF\varphi_{(d/2)}}{2RT}} = \frac{1}{4} dke^{-\frac{ZF\varphi_{(d/2)}}{2RT}} \quad (9)$$

本研究利用 Excel 2016 和 Matlab 2022 进行初步数据统计与处理, 利用 Origin 2018 进行绘图和模型拟合, 利用 SPSS 27.0 进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度 K^+ 和 Mg^{2+} 对崩壁红土层渗压特性的影响

本研究设定 50 kPa 渗透压力模拟水分堆积后的强渗透压, 通过分析不同固结压力下红土层饱和土样的渗透系数来研究不同浓度 K^+ 和 Mg^{2+} 对土壤渗压的影响, 结果如图 3 所示。由图可知, 红土层渗透系数在固结压力 50~150 kPa 时的变化幅度大于 150~250 kPa。党发宁等^[8]在对饱和土固结过

程中渗透系数变化的合理性验证中发现, 随着固结压力的施加, 饱和土渗透系数存在一个突变的拐点, 故本研究可将 150 kPa 看作渗压过程中渗透系数变化的临界压力。饱和土壤渗压过程受土壤中电解质类型和浓度的影响, 土壤渗透系数与电解质浓度间存在良好的单指数递增关系如表 1 所示。在任意固结压力下, 土壤渗透系数均随着电解质浓度的增大而增大且两种电解质体系的增大程度有较大差异。相较于原状红土, K^+ 体系下的土壤渗透系数明显减小, Mg^{2+} 体系下的渗透系数增大。丁武泉^[22]发现, Mg^{2+} 体系下水分的运动速率大于 Na^+ 体系下的水分入渗速率, 且电解质浓度减小也会导致水分入渗速率减小。说明土壤中的离子类型和浓度会对土壤水分运动产生重要影响。杨志花^[24]通过控制 NaCl 浓度来研究土壤团聚体的稳定性, 发现 NaCl 浓度的改变会影响土壤团聚体稳定性。因此, 离子界面反应对土壤内部微观结构的影响可能是两种电解质体系改变土壤渗透系数的原因。

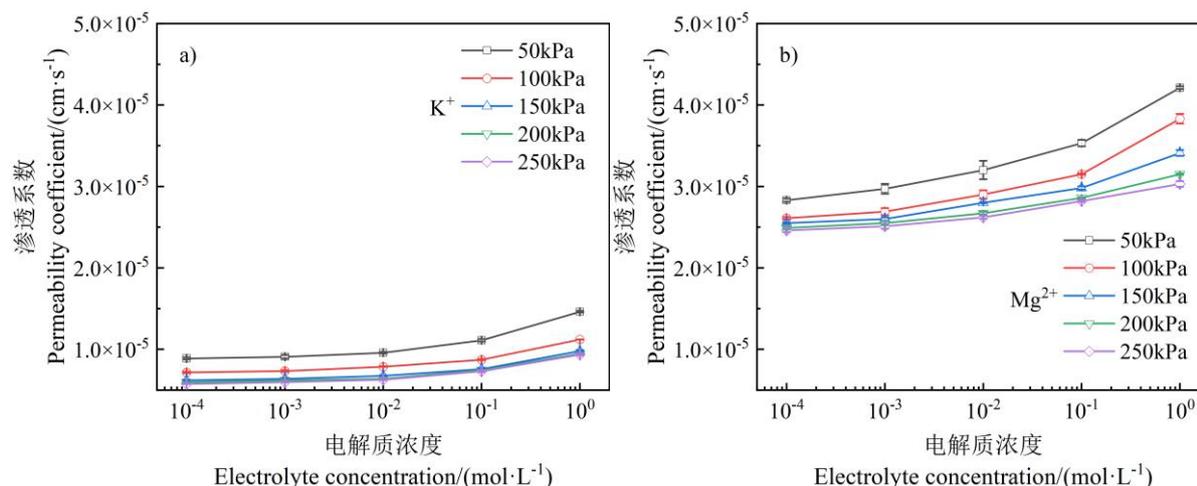


图 3 不同 K^+ 与 Mg^{2+} 体系下渗透系数与电解质浓度的关系

Fig. 3 Relationship between electrolyte concentration and permeability coefficient in red soil to different K^+ and Mg^{2+} electrolyte concentrations

表 1 1:1 和 2:1 型电解质体系下电解质浓度与渗透系数拟合方程

Table 1 Fitted equations of electrolyte concentration and permeability coefficient for red soils in 1:1 and 2:1 electrolyte

电解质类型 Electrolyte types	固结压力 Consolidation pressure/kPa	拟合方程 Fitted equations	R^2	P
KCl	50	$y = -5.58 \times 10^{-6} e^{-x^{0.22}} + 1.47 \times 10^{-5}$	0.991	<0.01
	100	$y = -4.04 \times 10^{-6} e^{-x^{0.13}} + 1.12 \times 10^{-6}$	0.897	<0.02
	150	$y = -3.59 \times 10^{-6} e^{-x^{0.13}} + 9.79 \times 10^{-6}$	0.898	<0.01
	200	$y = -3.50 \times 10^{-6} e^{-x^{0.12}} + 9.46 \times 10^{-6}$	0.916	<0.02
	250	$y = -3.60 \times 10^{-6} e^{-x^{0.12}} + 9.34 \times 10^{-6}$	0.918	<0.02
$MgCl_2$	50	$y = -1.25 \times 10^{-5} e^{-x^{0.15}} + 4.20 \times 10^{-5}$	0.927	<0.03
	100	$y = -1.22 \times 10^{-5} e^{-x^{0.12}} + 3.83 \times 10^{-5}$	0.857	<0.02
	150	$y = -8.61 \times 10^{-6} e^{-x^{0.12}} + 3.41 \times 10^{-5}$	0.840	<0.04
	200	$y = -6.61 \times 10^{-6} e^{-x^{0.10}} + 3.15 \times 10^{-5}$	0.868	<0.04
	250	$y = -5.71 \times 10^{-6} e^{-x^{0.10}} + 3.03 \times 10^{-5}$	0.880	<0.03

注: 表中 $P < 0.05$ 时, 表示两者具有显著相关关系, $P < 0.01$ 时, 表示两者具有极显著相关关系。

Note: The table, $P < 0.05$ indicates significant correlation and $P < 0.01$ indicates highly significant correlation.

土壤孔隙是土壤水渗流的主要通道，渗流速度取决于孔隙的大小和分布。反映土壤孔隙状况的指标一般用土壤孔隙比表示，渗压过程中土壤孔隙比的变化情况如图 4 所示。由图 4 可知，土壤孔隙比随着固结压力的增大而减小，符合多孔介质收缩的规律。各级固结压力下，土壤孔隙比均表现为： Mg^{2+} 体系>原状红土层> K^+ 体系，且随着电解质浓度的增大而增大，且 K^+ 使土壤孔隙比减小， Mg^{2+} 使土壤孔隙比增大，该规律与渗透系数变化情况一致。白玉锋^[25]在研究苏打碱土水盐运移特征时发现，加入土壤改良剂后其引入的不同价态的阳离子会改变土壤的孔隙状况。宋孝师等^[26]在研究 Mg^{2+} 对紫色土孔隙状况的影响时，通过分析土壤孔隙 CT 扫描图发现 Mg^{2+} 使土体更加疏松，孔隙大小分布更加复杂，形成多孔的土体结构，有利于水分的入渗。因此，本研究中 K^+ 体系下土壤孔隙比小于 Mg^{2+} 体系的原因是一价离子会分散土壤小颗粒，堵塞土壤大孔隙；二价离子能够加快土壤小颗粒的凝聚，提高土壤中大孔隙的数量。

离子价态和浓度影响了土壤孔隙比，改变了土壤孔隙结构，进而影响土壤渗压过程。虽然众多研究者^[22,24-25]在土壤水分入渗方面对水分运动过程进行了诸多定量研究并且建立了一些有效的水分运动模型，然而土壤结构过于复杂，现有的水分运动模型不仅无法很好地描述土壤压缩变形后的渗透性，而且缺少从土壤内部结构影响崩岗土壤渗透性的定量研究。李航和杨刚^[16]认为，不同离子屏蔽电荷的能力不同，其对土壤孔隙的影响是因为改变了土壤颗粒表面的静电相互作用，而静电相互作用决定着土壤颗粒间相互作用力，会对土壤团聚体稳定性产生影响，因此有必要对 K^+ 和 Mg^{2+} 体系影响下的土壤内力大小进行研究。

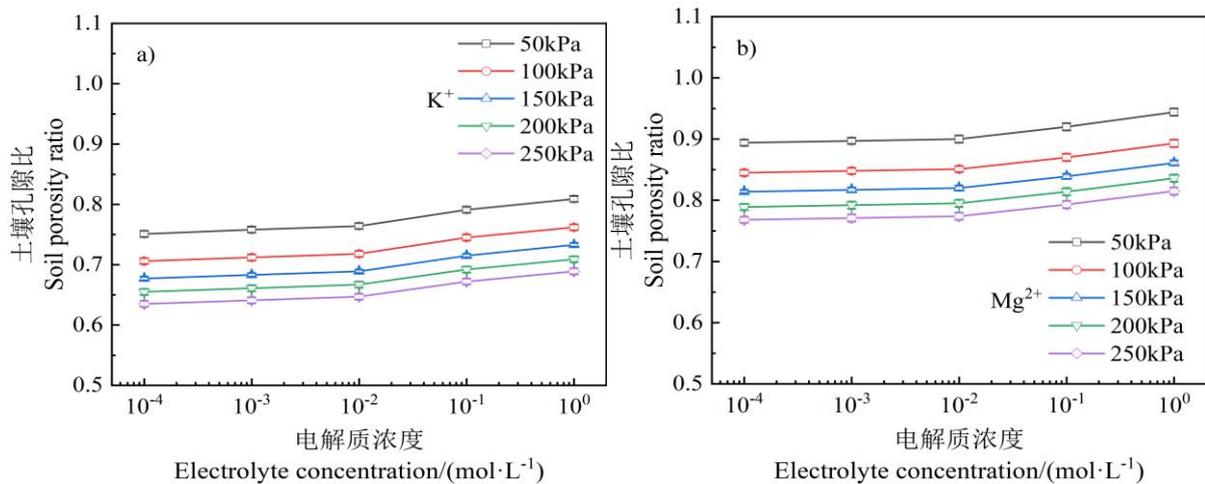


图 4 渗压过程电解质浓度与土壤孔隙比的关系

Fig. 4 Relationship between electrolyte concentration and soil porosity ratio during osmotic pressure

2.2 离子界面反应下的崩壁红土层土壤内力作用

(1) 土壤胶体颗粒表面电场强度分布。将基于表面性质联合测定法获得的阳离子交换量和比表面积计算得到的表面电位值代入式 (3) 至式 (5)，可以计算土壤胶体颗粒周围电场强度的分布，结果如图 5 所示。由图可知，在两种电解质体系中，伴随着土壤颗粒表面距离的增大，土壤颗粒表面电场强度不断减小，且随着电解质浓度的降低而增大。各浓度下，随着土壤颗粒表面距离的增加， Mg^{2+} 体系下的土壤表面电场强度下降速度大于 K^+ 体系，当电解质浓度为 $1^0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，两种电解质体系下土壤表面电场强度作用距离均不超过 15 nm，而当电解质浓度下降至 $10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，在超过 100 nm 处的土壤颗粒表面仍有很强的电场作用，说明离子界面反应可以有效调控土壤颗粒周围的电场强度分布状况。

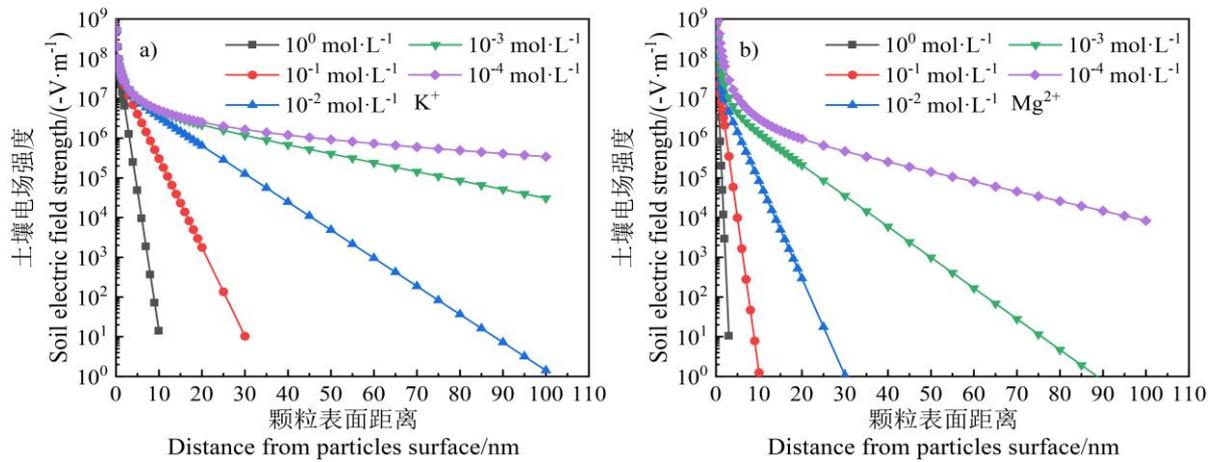


图 5 不同 K^+ 与 Mg^{2+} 浓度下红土层胶体颗粒周围电场强度分布

Fig. 5 Distribution of soil electric field strength around red soil particles relative to different K^+ and Mg^{2+} electrolyte concentrations

(2) 土壤胶体颗粒间的内力分布。根据经典双电层理论可知，离子类型和浓度改变了土壤颗粒表面电场强度分布，而土壤颗粒表面电场直接影响土壤颗粒间静电斥力的大小，决定着土壤团聚体破裂的强度。由式(6)和式(9)即可计算得到土壤颗粒表面静电斥力的分布状况，结果如图6所示。由图可知，两种电解质体系下相邻土壤颗粒间的静电斥力均随着颗粒间距离的增大而减小，随着电解质浓度的降低而增大，当电解质浓度降低到一定程度时，静电斥力变化差异开始减小，图中表现为静电斥力的曲线开始接近于重叠。且在相同的电解质浓度下， K^+ 体系下土壤颗粒间的静电斥力明显大于 Mg^{2+} 体系。刘新敏^[27]在研究土壤离子交换平衡时的电子涨落及其耦合作用时发现， K^+ 屏蔽电场的能力远小于 Mg^{2+} ，所以 Mg^{2+} 会降低土壤颗粒表面电场，从而降低两相邻土壤颗粒间的静电斥力。

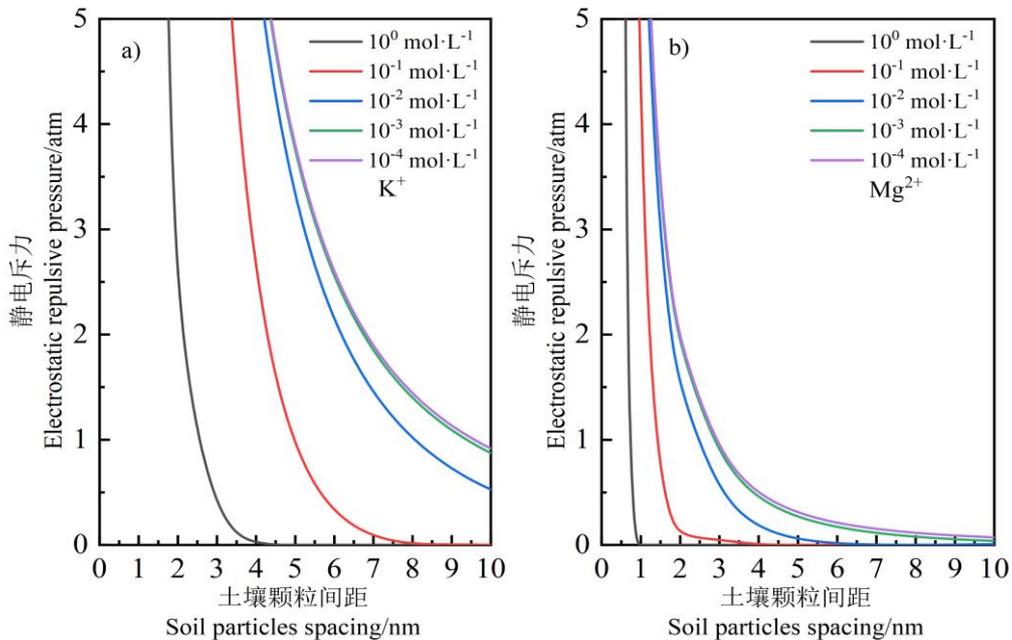


图 6 不同 K^+ 与 Mg^{2+} 浓度下的两相邻土壤颗粒静电斥力分布特征况

Fig. 6 Distribution of electrostatic repulsive pressure around red soil particles relative to different K^+ and Mg^{2+} electrolyte concentrations

土壤内力除了最主要的静电斥力外还有水合斥力和范德华引力，且二者的大小与土壤中电解质浓度和类型无关^[24]。由式(7)和式(8)可计算得到土壤胶体颗粒表面水合斥力和范德华引力的大小分布状况，结果如图7所示。由图可知，水合斥力和范德华引力均随着土壤颗粒间距的增大而减小，在1.5 nm后逐渐趋近于零，越靠近土壤颗粒表面增大的越快，且在近表面(0~0.5 nm)处有极高值，均表现为强烈的短程作用力。

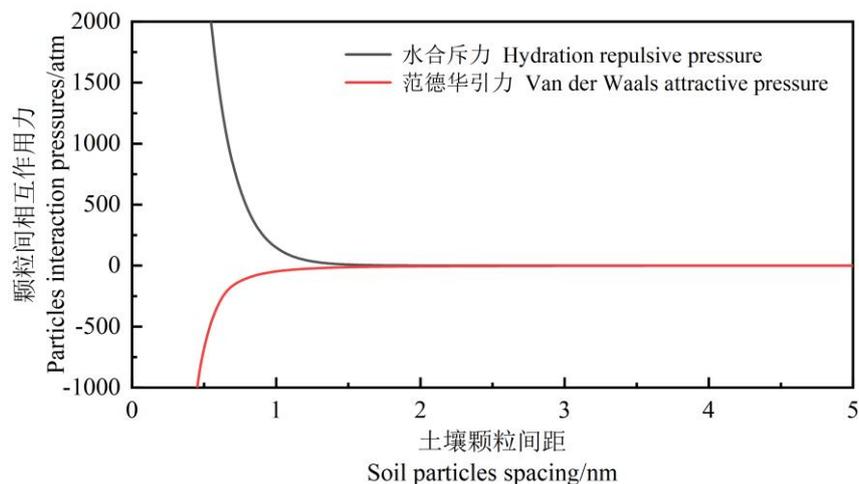


图7 K^+ 和 Mg^{2+} 体系下土壤颗粒间水合斥力和范德华引力的分布特征

Fig. 7 Distribution of hydration repulsive pressure and Van der Waals attractive pressure of red soils to K^+ and Mg^{2+} electrolyte concentrations

静电斥力、水合斥力和范德华引力的合力为土壤颗粒间的净作用力，结果如图8所示，其值的正负代表两相邻土壤颗粒间是排斥或是吸引。由图可知，在 K^+ 和 Mg^{2+} 体系中净作用力的分布具有较大差异。在 K^+ 体系中，净作用力总体表现为随电解质浓度减小而增大的斥力，先急速下降而后逐渐稳定。在电解质浓度为 $10^0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，净作用力在 1.75 nm 处出现峰值吸引力，理论上该浓度下土壤的大孔隙应该增多，渗透系数更大，然而本研究中浓度为 $10^0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 K^+ 溶液仍能使土壤渗透系数明显减小，丁武泉^[22]在不同浓度 Na^+ 影响紫色土入渗速率的研究中也得到了类似结果，对于该结果，可认为颗粒间距为 1.75 nm 处的峰值净吸引力只是将土壤颗粒膨胀至直径 1.75 nm 时将其稳定下来，土壤团聚体并未破碎，仅表现为体积增大，但整个土体孔隙体积仍是减小的。在 Mg^{2+} 体系中，净作用力随着颗粒间距的增大表现为先增大后减小而后稳定的净吸引力，且随着电解质浓度的增加而增大。 K^+ 体系下的红土层土壤仅在电解质浓度为 $10^0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时出现可以稳定团聚体的吸引力，其他浓度下均存在使团聚体发生破碎的斥力，而 Mg^{2+} 体系下的土壤颗粒间总是相互吸引，土壤颗粒间产生不同状态的净作用力是 Mg^{2+} 体系下土壤孔隙比大于 K^+ 体系的根本原因。 $10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 是静电斥力和净作用力随电解质浓度变化的临界浓度，该浓度与土壤渗压试验观察到的临界浓度一致。

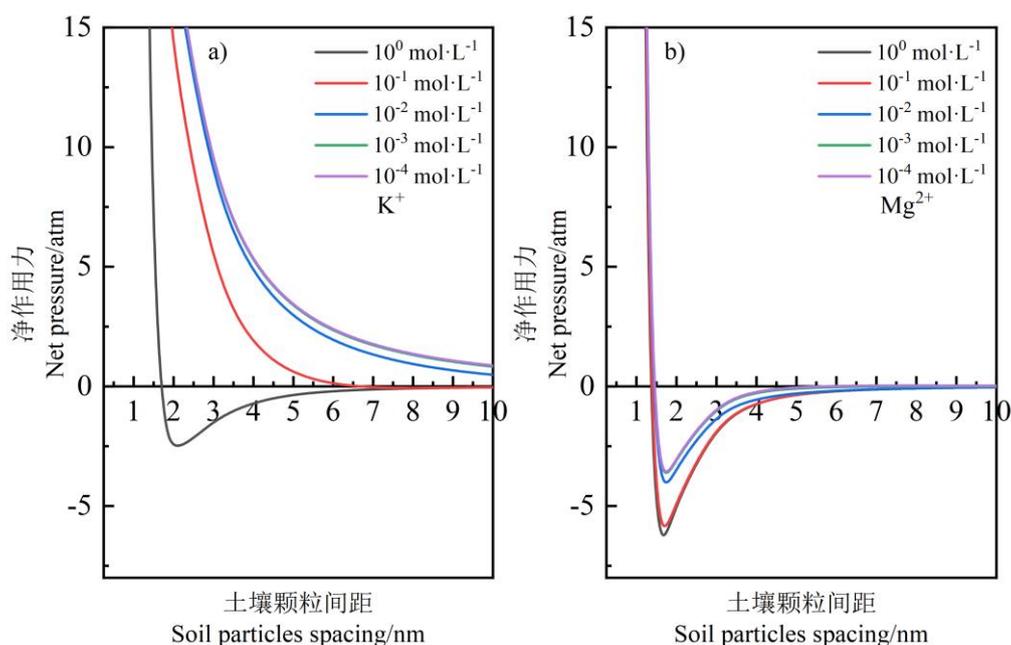


图 8 不同 K^+ 与 Mg^{2+} 浓度下土壤颗粒间净作用力的分布特征

Fig. 8 Distribution of net pressure of red soils at various K^+ and Mg^{2+} electrolyte concentrations

2.3 土壤内力对土壤渗透系数的影响

由图 7 可知, 当土壤相邻两颗粒间距为 1.5 nm 时, 范德华引力和水合斥力已经逐渐趋近于零且不受离子界面反应的影响。罗雅雪^[28]和 Li 等^[29]发现, 不同离子与土壤颗粒表面的相互作用差异是影响土壤颗粒分散和凝聚过程的原因, 静电斥力强烈影响土壤团聚体的稳定性, 且对土壤水分运动产生影响。因此, 静电斥力主导着土壤内力的大小, 决定着土壤颗粒的凝聚和分散过程。为了进一步明确离子界面反应下土壤内力对土壤渗压的影响, 对土壤两颗粒间距为 1.5 nm 时 K^+ 和 Mg^{2+} 电解质体系下土壤内力的合力即净作用力与 150 kPa 下土壤渗压的关系进行分析, 并建立净作用力与红土层渗透系数间的拟合模型, 结果如图 9 所示。

由图 9 可知, 土壤相邻两颗粒间距为 1.5 nm 时, K^+ 体系下两相邻土壤颗粒间净作用力为斥力, 净斥力增大, 土壤渗透系数减小; Mg^{2+} 体系下为吸引力, 净吸引力增大, 土壤渗透系数增大。受离子界面反应的影响, 在两相邻土壤颗粒间土壤内力从 -10 atm 增大至 35 atm, 这种先逐渐减小的净吸引力转变为逐渐增大的净斥力的过程中, 崩岗红土层渗透系数表现为先迅速减小再缓慢减小然后稳定的单指数衰减函数 $y=ae^{-x/t}+b$, $R^2>0.96$ 。Katuwal 等^[30]的研究认为, 土壤水在土壤大孔隙中的运移是土壤水分运动的主要形式, 土壤大孔隙是超过 90% 土壤水运移的通道, 而在固结过程中排出的水几乎全部为土壤大孔隙中的自由水。由此, 2.1 中渗透系数随电解质浓度的变化可得到解释, 即 K^+ 体系下的土壤颗粒间由于净作用力为斥力或较小的只能维持土壤团聚体稳定的引力, 土壤团聚体体积增大或破碎, 土壤大孔隙数量减少, 表现为渗透系数减小; Mg^{2+} 体系下的土壤颗粒间净作用力为吸引力, 大孔隙数量增加, 表现为渗透系数增大。本研究中, 在土壤内力从 -10 atm 增大至 35 atm 的过程中, 电解质类型改变的同时, 电解质浓度从 $10^0 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 减小至 $10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 降雨改变的离子浓度和人为施肥所用的肥料浓度均在此范围内。因此, 可以通过调控进入崩岗红土层土壤的电解质类型和浓度来影响土壤侵蚀的发生和发展。

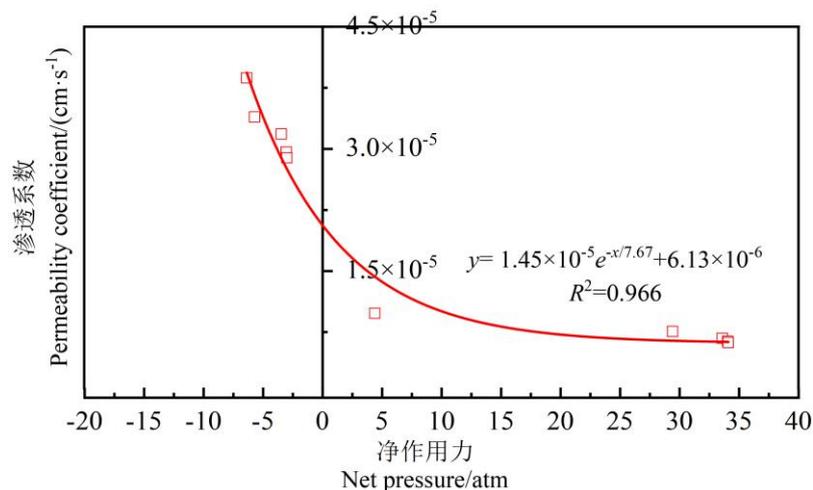


图 9 相距 1.5 nm 时两颗粒间净作用力与土壤渗透系数关系的拟合模型

Fig. 9 Fitting model of the relationship between net pressure and permeability coefficient of red soils between two particles 1.5 nm apart

3 结论

通过对不同浓度 K^+ 与 Mg^{2+} 溶液下崩岗红土层土壤进行渗压试验, 并从土壤表面电化学性质和土壤内力角度分析离子界面反应对土壤渗压特性的影响, 结果表明: 土壤胶体双电层结构对土壤颗粒表面电位的表征会影响土壤颗粒表面电场强度进而影响土壤内力, 通过对土壤颗粒间的静电斥力、水合斥力及范德华引力进行定量计算, 发现土壤团聚体稳定性主要受静电斥力的影响, 土壤团聚体破裂以后释放的小颗粒会改变土壤孔隙状况进而影响土壤的渗压过程。土壤的渗压过程受土壤体系中离子界面反应的影响, 土壤的渗透系数均随着电解质浓度的增大而增大, 两者具有良好的单指数递增关系。 K^+ 和 Mg^{2+} 分别降低和提高土壤的渗透系数, 这是由于 Mg^{2+} 体系下的土壤内力总表现为净吸引力, 加速了土壤小颗粒的凝聚, 使土壤中大孔隙数量增加; 而 K^+ 存在下的土壤孔隙结构由于颗粒间的净斥力导致土壤小颗粒分散, 大孔隙数量减少。随着土壤内力的增大, 高渗压状态下的崩岗红土层渗透系数表现为单指数衰减规律, 离子界面反应对土壤内力的影响会使崩岗土壤内部结构发生一定程度的变化, 从而影响土壤渗压特性。

参考文献 (References)

- [1] Zhang X B. Approach to weathering and expansion mechanism of dilapidated granite[J]. Soil and Water Conservation in China, 2005(7): 10-11. [张信宝. 崩岗边坡失稳的岩石风化膨胀机理探讨[J]. 中国水土保持, 2005(7): 10-11.]
- [2] Huang Y H. Soil and water conservation: Southern edition[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016. [黄炎和. 水土保持学: 南方本[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.]
- [3] Li G, Tang C A, Li L C. Advances in rock deformation and failure process under water-rock coupling[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5): 593-619. [李根, 唐春安, 李连崇. 水岩耦合变形破坏过程及机理研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 593-619.]
- [4] Bolt G H. Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays[J]. Géotechnique, 1956, 6(2): 86-93.
- [5] Editorial Board of Environmental science dictionary. Environmental science dictionary[M]. 2nd ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2008. [《环境科学大辞典》编委会. 环境科学大辞典[M]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.]
- [6] Xu Y Z, Yang Y H, Huang Z Q. Study on the influence of compaction degree on permeability characteristics of expansive soil[J]. Western China Communications Science & Technology, 2022(2): 8-10. [许英姿, 杨响和, 黄政祺. 压实度对膨胀土渗透特性的影响研究[J]. 西部交通科

- 技, 2022(2): 8-10.]
- [7] Gao J, Dang F N, Ding J L, et al. Research on soft soil consolidation calculation method considering the impacts of initial consolidation state[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3189-3196. [高俊, 党发宁, 丁九龙, 等. 考虑初始固结状态影响的软基固结计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3189-3196.]
- [8] Dang F N, Song J Y, Zhou M, et al. Consolidation theory of saturated soil considering permeability coefficient variation and its rationality verification[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(6): 506-515. [党发宁, 宋靖宇, 周玫, 等. 饱和土的变渗透系数固结理论及其合理性验证[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2022, 20(6): 506-515.]
- [9] Liu J F. The Effects of soil internal forces on aggregate stability and splash erosion of main soils in loess region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2022. [刘婧芳. 土壤内力对黄土区主要土壤团聚体稳定性及溅蚀的影响机制[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2022.]
- [10] Ma R T, Hu F N, Liu J F, et al. Evaluating the effect of soil internal forces on the stability of natural soil aggregates during vegetation restoration[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(9): 3034-3043.
- [11] Xing X G, Ma X Y, Kang D G. Impacts of type and concentration of salt cations on soil water retention and desiccation cracking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 115-122. [邢旭光, 马孝义, 康端刚. 盐阳离子类型及浓度对土壤持水及干缩开裂的作用效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 115-122.]
- [12] Huang X R, Li H, Li S, et al. Effect of coupling of electric field and organic macromolecular on soil aggregate stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(4): 734-742. [黄学茹, 李航, 李嵩, 等. 土壤电场与有机大分子的耦合对土壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 734-742.]
- [13] Liu Y X, Li W T, Sun X Y, et al. Pb and Cd-polluted soil remediation effects by green waste compost[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(4): 802-810. [刘源鑫, 李维庭, 孙向阳, 等. 园林废弃物堆肥对铅镉污染土壤的修复效果[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 802-810.]
- [14] Gan L, Zhang J, Zheng S W, et al. Effects of straw mulching on the change of soil moisture and structure in sugarcane field in Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(7): 1745-1752. [甘磊, 张俊, 郑思文, 等. 秸秆覆盖对广西甘蔗地土壤水分与结构变化的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(7): 1745-1752.]
- [15] Xu Z S, Hu W L. Characteristics of pore structure and permeability in soil crust using 3D X-CT images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 89-97. [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.]
- [16] Li H, Yang G. Rethink the methodologies in basic soil science research: From the perspective of soil chemistry[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4): 819-826. [李航, 杨刚. 基础土壤学研究的方法论思考: 基于土壤化学的视角[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 819-826.]
- [17] Zhang Z, Chen J, Lin J S, et al. Effect of water content on swell-shrink characteristics of collapsed granite soil in Anxi County[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 600-609. [章智, 陈洁, 林金石, 等. 含水率对安溪花岗岩崩岗土体胀缩特性的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 600-609.]
- [18] Hu F N, Xu C Y, Li H, et al. Particles interaction forces and their effects on soil aggregates breakdown[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 147: 1-9.
- [19] Fu E D. Analysis and discussion of the variable water head method for the determination permeability coefficient[J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(2): 68-69. [符二东. 变水头法测定渗透系数试验方法分析及探讨[J]. 山西建筑, 2014, 40(2): 68-69.]
- [20] Zhao Y H, Wang F G, Gao Z K, et al. Method of determining cohesive soil pressure instrument parameters[J]. Experimental Technology and Management, 2014, 31(8): 38-41. [赵玉红, 王福刚, 高振凯, 等. 渗压仪测定黏性土多参数的方法[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(8): 38-41.]
- [21] Tian R, Liu X M, Gao X D, et al. Observation of specific ion effects in humus aggregation process[J]. Pedosphere, 2021, 31(5): 736-745.
- [22] Ding W Q. The effect of ion-surface interactions on soil water infiltrability[D]. Chongqing: Southwest University, 2016. [丁武泉. 离子界面反应对土壤水分入渗的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016.]
- [23] Hu F N, Liu J F, Xu C Y, et al. Soil internal forces initiate aggregate breakdown and splash erosion[J]. Geoderma, 2018, 320: 43-51.

- [24] Yang Z H. Water infiltration and simulation of typical loess-developed soils affected by soil internal forces[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. [杨志花. 土壤内力作用对黄土母质发育土壤水力学性质的影响及模拟[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.]
- [25] Bai Y F. Characteristics of sodic alkaline soil water infiltration process and water-salt transport[D]. Harbin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2021. [白玉锋. 苏打碱土土壤水分入渗过程及水盐运移特征[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2021.]
- [26] Song X S, He J H, Ding W Q, et al. Influence mechanism of ionic interface reaction on soil porosity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 47-53. [宋孝帅, 何家洪, 丁武泉, 等. 离子界面反应对土壤孔隙状况的影响机制[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 47-53.]
- [27] Liu X M. Cation exchange equilibrium in soil: Electric field, quantum fluctuation of ion outer electrons as well their coupling effects[D]. Chongqing: Southwest University, 2014. [刘新敏. 土壤离子交换平衡: 电场、量子涨落及其耦合作用[D]. 重庆: 西南大学, 2014.]
- [28] Luo Y X. Study on soil particle interaction as considering hofmeister effects and its effects on soil water infiltration[D]. Chongqing: Southwest University, 2019. [罗雅雪. 基于 Hofmeister 效应的土粒相互作用及其对土壤水分入渗的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2019.]
- [29] Li Q Y, Li X, Yang S, et al. Structure, dynamics, and stability of water molecules during interfacial interaction with clay minerals: Strong dependence on surface charges[J]. ACS Omega, 2019, 4(3): 5932-5936.
- [30] Katuwal S, Moldrup P, Lamandé M, et al. Effects of CT number derived matrix density on preferential flow and transport in a macroporous agricultural soil[J]. Vadose Zone Journal, 2015, 14(7): 1-13.

(责任编辑: 檀满枝)