

弱酸侵蚀作用下 CaCO_3 对黄土液塑限的影响

孟杰¹, 李喜安^{1,2}, 吴建辉³, 张爽¹, 王力¹, 张晨¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 国土资源部 岩土工程开放研究实验室, 陕西 西安 710054; 3. 河北省地矿局第一地质大队, 河北 邯郸 056001)

摘要: [目的] 探讨碳酸钙赋存形式及其在黄土微结构中的作用, 为弱酸侵蚀作用下碳酸钙对黄土液塑限的影响机理提供依据。[方法] 首先采用蒸馏水洗去黄土中易溶盐, 再经 1 mol/L 的醋酸溶液处理得到不同碳酸钙含量的黄土试样, 采用液塑限联合测定仪测定黄土液塑限指标; 借助扫描电子显微镜 (SEM) 对试样进行 X 射线能谱分析 (EDX) 获取元素 Mapping 图像进行分析。[结果] ① 醋酸作用下, 液塑限随碳酸钙含量的减少而显著降低; ② 碳酸钙块、超细碳酸钙以骨架颗粒、集粒形式与 Si, Al, Si-Fe 接触, 其主要作用为颗粒之间连接胶结作用以及充当黄土的孔隙骨架。[结论] 醋酸处理前期以黏粒中碳酸钙溶解为主, 进而黏粒的流失导致黄土砂化而最终影响了其液塑限指标。

关键词: 碳酸钙; 液塑限; 酸侵蚀; 元素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)03-0118-05

中图分类号: TB3

文献参数: 孟杰, 李喜安, 吴建辉, 等. 弱酸侵蚀作用下 CaCO_3 对黄土液塑限的影响 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 118-122. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.019. Meng Jie, Li Xi'an, Wu Jianhui, et al. Influence of CaCO_3 on loess liquid and plastic limits under weak acid erosion [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 118-122.

Influence of CaCO_3 on Loess Liquid and Plastic Limits Under Weak Acid Erosion

MENG Jie¹, LI Xi'an^{1,2}, WU Jianhui³, ZHANG Shuang¹, WANG Li¹, ZHANG Chen¹

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering, Ministry of Land and Resources, Xi'an, Shaanxi

710054, China; 3. No. 1 Geology Team of Exploration Bureau of Hebei Province, Handan, Hebei 056001, China)

Abstract: [Objective] To study the form of calcium carbonate and its effect on the loess microstructure in order to provide basis for the study of influence mechanism of calcium carbonate on the loess liquid and plasticity limits. [Methods] First, using distilled water to wash soluble salt in loess, and obtained loess samples with different contents of calcium carbonate processed by 1 mol/L acetic acid solution. Liquid and plastic limits joint meter was used to measure loess liquid plastic limit indicator. The scanning electron microscope (SEM) was used to analyze the X-ray energy dispersive microanalysis (EDX). [Results] ① Under the action of acetic acid, the liquid plastic limit decreased significantly with the decrease of calcium carbonate. ② Calcium carbonate blocks and superfine calcium carbonate were exposed as the skeleton and set granules to Si, Al and Si-Fe, and its main function was to connect the cementation between the particles and the pore skeleton of the loess. [Conclusion] In the early stage of acetic acid treatment, the calcium carbonate was mainly dissolved in the clay granule, and the loss of granule led to the loss of loess sand soil and eventually affected the liquid and plastic limit index.

Keywords: calcium carbonate; liquid and plastic limits; acid attack; element

土壤退化是水土流失评估中的关键问题之一, 体的液限和塑限, 即土壤易受水的影响从半固态到塑前已经提出了几种评价土壤性质的指标, 其中包括土 性状态 (塑性极限, ω_p), 从塑性状态到液态 (液体极

收稿日期: 2017-11-06

修回日期: 2018-01-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于三维微观结构的黄土湿陷性成因及潜蚀黄土场地湿陷机理研究”(41572264), “洞穴侵蚀环境研究下黄土斜坡滑塌机理研究”(41172255), “沙漠—黄土高原过渡区风积砂性黄土动力特性试验研究”(41440044)

第一作者: 孟杰 (1992—), 男 (汉族), 河北省邢台市人, 硕士研究生, 主要从事黄土工程地质及地质灾害防治工作。E-mail: 260843911@qq.com.

通讯作者: 李喜安 (1968—), 男 (汉族), 陕西省丹凤县人, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土地质灾害方面的教学与科研工作。E-mail: dclixa@chd.edu.cn.

限, w_l) 时的含水量。Curtaz 等^[1], Stanchi 等^[2] 和 Vacchiano 等^[3] 曾提出将液塑限作为评估山地土壤侵蚀脆弱性及地表浅层移动的指标。

黄土是一种质地相对均一, 富含碳酸钙, 疏松多孔且具湿陷性的土壤, 易受雨水、地表径流等因素影响导致其大量流失^[4]。在生活中随着工业废气和交通尾气中的 SO₂, NO_x, HCl 等排放溶于水后导致雨水、地表径流 pH 值下降进而可形成酸性水质, 而黄土中带有 CO₃²⁻, SO₄²⁻ 离子的盐类物质(如碳酸盐、石膏等)极易同酸性液体发生化学反应。根据西北水科所的资料, 西北黄土的易溶盐含量平均值为 0.32%, 而中溶盐以石膏为典型代表平均含量为 0.22%, 难溶盐碳酸镁含量不到碳酸钙含量的 1%, 而碳酸钙的总平均含量为 10.34%。当水质 pH 值不同时土体所呈现的液塑限也有所不同。李善梅等^[5], 师林等^[6], 庄雅婷等^[7] 曾通过改变土壤中水的 pH 值对其液塑限进行了探究, 认为土壤液塑限明显受水 pH 值影响。但是土壤液塑限不仅受水 pH 值变化的影响, 与土壤中黏粒含量也有很大关系, 如 Stanchi 等^[8-9], Wei 等^[10] 认为土壤的液塑限取决于土壤有机质或黏粒的含量。黄土中富含碳酸钙, 而碳酸钙也在黄土骨架颗粒之间起着非常重要的胶结作用,

在酸性条件下碳酸钙胶结必然会发生变化而影响到黄土的液塑限。由此可见, 基于酸性条件下探究碳酸钙对黄土液塑限指标的影响及其机理对防治水土流失具有重要意义。

郭玉文等^[11-12] 采用 X 射线能谱仪的元素 Mapping 分析了黄土团粒中碳酸钙赋存形式, 其主要针对 Si, Al, Ca 这 3 种元素分布进行了研究(未对 Fe 元素进行说明), 而西北地区黄土中主要元素为 Si, Al, O, Ca, Fe, Cl 等, 这些元素以不同的化学结构组成了不同的物质, 其中阳离子以 Si²⁺, Al³⁺, Ca²⁺ 以及 Fe²⁺, Fe³⁺ 为主。本文拟通过对经醋酸处理的黄土样进行液塑限联合测定, 借助扫描电子显微镜的 X 射线能谱分析仪进行元素 Mapping 分析, 揭示碳酸钙赋存形式及其在黄土微结构中的作用, 进一步探究酸性条件下碳酸钙对黄土对液塑限的影响。

1 材料与方法

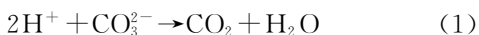
1.1 试验材料

所取土样为陕西省延川县黄土样, 取样深度为地下 5 m, 按照《土工试验规程》^[13] 测得其基本物理指标见表 1。土壤中天然含水的 pH 值为 6.8, 近于中性。

表 1 黄土的基本物理指标

取样地点	比重 G_s	天然含水率 $w/\%$	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	干密度 $\rho_d/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	颗粒组成/ $\%$		
						砂粒 (0.25~0.075 mm)	粉粒 (0.075~0.005 mm)	黏粒 (<0.005 mm)
陕西省延川县	2.65	11.62	27.67	15.14	1.43	<12.35	>73.46	>14.19

用蒸馏水对黄土中 CaCl₂, NaCl 等易溶盐进行淋滤, 重复 3~5 次(通过检测溶液中离子浓度, 当浓度为 0 时易溶盐被除去), 制得去易溶盐土。然后再用酸性溶液对去易溶盐土进行碳酸钙淋溶。为了安全及减少对硅、铁氧化物的影响, 本试验采用醋酸淋溶的方法^[14], 用 99.9% 的冰乙酸(郑州博研生物科技有限公司生产)配置成 1 mol/L 的酸性溶液, 式(1)为碳酸钙与醋酸的反应式:



按照该式所示的反应比例, 计算出淋溶不同含量的碳酸钙所需的醋酸溶液体积。为排除醋酸溶液淋溶后所产生的醋酸盐等对试验结果的干扰, 用蒸馏水多次浸泡醋酸淋溶后的土样, 然后烘干、碾碎, 过 2 mm 的筛备用。最终将所制得的土样分为 6 批, 分别为: 去易溶盐土(S)、去碳酸钙-1(I₁)、去碳酸钙-2(I₂)、去碳酸钙-3(I₃)、去碳酸钙-4(I₄)、去碳酸钙-5(I₅)。淋溶后通过气量法测定黄土中碳酸钙的含量,

测量时控制室温为 23 °C, 由公式(2)计算碳酸钙的含量。去易溶盐土 S 是天然黄土经蒸馏水浸泡后所得, 通过上述制备得到碳酸钙含量分别为 12.8%, 11.2%, 10.1%, 8.2%, 6.5%, 4.9% 的土样, 分别编号为 S, I₁, I₂, I₃, I₄, I₅。具体试验数据见表 2。

$$CaCO_3 = \frac{V \times P \times 10^{-6} \times 2.272}{m_d \times 10^{-3}} \quad (2)$$

式中: CaCO₃——难溶盐碳酸钙的含量(g/kg); V——CO₂ 体积(ml); p——在试验温度和气压下二氧化碳密度(ug/ml); m_d——烘干土质量(g); 2.272——由 CO₂ 换算成 CaCO₃ 的因数; 10⁻⁶——微克换算成克的因数; 10⁻³——克换算成千克的因数。

1.2 研究方法

借助中国南京同仁光电仪器研究所 SYS 系列数显液塑限测定仪(精度: 0.01 mm)采用液塑限联合测定法获取黄土液塑限指标^[13], 采用压样法将土样 S, I₃, I₅ 制成与原干密度含水率相同的重塑黄土样 S*,

I_3^* , I_5^* , 将其通过浸泡环氧树脂、切割打磨、镀碳系列处理后^[15]置于载玻片上,通过美国 FEI 公司生产的 FEI Quanta 400 FEG 扫描电镜获取元素 mapping 微观

图像,通过 Image-Pro Plus(IPP)程序进行数字图像的参数计算和参数分类,籍此对黄土微观结构图像数据提取分析。

表 2 乙酸浸泡后碳酸钙含量测定结果

土样类型	m_d / g	试验温度/ °C	大气压力/ p_a	V/ ml	P/ ($\mu\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$)	碳酸钙含量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
去易溶盐土 s	0.5	23	99 256	15.5	1815	128.0
去碳酸钙 I_1	0.5	23	99 856	13.5	1 828	112.0
去碳酸钙 I_2	0.5	23	99 590	12.2	1 822	101.0
去碳酸钙 I_3	0.5	23	99 362	9.9	1 817	82.0
去碳酸钙 I_4	0.5	23	99 633	7.8	1 824	65.0
去碳酸钙 I_5	0.5	23	99 453	5.9	1 820	49.0

2 结果与分析

2.1 淋溶前后粒级变化

对制得的 6 批样品,通过激光粒度仪测得其粒径组份,并对其中粒径小于 0.005 mm 的颗粒(黏粒)含量进行统计分析。由图 1 可见,黄土在醋酸溶液侵蚀作用下,黏粒含量随碳酸钙减少而降低,试样 I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 中 CaCO_3 减少量为 1.6%, 2.7%, 4.6%, 6.3%, 7.9%, 而相对应的黏粒减少量为 1.51%, 2.49%, 4.1%, 5.33%, 6.35%。表明 CaCO_3 含量与黄土中粒径小于 0.005 mm 的黏粒含量显著呈正相关关系,说明酸侵蚀作用前期以黏粒中的碳酸钙溶解为主(黏粒颗粒较细而比表面大,因此与酸接触面积大,碳酸钙溶解较快)。此后,随着黏粒中碳酸钙大量溶解逐步转化为以粒径大于 0.005 mm 的碳酸钙颗粒溶解为主。

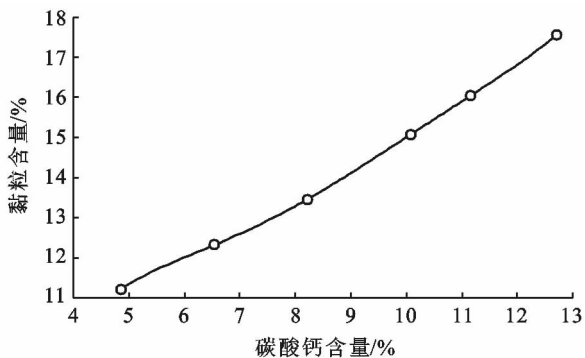


图 1 黏粒含量随 CaCO_3 含量变化曲线

2.2 碳酸钙对液塑限影响

分别对试样 $S, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$ 进行液塑限测定,每组试样选取 3 组误差小于 0.2% 的界限含水率。图 2 为试样液塑限指标随碳酸钙含量的变化曲线。由图 2 可见黄土在醋酸溶液侵蚀作用下,塑限随碳酸钙含量的减少呈下降趋势,幅度在 2% 左右(图 2a);液

限随碳酸钙含量减少先下降而后趋于平缓,幅度在 1% 左右(图 2b);液性指数随碳酸钙含量减少而逐渐升高,幅度在 0.18 左右(图 2c);塑性指数随碳酸钙含量减少先减少而后逐步升高,幅度在 1.3 左右(图 2d)。黄土的液塑限相关指标在一定程度上反应了黄土随黏粒碳酸钙流失而逐步砂化。

2.3 SEM/EDX 分析

通过 EDX 的元素 Mapping 功能获取黄土试样中不同元素的分布图像(图 3),由元素 Mapping 中图不同元素的分布情况可见,延川地区黄土以 Si 氧化物、Al 氧化物、Ca 氧化物、Fe 氧化物等物质为主^[16](有机质较少),黄土去除易溶盐后 Ca^{2+} 以中溶盐硫酸钙、难溶盐碳酸钙的形式存在,西北地区黄土中硫酸钙含量约为 0.22%,加之多次淋滤后其含量少之又少,所以获取的 Ca 元素分布即可表示碳酸钙分布。图 3 为不同放大倍数下试样 S^* 的电镜图像以及对应的元素 Mapping 图,同时可获取图像内所有元素含量百分比,其中 a 与 b 为 2 种代表性分布,以 Si, Al, Ca, Fe 元素的独立分布以及 Si-Fe, Si-Al 元素的组合分布为主,可以清晰的观测到颗粒的轮廓以及接触方式。图 3a 中 Si 元素含量 73.1%, Al 元素含量 18.1%, Ca 元素含量 8.6%, Fe 元素含量 0.2%;图 3b 中 Si 元素含量 69.3%, Al 元素含量 12.9%, Ca 元素含量 13.5%, Fe 元素含量 4.3%。元素 Mapping 图中以 Si, Al, Ca 为主,Fe 的含量相对较少。可以清楚的观察到碳酸钙的赋存形式:a 粒径大于 0.005 mm 的碳酸钙块以颗粒形式与 Si, Al 面接触(图 3a),充当黄土骨架颗粒(其粒径大于 5 μm)。b 粒径小于 0.005 mm 的超细碳酸钙以黏粒、集粒同 Si, Al, Si-Fe, Si-Al 散点接触(图 3b, 碳酸钙以散点形式分布在颗粒之间,粒径多小于 5 μm),充当胶结颗粒的作用。

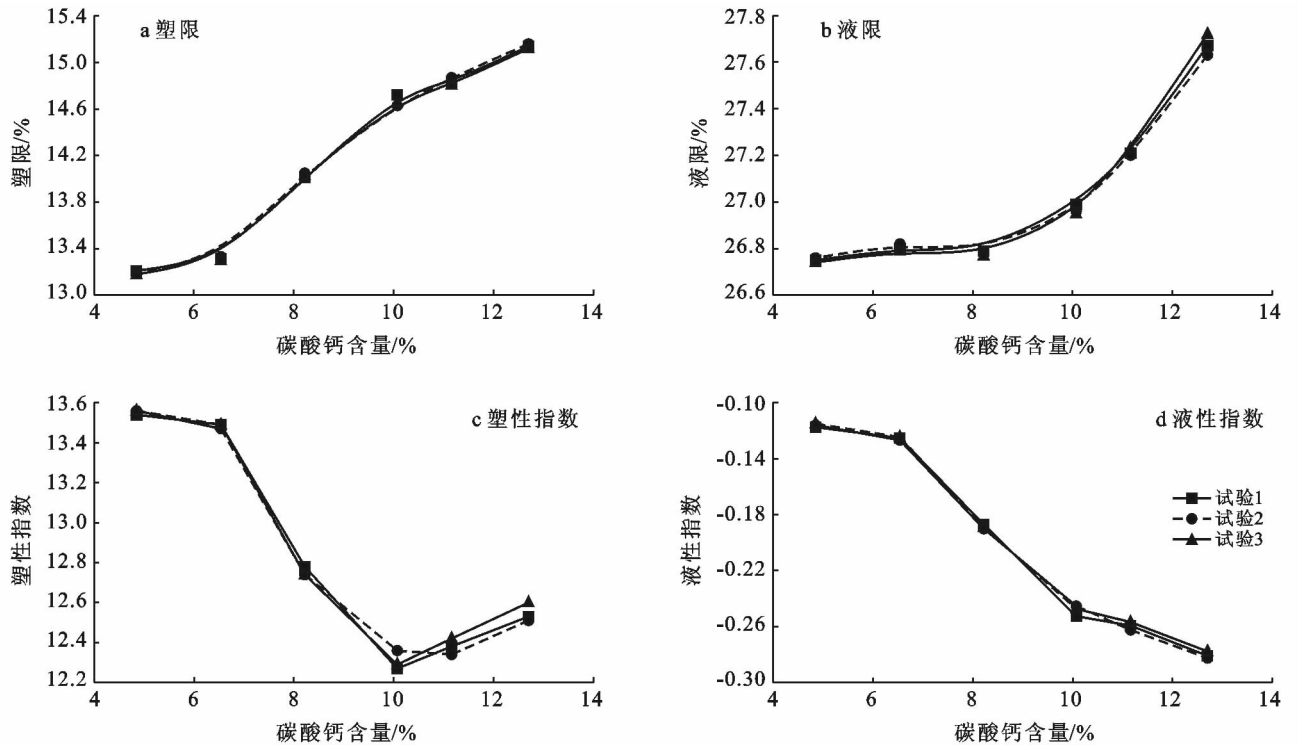


图 2 液塑限指标随碳酸钙含量变化

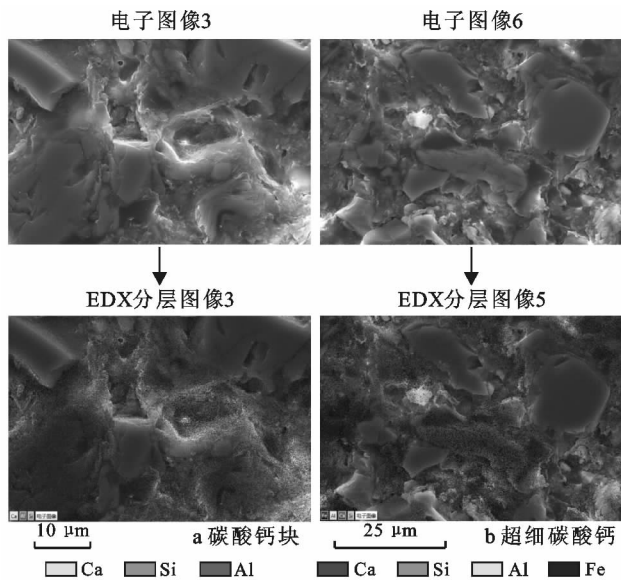


图 3 S* 切片电镜图像及元素 Mapping 分布

通过对黄土液塑限辅以黏粒含量分析,并借助 SEM/EDX 的元素 Mapping 分析,在酸性溶液侵蚀下黄土中碳酸钙溶解以黏粒中超细碳酸钙溶解为先,直接影响黄土液塑指标变化,其结果致使粉粒、砂粒相对含量增加,黄土趋于砂化。

现实生活中随着工业废气和交通尾气中的 SO₂, NO_x, HCl 排放导致降雨 pH 值下降进而形成了酸雨的酸酐部分直接作用于黄土,而另一部分通过地表径流及其他排放的溶液侵蚀黄土,导致黄土中碳酸钙含

量减少。一方面,胶结物质中碳酸钙(黏粒碳酸钙)被快速溶解,使黄土颗粒间吸附性能减弱,胶结强度降低,胶结方式逐渐从面接触胶结形式向点接触胶结转变;另一方面随着超细碳酸钙的大量溶解,进而骨架颗粒中碳酸钙块也被逐步溶蚀,使骨架颗粒的形态、连接方式等发生改变,支架—架空孔隙增多而使得湿陷性增强。

图 4 为 S* (碳酸钙含量 12.8%), I₃* (碳酸钙含量 8.2%), I₅* (碳酸钙含量 4.9%) 的电镜图像及其所对应的胶结模式。随着碳酸钙含量的减少,颗粒之间接触弱化,由面接触逐渐转变为点接触(黄土中面接触弱化的情况随碳酸钙减少逐步增多)。

将酸性溶液侵蚀黄土中碳酸钙的过程分成封闭体系和开放体系两种空间作用模式(图 5): ①在开放体系中随着 H⁺ 的增加或时间效应下碳酸钙逐步与酸反应,作用在颗粒之间的碳酸钙逐步溶解,生成的易溶盐、二氧化碳逐步流失,而其他黏土矿物、有机物在碳酸钙被溶解后也随之发生了一定的流失; ②在封闭体系中碳酸钙被溶解后钙离子随溶液运移后与部分二氧化碳重新生成次生碳酸钙。无论在开放体系与密闭体系中碳酸钙的流失均造成了原土壤层黏粒含量流失、颗粒骨架重构。随着酸侵蚀过程的进行,超细碳酸钙大量溶解,颗粒之间接触因由面接触逐渐转变为点接触而弱化,砂粒及粉粒含量增加而颗粒之间的黏聚矿物减少造成液塑限降低,并且碳酸钙

的溶解速率也从一定程度上控制了黄土从半固态到可塑状态乃至流动状态整个过程的时间效应。

3 结论

黄土中碳酸钙以碳酸钙块、超细碳酸钙形式存在,碳酸钙块充当骨架颗粒,超细碳酸钙为颗粒间胶结物并与黏土矿物共同作用形成胶结面。酸侵蚀作

用使黄土中碳酸钙溶解,其中超细碳酸钙溶解速率较快,导致原土壤层黏粒含量减少而颗粒间的面接触弱化。随超细碳酸钙溶解流失致使黄土逐步砂化,最终导致其液塑限降低。在上述过程中,碳酸钙的溶解速率也从一定程度上减少了黄土从半固态到可塑状态乃至流动状态整个过程所需时间、水量,从而容易引发土质滑坡、泥石流等灾害。

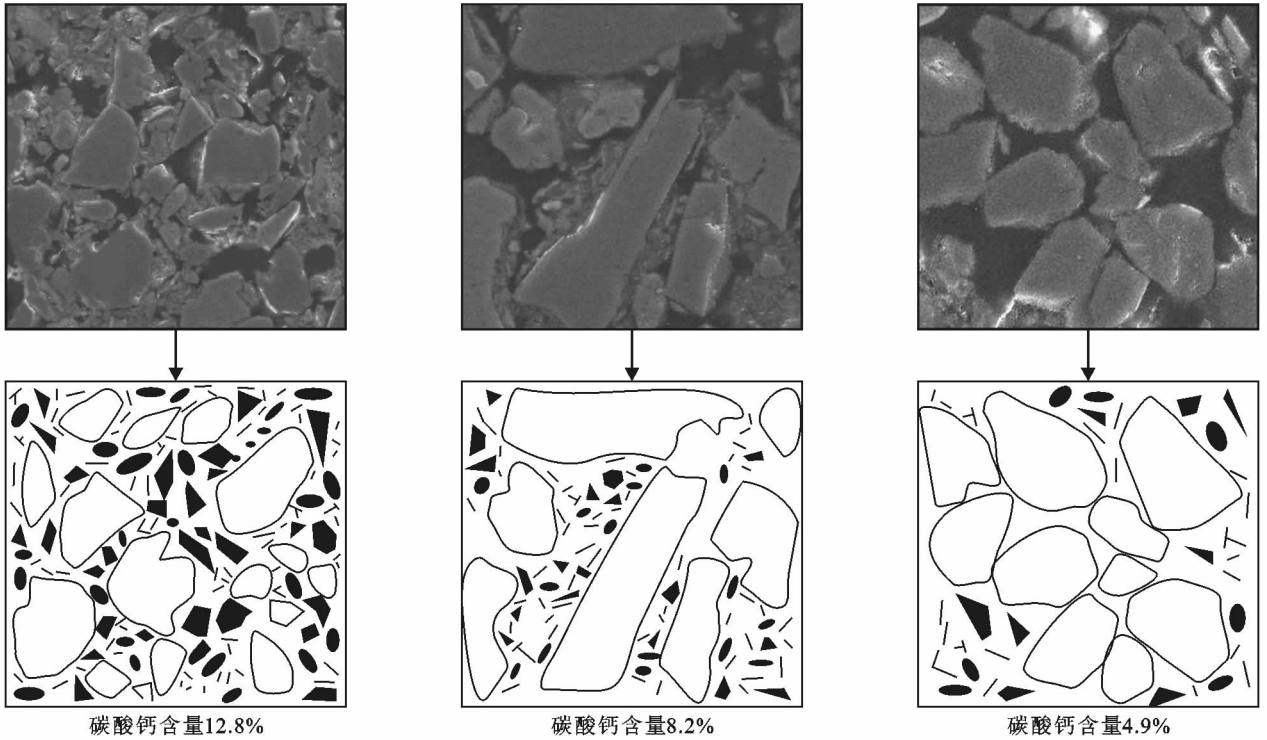


图 4 不同碳酸钙含量下颗粒接触模型

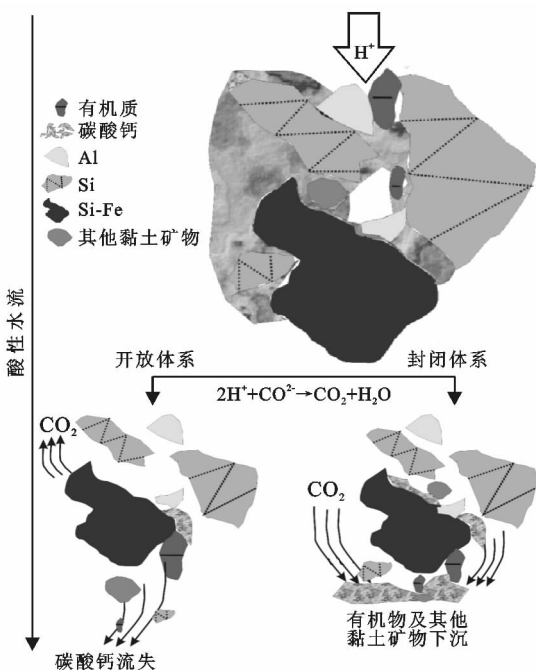


图 5 酸作用下碳酸钙溶解模式

在本文研究基础上,进一步量化分析黄土中的块状碳酸钙、超细碳酸钙在不同 pH 值环境下的溶解、运移与淀积规律,对防治黄土地层的水土流失具有重要的理论与实际意义。

[参 考 文 献]

[1] Curtaz F, Stanchi S, D'Amico M E, et al. Soil evolution after land-reshaping in mountains areas(Aosta Valley, NW Italy) [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015,199:238-248.

[2] Stanchi S, Freppaz M, Zanini E. The influence of Alpine soil properties on shallow movement hazards, investigated through factor analysis[J]. Natural Hazards Earth System Sciences, 2012, 12(6):1845-1854.

[3] Vacchiano G, Stanchi S, Marinari G, et al. Fire severity, residuals and soil legacies affect regeneration of Scots pine in the Southern Alps [J]. Science of the Total Environment, 2014,472:778-788.

- 成灾机理[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 46-50.
- [13] Li Weichao, Lee M L, Cai Hong, et al. Combined roles of saturated permeability and rainfall characteristics on surficial failure of homogeneous soil slope[J]. *Engineering Geology*, 2013, 153(2): 105-113.
- [14] 高润德, 彭良泉, 王钊. 雨水入渗作用下非饱和土边坡的稳定性分析[J]. *人民长江*, 2001, 32(11): 25-27.
- [15] Lu Ning, William J L. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 35-37.
- [16] Mckee C, Bumb A. The importance of unsaturated flow parameters in designing a hazardous waste site[C] // *Hazardous Wastes and Environmental Emergencies (Hazardous Materials Control Research Institute National Conference)*. Houston, TX, 1984: 50-58.
- [17] 吴玮江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006.
- [18] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(1): 1-15.
- [19] 李爱国, 岳中琦, 谭国焯, 等. 土体含水率和吸力量测及其对边坡稳定性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2003, 25(3): 278-282.
- [20] 崔冠英, 朱济祥. 水利工程地质[M]. 4版. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 35-36.
- [21] 李萍, 李同录, 王红, 等. 非饱和黄土土-水特征曲线与渗透系数 Childs&Collis-Geroge 模型预测[J]. *岩土力学*, 2013(S2): 184-189.
- [22] 杨仲康, 陈冠, 孟兴民, 等. 基于现场渗透试验的黄土滑坡体入渗特性[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(3): 285-291.
- [23] Peng Jianbin, Fan Zhongjie, Wu Di, et al. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China[J]. *Engineering Geology*, 2015, 186: 79-90.
- [24] 加拿大 GEO-SLOPE 国际有限公司. 非饱和土体渗流分析软件 SEEP/W 用户指南[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [25] Liu Chianan. Progressive failure mechanism in one-dimensional stability analysis of shallow slope failures[J]. *Landslides*, 2009, 6(2): 129-137.
- [26] Francesca C, Victor S, Springmansarah M. Hydromechanical behaviour of a silty sand from a steep slope triggered. [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, 50(1): 28-40.
- [27] 于国强, 张茂省, 胡炜. 天水市“7·25”群发性山洪地质灾害发育特征及成因分析[J]. *西北地质*, 2014, 47(3): 185-191.
- [28] Peng Jianbin, Fan Zhongjie, Wu Di, et al. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China[J]. *Engineering Geology*, 2015, 186: 79-90.

(上接第 122 页)

- [4] 雷祥义. 黄土地质灾害的形成机理与防治对策[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.
- [5] 李善梅, 刘之葵, 蒙剑坪. pH 值对桂林红黏土界限含水率的影响及其机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(10): 1814-1822.
- [6] 师林, 朱大勇, 陈龙飞. 酸碱度值对土体液、塑限的影响[J]. *工业建筑*, 2011, 41(7): 70-73.
- [7] 庄雅婷, 黄炎和, 林金石. 崩岗红土层土壤液塑限特性及影响因素研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(3): 208-211, 216.
- [8] Stanchi S, Catoni M, D'Amico M E, et al. Liquid and plastic limits of clayey, organic C-rich mountain soils: Role of organic matter and mineralogy [J]. *Catena*, 2017, 151: 238-246.
- [9] Stanchi S, D'Amico M, Zanini E, et al. Liquid and plastic limits of mountain soils as a function of the soil and horizon type[J]. *Catena*, 2015, 135: 114-121.
- [10] Wei Yujie, Wu Xinliang, Cai Chongfa. Splash erosion of clay-sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure[J]. *Catena*, 2015, 135: 254-262.
- [11] 郭玉文, 宋菲, 加藤诚. 黄土中碳酸钙分布的能谱分析[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(9): 1004-1007.
- [12] 郭玉文, 王淑红, 张玉龙. 黄土高原灌溉农田土壤团粒与碳酸钙关系研究[J]. *深圳大学学报: 理工版*, 2008, 25(3): 314-319.
- [13] 中华人民共和国水利部. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利出版社, 1999.
- [14] 刘连文, 王洪涛, 陈晔, 等. 黄土醋酸淋溶实验及其碳酸盐组分的地球化学特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21(1): 69-73.
- [15] Li Xi'an, Li Lincui. Quantification of the pore structures of Malan loess and the effects on loess permeability and environmental significance, Shaanxi Province, China: An experimental study[J/OL]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(15): 523. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6855-7>.
- [16] 郭泽泽, 李喜安, 陈阳, 等. 基于 SEM-EDS 的湿陷性黄土黏土矿物定量分析[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(5): 899-906.