

区分黄土湿陷量与溶陷量方法综述

杨永贵, 蔡文豪, 王章东

西京学院土木工程学院, 陕西, 西安

收稿日期: 2025年5月18日; 录用日期: 2025年6月11日; 发布日期: 2025年6月19日

摘要

易溶盐在黄土中占据重要地位, 它不仅有助于土体颗粒的胶结, 还维持着黄土的整体结构。在黄土含有较高比例的易溶盐时, 受到上方压力和水分渗透的影响, 其变形主要由两部分构成: 一是由于土壤结构被破坏导致的湿陷, 二是由于易溶盐溶解所引起的溶陷。这两种变形同时发生, 共同构成了我们通常所说的湿陷量。为了更准确地区分这两种变形, 我们进行了三种不同的压缩试验: 保持原含水率的黄土样试验、浸盐溶液试验和浸纯水试验。在此基础上, 我们提出了一种名为“三线法”的区分方法, 该方法在原有的双线法湿陷试验基础上增加了浸盐溶液的压缩试验, 从而能够定量地区分黄土在压力和水分作用下产生的湿陷变形量和由易溶盐溶解导致的溶陷变形量。

关键词

黄土, 易溶盐, 湿陷, 溶陷, 三线法

A Review of Methods for Distinguishing Collapsible Amount and Solution Subsidence Amount of Loess

Yonggui Yang, Wenhao Cai, Zhangdong Wang

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: May 18th, 2025; accepted: Jun. 11th, 2025; published: Jun. 19th, 2025

Abstract

Soluble salt plays an important role in loess, which not only contributes to the cementation of soil particles, but also maintains the whole structure of loess. When loess contains a high proportion of soluble salt, it is affected by the upper pressure and water infiltration, and its deformation is mainly

composed of two parts: one is the collapse caused by the destruction of soil structure, and the other is the collapse caused by the dissolution of soluble salt. These two deformations occur at the same time and together constitute what we commonly call the collapse amount. In order to distinguish these two types of deformation more accurately, we carried out three different compression tests: the loess test with the original water content maintained, the salt solution test and the pure water test. On this basis, we put forward a method called "three-wire method" to distinguish the collapsibility deformation of loess under the action of pressure and water and the collapsibility deformation caused by soluble salt dissolution.

Keywords

Loess, Soluble Salts, Wet Collapse, Dissolution Collapse, Three-Line Method

Copyright © 2025 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

自 1892 年安德烈耶夫首次提出黄土湿陷性的概念以来,经过一个多世纪的深入研究,该领域已经积累了丰富的成果。黄土湿陷性的概念在学术上存在广义与狭义两种理解。狭义上,湿陷特指黄土在浸水后发生的沉陷现象。根据黄土浸水后变形的宏观差异性,我们可以将黄土明确区分为湿陷性黄土和非湿陷性黄土。沈珠江等人立足于非饱和土理论提出了广义的湿陷性[1][2],从力学角度进行湿陷性研究,认为由黄土自身属性产生的结构强度下降是导致传统意义上湿陷的原因。从土力学角度开展了黄土湿陷机理的研究。沈珠江院士在土力学领域作出了重要贡献,他基于饱和土的有效应力原理,进一步推广并提出了广义有效应力原理,并据此建立了描述黄土湿陷特性的本构模型。汤连生认为[3],黄土湿陷的过程是由于水的渗透导致黄土结构中的吸力丧失,并产生了湿吸力。在这个过程中,黄土的微结构会尝试进行重建,但同时也会遇到阻碍重建的阻力。这种重建动力和阻力的动态变化,最终导致了湿陷现象的发生。Gaaver [3]的研究揭示,黄土因其疏松的结构特性,其颗粒间的连接力相对较弱,小于抗压应力。同时,黄土中存在的大孔隙使得其能够容纳超过液限的含水量,直至达到饱和状态,这是黄土易于湿陷的原因。还有很多学者是基质吸力的降低导致了黄土的湿陷[4]-[6]。目前,评估黄土湿陷性的主要手段包括现场进行的试坑浸水测试以及在实验室中进行的固结试验。针对湿陷性评价这一议题,众多学者已经开展了广泛而深入的研究工作:从单轴试验到三轴压缩试验[7]-[10],从常规三轴应力路径到多种应力组合的复杂应力路径[11]-[13],从单一浸水饱和湿陷到广义增湿湿陷[14]-[17],从各向同性研究到各向异性研究[18]-[21]。有学者持续致力于黄土湿陷性评价方法的创新,穆青翼等人[22]利用时域反射技术(TDR)进行原位测试,获取黄土的干密度、质量含水量等物理性质指标,并通过经验模型对黄土的湿陷性进行评估。这些改进后的试验方法在一定程度上提升了黄土湿陷性指标的测试准确性,为实际工程建设提供了重要的指导和尝试。

通过归纳与分析现有研究,我们已经对易溶盐如何影响黄土的湿陷特性有了较为深入的理解。然而,黄土在浸水后的变形实际上是由湿陷和溶陷两种机制共同作用的结果。遗憾的是,在目前的文献中,大多研究都是独立地聚焦于黄土的湿陷性或溶陷性,而未能明确区分由颗粒结构变化所导致的湿陷变形与由易溶盐溶解所引发的溶陷变形。为了更加深入地探讨易溶盐含量对黄土浸水变形的影响,我们必须正视并妥善处理黄土湿陷与溶陷的区分问题。换句话说,未来的研究应当致力于在黄土浸水变形的分析中,

明确区分并量化湿陷与溶陷的不同贡献,以更全面地理解黄土的浸水变形行为。在黄土的“单线法”和“双线法”湿陷试验基础上,我们进行了拓展研究,并创造性地提出了黄土压缩试验的新方法“三线法”。该方法旨在将黄土在受到上方压力和水渗透时所产生的变形,精确地划分为两部分:一部分是由于土壤颗粒结构被破坏所导致的湿陷变形,另一部分则是由起胶结作用的易溶盐溶解所引起的溶陷变形。具体操作为:首先,在黄土的原始含水率下进行不同上覆压力的压缩试验(一线);其次,在盐溶液中当所有离子均达到平衡状态时,进行压缩试验(二线);最后,在纯水中进行压缩试验(三线)。在同一上覆压力下,通过比较“二线”与“一线”的结果,我们可以得出湿陷变形量;而通过比较“二线”与“三线”的结果,则可以得出溶陷变形量。

2. 黄土湿陷变形量与溶陷变形量区分研究内容

2.1. 原理说明

广义而言,黄土的湿陷变形实际上是湿陷效应与溶陷效应相互作用、共同导致的结果。具体而言,溶陷是由于水分浸入,导致土颗粒连接点处的易溶盐结晶溶解,从而使得土体颗粒间的胶结力减弱,土体因此发生沉陷变形,这种由易溶盐溶解引起的变形我们称之为溶陷变形。而湿陷则是由于水分的作用,使得黄土中原本相互接触的土体颗粒或团粒的天然结构瓦解崩溃,这种由黄土结构性改变引起的变形我们称之为湿陷变形。为了精确区分这两种效应各自导致的变形量,我们分别将它们命名为湿陷变形和溶陷变形,并将它们两者的总和定义为总变形。

2.2. 单盐 Na_2SO_4

通过以黄土双线法湿陷试验为基础,开展不同易溶盐含量下原状黄土湿陷和溶陷作用的区分。首先从单盐 Na_2SO_4 的情况入手,介绍湿陷与溶陷的区分方法。对于含有不同 Na_2SO_4 (硫酸钠)浓度的原状黄土样本,分别执行以下三项试验:

1) 原含水率压缩试验;

2) 在浸饱和和 Na_2SO_4 溶液的压缩试验中,由于假定黄土样本中的 Na_2SO_4 晶体不再溶解,因此只发生湿陷变形而不发生溶陷变形。这意味着,在同一级压力下,通过浸饱和和盐溶液测得的变形量(h_2)与常规压缩试验中的变形量(h_1)之间的差异,就代表了湿陷量(h_s)即:

$$h_s = h_2 - h_1 \quad (1)$$

3) 浸纯水湿陷试验中,当试样浸泡在纯水中时,其变形量(h_3)包含了湿陷变形和溶陷变形两部分。为了单独获取溶陷变形的量,我们将这一变形量与在相同压力下浸泡于饱和 Na_2SO_4 溶液中所产生的仅包含湿陷变形的量(h_2)进行比较,二者之差即为溶陷量(h_r)。即:

$$h_r = h_3 - h_2 \quad (2)$$

总变形量是由湿陷变形量和溶陷变形量共同构成的,即它是这两种变形量相加的总和:

$$h = h_s + h_r = (h_2 - h_1) + (h_3 - h_2) = h_3 - h_1 \quad (3)$$

这一方法是对《土工试验规程》(SL237-2018)中黄土饱水湿陷系数测定方法中双线法的扩展。由黄土饱水湿陷系数的定义,分别将湿陷变形量 h_s 、溶陷变形量 h_r 及总变形量 h 与试样初始厚度 h_0 ($h_0 = 20 \text{ mm}$) 的比值称为湿陷系数 δ_s 、溶陷系数 δ_r 和变形系数 δ 。

2.3. 多种易溶盐

为了更深入地探究易溶盐含量如何影响黄土的湿陷和溶陷特性及其背后的机制与规律,我们将实验

范围从单一盐分扩展到了与黄土中实际盐分组成相匹配的全盐环境。在这一更为复杂的盐分条件下,我们将详细阐述并区分由多种易溶盐共同作用引起的湿陷变形与溶陷变形。换言之,我们的研究现在旨在全面解析全盐环境下黄土湿陷与溶陷的特性和它们之间的区别,以期获得更为准确和全面的认识。

在单盐 Na_2SO_4 情况下,试验采用了浸饱和 Na_2SO_4 溶液压缩的方法,使试样不会因 Na_2SO_4 溶解而发生溶陷变形。针对多种易溶盐共存的情况,我们根据试验设计精心配制了一种特殊的溶液,该溶液能够确保黄土试样中的所有易溶盐离子达到完全平衡状态。在进行这种全盐试样的压缩试验时,当试样被浸入此溶液后,其中的易溶盐离子主要发生沉淀反应而不会发生溶解。因此,在这种条件下,黄土试样的变形主要来源于其结构性的改变,即湿陷变形,而由易溶盐溶解引起的溶陷变形则被有效排除在外。换言之,我们通过这种特殊配置的溶液和试验方法,能够更纯粹地研究黄土因结构性变化而产生的湿陷变形特性。

如何配置这种使所有目标离子恰好完全平衡的溶液是进一步试验的关键问题。

按照传统的试验方法,我们需要根据黄土中易溶盐离子的种类及其浓度,准备多种单一盐溶液。在这个过程中,我们会遵循一个原则,即溶解度较低的盐分优先析出。(如 $K_{sp}[\text{Mg}(\text{OH})_2] < K_{sp}[\text{CaSO}_4] < K_{sp}[\text{Ca}(\text{OH})_2] < K_{sp}[\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2] < K_{sp}[\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2]$),由溶度积(K_{sp})的大小反推溶液离子积,逐步计算所需各离子浓度,这一计算过程十分复杂冗长。即使通过上述计算,理论上计算出所需各离子浓度,在实际配置过程中,多种用以配置的单盐溶液混合会使溶剂体积增加,无法达到计算好的目标离子浓度。且多种盐溶液混合时,化学反应是十分复杂的,并不是每种可能的沉淀都会产生,还有可能生成复杂的络合物。为解决这一问题,本研究采用了水文地球化学软件 PHREEQC,利用其自带的地球化学数据库 Phreeqc.dat、wareq4f.dat 等,解决各单盐溶液混合过程中化学反应平衡及物质生成的问题。

2.4. 湿溶陷峰值系数与易溶盐含量的关系

用 δ_{sf} 、 δ_{rf} 和 δ_f 表示此时曲线对应的峰值湿陷系数、峰值溶陷系数和峰值变形系数,它们与易溶盐含量的关系。可见, δ_{sf} 随易溶盐含量的增加增幅较小,而 δ_{rf} 和 δ_f 曲线在易溶盐含量为 $8 \text{ g/kg} \sim 14 \text{ g/kg}$ 之间增幅明显,且两曲线变化趋势基本一致。说明易溶盐含量的增加对浸水变形的影响主要体现在溶陷作用,且土中含盐量在 $8 \text{ g/kg} \sim 14 \text{ g/kg}$ 之间时溶陷作用显著。分别用 δ_{sf}/δ_f 、 δ_{rf}/δ_f 表示湿、溶陷变形占总变形量比值,为 δ_{sf}/δ_f 、 δ_{rf}/δ_f 与易溶盐含量的关系。可见两条曲线在易溶盐含量为 11 g/kg 左右时相交,此时湿陷作用与溶陷作用对总变形的影响相持平,两者各占总变形的 50%,该交点是湿陷作用与溶陷作用支配主导地位的交流分界,黄土试样含盐量为 11 g/kg 左右时湿陷作用与溶陷作用对总变形的贡献率相等,这一结论与牛丽思得出的 NaCl 含量为 10 g/kg 时黄土湿陷作用与溶陷作用相持相近。随着易溶盐含量的增加, δ_{sf}/δ_f 和 δ_{rf}/δ_f 呈现出此消彼长的趋势,溶陷作用占比曲线逐渐上升,最终稳定在 65% 左右,湿陷作用占比曲线逐渐下降,最终稳定在 35% 左右。

3. PHREEQC 介绍

PHREEQC 是一个功能强大的计算机程序,由 C 和 C++ 编程语言打造,自 1995 年起由美国地质调查局的 Parkhurst 和 Appelo 等人开发,并持续演进至当前的版本 3。该程序在同类软件中模拟能力出众,享有国际盛誉,被广泛应用于各种领域。简而言之,PHREEQC 是一个广受认可的、具有高级模拟功能的计算工具,由经验丰富的开发者团队持续维护和升级。

3.1. PHREEQC 的功能

PHREEQC 基于离子关联的水化学模型,能够进行计算和预测(Parkhurst and Appelo 1999):

- 1) 生成物的饱和系数(SI);

2) PHREEQC 能够进行包含可逆反应和不可逆反应的批次反应迁移计算。

其中包括可逆反应和不可逆反应。可逆反应涵盖了水、矿物/无机溶液、气体之间的反应,以及表面络合和离子交换平衡等过程。而不可逆反应则包括指定成分的摩尔转换、动态控制下的反应、溶液的混合以及温度的变化等

3) 逆向建模技术能够用于估算矿物和气体分子在水中迁移的量。

其中 PHREEQC 的一个基础应用是,它能够推导和精确量化溶液混合时化学物质变化的化学反应方程式,并据此计算出溶液中形成的物质种类及其饱和指数(SI)。相反地,如果我们希望达到特定相的平衡状态(或特定的饱和指数),PHREEQC 也能够通过调整溶液中离子的浓度来实现。具体来说,在黄土研究的应用场景中,我们可以通过输入黄土中原生八大离子的浓度,并设定目标沉淀物的饱和指数(SI),利用 PHREEQC 来计算出为了达到“所有目标离子完全平衡”这一目标,所需混合的各种单盐溶液的浓度。简而言之,PHREEQC 为我们提供了一种强大的工具,使我们能够精确调控溶液成分,以达到特定的化学平衡状态。

3.2. 饱和指数(SI)

在热力学理论框架下,新化合物的形成被视为反应物溶解成阴阳离子后重新组合并沉淀的过程[23]。这种化合物的“溶解-沉淀(或结晶)”平衡状态决定了其在体系中的存在形式,而该平衡状态可以通过饱和指数(SI)来进行量化描述。当 $SI < -0.2$ 时化合物处于不饱和状态,倾向于溶解;当 $-0.2 < SI < 0.2$ 时,化合物处于化学平衡状态;当 $SI > 0.2$ 时,化合物处于过饱和状态,倾向于沉淀(结晶)。SI 仅与化学反应的平衡常数及化合物的离子在液相环境中的活度(有效浓度)有关[24],其计算公式为:

$$SI = \lg \frac{IAP}{K_{sp}} \quad (4)$$

式中: IAP (离子活度积)是目标化合物在液相环境中,其组成离子各自活度的乘积; K_{sp} 是一个仅受温度影响的常数,它描述了化合物在溶解反应达到平衡时的状态,这个常数具体数值可以从 PHREEQC 化学数据库的 Phreeqc.dat 和 wareq4f.dat 文件中获取。下面以化合物 A_xB_y 为例,其溶解反应的化学方程式如公式(5)所示,对应 IAP 及 K_{sp} 公式分别为式(6)及式(7):



$$IAP = [A^{y+}]^x \cdot [B^{x-}]^y \quad (6)$$

$$K_{sp} = \frac{[A^{y+}]^x \cdot [B^{x-}]^y}{[A_xB_y]} \quad (7)$$

式中, $[]$ 代表相应成分的活度,由式(8)~(9)计算:

$$[] = m_i \gamma_i \quad (8)$$

$$\lg \gamma_i = \frac{1.82483 \times 10^6 \cdot \sqrt{I}}{(\epsilon \cdot T_k)^{3/2}} \cdot z_i^2 \left\{ \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.3I \right\} \quad (9)$$

$$I = \frac{1}{2} \sum_i z_i^2 m_i \quad (10)$$

式(8)中, m_i 为离子 i 的质量摩尔浓度($\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$); γ_i 为离子的活度系数(无量纲)。

3.3. 数据输入说明

本文主要使用的功能有：

1) SOLUTION。该数据块用于定义初始溶液的温度和化学成分。单个元素的浓度可以调整以达到电荷平衡或与纯相的平衡，所有输入浓度都在内部转换为元素的摩尔单位和元素的价态。如表 1 示例数据块。

Table 1. Example data bloc
表 1. 示例数据块

工况	动位移/mm	加速度/(m·s ⁻²)
无阻尼器	12.40	0.23
有阻尼器	6.32	0.11

2) MIX。该数据块用于混合两种或两种以上的水溶液。如表 2 示例数据块。

Table 2. Example data bloc
表 2. 示例数据块

Line 0:	SOLUTION 1 Test solution		
Line 1:	temp	25.0	
Line 2:	pH	7.0	charge
Line 3:	pe	4.5	
Line 4:	redox	O (-2)/O (0)	
Line 5:	units	ppm	
Line 6:	density	1.02	
Line 7a:	Ca	80.0	
Line 7b:	S (6)	96.0	as SO ₄
Line 7c:	S (-2)	1.0	as S
Line 7d:	O (0)	8.0	

假如溶液 5、6 和 7 中某元素的摩尔数分别为 0.1、0.2 和 0.3，则混合溶液中的该元素的摩尔数将是 $0.1 \times 1.1 + 0.2 \times 0.5 + 0.3 \times 0.3 = 0.3$ 。

4. 结语

在黄土双线法湿陷试验的基础上，我们进行了拓展研究，提出了一种新的试验原理和方法，用以区分黄土的湿陷变形和溶陷变形。具体做法是，对每组含盐量相同的试样分别进行三种试验：原含水率压缩试验[25] [26]、浸盐溶液压缩试验和浸纯水湿陷试验。通过比较同级压力下浸盐溶液测得的变形量与压缩试验的变形量，我们可以得出湿陷量；而浸纯水压缩变形量与浸盐溶液变形量之差，则代表了溶陷量。在单盐 Na₂SO₄ 情况下，利用浸饱和 Na₂SO₄ 溶液压缩试验这一设计[20] [27] [28]，使试样不因 Na₂SO₄ 的溶解而发生溶陷变形，仅存在因黄土结构性改变引发的湿陷变形。在由单盐 Na₂SO₄ 拓展至与黄土实际盐成分相一致的全盐情况时，利用了软件 PHREEQC，介绍了其基本功能及数据模块，从饱和指数(SI)的概

念及计算方法入手,利用其自带的地球化学数据库 Phreeqc.dat、wareq4f.dat 等,PHREEQC 解决了在盐溶液混合过程中如何达到化学反应平衡以及确定物质生成的问题。从理论计算方面实现了配置一种“使所有目标离子恰好完全平衡的溶液”这一目标,在浸这种混合盐溶液压缩时,通过确保试样中仅发生离子沉淀而无易溶盐溶解,我们成功区分了黄土试样的湿陷变形量与溶陷变形量,这为深入研究易溶盐对黄土湿陷和溶陷特性的影响规律奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报, 1996(2): 1-9
- [2] 许领, 戴福初. 黄土湿陷机理研究现状及有关问题探讨[J]. 地质力学学报, 2009, 15(1): 88-94, 104.
- [3] 汤连生. 黄土湿陷性的微结构不平衡吸力成因论[J]. 工程地质学报, 2003(1): 30-35.
- [4] Gaaver, K.E. (2012) Geotechnical Properties of Egyptian Collapsible Soils. *Alexandria Engineering Journal*, **51**, 205-210. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.05.002>
- [5] Yuan, Z.X. and Wang, L.M. (2009) Collapsibility and Seismic Settlement of Loess. *Engineering Geology*, **105**, 119-123. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.12.002>
- [6] 李舰, 刘凯, 尹振宇, 等. 非饱和砂土及黏土的水-力耦合双屈服面模型[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 72-80.
- [7] 邵生俊, 王丽琴, 邵帅, 等. 黄土的结构屈服及湿陷变形的分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1357-1365.
- [8] 崔靖俞, 张吾渝, 解邦龙, 等. 西宁地区不同深度原状黄土湿陷性及微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S2): 249-252.
- [9] 穆青翼, 党影杰, 董琪, 等. 原状和压实黄土持水特性及湿陷性对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1496-1504.
- [10] 张禹. 基于温度效应的非饱和黄土湿陷与强度特性试验研究及数值分析[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 青海大学, 2019.
- [11] 郭敏霞, 张少宏, 邢义川. 非饱和原状黄土湿陷变形及孔隙压力特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2000(6): 785-788.
- [12] 朱元青, 陈正汉. 研究黄土湿陷性的新方法[J]. 岩土工程学报, 2008(4): 524-528.
- [13] 牛丽思. 考虑易溶盐含量的伊犁黄土非饱和弹塑性本构模型[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
- [14] 方瑾瑾, 冯以鑫, 余永强, 等. 真三轴条件下的原状黄土增湿变形特性[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1235-1246.
- [15] 周凤玺, 周志雄, 邵生俊. 非饱和黄土的增湿湿陷变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 36-40.
- [16] 胡海军, 王晨, 吕彤阳, 等. 一维载荷浸水下重塑黄土的水分入渗和增湿变形模型及试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 1020-1030.
- [17] 牛丽思, 张爱军, 王毓国, 等. NaCl 含量对伊犁原状黄土湿陷和溶陷特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 67-71.
- [18] 叶朝良, 朱永全, 刘尧军, 等. 原状黄土各向异性及卸载变形特征试验研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(6): 1-6.
- [19] 罗传庆, 张吾渝, 李辉, 等. 西宁地区原状黄土强度各向异性试验研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(6): 1327-1332.
- [20] 王丽琴, 赵聪, 胡向阳, 等. 黄土强度及结构的各向异性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 25-29.
- [21] 包含, 马扬帆, 兰恒星, 等. 基于微结构量化的含渐变带黄土各向异性特征研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(10): 88-99.
- [22] 穆青翼, 郑建国, 于永堂, 等. 基于时域反射技术(TDR)的黄土湿陷原位评价研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1115-1123.
- [23] Lothenbach, B., Kulik, D.A., Matschei, T., Balonis, M., Baquerizo, L., Dilnesa, B., et al. (2019) Cemdata18: A Chemical Thermodynamic Database for Hydrated Portland Cements and Alkali-Activated Materials. *Cement and Concrete Research*, **115**, 472-506. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.018>
- [24] 王徐菲, 韦华, 钱文勋, 等. 水泥土组成矿物的热重-热力学模拟联用分析[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4): 424-433
- [25] 王龙, 陈国兴, 胡伟, 等. 三维非饱和土边坡拟动力稳定性分析初探[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(9): 1859-1867.

-
- [26] 牛丽思, 张爱军, 赵佳敏, 等. 易溶盐含量对伊犁原状黄土力学特性 的影响规律[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1705-1714.
- [27] Huang, S., Liu, Q., Cheng, A. and Liu, Y. (2018) A Statistical Damage Constitutive Model under Freeze-Thaw and Loading for Rock and Its Engineering Application. *Cold Regions Science and Technology*, **145**, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.10.015>
- [28] 吴云涛, 叶万军, 杨更社, 等. 考虑应力路径的土体微观孔隙及宏观 变形特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2311-2320.