

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.119



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



非饱和黄土的水蒸气吸附特性

符文媛^a, 刘德仁^a, 王旭^{a,b}, 李建东^a, 马玥^a

(兰州交通大学 a. 土木工程学院; b. 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 兰州 730070)

摘要:为研究非饱和黄土对水蒸气的吸附特性,采用蒸汽平衡法开展不同湿度环境下的等温吸附试验,分析水蒸气在非饱和黄土表面的吸附行为,并探讨温度、矿物成分及含量、干密度对土体吸附性能的影响。结果表明:非饱和黄土水蒸气吸附量随相对湿度的增加而增加,整个过程包含了单层吸附、多层吸附和毛细凝聚 3 个阶段,且 GAB 模型可以用来描述非饱和黄土的水蒸气吸附过程;水蒸气吸附量与温度之间存在明显的负相关关系,相对湿度恒定,水蒸气吸附量随温度的升高而降低;非饱和黄土的水蒸气吸附与矿物组成密切相关,黏土矿物含量直接影响其水蒸气吸附能力;此外,干密度对水蒸气吸附量的影响可分为两个阶段,在相对湿度 $RH < 80\%$ 时,水蒸气吸附量随干密度的增大而增大,直到进入毛细凝聚阶段,随着干密度的增大,水蒸气吸附量不再增大反而有所降低。

关键词:非饱和黄土;水蒸气吸附;蒸汽平衡法;等温吸附曲线;吸附特性

中图分类号:TU444 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)01-0080-09

Water vapor adsorption characteristics of unsaturated loess

FU Wenyuan^a, LIU Deren^a, WANG Xu^{a,b}, LI Jiandong^a, MA Yue^a

(a. School of Civil Engineering; b. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: In order to study the adsorption characteristics of water vapor on unsaturated loess, isothermal adsorption experiments under different humidity conditions were carried out by vapor equilibrium method. The adsorption behavior of water vapor on the surface of unsaturated loess was analyzed, and the effects of temperature, mineral composition and content, dry density on the adsorption property of soil were discussed. The experimental results show that the water vapor adsorption capacity of unsaturated loess increases with the increase of relative humidity, and the entire process consists of three stages: monolayer adsorption, multilayer adsorption and capillary condensation. The GAB model can describe the water vapor adsorption process of unsaturated loess. There is a significant negative correlation between water vapor adsorption capacity and temperature. When the relative humidity is constant, the adsorption capacity of water vapor decreases with the increase of temperature. Water vapor adsorption of unsaturated loess is closely related to mineral composition, and clay mineral content directly affects its water vapor adsorption capacity. In addition, the effect of dry density

收稿日期:2022-07-26

基金项目:国家自然科学基金(41662017)

作者简介:符文媛(1998-),女,主要从事黄土水蒸气吸附研究,E-mail:2195166450@qq.com。

刘德仁(通信作者),男,博士,副教授,E-mail:liuderen@mail.lzjtu.cn。

Received: 2022-07-26

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41662017)

Author brief: FU Wenyuan (1998-), main research interest: water vapor adsorption of loess, E-mail: 2195166450@qq.com.

LIU Deren (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: liuderen@mail.lzjtu.cn.

on water vapor adsorption capacity can be divided into two stages. When the relative humidity $RH < 80\%$, water vapor adsorption capacity increases with the increase of dry density. For capillary condensation stage, with the increase of dry density, the amount of water vapor adsorption no longer increases but decreases.

Keywords: unsaturated loess; water vapor adsorption; vapor equilibrium method; isothermal adsorption; adsorption characteristics

中国黄土分布广泛,具有大孔隙发育、水敏性强和湿陷性强的特点,在天然低湿度下具有较高强度和较低压缩性,一旦浸水甚至增湿则力学性能显著劣化^[1-2]。在降雨、蒸发以及冻融循环等作用下,黄土地区滑坡、崩塌、地面沉降、泥石流等地质灾害频发^[3-5]。水汽吸附作为陆面非降水性水分的重要来源之一,在干旱和半干旱地区的贡献有时能达到与降水同样量级^[6]。因此,水蒸气吸附作用对于黄土湿度及其水力-力学性质的影响不容小觑。

土体水汽吸附是指水蒸气以膜状水和吸湿水等形式逐层附着在土颗粒表面的过程,在揭示土体孔隙特性、预测土体比表面积及孔隙分形维数等方面具有重要意义^[7-9]。一般而言,可以把影响土体水蒸气吸附的因素归为两类,一类是外界因素,另一类是内在因素。外界因素主要包括空气相对湿度、温度等。诸多研究表明,吸附后的平衡含水率会随相对湿度的增大而增大^[10-11]。温度对水蒸气吸附起抑制作用,升高温度会加快水蒸气的扩散速率,并降低对水蒸气的吸附量^[12-13]。影响水蒸气吸附的内在因素较多,俞锴等^[14]通过对天然膨胀土以及石灰改性膨胀土进行水蒸气吸附试验发现,中孔孔径的变化是影响膨胀土吸水性的主要原因。Bai等^[15]开展不同湿度下页岩的水蒸气吸附试验发现,孔径和孔隙体积控制着页岩水蒸气吸附过程的不同阶段。沈伟军等^[16]、冯东等^[17]、李凤洁等^[18]等的研究表明,水蒸气吸附与矿物组成密切相关,且不同的矿物因其性质及结构对水蒸气吸附的影响大小也不尽相同。比表面积是影响土体水蒸气吸附最直接的因素之一,而黏土含量则是通过影响可供水分子吸附的比表面积的大小来影响水蒸气吸附能力^[19]。此外,土中有机质含有羟基、羧基等亲水官能团,可与

水分子形成氢键而成为吸附中心,对水蒸气吸附起促进作用^[7]。

等温吸附曲线描述了在给定温度下相对湿度与水蒸气吸附量之间的关系,对于量化和模拟土体水蒸气吸附过程具有重要意义^[20]。近年来,诸多描述等温吸附曲线的理论模型开始被用于土体水蒸气吸附过程的研究。尹英杰等^[21]测定了7种不同土壤的水汽吸附曲线,并评价了GAB模型的模拟效果。林怡菲等^[22]通过Langmuir模型对页岩吸附等温线进行拟合,建立了任意含水饱和度页岩吸附等温线的计算模型。Akin等^[23]采用Freundlich、FHH、BET以及GAB等4种吸附等温线模型评估了膨胀土的水蒸气吸附性能。Chen等^[24]通过对吸附等温线的拟合,研究了GAB、MBET、DLP等9种理论模型对于描述盐渍土水蒸气吸附的适用性。

综上所述,学者们对于多孔介质水蒸气吸附已经做了多角度和广泛深入的研究,并取得了一些有意义的结论和成果,但是,目前专门针对非饱和黄土与水蒸气吸附相互作用的研究非常有限,尤其是不同影响因素与水蒸气吸附量之间的关系,还缺乏必要的试验研究。并且,适合描述非饱和黄土水蒸气吸附的理论模型尚不明确。针对非饱和黄土,笔者采用蒸汽平衡法开展等温吸附试验,探讨温度、矿物成分及含量、干密度对水蒸气吸附作用的影响,并评价常用的等温吸附线模型在准确表征非饱和黄土水蒸气吸附过程中的适用性。

1 试样制备及试验方法

1.1 试样制备

试验用土取自兰州地区黄土场地,基本物理力学参数见表1。

表 1 土体基本物理指标
Table 1 Soil basic physical index

含水率/%	干密度/ (g/cm ³)	最优含水 率/%	最大干密度/ (g/cm ³)	塑限/%	液限/%	颗粒组成/%		
						≥0.075 mm	0.075~0.005 mm	≤0.005 mm
6.4	1.31	14.5	1.82	16.4	26.2	8.4	76.4	15.2

为探讨土体中矿物成分及含量对土体吸附性能的影响,在黄土中掺加质量分数为10%、30%的膨润土,制备黄土(H)、10%膨润土+黄土(10%B+H)、30%膨润土+黄土(30%B+H)试

样,并控制干密度为1.20、1.35、1.50 g/cm³,分别在10、20℃温度下开展吸附试验,以期得到不同影响因素与水蒸气吸附量之间的关系。详细的试验方案见表2。

表 2 不同影响因素非饱和黄土水蒸气吸附试验方案

Table 2 Water vapor adsorption test scheme of unsaturated loess with different influencing factors

试样编号	温度/℃	膨润土掺量/%	干密度/(g/cm ³)
A1	10		1.35
A2	20		1.35
B1	20	10	1.35
B2	20	30	1.35
C1	20		1.20
C2	20		1.50

考虑到试样尺寸太大会导致采用蒸汽平衡法吸附达平衡的时间过长,故将试样的目标尺寸设定为直径 3.91 cm,高度 1 cm。试样制备采用击实试验得到的最优含水率为制样含水率,然后按控制干密度和最优含水率计算出压缩试样所需土的质量,再用压样法制备而成,如图 1 所示。为确保试验的可靠性,每个条件下需设置 3 个试样进行平行试验。



图 1 非饱和黄土水蒸气吸附试样

Fig. 1 Water vapor adsorption sample of unsaturated loess

1.2 水蒸气吸附试验

水蒸气吸附试验采用蒸汽平衡法(图 2)。通过在密闭的干燥器底部放入饱和盐溶液以提供不同的相对湿度环境,水蒸气可以通过隔板上的小孔均匀地分布于干燥器中,再将被测试试样置于隔板之上,进而达到非饱和黄土水蒸气吸附的目的。试样测定前需要装入铝盒并在 105℃的烘箱中烘干 24 h,随后连同铝盒一起置于不同相对湿度环境的干燥器中进行吸附,最后再将干燥器放入恒温箱中。为保证干燥器内相对湿度的准确性,通过预置高精度的温湿度记录仪来监测量控。

测试共设置 9 个不同的相对湿度环境,如表 3 所示。将试样放置于不同相对湿度环境的干燥器中进行吸附,每 24 h 称重一次,称重时采用万分之一的天平称量,待连续 3 次称重的质量变化小于总质量的 0.1% 时,即可认为土样达到吸附平衡状态^[25]。

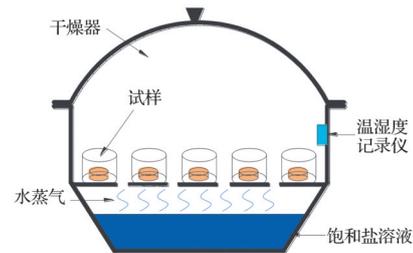


图 2 水蒸气吸附试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water vapor adsorption test device

表 3 不同饱和盐溶液及其对应的相对湿度

Table 3 Different saturated salt solutions and their corresponding relative humidity

饱和盐溶液	相对湿度/%	
	10℃	20℃
LiCl	11.7	11.6
CH ₃ COOK	23.3	23.0
MgCl ₂	33.4	33.1
K ₂ CO ₃	43.6	43.2
NaBr	60.6	58.8
NaCl	75.9	75.5
KCl	87.4	84.5
Na ₂ SO ₃	93.4	90.9
K ₂ SO ₄	98.0	97.1

试验结束后,按式(1)计算土样的水蒸气吸附量,并以相对湿度和水蒸气吸附量为横、纵坐标绘制等温吸附曲线。

$$q = \frac{m_i - m_0}{m_0} \quad (1)$$

式中: q 为水蒸气吸附量; m_0 为干燥后的样品质量; m_i 为吸附平衡后的样品质量。

2 试验结果分析

2.1 非饱和黄土水蒸气吸附特性

由蒸汽平衡法试验得到温度为 20℃、干密度为 1.35 g/cm³时的非饱和黄土试样水蒸气吸附量随时间的动态变化曲线如图 3 所示。可以看出,水蒸气吸附量随吸附持续时间的增加而增加,吸附前几天的变化特别明显,当相对湿度 RH<97.1% 时,第 1 天完成的吸附量可达总吸附量的 70% 以上;当相对湿度 RH=97.1% 时,土样前 5 天吸附的水蒸气含量占吸附总量的 79%,随后吸附量的变化幅度逐渐减小,当达到某一时间后,水蒸气吸附量不再增加,最终趋于稳定达到平衡。图 3 还表明:1)非饱和黄土吸附水蒸气达到稳定的时间与相对湿度有很大的关系,相对湿度越高,试样达到吸附平衡所需要的时间也越长;2)水蒸气吸附量随相对湿度的增大

而增大,相对湿度较低时,增大的幅度较小,当相对湿度 $RH > 58.8\%$ 时,水蒸气吸附量随相对湿度的增大而显著增大。

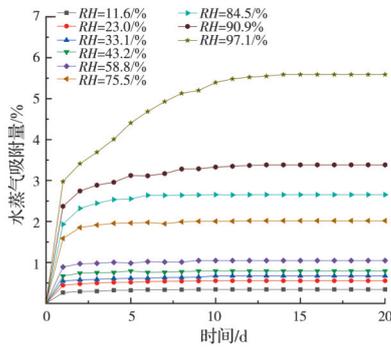


图 3 不同相对湿度水蒸气吸附量随时间的变化

Fig. 3 The variation of water vapor adsorption capacity with time under different relative humidity

2.2 非饱和黄土水蒸气等温吸附曲线及影响因素分析

2.2.1 温度对水蒸气吸附特性的影响

图 4 是非饱和黄土试样在 10、20 °C 时的水蒸气等温吸附曲线。可以看出,试验时所处的温度不同,非饱和黄土所吸附的水蒸气含量就不一样,但并不影响水蒸气吸附曲线的总体趋势。根据国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)提出的等温吸附曲线的分类^[26],试样在 10、20 °C 的等温吸附曲线均与 II 型吸附曲线较为吻合。

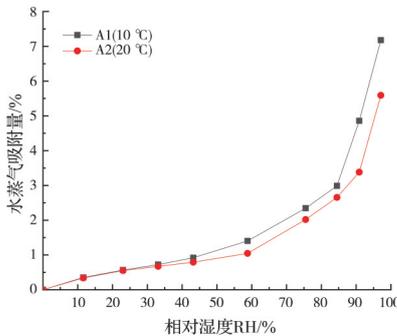


图 4 不同温度下水蒸气等温吸附曲线

Fig. 4 Isothermal adsorption curves of water vapor at different temperatures

基于等温吸附曲线的变化特征,可以大致将吸附曲线按相对湿度范围划分为 0~30%、30%~80% 和 80%~97.1% 三个阶段。相对湿度 $RH < 30\%$ 时等温线上凸,水蒸气吸附量在这一湿度区间有了明显的提升,意味着第 1 层吸附已经完成。当相对湿度介于 30%~80% 之间时,等温吸附曲线的斜率增加缓慢,该过程水蒸气在黄土颗粒表面发生了多层吸附。但随着相对湿度的继续升高,水蒸气吸附量显著增加,这是由于水蒸气分子在非饱和黄土孔隙中大量凝聚,发生了毛细凝聚现象,从而引起土体水蒸气吸附量急剧增大。

此外,从图 4 还可以看出,相对湿度恒定,非饱和黄土水蒸气吸附量随温度的升高而降低。在相对湿度 $RH < 30\%$ 时,随着温度的升高,水蒸气吸附量的变化很小,但随着相对湿度的继续增大,温度对水蒸气吸附量的影响很大。总的来说,20 °C 的水蒸气吸附量低于 10 °C。分析其原因,主要是随着温度的升高,水分子的热运动增加,不利于非饱和黄土对水蒸气的吸附。当温度升高时,被吸附分子中的动能增加,并获得足够的能量来克服吸附力,回到气相,从而降低了吸附能力^[27]。因此,水蒸气吸附量与温度之间存在显著的负相关关系。

2.2.2 矿物成分及含量对水蒸气吸附特性的影响

A2(H)、B1(10%B+H)以及 B2(30%B+H)土样在 20 °C 不同相对湿度环境下的水蒸气等温吸附曲线如图 5 所示,可以看出,3 种土样所呈现的水蒸气等温吸附曲线具有相似的变化特征。随着相对湿度的增大,土样表面的水蒸气吸附量不断增大,吸附曲线总体呈上升趋势。在相对湿度较低时,水蒸气首先在土样表面发生单层吸附,A2、B1 和 B2 土样的水蒸气吸附量分别上升至 0.63%、0.68% 和 0.98%。随着相对湿度的继续增大,等温吸附曲线平稳变化,进入多层吸附阶段,水蒸气吸附量也相应地增长到 2.34%、2.58% 和 3.70%。当毛细孔中孔隙水凹液面形成时,毛细凝聚成为土体吸附水蒸气最主要的驱动力,吸附量最终增至 5.59%、5.86% 和 7.14%。

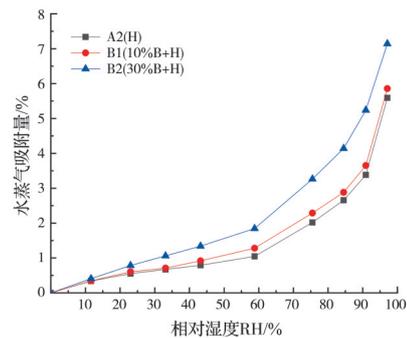


图 5 不同膨润土掺量水蒸气等温吸附曲线

Fig. 5 Isothermal adsorption curves of water vapor with different bentonite content

通过 X 射线衍射仪对 3 个样品中的矿物成分进行定性与定量分析,分析结果见表 4。从表中可以看出,3 个样品的矿物成分种类基本一致,仅在矿物成分含量上有所差异。3 个土样含量较多的均以碎屑粗颗粒矿物石英和钠长石为主,其中 A2 土样中石英含量接近矿物总量的一半,白云石的含量最少,占比仅为 1%。而 B1 和 B2 土样中石英的含量比 A2 少,白云石矿物的含量又比 A1 土样多 10% 左

右,原因是受参加的膨润土矿物成分含量的影响。土中非黏土矿物对土体吸附水的能力影响不大,对土体水蒸气吸附能力有显著影响的是黏土矿物^[28-29]。试验所用土样中的黏土矿物主要为蒙脱石、高岭石和伊利石,这些矿物都是由二维排列的硅氧四面体和铝氧八面体按不同的比例叠置而成。并且,不同的黏土矿物成分受其化学性质和晶体结构的影响也具有不同的亲水性。蒙脱石是由两层硅氧四面体和一层铝氧八面体组成,除了外表面积外,还存在由层间结构提供的大量内表面可供水分子吸附,使其对水蒸气的吸附能力要远大于高岭石和伊利石^[17]。

表 4 土样的矿物组成和含量

Table 4 Mineral composition and content of soil samples

土样 编号	矿物成分/%						
	石英	钠长石	蒙脱石	高岭石	伊利石	方解石	白云石
A2	45.0	19.7	8.7	8.8	8.6	8.1	1.0
B1	38.3	17.3	10.0	8.6	9.0	8.0	8.8
B2	34.6	15.5	13.8	9.7	7.6	7.0	11.8

由表 4 可知,3 种土样中所含黏土矿物总含量的大小排序为: B2>B1>A2。进一步将试验土样的水蒸气吸附量与黏土矿物含量的关系绘制于图 6。可以看出,水蒸气吸附量与黏土矿物含量之间存在明显的正相关关系,这表明黏土矿物含量越高,非饱和黄土对水蒸气的吸附能力就越强。因此,3 种土样的水蒸气吸附量呈现出和黏土矿物总量一致的变化趋势。

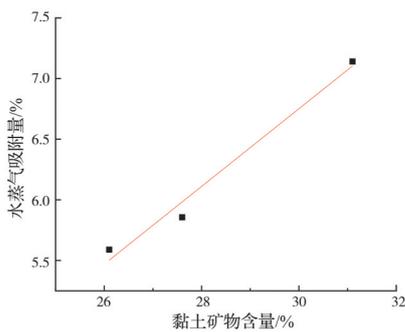


图 6 水蒸气吸附量与黏土矿物含量之间的关系

Fig. 6 Relationship between water vapor adsorption and clay mineral content

2.2.3 干密度对水蒸气吸附特性的影响

由蒸汽平衡法得到不同干密度土样的水蒸气等温吸附曲线如图 7 所示。可以看出,不论干密度有何变化,各土样的等温吸附曲线形态没有明显差异,大致趋势基本一致,并且干密度不同的 3 条曲线变化幅度较小,说明不同干密度条件下水蒸气吸附量相近,即干密度的变化并没有显著改变非饱和黄

土水蒸气吸附能力。

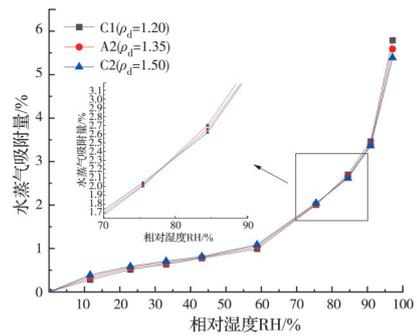


图 7 不同干密度水蒸气等温吸附曲线

Fig. 7 Isothermal adsorption curves of water vapor with different dry densities

干密度的增加能够提高试样黏粒含量,亦能够改变土样内部孔隙结构,而黏粒含量与孔隙结构均会影响到土样对水蒸气吸附能力的大小,进而控制吸附曲线的大致趋势和形状。从图 7 可以看出,在整个相对湿度范围内,干密度对水蒸气吸附量的影响大致可分为两个阶段。在单层吸附和多层吸附阶段,干密度越大,水蒸气吸附量也越大。主要原因是干密度越大,试样中的黏粒含量越高,其水蒸气吸附能力也就越强^[20]。因此,水蒸气吸附量与干密度的变化呈正相关关系。直到进入毛细凝聚阶段,随着干密度的增大,水蒸气吸附量不再增大反而有所降低。这可能与干密度变化引起土样内部孔隙体积变化有关。孔隙体积会影响水蒸气吸附能力,更大的孔隙体积能够吸附更多的水蒸气^[15]。干密度越大,土颗粒之间排列更加紧密,形成更小的孔隙体积,从而吸附的水蒸气含量就越小。可见,相对湿度较低时,黏粒含量控制土样的水蒸气吸附能力,孔隙体积则控制高相对湿度下的水蒸气吸附能力。

2.2.4 影响因素分析

采用方差分析法对试验数据进行分析,以定量估计各试验因素对水蒸气吸附量的影响程度。由分析可知,干密度对水蒸气吸附量的影响最不显著,明显低于温度和矿物成分及含量的影响。因此,只对温度和矿物成分及含量的试验数据采用 SPSS 软件进行方差分析,结果列于表 5。

表 5 方差分析表

Table 5 Variance analysis results

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F	显著性
温度	1.893	1	1.893	47.008	0.021
矿物成分及含量	1.818	2	0.909	22.584	0.042
误差	0.081	2	0.04		
总和	3.149	5			

由方差分析结果可知:温度、矿物成分及含量的显著性 P 值均小于 0.05,说明温度、矿物成分及含量对水蒸气吸附量均具有强显著影响。因此,综合考虑分析得到,在试验设计因素中,温度、矿物成分及含量对非饱和黄土水蒸气吸附性能具有强显著影响,而干密度的影响不显著。

2.3 水蒸气等温吸附模型拟合

目前,描述等温吸附的数学模型有很多。基于单分子层理论的 Langmuir 方程是最常用的等温线方程之一。该模型假定吸附表面均匀,吸附位固定不变且每个吸附位只能容纳一个分子或原子^[30]。其表达式为

$$q = \frac{q_m k_L p}{1 + k_L p} \quad (2)$$

式中: q 为气体的吸附量; q_m 为单分子层的最大吸附量; k_L 为 Langmuir 常数; p 为平衡压力。

Freundlich 模型假定气体吸附发生在非均匀固体表面,可用于描述多层吸附过程,表达式为

$$q = k_F P^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

式中: q 为气体的吸附量; n 和 k_F 为 Freundlich 常数; P 为平衡压力。

BET 吸附数学模型假设固体表面发生了多层吸附,适用于相对湿度较低情况下的吸附等温线拟合。其表达式为

$$q = \frac{q_m a_w c}{(1 - a_w)[1 + (c - 1)a_w]} \quad (4)$$

式中: q 为气体的吸附量; q_m 为单分子层的最大吸附量; a_w 为相对压力或相对湿度; c 为 BET 常数。

GAB 模型是在 BET 模型的基础上发展而来的,与 BET 模型相比,GAB 模型引入了多层吸附能常数 k ,且 GAB 模型适用的相对湿度范围($RH=5\% \sim 95\%$)远大于 BET 模型($RH=5\% \sim 35\%$),更具有通用性^[31]。该模型的数学表达式为

$$q = \frac{q_m k a_w c}{(1 - k a_w)[1 + (c - 1)k a_w]} \quad (5)$$

式中: q 为气体的吸附量; q_m 为单分子层的最大吸附量; a_w 是相对压力或相对湿度; c 和 k 是 GAB 常数,它们与单层和多层的性质有关。

吸附理论模型对于分析水蒸气在非饱和黄土中的吸附过程具有重要意义。利用 Origin 软件对试验黄土的水蒸气等温吸附曲线分别采用以上 4 种模型进行拟合,拟合结果如图 8 所示。

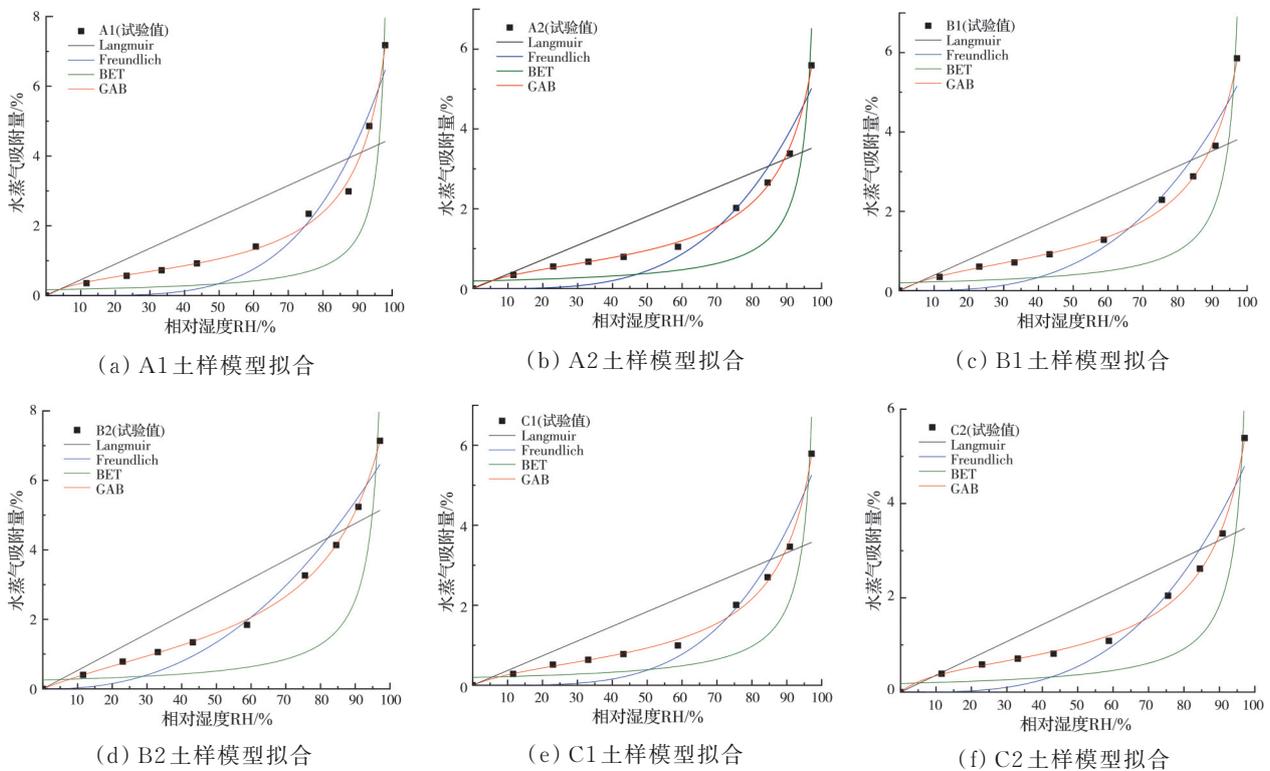


图 8 不同土样的水蒸气等温吸附曲线拟合

Fig. 8 Water vapor isothermal adsorption curve fitting of different soil samples

从图 8 可以看出,Langmuir、Freundlich 和 BET 模型均偏离试验数据,拟合效果较差,而 GAB 模型能大致预测水蒸气等温吸附曲线的变化趋势,拟合

精度最高。用 GAB 模型拟合的回归参数见表 6。

从表 6 可以看出,6 种土样的单层水分子吸附能常数 c 值变化较大,这可能与土样性质和内部孔隙

表 6 水蒸气吸附 GAB 模型拟合参数
Table 6 GAB model fitting parameters of water vapor adsorption

土样编号	吸附参数			
	c	k	$q_m/\%$	R^2
A1	4.531	0.924	0.765	0.9953
A2	9.000	0.923	0.584	0.9960
B1	7.701	0.911	0.683	0.9956
B2	3.625	0.857	1.261	0.9986
C1	6.493	0.926	0.589	0.9961
C2	11.254	0.917	0.594	0.9963

结构有关。吸附能常数 k 的大小反映多层吸附水结合能力的差异,当 k 值较低时,表明土样多层吸附水的结合能力较低。由表可知,6 种土样拟合得到的 k 值较为接近且均远小于 c 值,表明多层吸附作用相同且远弱于单层吸附作用。参数 q_m 可以反映不同土样之间单层吸附量的差异,以 B2 土样的单层吸附量最大,达到 1.261%。此外,6 种土样拟合得到的相关系数 R^2 均大于 0.99,由此可见,非饱和黄土吸附等温线都比较符合 GAB 理论吸附模型,且不同影响因素下吸附等温线的模型拟合精度都较高。

3 结论

1) 非饱和黄土水蒸气吸附量随相对湿度的增加而增加。在相对湿度 $RH < 80\%$ 时,水蒸气等温吸附曲线上升缓慢,该过程在土样表面发生了单层吸附、多层吸附。随着相对湿度的持续升高,水蒸气吸附量急剧增大,发生了毛细凝聚现象。

2) 随着温度的升高,水蒸气吸附量逐渐降低。温度对水蒸气的吸附起抑制作用,原因是温度升高促进了水分子的热运动,使得被吸附分子获得足够的能量来克服吸附力,从而导致吸附能力减弱。

3) 与非黏土矿物相比,黏土矿物有大量的比表面积可供水分子吸附,且不同的黏土矿物受化学性质和晶体结构的影响,水蒸气吸附能力也有所差异。总的来说,黏土矿物含量越高,其对水蒸气的吸附能力也就越强。

4) 干密度不同,土样的水蒸气吸附量也不同。相对湿度 $RH < 80\%$ 时,水蒸气吸附量随干密度的增大而增大;当相对湿度 $RH > 80\%$ 时,干密度越大,平衡后的水蒸气吸附量越小。

5) 非饱和黄土水蒸气吸附符合 GAB 理论吸附模型。6 种土样拟合结果的 $R^2 > 0.99$,说明不同影响因素下吸附等温线的 GAB 模型拟合精度均较高。

参考文献

- [1] 刘德仁,徐硕昌,肖洋,等. 浸水入渗条件下压实黄土水-气运移规律试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3260-3270.
LIU D R, XU S C, XIAO Y, et al. Experimental study on the law of water-air migration in compacted loess under the condition of immersion infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3260-3270. (in Chinese)
- [2] 魏亚妮,范文,麻广林. 黄土高原马兰黄土微结构特征及湿陷机理[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(4): 581-592.
WEI Y N, FAN W, MA G L. Characteristics of micro-structure and collapsible mechanism of Malan loess in loess plateau, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(4): 581-592. (in Chinese)
- [3] 孙萍萍,张茂省,程秀娟,等. 黄土高原地质灾害发生规律[J]. 山地学报, 2019, 37(5): 737-746.
SUN P P, ZHANG M S, CHENG X J, et al. On the regularity of geological hazards on the loess plateau in China [J]. Mountain Research, 2019, 37(5): 737-746. (in Chinese)
- [4] 朱兴华,彭建兵,同霄,等. 黄土地区地质灾害链研究初探[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 117-122.
ZHU X H, PENG J B, TONG X, et al. Preliminary research on geological disaster chains in loess area [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 117-122. (in Chinese)
- [5] 王磊,李荣建,刘军定,等. 连续降雨下黄土陡坡开裂及稳定性评价[J]. 水利水运工程学报, 2022(4): 77-86.
WANG L, LI R J, LIU J D, et al. Stability evaluation and cracking research of steep loess slope under continuous rainfall [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022 (4): 77-86. (in Chinese)
- [6] 张强,王胜,王闪闪,等. 半干旱区土壤水汽吸附的影响因素及变化特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(11): 1515-1527.
ZHANG Q, WANG S, WANG S S, et al. Influence factors and variation characteristics of water vapor absorption by soil in semi-arid region [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2016, 46(11): 1515-1527. (in Chinese)
- [7] 李胜龙,肖波,孙福海. 黄土高原干旱半干旱区生物结皮覆盖土壤水汽吸附与凝结特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 111-119.
LI S L, XIAO B, SUN F H. Characteristics of water vapor sorption and condensation in biocrusts covered surface soil in arid and semiarid areas of the Loess Plateau, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 111-119. (in Chinese)
- [8] 崔德山,项伟,陈琼,等. 真空冷冻干燥和烘干对滑带土孔隙特征的影响试验[J]. 地球科学, 2014, 39(10):

- 1531-1537.
- CUI D S, XIANG W, CHEN Q, et al. Pore characteristics of sliding zone soils of huangtupo landslide by vacuum freeze-dried and dried methods [J]. *Earth Science*, 2014, 39(10): 1531-1537. (in Chinese)
- [9] 陈琼, 项伟, 崔德山, 等. 黄土坡滑坡滑带土氮气与水蒸气吸附试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(4): 691-696.
- CHEN Q, XIANG W, CUI D S, et al. Adsorption of nitrogen and water vapor by sliding zone soils of Huangtupo landslide [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(4): 691-696. (in Chinese)
- [10] 徐龙飞, 翁效林, 张爱军, 等. 变湿度条件下生土材料持水特性及气态水迁移效应试验研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(9): 2489-2498.
- XU L F, WENG X L, ZHANG A J, et al. Experimental study of water retention characteristics and vapor migration of earth material under relative humidity variation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(9): 2489-2498. (in Chinese)
- [11] ŽUMÁR J, PAVLÍK Z. Adsorption of water vapor in selected sandstone influenced by different method of measurement using dynamic vapor sorption device [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 982: 16-21.
- [12] JABRO J D. Water vapor diffusion through soil as affected by temperature and aggregate size [J]. *Transport in Porous Media*, 2009, 77(3): 417-428.
- [13] LI J H, LI B B, GAO Z. Water vapor adsorption behavior in shale under different temperatures and pore structures [J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30(3): 2789-2805.
- [14] 俞缙, 王海, 郑春婷, 等. 掺灰膨胀土表面吸附试验及吸水性验证[J]. *岩土力学*, 2012, 33(1): 73-77.
- YU J, WANG H, ZHENG C T, et al. Superficial adsorption experiment and water adsorption corroboration for lime modified expansive soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(1): 73-77. (in Chinese)
- [15] BAI J J, KANG Y L, CHEN M J, et al. Impact of surface chemistry and pore structure on water vapor adsorption behavior in gas shale [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 402: 126238.
- [16] 沈伟军, 李熙喆, 鲁晓兵, 等. 基于等温吸附的页岩水分传输特征研究[J]. *力学学报*, 2019, 51(3): 932-939.
- SHEN W J, LI X Z, LU X B, et al. Study on moisture transport characteristics of shale based on isothermal adsorption [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(3): 932-939. (in Chinese)
- [17] 冯东, 李相方, 李靖, 等. 黏土矿物吸附水蒸气特征及对孔隙分布的影响[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(2): 110-118.
- FENG D, LI X F, LI J, et al. Water adsorption isotherm and its effect on pore size distribution of clay minerals [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2018, 42(2): 110-118. (in Chinese)
- [18] 李凤洁, 王旭东, 郭青林. 莫高窟壁画地仗层水汽吸附特征及其影响因素[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(4): 606-614.
- LI F J, WANG X D, GUO Q L. The characteristics and influencing factors of the moisture adsorption in the earthen plaster of murals in Mogao Grottoes [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(4): 606-614. (in Chinese)
- [19] YANG R, JIA A Q, HE S, et al. Water adsorption characteristics of organic-rich Wufeng and Longmaxi Shales, Sichuan Basin (China) [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 193: 107387.
- [20] CHEN C, ARTHUR E, ZHOU H, et al. A new model for soil water vapor sorption isotherms considering adsorption and condensation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021, 85(2): 195-206.
- [21] 尹英杰, 陈冲, 晏朝睿, 等. 土壤水汽吸附曲线的模拟及其滞后效应[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4): 838-846.
- YIN Y J, CHEN C, YAN C R, et al. Simulation and hysteresis effect of soil water vapor sorption isotherm [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 838-846. (in Chinese)
- [22] 林怡菲, 关富佳, 胡海燕. 川东龙马溪组含水页岩吸附特征[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 34(4): 21-25.
- LIN Y F, GUAN F J, HU H Y. Adsorption characteristics of water-bearing shale in Longmaxi Formation, eastern Sichuan [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2019, 34(4): 21-25. (in Chinese)
- [23] AKIN I D, LIKOS W J. Evaluation of isotherm models for water vapor sorption behavior of expansive clays [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31(1): D4016001.
- [24] CHEN M Y, ZENG W Z, ARTHUR E, et al. Relating soil salinity, clay content and water vapour sorption isotherms [J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(3): 399-414.
- [25] 建筑材料及制品的湿热性能 吸湿性能的测定: GB/T 20312—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- Hygrothermal performance of building materials and products-Determination of hygroscopic sorption properties: GB/T 20312—2006 [S]. Beijing: China Standard Press, 2006.

- [26] SING K S W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984) [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, 57(4): 603-619.
- [27] FIANU J, GHOLINEZHAD J, HASSAN M. Comparison of temperature-dependent gas adsorption models and their application to shale gas reservoirs [J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(4): 4763-4771.
- [28] SAXTON K E, RAWLS W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1569-1578.
- [29] MIRONOV V L, SUKHOVSKII A A, LUKIN Y I, et al. Measurement of the maximum content of bound water in bentonitic clay using dielectric and NMR methods [J]. *Russian Physics Journal*, 2011, 54(1): 71-76.
- [30] 党伟, 张金川, 王凤琴, 等. 富有机质页岩-水蒸气吸附热力学与动力学特性: 以鄂尔多斯盆地二叠系山西组页岩为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 173-185.
- DANG W, ZHANG J C, WANG F Q, et al. Thermodynamics and kinetics of water vapor adsorption onto shale: A case study of the Permian Shanxi Formation, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 173-185. (in Chinese)
- [31] TIMMERMANN E O. Multilayer sorption parameters: BET or GAB values? [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2003, 220(1/2/3): 235-260.

(编辑 王秀玲)