

# 盾构影响下的路基土气态水迁移研究

王 锴<sup>1</sup>, 邹连慧<sup>2</sup>, 魏海斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中铁一局集团第二工程有限公司, 吉林 长春

<sup>2</sup>吉林大学交通学院, 吉林 长春

收稿日期: 2023年7月26日; 录用日期: 2023年8月16日; 发布日期: 2023年8月28日

## 摘 要

为了探讨盾构影响下路基土的抗冻胀性及其气态水迁移规律, 本文通过创新发明的试验装置, 开展了不同含水率和不同压实度的路基土在不同温度下的气态水迁移试验。试验结果揭示出: 同一压实度的路基土在相同温度情况下气态水迁移质量随含水率的增大而增大; 当含水率较低时, 路基土的气态水迁移质量随着压实度的增大呈先减小后增加的趋势, 当含水率较高时, 路基土的气态水迁移质量随着压实度的增大而增加; 同一含水率的路基土在相同压实度情况下气态水迁移质量随着温度的升高而增大。本研究成果对于探索路基土在盾构影响下的气态水迁移规律具有一定的现实意义, 同时为非饱和土的水汽迁移机理深入研究提供借鉴。

## 关键词

盾构影响, 路基土, 气态水迁移, 含水率, 压实度

# Study of Gaseous Water Migration in Roadbed Soil under the Influence of Shield

Kai Wang<sup>1</sup>, Lianhui Zou<sup>2</sup>, Haibin Wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China Railway First Bureau Group Second Engineering Co., Changchun Jilin

<sup>2</sup>Transportation College, Jilin University, Changchun Jilin

Received: Jul. 26<sup>th</sup>, 2023; accepted: Aug. 16<sup>th</sup>, 2023; published: Aug. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to investigate the frost swelling resistance of the roadbed soil and its gaseous water migration law under the influence of shield structure, this paper carried out the gaseous water migration test of roadbed soil with different water content and different compaction degree at different temperatures by means of an innovative invented test device. The test results reveal that:

文章引用: 王锴, 邹连慧, 魏海斌. 盾构影响下的路基土气态水迁移研究[J]. 土木工程, 2023, 12(8): 1129-1136.

DOI: 10.12677/hjce.2023.128129

the gaseous water migration mass of the same compaction degree of roadbed soil at the same temperature increases with the increase of water content. When the water content is low, the gaseous water migration mass of roadbed soil decreases with the increase of compaction degree and then increases with the increase of compaction degree. When the water content is high, the gaseous water migration mass of roadbed soil increases with the increase of compaction degree. The gaseous water migration mass increases with the increase of temperature for the same moisture content of the roadbed soil at the same compaction level. The research results are of practical significance for exploring the gaseous water migration law of roadbed soil under the influence of shield structure, and also provide reference for the in-depth study of water vapor migration mechanism of unsaturated soil.

## Keywords

The Influence of Shield Structure, Roadbed Soil, Gaseous Water Migration, Water Content, Compaction Degree

Copyright © 2023 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

季冻区路基冻胀是影响工程安全以及道路使用寿命的重要因素，而在道路下方进行盾构施工会改变路基土的含水率及压实度等状态，进而影响路基的抗冻胀性能。

路基是典型的非饱和土，非饱和土中的水汽迁移导致含土中含水量发生变化，土中含水量在很大程度上影响着土体的稳定性，比如体积和抗剪强度发生变化、土中的孔隙压力的变化会导致土体的有效应力发生一定的改变、在水渗透时产生的渗透力在一定程度上影响边坡的稳定性[1]。路基发生的工程病害问题如冻胀、塌陷、翻浆、冲刷，在很大程度上与路基土中的水汽迁移有着密切的联系，而水汽迁移分为气态水迁移和液态水迁移[2]。王铁行[3] [4] [5]、贺再求[6]、李颜龙[7]、张升[8]、李颖颖[9]等多位学者对非饱和土的气态水迁移进行了相关试验研究，结果表明非饱和土气态水迁移与温度、含水率和压实度有密切的联系。

气态水迁移在季冻区路基冻胀中的作用是不能忽略的，系统研究路基土的气态水迁移对其在实际工程中的应用具有重要的意义[10]。本文考虑通过自主创新的试验装置对盾构影响下不同含水率和不同压实度的路基土在不同温度下的气态水迁移进行试验研究。

## 2. 试验装置及方案

### 2.1. 试验装置

本文创新发明测量土中气态水迁移质量的装置，气态水迁移盒示意图与实物图如图 1 所示，具体包括底座(1)、环刀(2)、试验土样(3)、滤纸固定垫片(4)、滤纸(5)、螺栓(6)、螺母(7)。

将含有土样的环刀放入底座当中；将滤纸固定垫片放到底座上；将密封橡胶圈放在滤纸固定垫片外沿上；该装置上下两侧为对称结构，上侧操作过程与下侧操作过程相同；将烘干并称重后的滤纸用镊子放在滤纸固定垫片上；将上下两结构迅速结合并通过螺栓和螺母连接形成一体，此操作在 2 s 内完成；将装配好的气态水迁移盒放入低温恒温槽中，8 h 后从低温恒温槽中取出且卸下螺栓和螺母；用镊子快速将

滤纸取出立即放到精度为 0.0001 g 的电子天平上称重,该操作在 2 s 内完成以减小滤纸在空气中脱湿所造成的误差;这个过程需要两人共同参与,并且必须戴干燥的塑胶手套,禁止使用手直接接触滤纸。采用本试验装置测量土中气态水迁移质量具有精确度高、方便快捷、试验周期短、低成本、小工作量、可循环利用等优点。

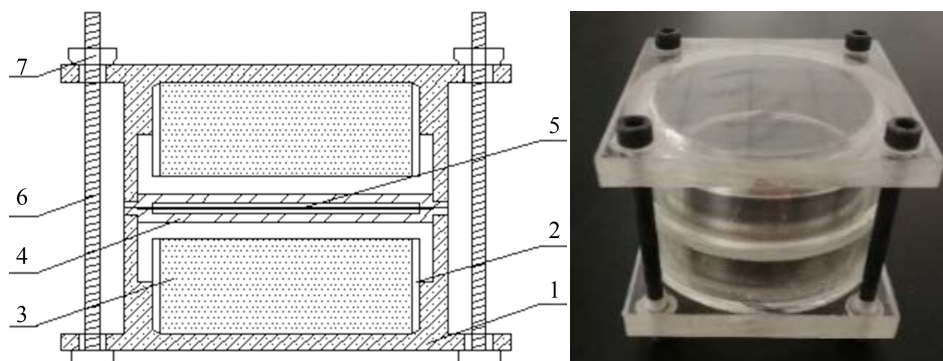


Figure 1. Schematic diagram and physical diagram of gaseous water migration device  
图 1. 气态水迁移盒示意图与实物图

## 2.2. 试验方案

为探究路基土在盾构影响下的不同条件下的气态水迁移规律,本实验拟通过试验装置测定不同条件下路基土的气态水迁移的质量。

通过在盾构轴线上方布设含水率传感器及温度传感器,监测盾构过程中含水率及温度的变化,并通过现场钻芯取样进行试验的方法测定路基土的压实度变化情况,含水率在盾构过程中的变化趋势如图 2 所示,在施工开始前的含水率大约为 27.8%,开工后第 15 天降低至 22.8%,第 18 天降低至 17.8%,第 20 天降低至 7.8%,之后开始回升至 12.8%并保持稳定,全年土体温度在 0℃~20℃之间变化,钻芯取样测得的路基土压实度在 70%~90%之间,因而确定具体试验方案见表 1。

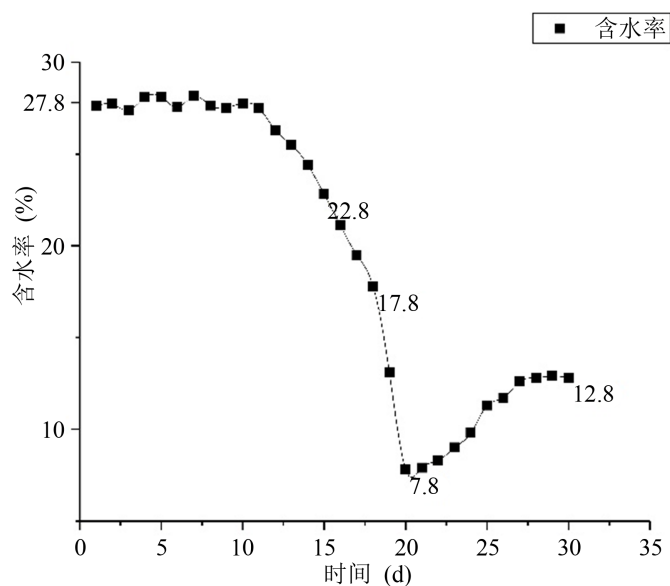


Figure 2. Trend of moisture content  
图 2. 含水率变化图

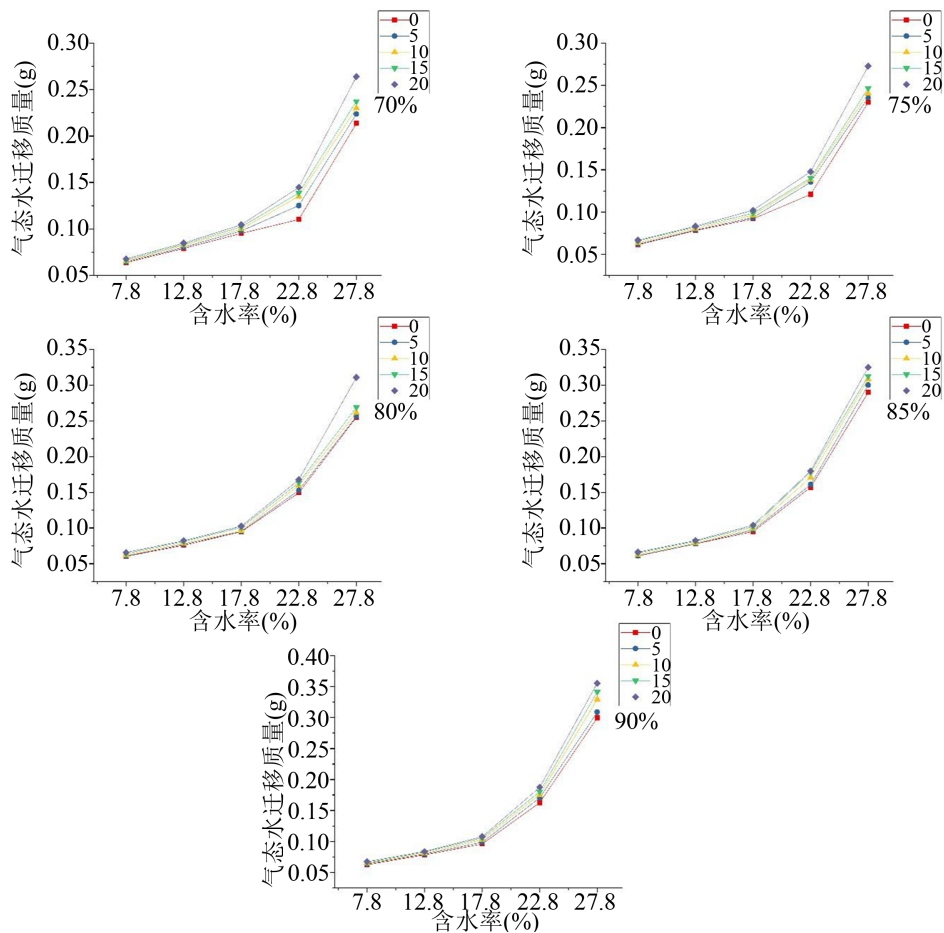
**Table 1.** Test plan table  
**表 1.** 试验方案表

土样	压实度度(%)	含水率(%)	温度(°C)
路基土	70	7.8、12.8、17.8、22.8、27.8	0、5、10、15、20
	75		
	80		
	85		
	90		

### 3. 试验数据分析

#### 3.1. 含水率对路基土中气态水迁移的影响

压实度为 70%、75%、80%、85%、90% 的路基土在温度为 0°C、5°C、10°C、15°C、20°C 情况下气态水迁移质量与含水率之间的关系如图 3 所示。



**Figure 3.** Relationship between gaseous water migration mass of subgrade and moisture content  
**图 3.** 路基土的气态水迁移质量与含水率之间的关系

从图中可以看出压实度和温度一定的路基土的气态水迁移质量随着含水率的增大而增大。压实度和温度一定的路基土在含水率为 7.8%~17.8%时, 气态水迁移质量变化较小; 当含水率为 17.8%~22.8%时, 气态水迁移质量变化明显; 当含水率为 22.8%~27.8%时, 气态水迁移质量增加幅度最大。在含水率较低的情况下, 相同压实度的路基土的气态水迁移质量在不同温度下的差异较小; 随着含水率的增加, 路基土的气态水迁移质量在不同温度下差异逐渐明显; 含水率为 22.8%~27.8%这一范围内路基土的气态水迁移质量在不同温度下的差异最大, 其中 0℃时气态水迁移质量最小, 随着温度的升高气态水迁移质量不断增加, 20℃时气态水迁移量最大。说明在相同情况下含水率的增加会促进气态水的迁移, 因为含水率增大, 相同质量土中的水分增多, 水膜厚度较大活性越强, 其中可以转化为气态水的水量越大, 即可运移水汽的补给量越大。

### 3.2. 压实度对路基土中气态水迁移的影响

含水率为 7.8%、12.8%、17.8%、22.8%、27.8%的路基土在温度为 0℃、5℃、10℃、15℃、20℃情况下气态水迁移质量与压实度之间的关系如图 4 所示。

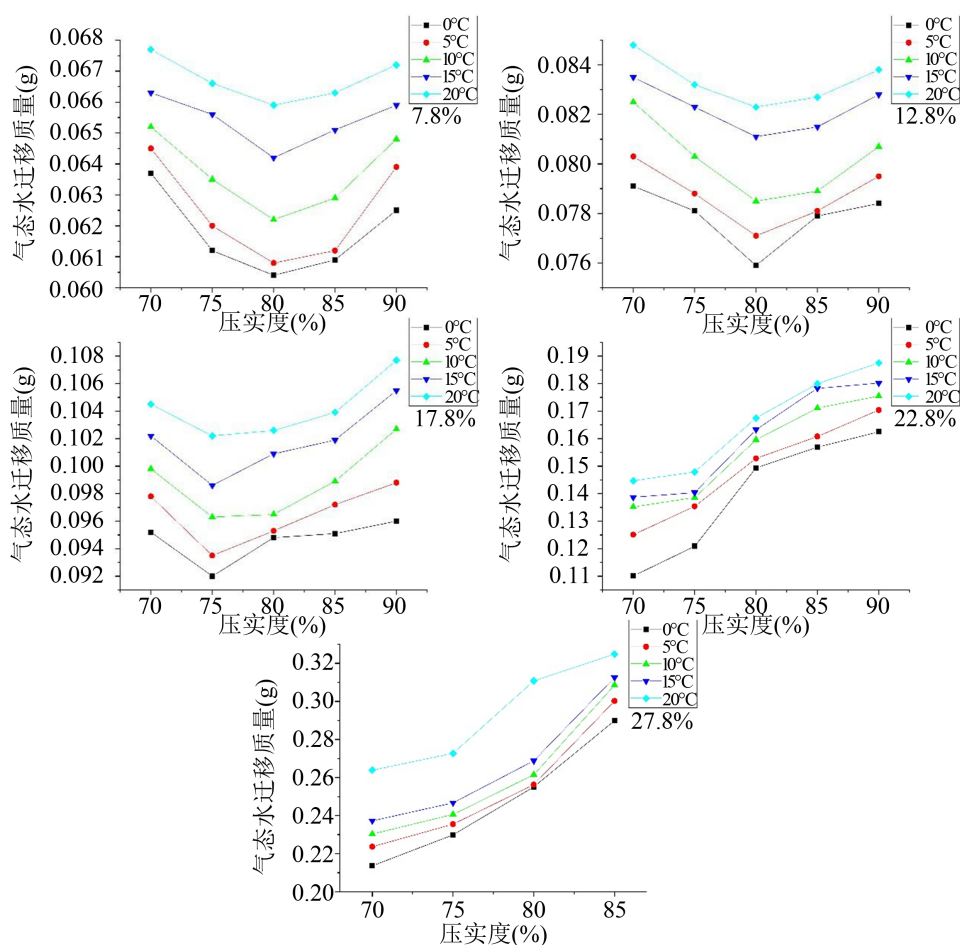


Figure 4. Relationship between gaseous water migration mass of subgrade and compaction degree

图 4. 路基土的气态水迁移质量与压实度之间的关系

从图中可以看出在相同温度情况下, 同一含水率的路基土的气态水迁移质量随着压实度的增加显现出不同的情况。当含水率为 7.8%~17.8%时, 路基土的气态水迁移质量随着压实度的增加呈先减小后增加

的趋势,当含水率为7.8%~12.8%时,路基土的气态水迁移质量在压实度为80%时最小,当含水率为17.8%时,路基土的气态水迁移质量在压实度为75%时最小。当含水率为22.8%~27.8%时,路基土的气态水迁移质量随着压实度的增加而增加。含水率和温度一定的路基土,随着压实度的增大,路基土的孔隙变小,孔隙直径和孔隙参数变小,从而导致孔隙流通性变差导致气态水迁移受到抑制,但是随着压实度的增大单位体积内的路基土的水质量增大,可迁移的气态水质量增多。可见压实度的增大对路基土的气态水迁移既有促进作用也有抑制作用,当含水率为7.8%~12.8%时,压实度为70%~80%这一过程中气态水迁移质量减小,在此过程中压实度增大的抑制作用占主导地位,但是当压实度为80%~90%这一过程中气态水迁移质量增大,在此过程中压实度增大的促进作用占主导地位;当含水率为17.8%时,压实度为70%~75%这一过程中气态水迁移质量减小,压实度为75%~90%这一过程中气态水迁移质量增大。相比于含水率为7.8%~12.8%的路基土,含水率为17.8%的路基土可迁移气态水质量明显增多,因此气态水迁移质量最低点由80%压实度转变为75%压实度;当含水率为22.8%和27.8%时,压实度的增大完全表现为促进气态水迁移,随着压实度的增大,气态水迁移质量不断的增大。

### 3.3. 温度对路基土中气态水迁移的影响

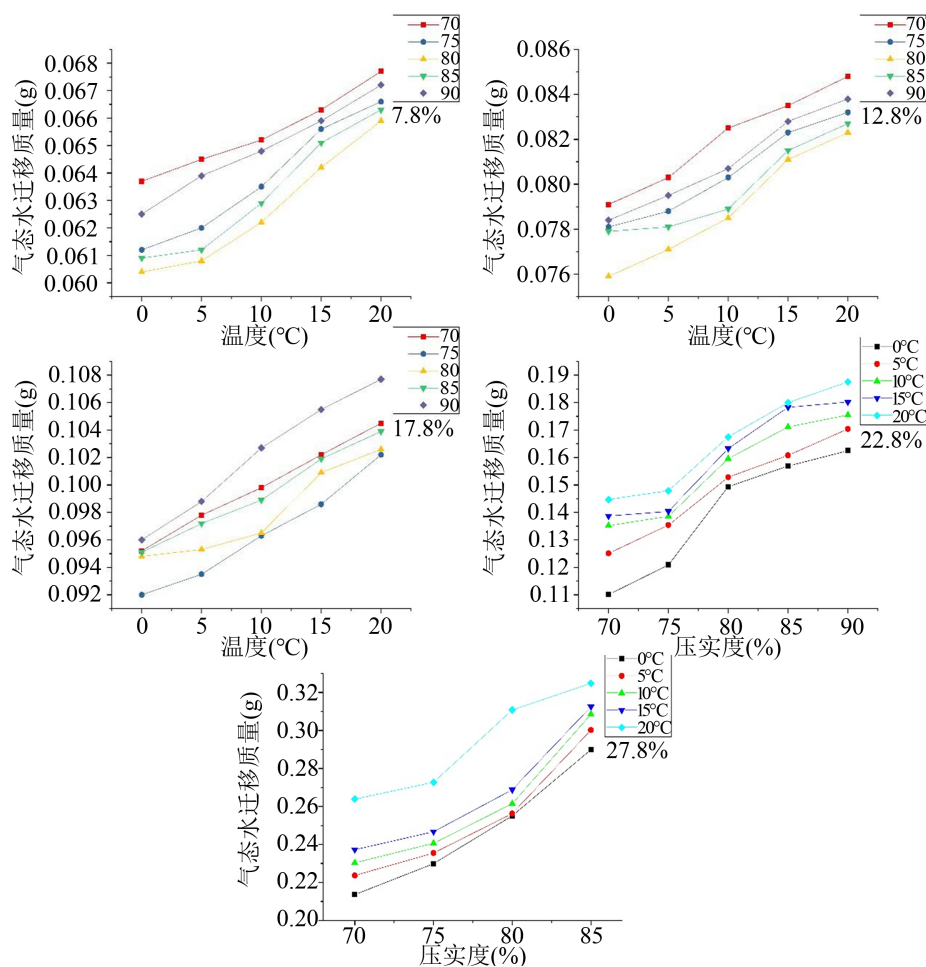


Figure 5. Relationship between gaseous water migration mass of subgrade and temperature

图 5. 路基土的气态水迁移质量与温度之间的关系

含水率为7.8%、12.8%、17.8%、22.8%、27.8%的路基土在压实度为70%、75%、80%、85%、90%

情况下气态水迁移质量与温度之间的关系如图 5 所示。从图中可以看出同一含水率的路基土在相同压实度情况下气态水迁移质量随着温度的升高而增大。说明在相同情况下,温度的升高会加速气态水的迁移,这是因为随着温度的升高,水分子的运动更加剧烈从而导致更多的水分能脱离液态水成为气态水,温度越高气态水迁移质量越大。当温度小于  $0^{\circ}\text{C}$  时,路基土中的气态水处于冻结状态,将不再会进行迁移,因此本文未对  $0^{\circ}\text{C}$  以下时路基土的气态水迁移进行研究。

### 3.4. 多因素对路基土中气态水迁移的影响

路基土的气态水迁移质量与含水率、温度和压实度中两因素之间的关系如图 6、图 7 和图 8 所示。从图中可以看出同时提高含水率和温度或者含水率和压实度都会明显促进路基土的气态水迁移;当含水率较高时,同时提高压实度和温度会明显促进路基土的气态水迁移,当含水率较低时,同时提高压实度和温度促进路基土的气态水迁移效果不明显。

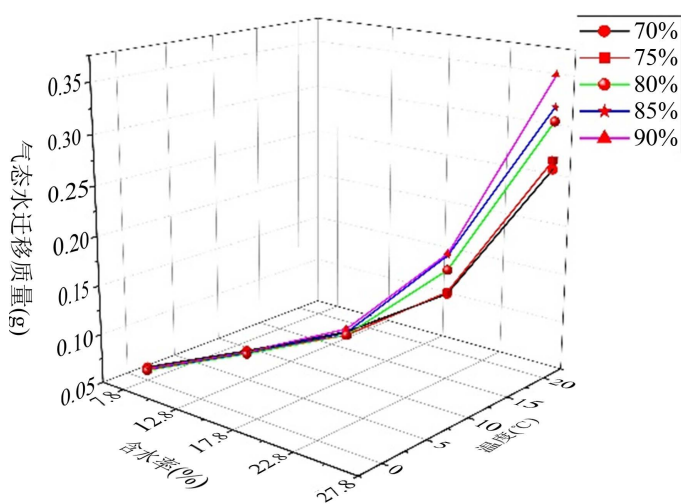


Figure 6. Relationship between gaseous water migration mass of subgrade and moisture content and temperature

图 6. 路基土的气态水迁移质量与含水率和温度之间的关系

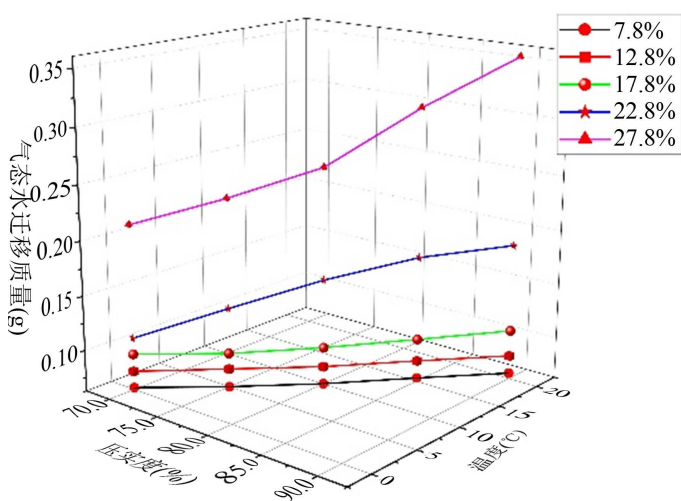
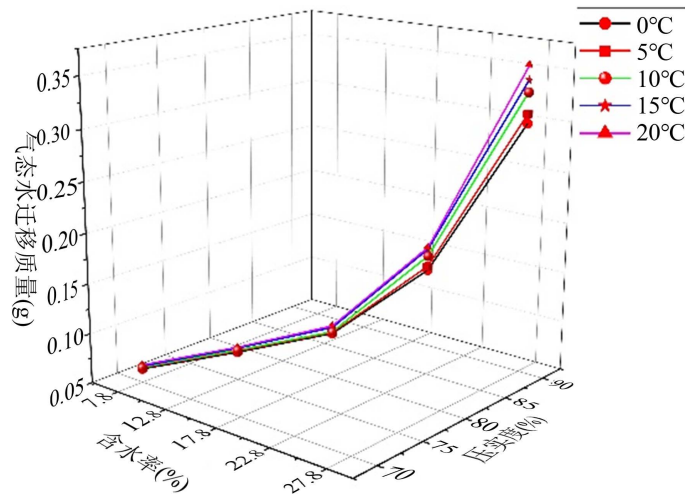


Figure 7. Relationship between gaseous water migration mass of subgrade and compaction degree and temperature

图 7. 路基土的气态水迁移质量与压实度和温度之间的关系



**Figure 8.** Relationship between gaseous water migration mass of subgrade and moisture content and t compaction degree

**图 8.** 路基土的气态水迁移质量与含水率和压实度之间的关系

#### 4. 结论

本文研究了盾构影响下不同含水率的路基土在不同温度和不同压实度下的气态水迁移规律，得到以下结论：

- 1) 路基土的气态水迁移质量随着含水率的增大而增大；
- 2) 压实度的增大对路基土的气态水迁移既有促进作用也有抑制作用，当含水率较低时，路基土的气态水迁移质量随着压实度的增加呈先减小后增加的趋势，当含水率较高时，路基土的气态水迁移质量随着压实度的增加而增加；路基土的气态水迁移质量随着温度的升高而增大。

#### 参考文献

- [1] 王铁行, 王娟娟, 张龙党. 冻结作用下非饱和黄土水分迁移试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 2012, 44(1): 7-13+71.
- [2] Milly, P.C.D. (1984) A Simulation Analysis of Thermal Effects on Evaporation from Soil. *Water Resources Research*, **20**, 1087-1098. <https://doi.org/10.1029/WR020i008p01087>
- [3] 王铁行, 贺再球, 赵树德, 等. 非饱和土体气态水迁移试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3271-3275.
- [4] 王铁行, 陆海红. 温度影响下的非饱和黄土水分迁移问题探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1081-1084.
- [5] 王铁行, 赵树德. 非饱和土体气态水迁移引起的含水量变化方程[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 18-21.
- [6] 贺再球, 王铁行, 赵树德. 非饱和土体气态水和液态水混合迁移的耦合计算[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2004, 36(3): 285-287+298.
- [7] 李彦龙, 王俊, 王铁行. 温度梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2839-2844.
- [8] 张升, 贺佐跃, 滕继东, 等. 非饱和土水汽迁移与相变: 两类“锅盖效应”的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 961-968.
- [9] 李颖颖. 非饱和土水汽迁移特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [10] Rassam, D.W. and Williams, D.J. (1999) Bearing Capacity of Desiccated Tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**, 600-609. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:7\(600\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:7(600))