

西北富水地区盐渍土地层内温湿度变化规律研究

唐先习¹,高毅仁¹,侯兆领²,杨欢²,蒙富佳¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050;

2. 中交三公局第二工程有限公司,天津 301800)

摘要: 温湿度对盐渍土地区公路的季节性冻胀和沉陷有着明显的影响,为研究富水地区盐渍土地基的温湿度变化规律,以柳园至敦煌公路某区段为例,通过多层土壤参数监测仪对公路两侧的温湿度进行了为期1年的监测,并采用公式拟合的方式建立了不同深度地层的温度曲线表达式,在拟合出的温度曲线表达式的基础上确定了受地表温度变化影响的临界地层深度,最后通过湿度监测结果研究了不同深度地层的湿度变化规律和地层冻结深度。研究表明:研究区段地层年温度近似呈正弦曲线式变化,不同深度的地层温度曲线间存在着温度滞后现象,滞后时间与地层深度呈正比;研究区段地层在冬季出现结冰现象,冻土层深度在25 cm~45 cm之间;地层温度受地表温度影响的临界深度为400 cm~500 cm;地层湿度受地下水的影响表现出夏季湿度大、冬季湿度小的特点。

关键词: 岩土工程;盐渍土地层;温湿度变化;滞后现象

中图分类号: TU448;U213.14

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)02—0108—07

Variation of Temperature and Humidity in Saline Soil Layer in Northwest Water-rich Area

TANG Xianxi¹, GAO Yiren¹, HOU Zhaoling², YANG Huan², MENG Fujia¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. The Second Engineering Co., Ltd., Third Highway Engineering Bureau of China Transportation Construction, Tianjin 301800, China)

Abstract: Temperature and humidity have obvious influence on seasonal frost heave and subsidence of highway in saline soil area. In order to analyze the variation law of temperature and humidity of saline soil foundation in water-rich area, this work took a section of Liuyuan-Dunhuang highway as an example, the temperature and humidity on both sides of the highway were monitored for one year by multi-layer soil parameter monitor, and the temperature curve expressions of strata at different depths were established by formula fitting. Based on the fitted temperature curve expression, the critical stratum depth affected by surface temperature change was determined. Finally, the humidity variation law and freezing depth of strata at different depths were analyzed by humidity monitoring results. The results show that the annual temperature of the formation in the study area changes approximately in a sine function curve. There is a temperature lag phenomenon between the formation temperature curves at different depths, and the lag time is proportional to the formation depth. The formation of the study area is frozen in winter, and the depth of the frozen soil layer is between 25 cm and 45 cm. The critical depth of formation temperature affected by surface temperature is 400 cm~500 cm. The influence of groundwater on the formation humidity shows the characteristics of high humidity in summer and low humidity in winter.

Keywords: geotechnical engineering; saline soil layer; temperature and humidity changes; lag phenomenon

收稿日期:2022-10-17

修稿日期:2022-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11962016)

作者简介:唐先习(1972—),男,博士,副教授,主要从事盐渍土冻胀方面的研究工作。E-mail:695913483@qq.com

通讯作者:高毅仁(1998—),男,硕士研究生,研究方向为盐渍土冻胀。E-mail:984025155@qq.com

盐渍土广泛分布于我国的西北部地区,盐渍土中的盐分在温湿度的变化作用下反复结晶-溶解,容易造成该地区的公路病害;同时,如该区域处于季冻区,冬季的盐冻同样会对公路造成病害。这些病害会导致路基产生不均匀沉降,或导致路基土强度和承载力下降,严重影响了公路的通行效果,大大增加了公路的养护费用。现阶段国内外关于盐渍土的研究相对较多,涉及到盐胀、冻胀、水分迁移等方面。在这方面,谭冬生等^[1]分析并研究了盐渍土的盐胀性,指出盐胀作用多在硫酸盐渍土地区发生,其中硫酸盐中以硫酸钠的盐胀作用最剧烈。任秀玲等^[2]总结出盐胀过程应是盐渍土体内硫酸钠的迁移聚积、结晶体膨胀和土体膨胀 3 个过程的综合结果。慈军等^[3]、刘凯等^[4]指出含水率和温度是影响盐胀产生的主要原因,加入氯盐主要是削弱温度降低带来的影响,并且氯盐的含量要控制在一定的范围。王利莉^[5]通过对氯盐渍土进行变形试验验证了冻胀、盐胀均是土、水、盐等综合作用的结果。张运海等^[6]通过对天然盐渍土的冻胀和水盐迁移试验指出冷端持续降温过程土体膨胀变形可分为 3 个阶段,第一阶段为盐胀起胀阶段,第二阶段为盐胀增长阶段,第三阶段为盐-冻胀共同增长阶段。张彧等^[7-8]对影响盐渍土病害的温湿度进行了观测,杨霞等^[9-12]对不同地区的土壤温湿度变化规律进行了研究,Oyelami Seun 等^[13-14]对温湿度监测系统进行了进一步的设计和开发。从以上的研究内容可以看出,虽然内容相对较多,但对于盐渍土地层内温湿度变化的规律的研究却相对较少,特别是针对有地下水补充条件下的盐渍土的温湿度变化规律的研究则更少,而这些恰恰是导致盐渍土出现盐胀或盐冻的根本原因。

本文结合 G215 线某富含地下水区段的地基进

行为期 1 年的盐渍土地基温度、湿度监测,研究了不同深度盐渍土地层的温度变化规律和滞后现象,确定了冻结深度范围并预测了地表温度对地层温度影响的临界深度。通过对湿度的监测研究了地层湿度的变化规律,以期对解决我国西北地区由盐渍土导致的工程病害提供一定的参考和借鉴。

1 土体基本性质和监测方案

1.1 土体基本性质

本次研究的监测地点选在 G215 线柳园至敦煌公路区段。该区段地处河西走廊,气候常年干燥,风沙居多,雨量稀少且蒸发量大,日温差较大。研究区段年平均降水量、年平均蒸发量、年平均相对湿度分别分布在 42.4 mm~151.4 mm、2 005.2 mm~3 523.9 mm、39%~42.2% 之间。春、夏、秋三季多东风,冬季多西风,年平均风速 3.7 m/s。但由于该研究区段间每年受疏勒河释放生态水的影响,地下水非常丰富。

2020 年 7 月对监测地点距离地表 0.25 m、0.85 m 和 1.25 m 处的土样进行采样,分别称为表层土、中层土、下层土。表层土、中层土和下层土的含水率分别为 20.24%、28.63% 和 23.75%。三层土样均为细粒土质砂,距地表不同深度土样含盐量见表 1。根据《岩土工程勘察规范》^[15](GB 50021—2009)及规程中盐渍土按照其含盐性质以及盐渍化程度进行分类。可以得到表层土属于氯盐渍土,中层土属于亚氯盐渍土,下层土属于亚硫酸盐渍土,则在 1 m 深的范围内可以认为大部分属于氯盐渍土。根据盐渍土工程分类,距离地表 0.25 m 处的表层土易溶盐总量为 2.66%,属于中盐渍土;距离地表 0.85 m 和 1.25 m 处的中层土和下层土易溶盐总量分别为 0.99% 和 0.71%,属于弱盐渍土。

表 1 不同深度土样主要易溶盐含量

土样 深度/m	易溶盐分量/(mmol·kg ⁻¹)									易溶盐 总量/%
	阴离子含量				阳离子含量					
	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	
0.25	228.79	55.15	11.22	1.04	56.16	21.04	218.48	0.35	0.17	2.26
0.85	77.79	31.89	11.55	1.05	32.06	25.37	64.50	0.24	0.11	0.99
1.25	48.31	24.87	11.06	1.05	26.91	15.07	42.87	0.27	0.17	0.71

综合考虑含水率以及起主导作用的阴离子与阳离子的作用^[16],得出土体冻结温度计算公式为:
 $-T_f = 4.2716W^{-1.0255}(\text{Na}^+)^{0.5420}(\text{Cl}^-)^{0.4509}$ (1)
式中:W 为含水率,%;Na⁺、Cl⁻ 离子量的单位为

mmol/100 g。
通过计算得到表层土的冻结温度为 -4.26℃,中层土的冻结温度为 -0.95℃,下层土的冻结温度为 -0.74℃。

1.2 监测方法

地层温湿度监测利用监控主机(见图 1)、多层土壤参数监测仪(见图 2)和监控云平台共同完成。整个监测试验通过监控主机将各个监测仪的测试信息反馈传递至监控云平台,进行远程数据采集。



图 1 监控主机

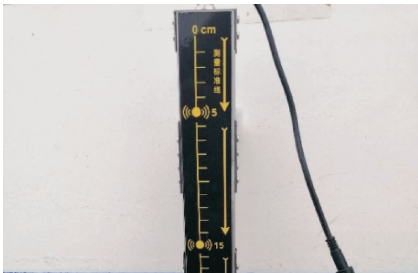


图 2 多层土壤参数监测仪

进行监测设备的安装时,在研究区段开挖深度为 125 cm、直径为 100 cm 的圆形探井,然后埋设多层土壤参数监测仪。湿度采集深度分别距离地表 5 cm、25 cm、45 cm、85 cm、125 cm。温湿度检测布置示意图如图 3 所示,现场布置如图 4 所示。根据监测要求,在监测点进行了为期一年的监测并对温湿度变化进行分析。

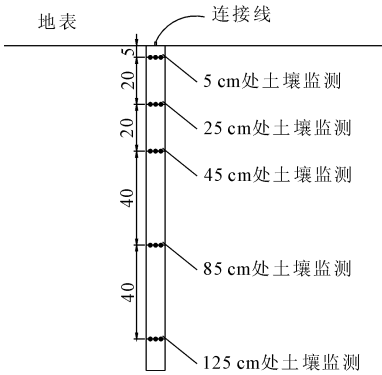


图 3 温湿度监测布置图

2 地层内温度变化规律

2.1 地层内温度变化规律

图 5 为研究区段地层深度为 5 cm、25 cm、45

cm、85 cm、125 cm 的地层温度变化图,周期为一年。



图 4 温湿度监测现场布置图

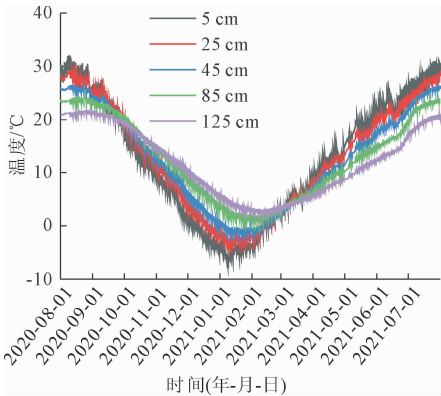


图 5 地层温度变化图

由图 5 可以得出以下的地层温度变化规律:

(1) 在夏季温度最高的 8 月,深度越小的地层温度越高。地层深度为 5 cm 处的最高温度为 32.0℃,地层深度 25 cm 处最高温度为 29.1℃,地层深度 45 cm 处最高温度为 26.4℃,地层深度 85 cm 处最高温度为 24.0℃,地层深度 125 cm 处最高温度为 21.6℃。

(2) 在冬季,深度越小的地层温度越低。地层深度为 5 cm 处的最低温度为 -6.8℃,地层深度为 25 cm 处的最低温度为 -3.9℃,地层深度为 45 cm 处的最低温度为 -1.6℃,地层深度为 85 cm 处的最低温度为 0.7℃,地层深度为 125 cm 处的最低温度为 2.2℃。

(3) 一年时间的地层温度曲线近似呈正弦曲线式变化。地层深度为 5 cm 处温度曲线的最高温度出现在 2020 年 8 月,而最低温度出现在 2021 年 1 月,根据该地区的月平均气温资料了解到,2019 年月平均最低和最高温度出现在 1 月和 8 月,其他年份也出现过月平均最低温和最高温的时间差为 7 个月,所以该地区的地层温度受环境温度的影响,近似

呈现为正弦曲线式变化。

(4) 在地层温度下降和回升的过程中,较深处的地层温度的下降和回升时间晚于较浅处的地层,称该现象为滞后现象。如在温度下降的过程中,地层深度为 5 cm 处降温日期在 8 月上旬,而地层深度为 125 cm 处降温日期在 8 月下旬。

(5) 随着距离地表深度的增大,各地层温度变化的幅度越小。地层深度为 5 cm 处一年中最高温度与最低温度的差值为 38.8℃,地层深度为 25 cm 处一年中最高温度与最低温度的差值为 33.0℃,地层深度为 45 cm 处一年中最高温度与最低温度的差值为 28.0℃,地层深度为 85 cm 处一年中最高温度与最低温度的差值为 23.3℃,地层深度为 125 cm 处一年中最高温度与最低温度的差值为 19.4℃。

地层内温度变化由地表温度的变化影响,白天地层吸热,晚上地层放热而发生温度变化。图 6 为各个月份温度随地层深度变化图,由图 6 可以看到,地层温度变化以某一温度为对称轴随着时间往复变化,随着地层深度的增大,温度变化幅度越来越小,这是由于温度向下传递的过程中,每层土体都会吸收一部分热量,随着深度增大,土层获得的热量越少。可以推测一定存在一个不受地表温度影响的临界地层深度,大于临界地层深度的土体温度常年不变并且不受地表温度的影响。

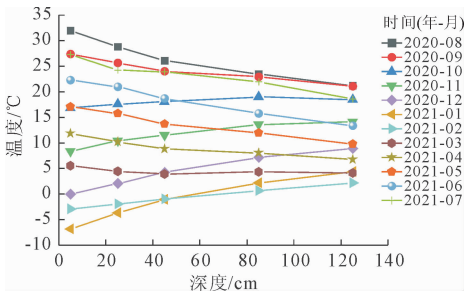


图 6 各月份温度随地层深度变化图

图 7 为夏季 72 h 地层温度变化图,图中 0 h ~ 72 h 对应第一天的 0 时到第三天的 24 时。对比图 5 和图 7 可以发现,尽管 45 cm 以下的地层日温度变化幅度非常小(小于 0.6℃),但是地层年温度的变化幅度较大:比如深度为 125 cm 处的地层中,夏季的温度为 21.6℃,冬季温度为 2.2℃;而夏季的日温度没有明显的变化。这说明地层内较深部位温度随着地表温度的变化依然较大,只是其日温度变化幅度非常小。

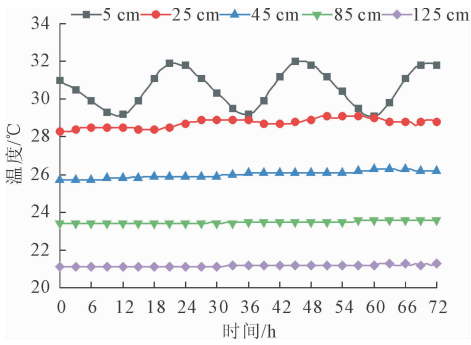


图 7 夏季 72 h 地层温度变化图

2.2 地层内温度变化相对于地表温度变化的滞后现象

相比于环境温度,地表温度更直接影响地层内的温度变化。图 8 为研究区段的地层温度与地表温度变化图(地表温度由气象单位查询),展示了地表温度和不同深度地层温度一年当中的温度变化。从图 8 可以看出,无论是升温过程还是降温过程,地表温度与地层内温度、不同地层温度之间都存在一定的滞后现象,随着地层深度的增大,滞后的时间也越来越长。地表温度变化自上而上传导引起地层温度的变化,而热量的传输会发生衰减并需要时间,因而下部地层的升温 and 降温时间要晚于上部地层,且随着地层深度的增加,滞后现象也越来越明显。

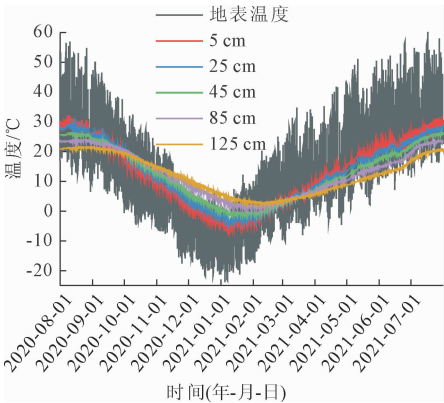


图 8 地层温度与地表温度变化关系

降温滞后时间指的是不同深度地层的降温日期与地表降温日期的差值,升温滞后时间同理。表 2 统计了一年地层温度相对于地表温度的滞后时间。通过对比降温 and 升温的滞后时间可以发现,地层中温度的升温滞后时间明显大于降温滞后时间。因为降温时处于秋季,相较于升温时的春季,秋季的日照时间长,昼夜温差大,热量在土层中传递或者损失比较多,所以降温的滞后时间比升温的滞后时间长。春季土层升温时,由于冬季日照时间短且昼夜

温差相对较小,所以在土层升温的过程中滞后时间较长。

表 2 地层温度变化滞后时间统计表

地层深度/cm	秋季		春季	
	降温日期	滞后时间/d	升温日期	滞后时间/d
0	2020-08-08	0	2021-01-08	0
5	2020-08-08	0	2021-01-08	0
25	2020-08-09	1	2021-01-09	1
45	2020-08-12	4	2021-01-14	6
85	2020-08-19	11	2021-02-06	29
125	2020-08-27	19	2021-02-12	35

注:由图 7 中可以看出,地层深度为 25 cm 处的日温度变化幅值已经很小,无法判断更深处地层的升温降温时间,所以滞后时间按天计算。

2.3 地层温度变化理论分析

从图 8 中可以看出,研究区段的温度曲线年变化规律近似表现为正弦曲线式变化,且不同地层深度的温度曲线对应的幅值、相位和极值不相同。因此,地层温度曲线以一个周期中的平均温度为基准值,以地层温度变化的幅度为幅值,以时间作为相位变化值,以温度滞后时间表达各地层曲线间的相位差,拟合的地层温度曲线表达式为:

$$T = T_0 + T_1 e^{(-\frac{z}{A})} \sin(\pi \cdot \frac{t - (Bz + C)}{\omega}) \tag{2}$$

式中: T_0 为地层温度曲线一个周期中的平均温度,℃; $T_1 = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$, $T_{\max}$ 为地层温度曲线中的最高温度, $T_{\min}$ 为温度曲线中的最低温度; z 为地层深度,cm; A 为固定参数; ω 为地层温度曲线的周期, $\omega = \frac{2\pi}{t_0}$,其中 t_0 为温度曲线一个周期的天数,对于年温度曲线, $t_0 = 365$ d; t 为时间,d,1 月 1 日到 12 月 31 日分别对应 1 d~365 d; B 为滞后时间随地层深度变化参数; C 为地层深度曲线与标准的周期为 365 d 正弦曲线的相位差。

从地层温度变化公式可以看出:(1) 地层温度曲线的幅值按照指数 $e^{(-\frac{z}{A})}$ 规律衰减,随着地层深度 z 的增大,温度曲线的幅值越小,观测显示深度 5 cm、25 cm、45 cm、85 cm 和 125 cm 处地层的温度变化幅值分别为 19.4℃、16.5℃、14.0℃、11.6℃、9.7℃,所以应该存在着一个地表温度对地层温度影响深度的临界值 z_0 ,当地层深度小于 z_0 时,地层温度受到地表温度变化的影响并存在滞后现象,当地层深度大于 z_0 时,地层温度不再受地表温度变化的

影响,地层温度为一个恒定值,且不存在滞后现象;(2) 地层温度曲线的滞后时间随着地层深度的增加呈线性增长。

地层温度变化公式能够较好地反映地层温度随着时间、地层深度变化出现的滞后现象和周期性变化,在一定的观测基础上能够较好地预测当地某深度处某天的地层温度。通过对不同深度的地层温度曲线进行拟合,得到研究区段不同地层深度的温度曲线表达式为:

地表: $y = 6.20 + 22.37 \cdot \sin(\pi \cdot \frac{x - 69.46}{233.02}) \tag{3}$

5 cm: $y = 12.69 + 17.00 \cdot \sin(\pi \cdot \frac{x - 106.82}{189.82}) \tag{4}$

25 cm: $y = 13.08 + 15.12 \cdot \sin(\pi \cdot \frac{x - 113.77}{188.56}) \tag{5}$

45 cm: $y = 12.68 + 13.23 \cdot \sin(\pi \cdot \frac{x - 120.19}{187.87}) \tag{6}$

85 cm: $y = 12.76 + 10.93 \cdot \sin(\pi \cdot \frac{x - 131.00}{186.98}) \tag{7}$

125 cm: $y = 12.10 + 9.22 \cdot \sin(\pi \cdot \frac{x - 141.50}{184.69}) \tag{8}$

进而可以得到固定参数 $A = 133.34$, $B = 0.29$, $C = 106.36$,进一步验证了该公式对地层温度的描述。得到研究区段的温度曲线表达式为:

$$T = T_0 + 19.91 e^{(-\frac{z}{133.35})} \sin(\pi \cdot \frac{t - (0.29z + 106.36)}{\omega}) \tag{9}$$

式(9)中的符号表达的意思与式(2)相同。分析式(9)可得:(1) 不同深度地层土体的一个周期的平均温度 T_0 分别为 12.69℃、13.08℃、12.68℃、12.76℃和 12.10℃,与图 6 中观测结果一致。而地表温度的平均温度为 6.20℃,由于地表温度直接受环境温度的影响,空气与地层的热扩散率不同,所以导致地表一个周期的平均温度与其他地层平均温度不同;(2) 地层温度随着深度增加呈指数形式衰减;(3) 温度滞后时间与地层深度成正相关。该结论与现场实测数据得出的结论相符。

2.4 地层临界深度

从图 6 和式(2)中可以看出随着地层深度的增大,存在着不受地表温度影响的临界深度,通过式

(2)和式(4)一式(8)得到温度曲线的幅值随地层深度变化规律为 $f=19.91e^{(-\frac{x}{133.35})}$,将各地层的温度曲线幅值再次进行拟合得到温度曲线幅值随深度变化图见图9。由图9中可以看到,随着地层深度的增大,温度曲线的幅值呈指数形式衰减,在研究区段所监测的5 cm~125 cm深地层中温度曲线的幅值减小明显,在400 cm~500 cm深处幅值衰减明显平缓,所以研究区段受地表温度变化的临界深度为400 cm~500 cm,可以为该地区地下管道等地下基础设施的修建提供参考。

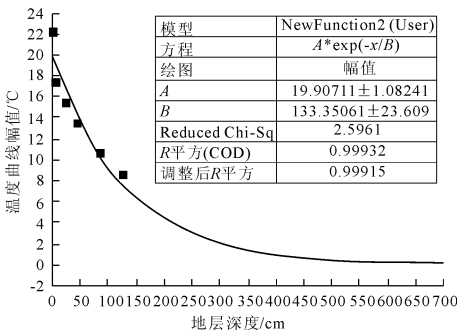


图9 温度曲线幅值随地层深度变化

3 地层湿度变化规律

图10所示为研究区段2007年—2021年的年降雨量情况,可以看出,研究区段的年降雨量很少,正常情况下不会超过100 mm,许多年份降雨量没有超过80 mm,只有2015年、2016年和2019年三年的年降雨量超过了80 mm。通过气象数据了解到,研究区段的降雨主要集中在夏季的7月—9月,年蒸发量远大于降雨量,气候特别干燥^[17]。虽然研究区段降雨量小,蒸发量大,但是研究区段位于疏勒河附近,研究区段间每年受疏勒河释放生态水的影响,地下水非常丰富。综上分析可知,研究区段盐渍土层几乎得不到外在降水的补给,但是夏季会有充足的地下水补给,所以地层湿度随着季节会有明显的变化。

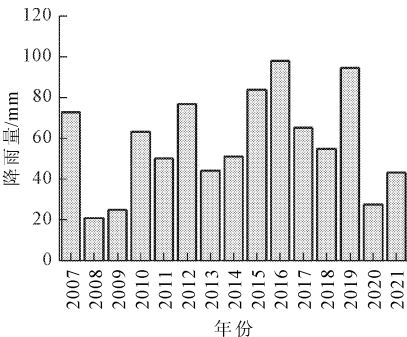


图10 研究区段年降雨量

通过多层土壤参数监测仪进行为期1 a的湿度监测得到地层深度为5 cm、25 cm、45 cm、85 cm、125 cm处的湿度变化见图11。由图11可以看出,随着时间的变化,各地层的湿度变化特别明显,夏季由于疏勒河释放生态水,地下水充沛,所以地层夏季湿度明显高于冬季。冬季疏勒河不再释放生态水,且几乎无降水,导致疏勒河附近地层内地下水水位下降,继而导致0 cm~125 cm深度地层湿度明显降低。5 cm、25 cm地层深度处湿度的减小速率明显大于更深处地层的湿度减小速率,距离地表近的地层受到干燥多风的环境影响,在地下水补充减少后湿度减小明显加快。

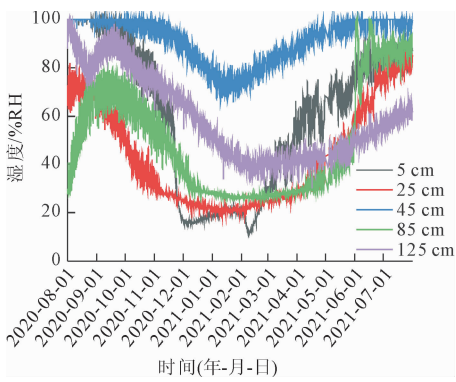


图11 地层湿度随时间变化规律

从图11可以看出,地层5 cm深度处的温湿度变化范围最大,地层45 cm深度处的温湿度变化范围最小,湿度始终保持在73% RH~100% RH,表明45 cm深度地层的保水性较好。

由以上研究内容可知,表层土、中层土和下层土的冻结温度均小于0℃。由图5可知监测点在最冷的时候地层深度为5 cm、25 cm和45 cm处的土体温度均小于0℃,据此可以判断监测区段的地层冻结深度在45 cm~85 cm范围内。而从图11中可以看出,冬季地表深度为5 cm和25 cm处土体的相对湿度明显降低,而地层深度为45 cm处土体的相对湿度为73% RH,由此可以看出监测区段的土体冻结深度在25 cm~45 cm范围内。综合图5和图11中的监测结果,距离地表0 cm~45 cm范围的地层内存在着冻融现象,地层的冻融容易导致翻浆。同时氯化盐土有明显的保湿性,从而使土壤长期处于潮湿、饱和状态,易产生“液化”现象^[18]。

研究区段的湿度监测结果显示,该地区地层湿度随着疏勒河流量变化存在明显的变化,所以地层在夏季湿度大,冬季湿度小。冬季水分蒸发和低温作用促使盐分和水分子向地层上部迁移为盐胀提供了

物质基础。因此 45 cm 以上地层也同样存在盐胀的风险。

4 结 论

(1) 研究区段的地层温度呈正弦曲线变化,随着地层深度的增大,曲线的幅值呈指数形式减小。地层温度变化存在明显的滞后现象,且滞后时间与地层深度呈线性关系。地层受地表温影响的临界深度为 400 cm~500 cm。

(2) 研究区段年降雨量小,年蒸发量大,但夏季有明显的地下水补充,地层湿度表现为夏季湿度大,冬季湿度小,年湿度变化明显。

(3) 研究区段地层年温度变化明显,距离地面 0 cm~45 cm 范围的地层内存在着冻融现象,又由于地层湿度年变化同样明显,研究区段的地层存在翻浆和盐胀的风险。

参考文献:

- [1] 谭冬生,毅敏,胡力学,等. 新建兰新铁路新疆段沿线盐渍土盐胀特性、机理与防治对策[J]. 铁道学报, 2011,33(9):83-88.
- [2] 任秀玲,张文,刘昕,等. 西北地区盐渍土盐胀特性研究进展与思考[J]. 土壤通报,2016,47(1):246-252.
- [3] 慈军,张远芳,那姝姝. 冻融循环条件下罗布泊天然盐渍土的盐胀融沉规律研究[J]. 水利水电技术, 2014,45(7):120-123.
- [4] 刘凯,张远芳,张运海,等. 冻融循环条件下亚氯盐渍土盐冻胀试验研究[J]. 长江科学院院报,2018,35(5):93-96,102.
- [5] 王利莉. 氯盐渍土变形特性的试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [6] 张运海,张远芳,刘凯,等. 天然盐渍土冷端阶梯式持续降温盐-冻胀及水盐迁移试验研究[J]. 科学技术

与工程,2016,16(31):265-269.

- [7] 张戩,房建宏,刘建坤,等. 察尔汗地区盐渍土水热状态变化特征与水盐迁移规律研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(7):1344-1348.
- [8] 赵天宇,张虎元,严耿升,等. 河西寒旱区盐渍土地层温湿度变化模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016,46(5):1466-1474.
- [9] 杨霞,赵逸舟,罗继,等. 阿克苏地区土壤温度特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(12):97-101.
- [10] 嘎拉泰,朱双双,徐道春,等. 鹫峰森林多层土壤温度变化规律的研究[J]. 林业工程学报,2018,3(3):136-141.
- [11] 李雪琴,鲁旭阳,范继辉,等. 藏东南不同下垫面栽培草地土壤温湿度的特征分析[J]. 草业科学,2020,37(7):1227-1238.
- [12] 祁威,张镱铿,刘林山,等. 羌塘高原核心区 2013—2014 年土壤温度变化特征[J]. 地理研究,2017,36(11):2075-2087.
- [13] Oyelami Seun, Azeez N, Olongunye O, et al. Development of a low-cost wireless data logging pyranometer with inbuilt temperature and humidity monitoring system[J]. Environmental Challenges, 2021:100219.
- [14] Sonawane R N, Ghule A, Bowlekar A, et al. Design and development of temperature and humidity monitoring system[J]. Agricultural Science Digest-A Research Journal, 2019,39(2):114-118.
- [15] 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S]. 2009 年版. 北京:中国工业建筑出版社,2009.
- [16] 邱国庆,王雅卿,曾凯文,等. 兰州地区黄土的冻结温度[J]. 冰川冻土,1990,12(2):105-115.
- [17] 李维东. 西北盐渍土地区地基冻胀特性及其对路基变形影响研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2021.
- [18] 王小生,章洪庆,薛明,等. 盐渍土地区道路病害与防治[J]. 同济大学学报(自然科学版),2003,31(10):1178-1182.