内蒙古荒漠草原南缘春季消融期土壤水热变化特征及其对气象因子的响应

常耀文[1,2]，张瑞强[2]，姜洪涛[1]，张丽星[1]，海春兴[1]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特　010022；2. 水利部牧区水利科学研究所，内蒙古 呼和浩特　010020）

摘要：基于内蒙古荒漠草原南缘 2009—2018 年的土壤温湿度与气温降水实测数据，利用统计学、相关性分析及回归分析相结合的方法研究了春季消融期内蒙古荒漠草原土壤温湿度的动态变化及相互关系。通过研究荒漠草原在消融过程中土壤水热的变化规律及相互影响，揭示气象因子对土壤温湿度的影响，并为调整牧业发展模式及恢复生态环境提供科学依据。结果表明：在该时期，土壤温度总体呈上升趋势，土壤湿度呈先增长后下降的趋势，100 cm 以上的土壤在 4 月中旬完全解冻；20 cm 土壤温湿度呈正弦函数的昼夜周期变化，各层土壤温湿度呈显著正相关，随着土壤温度达到一定程度，土壤温湿度正相关减弱；气温降水与土壤温湿度均呈显著正相关，且不同时间尺度下相关性存在差异，气温对土壤温湿度的影响有滞后效应。得出土壤温湿度存在明显的日际与日内变化规律，土壤的日消夜冻现象明显，土壤温湿度的正相关关系在达到一定阈值后有所减弱，不同时间尺度下气温与降水对土壤温湿度的相关性存在差异性，气温对土壤温湿度的影响存在滞后效应。

关键词：荒漠草原；春季消融期；土壤温度；土壤湿度

中图分类号：S812　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1009-5500(2021)04-0111-09

DOI： 10.13817/j.cnki.cyycp.2021.04.015

冻融现象是存在于高纬度或高海拔地区的普遍现象，自从全球气候变暖以来，北半球季节性冻土覆盖面积减少了约 7%，季节性冻融的深度与范围也逐步缩小[1]。中国是世界第 3 大冻土国，多年冻土与季节性冻土面积占陆地面积达 75%，主要分布在青藏高原和内蒙古高原等高海拔或高纬度地区[2]。在冻融过程中，陆面与大气的耦合会更加显著，土壤湿度会在土壤温度急剧变化下发生固液相转化，使得由土壤温湿度驱动下的地气耦合过程变得更加复杂。土壤温湿度表征陆面的水热状态，分别控制着地表热量平衡与土壤水循环，是影响陆地与大气之间物质迁移与能量传递的重要物理参数，也影响地表植被的生长发育[3]，有研究表明，消融期间的土壤温湿度是影响返青期植物萌芽与生长的关键因素[4]。同时，土壤水分与土壤热量之间有着密切正负反馈效应[5]，土壤水分会影响土壤热量在水平和垂直两个方向上的热传导[6]，相反地，土壤温度也会影响土壤水分的变化及运动[7]。研究表明，土壤温度对土壤水分的影响还存在季节性差异[8]。当前，有学者在中国已经开展了关于冻融过程对地表水热影响的研究，但大部分研究主要集中在青藏高原[1,9-12]等高海拔地区。

内蒙古高原位于中国干旱半干旱地区，深受东亚夏季风以及来自西伯利亚冬季风的影响，是典型的强地气耦合区域[13-14]，对该地区的相关研究主要侧重于大时空尺度下土壤温湿度的变化特征，随着全球气候变化及数值模拟研究的深入，了解区域及中小尺度上地气之间各要素相互影响的过程与机制显得越来越重

收稿日期：2020-06-24；**修回日期：**2020-07-15

基金项目：中国水科院科研专项(MK2017J05)；内蒙古科技计划项目(201701024)

作者简介：常耀文(1998-)，男，内蒙古呼和浩特人，在读硕士研究生。

E-mail：15148099284@163.com

张瑞强为通讯作者。E-mail：zrqabc@163.com

要，由于易受到地表形态及大气等环境因子的影响，土壤温湿度表现出强烈的空间异质性与时间变异性，因此大尺度的地气耦合结果很难表现小尺度时空地气之间水热的相互影响。另一方面，目前土壤温湿度数据的获取方式主要以数据同化方法反演为主[15-17]，然而，当研究尺度较小时，地面观测仍然是获取土壤温湿度时空分布和垂直变化最准确、最直接的方法。针对该研究区冻融过程中复杂的土壤温湿度变化状态及该地区相关研究较少的现状，利用位于研究区内水利部牧区水利科学研究所试验基地土壤温湿度数据与相关气象数据，在野外观测的基础上分析该时期荒漠草原不同深度下土壤温湿度的变异性，揭示不同深度土壤温湿度的相互影响机制，分析了气象因子对不同土壤深度温度与湿度的影响。为深入理解荒漠草原在土壤消融－冻结的复杂过程中土壤的热量迁移及土壤水分的物态转化具有重要意义，也为调整牧业发展模式及恢复生态环境提供科学依据与理论支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验样地位于内蒙古荒漠草原南缘的水利部牧区水利科学研究所野外试验基地，地理位置 N 40°20′～42°40′，E 109°16′～111°16′，隶属于内蒙古包头市达尔罕茂明安联合旗希拉穆仁镇。属于中温带半干旱大陆性季风气候，春秋季干旱多风，夏季雨量较充沛，冬季干燥寒冷，年平均降水量为 284 mm，蒸发量为 2 305 mm，降水主要集中在 6－8 月；年均气温 2.5℃；≥10℃年有效积温 1 985～2 800℃，年均日照时数 3 100～3 300 h，无霜期 83 d；年均风速 4.5 m/s，冬春季以北风和西北风为主，年大风日数为 63 d。地带性土壤为栗钙土，质地粗糙；地带性植被建群种为克氏针茅（*Stipa krylovii*），优势植物主要有冷蒿（*Artemisia frigida*）、糙隐子草（*Cleistogenes squarrosa* ）、银灰旋花（*Convolvulus ammannii* ）、阿尔泰狗娃花（*Heteropappus altaicus*）、冰草（*Agropyron cristatum*）和羊草（*Leymus chinensis*）。

1.2 数据来源与处理

土壤温湿度数据均来自于试验样地内的 ENVIS（ENVironmental Information System）自动气象站（N 41°21′9″，E 111°12′24″，海拔 1 590 m），其中土壤温度传感器（德国 IMKO 公司；型号 Pt100）分别埋设于土壤深度 20、40、60、80 和 100 cm 处，测量温度为－30～60℃，测量精度为±0.1℃；土壤湿度传感器（德国 IMKO 公司，TDR 插针式）则分别埋设于距地表 20、40 与 60 cm 的深度，测量范围为 0～70%，测量精度为±0.5%，土壤温湿度数据每隔 30 min 采集 1 次。两仪器观测点相距约 100 m。本研究选取 2009－2018 年共 10 年的春季消融期（2 月 21－5 月 31 日）的土壤温湿度数据，期间由于传感器故障，导致 2015 年与 2016 年春季消融期数据出现异常，但本研究只做土壤温湿度多年平均日际变化与日内变化的特征分析，因此对本研究的影响可忽略不计。使用 Office Excel 软件按同一日期进行累加平均得到多年春季消融期平均土壤温湿度数据，分析其日际变化特征；同时，根据每旬同一时刻进行累加平均得到多年各旬土壤温湿度数据，分析其日内变化特征。

气温与降水数据来源于试验基地内土壤水蚀观测系统的 UGT 气象观测站（德国 UGT 公司；N 41°21′13″，E 111°12′27″，海拔 1 600 m），其中气温测量范围为－30～50℃，精度为±0.1℃；雨量计为非加热式，测量精度±0.1 mm，数据连续性较好，异常值剔除后利用临近时间段计算平均值做插值处理；数据选取的时间段与土壤温湿度数据相同，时间分辨率为 30 min，本研究数据的记录时间均为北京时间。

使用 IBM SPSS Statistics 25 软件对数据进行异常值检验，同时，使用该软件的 Pearson 相关分析法对各尺度研究数据进行相关性检验；使用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤温湿度日际变化

冻融过程导致土壤中的水热变化更为剧烈，在冻结与消融的交替过程中，探究土壤中水分与热量迁移过程的连续变化及其土壤温湿度的时空分布特征，对草原生态系统变化的研究具有重要意义。

2.1.1 土壤温度日际变化 土壤温度在消融期变化剧烈，各层土壤温度变化均呈上升趋势。在整个消融期（2 月 21－5 月 31 日），表层土壤的增温速率快于深层土壤。20～100 cm 的土壤温度在消融期出现反转现象，在消融期初期，土壤温度随着土壤深度的增加而增加，随着气温的回升，表层温度最先开始上升且上升速度最快，随后 40、60、80 与 100 cm 的土壤温度也陆

续开始上升，3 月中下旬，土壤温度垂直变化发生反转，土壤温度随着土壤深度的增加而降低。此外，从土壤温度垂直变化剖面图(图 1)可以看出，以 0℃等温线为界，左侧等温线稀疏，土壤温度增加缓慢；右侧等温线较为稠密，土壤温度增温迅速，可能与该时间段大气温度的变化幅度有关。

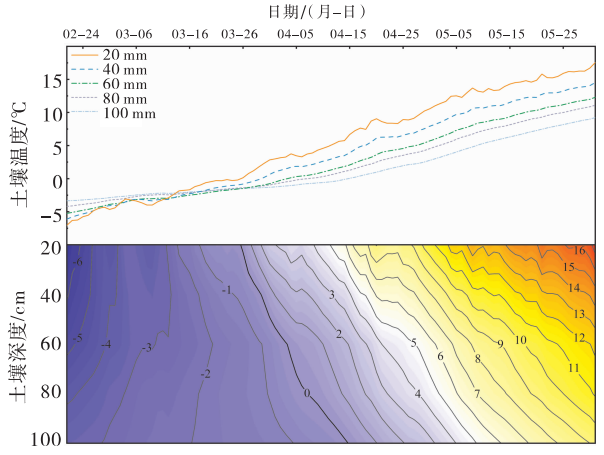

图 1　土壤温度日际变化及其剖面

Fig. 1　Daily variation of soil temperature along the soil profile

根据各层土壤温度日均值开始持续大于 0℃的日期为解冻日，20、40、60、80 与 100 cm 的解冻分别开始于 3 月 26 日、3 月 30 日、4 月 4 日、4 月 8 日和 4 月 15 日。受气温的影响，土壤表层率先开始消融，100 cm 以上的土壤在 4 月中旬完全解冻。关于土壤温度垂直变化率，在 3 月 13 日之前，土壤垂直变化率为正，表示土壤温度随着土壤深度的增加而升高；3 月 13 日之后，则相反，土壤温度随着土壤深度的增加而降低，并且温度垂直递减率逐渐增大，在 4 月 19 日之后，土壤温度垂直递减率基本稳定在 0.1℃/cm。

2.1.2　土壤湿度日际变化　在消融期，20、40 与 60 cm的土壤湿度均值分别为 14.99%、11.47%与 13.92%。其中，20 cm 土壤湿度的变化趋势以 3 月 30 日为界分为两个阶段，2 月 21－3 月 30 日，土壤湿度从 9.77%波动上升至 17.95%，上升速率为0.22%/d；在后半段，土壤湿度开始缓慢下降，一直下降至 14.23%，下降速率为 0.06%/d；40 cm 与 60 cm 的变化趋势相似，40 cm 的土壤湿度在前期(2 月 21－3 月 10 日)处于平稳阶段，土壤湿度围绕 8%上下波动，随后在 3 月中旬开始上升，直到 4 月 20 日土壤湿度上升至 13.66%，随后在 13%～14%上下波动；60 cm 的变化趋势也可分为两个阶段，2 月 21－4 月 20 日，土壤湿度从 10.2%上升至 16.25%，随后土壤湿度变化进入平稳期，土壤湿度变幅稳定在 16%～17%。特别地，在消融期，60 cm 的土壤湿度一直大于 40 cm 的土壤湿度，甚至在 2 月 22 日前后及 4 月 26 日之后大于 20 cm 的土壤湿度(图 2)。

结合该时期土壤温度的变化特征，40 cm 与 60 cm 的土壤温度与湿度变化趋势一致，当 20 cm 土壤温度上升至 0℃以上时(3 月 26 日)，40 cm 与 60 cm 的土壤湿度也开始因土壤消融而上升，随着土壤温度的进一步上升，地表蒸发与植物生长所需水分导致土壤湿度收支达到平衡状态，所以 40 cm 与 60 cm 在后期变化平稳；20 cm 土壤湿度的上升则要早于表层土壤消融，推测此时土壤湿度上升的原因可能是气温上升使地表积雪融化导致。

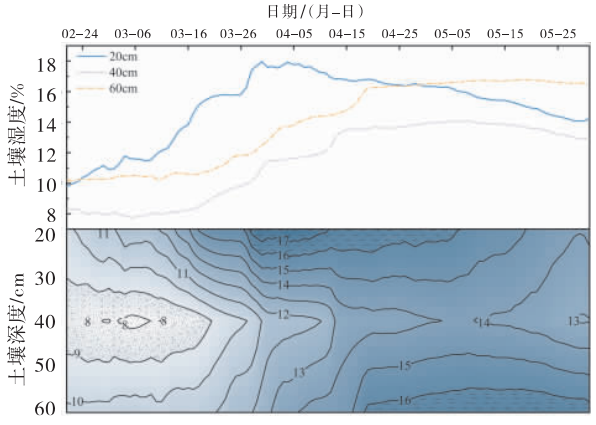

图 2　土壤湿度日际变化及其剖面

Fig. 2　Daily variation of soil moisture along the soil profile

在消融期，土壤湿度的低值区(土壤湿度≤ 9%)出现在 2 月 21－3 月 31 日的 30～50 cm 土层中，土壤湿度高值区(土壤湿度≥ 16%)有两个，分别出现在 3 月 26－5 月 7 日的 20～25 cm 与 4 月 18 日至 5 月 31 日的 55～60 cm 的土层中(图 2)。

2.2　土壤温湿度日变化

土壤温度与土壤湿度有着密切的相互作用，受太阳辐射与大气的影响，土壤温度存在明显的昼夜变化，在春季消融期，土壤湿度甚至会在土壤温度的影响下出现日消夜冻的现象。因此，将春季消融期按旬尺度分为 2 月末、3 月初、3 月中、3 月末、4 月初、4 月中、4 月末与 5 月初 8 个阶段，分别研究各旬土壤温湿度的日内变化特征。

2.2.1　土壤温度日内变化　表层 20 cm 处的土壤温度在各旬均呈现明显的正弦函数昼夜周期变化规律，日

最低温出现在11:00,而日最高温出现的时间有所差异,出现在20:00～22:00,40 cm的土壤温度变化较小,60、80与100 cm的土壤温度变化则不明显(图2)。

2月末,土壤温度从高到低依次为100、80、60、40与20 cm,其中100、80与60 cm分别稳定在－3.2℃、－3.8℃与－4.7℃,40 cm处的土壤温度则有较小的日变化,变化于－5.5～－5℃,最大值出现在7:00,最小值出现在16:00,20 cm土壤温度的日变化最为明显,在－6.5～－4.7℃呈正弦函数波动,特别地,在17:00至次日1:00,20 cm的土壤温度高于40 cm的土壤温度,甚至在9:00左右接近60 cm处的土壤温度,在1:00－17:00,20 cm的土壤温度则低于40 cm。

3月初,各层土壤温度均有所上升,但深层土壤温度仍高于表层土壤温度,100、80与60 cm的土壤温度基本稳定在－2.5、－2.7和－3.4℃。40～60 cm的温度较接近,20 cm的土壤温度上升幅度较大,在17:00至次日2:00,20 cm的土壤温度高于40 cm,在18:00至次日2:00,高于60 cm的土壤温度,而在2:00～17:00,20 cm的土壤温度则小于40 cm土壤温度。3月中,土壤温度开始出现反转,各层土壤温度由大到小排列依次为20、100、80、40与60 cm,20 cm的土壤温度在大部分时段高于100 cm的土壤温度,但在10:00～13:00仍低于100 cm的土壤温度;同时,100、80、40与60 cm的日内变化均不明显,且各土层之间的温差较小,集中在－2.5～2℃。3月末,各层土壤温度继续上升,20 cm土壤温度在一天内均高于0℃,在11:00降到最低温,接近0℃,40～100 cm的土壤温度低于0℃,仍处于冻结状态,60、80 cm与100 cm的

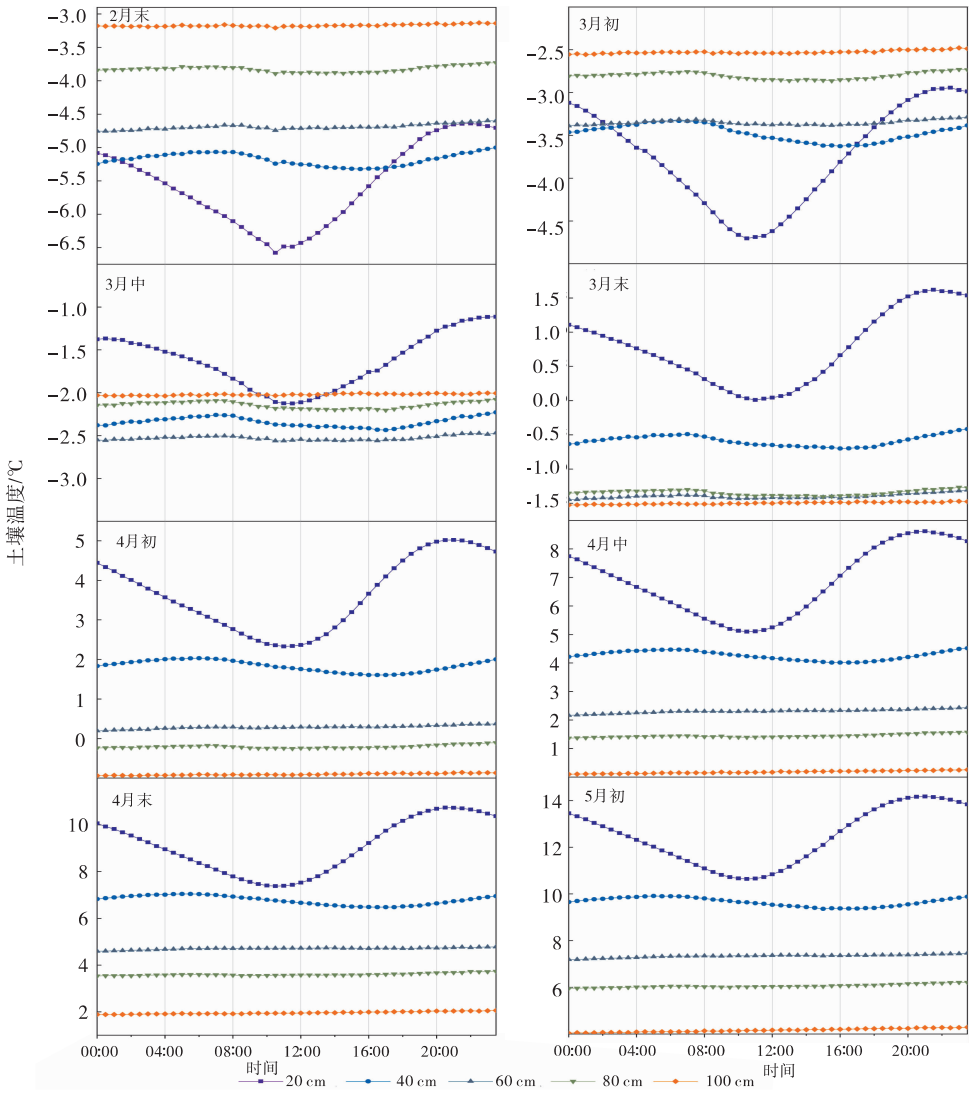

图3 各旬土壤温度日内变化

Fig. 3 Diurnal variation of soil temperature in 10 days at different period

温度差进一步缩小，均集中在－1.5℃附近。

4 月初，20～100 cm 的土壤温度完成反转，随着土壤深度的增加土壤温度下降，20～60 cm 的土壤温度均高于 0℃，80～100 cm 的土壤温度仍低于 0℃，处于冻结状态。20 cm 的土壤温度在 11∶00 降至 2.33℃，随后开始上升，直到 21∶00 达到的最大值 5.02℃。到 4 月中旬，土壤温度继续上升，20～100 cm 土壤温度均上升至 0℃以上，20 cm 处的土壤温度则在 5.10～8.62℃呈正弦函数曲线变化，土壤表层温度在全天均大于 5℃，地表植被开始萌芽返青，荒漠草原进入返青期。4 月末至 5 月初，各层土壤温度进一步上升。

特别在 3 月中至 3 月末，各层土壤温度日内变化接近于 0℃，20 cm 的土壤温度由于昼夜变化明显，20 cm 的最大值与最小值分别出现在夜晚 21∶00 与 11∶00 左右，所以在这个时期土壤可能出现日冻夜消的循环现象，可能是由于夜间的保温效应与气温对土壤温度影响的滞后性导致，也可能是此时表层积雪融化从土壤表层及大气吸收大量热量并使融化的雪水渗透到 20 cm 的土壤中导致的(图 3)。

2.2.2　土壤湿度日变化　2 月末，20 cm 的土壤湿度存在较小的昼夜变化，40 cm 与 60 cm 的土壤湿度无显著昼夜变化。总体上，各层土壤湿度由大到小排列为 20 cm＞ 60 cm＞ 40 cm，但 20 cm 与 60 cm 的湿度差异较小，特别在 11∶00 左右，20 cm 与 60 cm 的土壤湿度基本相同。到 3 月初，20 cm 土壤湿度有较明显的昼夜变化，其变化趋势与 2 月末相似，40 cm 与 60 cm 的土壤湿度则无明显变化，分别稳定在 8% 与 10.5%，与 2 月末相比，20 cm 与 60 cm 的土壤湿度均有较小的上升，40 cm 的土壤湿度则有轻微的下降(图 4)。

3 月中旬至 4 月中旬，各层土壤湿度由大到小排列均为：20 cm＞ 60 cm＞ 40 cm，在此期间，除 4 月初 20 cm 的土壤湿度有较小的昼夜变化外，各层土壤湿度均无明显昼夜变化。特别地，日土壤湿度最大值出现在13∶00左右。4月末，各层的土壤湿度与2月末

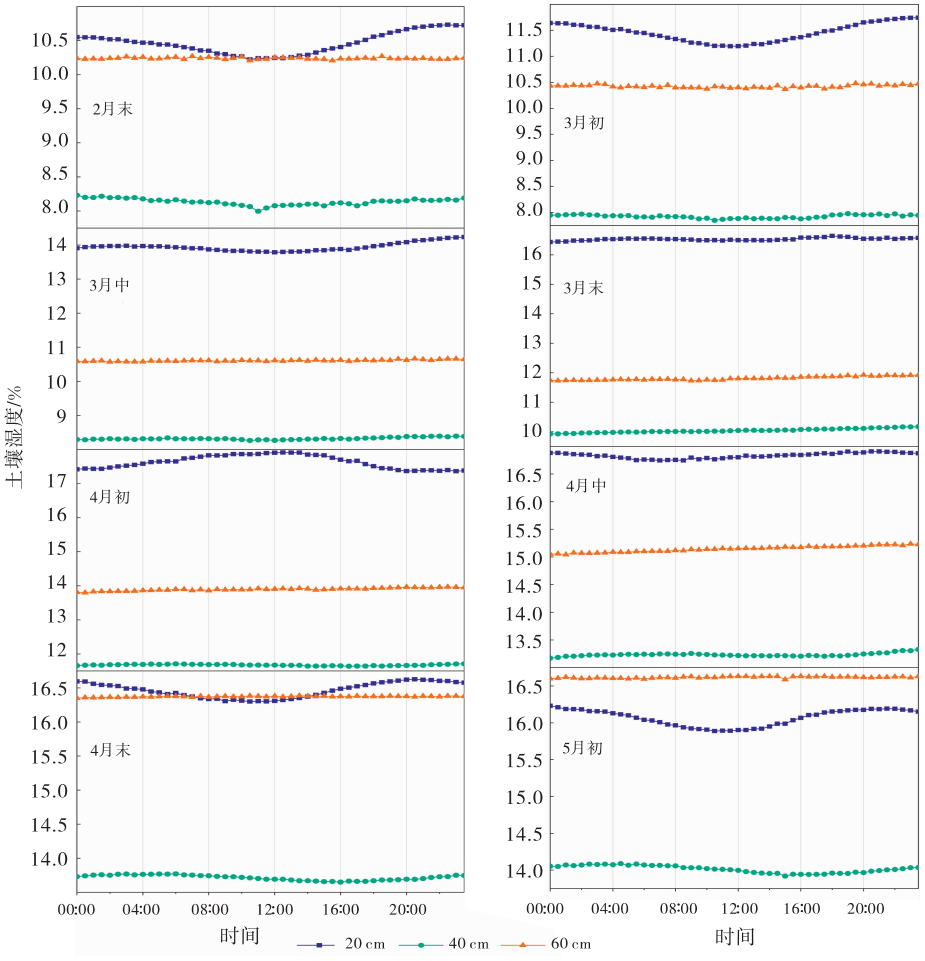

图 4　各旬土壤湿度日内变化

Fig. 4　Diurnal variation of soil moisture of ten days at different period

的土壤湿度昼夜变化趋势相似，在 0∶00～7∶00 与 14∶00～24∶00，20 cm 的土壤湿度高于 60 cm，而在 7∶00～14∶00，60 cm 的土壤湿度高于 20 cm。5 月初，土壤湿度发生反转，在一天内，60 cm 的土壤湿度均大于 20 cm，表层 20 cm 的土壤湿度有较小的昼夜变化，在 11∶00 达到最低值 15.89%，40 cm 的土壤湿度则稳定在 14%。由于各旬的土壤湿度数据是按多年同一时刻累加平均得到的，所以土壤湿度在整体上表现出的昼夜变化并不是特别明显，综上所述，只有土壤表层 20 cm 在 2 月末、3 月初、4 月初、4 月末与 5 月初表现出较小的昼夜变化(图 4)。

2.3 土壤温度与土壤湿度的关系

土壤温度与土壤湿度有着密切的关系，特别是在土壤水热变化剧烈的消融期。土壤温度是土壤消融的重要影响因子，土壤温度的上升致使土壤消融从而导致土壤湿度上升，与此同时，土壤湿度的变化也会影响土壤性质，从而导致土壤温度的变化。为探索消融期土壤温湿度之间的相互影响，分别对土层(20、40 与 60 cm)的土壤温度与土壤湿度进行多项式非线性拟合。

通过拟合发现，总体上 3 个土层中土壤温度与土壤湿度呈显著正相关($P<0.05$)，然而当温度达到一定阈值时，各层土壤湿度与土壤温度的关系有所差异(图 5)。随着土壤温度的上升，土壤中大量的固态水消融，导致土壤湿度急剧上升。在消融补给减少与蒸发耗散增加的情况下，土壤湿度开始缓慢下降，随着土壤温度的进一步上升，荒漠草原地区植被开始萌芽返青，植物生长需水成为表层土壤水分的又一支出，而且该地区春季降水较少，在得不到其他补给的情况下致使表层土壤湿度进一步下降。在 40 cm，土壤消融依旧是该层土壤湿度的主要补给，此层土壤受地表蒸发的影响较小，上层土壤重力水也是下层土壤水分的重要补给。温度达到 10℃之后，蒸发与植物需水量增强，40 cm 土层土壤湿度呈下降趋势。一个土层的含水量可以视作一个系统，对于深层土壤来说，上层土壤水分的下渗与自身的土壤消融为主要补给，而主要的耗散方式包括向上的水分蒸发，植物生长需水及向下的水分下渗，这些都影响着一个土层含水量的变化。在荒漠草原的返青期初期，植物的根系很少能够达到 60 cm 的深度，相比于 20、40、60 cm 处的土壤则不易受到地表蒸发的影响，因此该层土壤温度导致的土壤消融是影响土壤湿度的主要因素。

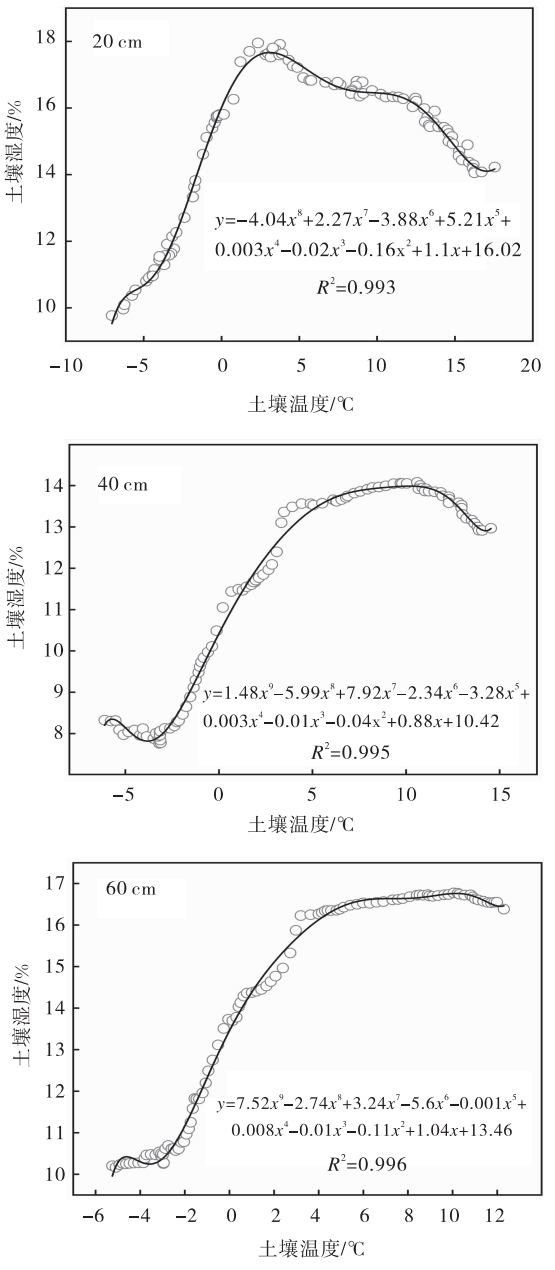

图 5 各层土壤温度与土壤湿度的拟合

Fig. 5 Curves fitting the relationship between soil moisture and soil temperature in 0～20 cm, 20～40 cm and 40～60 cm soil layer

2.4 土壤水热与气象因子的关系

大气状况是影响陆面性质的主要因素，特别是气温与降水，直接影响着土壤的水热状态。为了进一步揭示该地区消融期气象因子对土壤温湿度的影响，分别从不同尺度对土壤温湿度与气温降水进行相关性分析。总体上，在不同研究尺度下，气温降水与土壤温湿度的相关性存在明显差异，随着研究尺度越来越精细，气温降水与土壤温湿度的相关性下降。在旬、日与小时尺度下，气温与各层土壤湿度呈极显著正相关($P<$

0.01)，40、60 cm 受气温的影响则更加极显著($P<0.01$)；气温与各个土层的土壤温度均呈极显著正相关($P<0.01$)，在各时间尺度下，气温与土壤温度的相关性随着深度的增加而下降。

同时，气温与 1 h 后的土壤温湿度的相关程度与小时尺度下的相关程度相同，而与 2 h 后的土壤温湿度呈显著弱相关($P<0.01$)，气温对土壤温度的影响存在 1 h 的滞后效应；相反地，降水与 1 h 后的土壤温湿度均呈显著弱相关($P<0.01$)，降水对土壤温湿度影响的滞后性较弱(表 1)。同时，在小时尺度下，降水与土壤温湿度无相关性($P<0.01$，如表 1)，在日尺度与旬尺度下，降水与土壤温度均有极显著正相关关系($P<0.01$)，在旬尺度与日尺度下，降水与 20 cm 的土壤湿度的相关性不显著($P>0.05$)，而与 40～60 cm 的土壤湿度呈极显著正相关($P<0.01$)。

表 1 各尺度下气温、降水与土壤温湿度的相关性

Table 1 Correlation between soil temperature/moisture and air temperature/precipitation at various scales

		SM20	SM40	SM60	ST20	ST40	ST60	ST80	ST100
气温	旬	0.601	0.93**	0.957**	0.994**	0.986**	0.975**	0.963**	0.939**
	日	0.544**	0.908**	0.938**	0.981**	0.971**	0.96**	0.948**	0.926**
	时	0.291**	0.567**	0.534**	0.715**	0.69**	0.677**	0.655**	0.636**
	滞后 1 h	0.292**	0.566**	0.534**	0.732**	0.69**	0.677**	0.655**	0.637**
	滞后 2 h	0.012	0.046**	0.047**	0.062**	0.068**	0.067**	0.065**	0.06**
降水	旬	0.286	0.734*	0.794**	0.871**	0.879**	0.888**	0.891**	0.889**
	日	0.144	0.406**	0.439**	0.474**	0.477**	0.478**	0.476**	0.471**
	时	0.012	0.046**	0.047**	0.064**	0.068**	0.067**	0.065**	0.06**
	滞后 1 h	0.012	0.046**	0.047**	0.063**	0.068**	0.067**	0.065**	0.06**
	滞后 2 h	0.012	0.046**	0.047**	0.062**	0.068**	0.067**	0.065**	0.06**

注：* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关；** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

3 讨论

通过上述研究发现，该地区在春季消融期土壤温度总体呈上升趋势，土壤温度增幅随着土壤深度的增加而减小，与买小虎等[18]和冉洪伍等[12]的研究结果一致，但在土壤温度变化的数值上有所差异；同时，土壤湿度的变化特征与中国其他冻土地区的变化特征一致，例如东北地区[19]和青藏高原地区[20]，但从 4 月初开始，从表层至深层土壤湿度的增长趋势陆续开始减缓，土壤表层 20 cm 的土壤湿度甚至开始波动下降，苗百岭等[21]研究发现内蒙古荒漠草原的返青期开始于 117±10 d，刚好与土壤湿度下降的时间点吻合，因此推断植物开始萌芽返青使土壤需水量增加是土壤湿度下降的一个主要原因。研究还发现，表层土壤温度的昼夜变化明显，而土壤湿度的昼夜变化较稳定，与权晨等[20]的研究结果一致。另一方面，草原植被类型覆盖下的土壤都会存在临时干层和永久干层[22]，本研究也发现相比于 20 cm 与 60 cm，40 cm 的土壤湿度相对较小，可能对春季荒漠草原植物的生长构成威胁，相关部门应加强春季荒漠草原土壤墒情的监测，适时调整畜牧业发展，预防春旱的发生。

各土层的相关性总体呈显著正相关($P<0.05$)，但随着土壤温度的上升，土壤湿度与土壤温度的正相关程度减弱，甚至在 20 cm 的土层中，当温度大于 3℃时，土壤温湿度呈显著负相关关系($P<0.05$)，在买小虎[18]的研究中也发现了相似的相关性，但不同的是，其研究发现在 60 cm 的深层土壤中，在一定的温度区间土壤温湿度存在负相关($P<0.05$)，可能与研究区域的植被差异有关，其研究区为植被类型与结构更加丰富稳定的典型草原，与荒漠草原相比，植物根系能够达到更深的深度，因此其研究在更深层的 60 cm 土层中发现土壤温湿度的负相关，也进一步表明，在草原生态系统中，地表植被与土壤温湿度的相互影响不容忽视，但遗憾的是，本文仅探讨了气温与降水两个气象因子对该地区土壤温湿度的影响，在以后的研究中应当侧重于“土壤温度－土壤湿度－植被”之间的耦合，探索植物与土壤温湿度变化的相互影响。

本研究的数据是该时期多年的数据按日期累加平均得到的，表现了当地土壤温湿度动态变化的平均状态，忽略了随机气象事件对土壤温湿度的影响，例如春季寒潮对土壤温度的瞬时影响以及单次降水过程对土壤湿度的扰动。因此，接下来关于土壤温湿度影响因

子的研究可以侧重于气象因子的随机性进行。

4 结论

本研究利用内蒙古荒漠草原水利部牧区水利科学研究所试验基地 2009－2018 年的土壤温湿度与相应的气温降水数据，分析了该地区不同深度的土壤温湿度逐日变化与昼夜变化特征与影响因素。主要结论如下：

(1)在春季消融期，各层土壤温度总体呈上升趋势，随着土壤深度的增加，土壤温度的变化幅度逐渐减小，在初期，土壤温度随着土壤深度的增加而增加，而在后期，土壤温度随着土壤深度的增加而减小，100 cm 以上的土壤在 4 月中旬完全解冻；20 cm 的土壤温度呈正弦函数的昼夜周期变化，60、80 与 100 cm 土壤温度昼夜变化不明显。

(2)在春季消融期，20、40 与 60 cm 的土壤湿度均值分别为 14.99%、11.47%与 13.92%。3 个深度的土壤湿度日变化均可分为两个阶段，20 cm 先增长后下降，40 cm 与 60 cm 均先增长后分别稳定在 13%与 16%；表层 20 cm 的土壤湿度存在较小的昼夜变化，40 cm 与 60 cm 则无显著昼夜变化。

(3)对各层的土壤温湿度进行拟合发现，土层深度为 20 cm，土壤温度低于 4℃时，土壤湿度与土壤温度呈显著正相关($P<0.05$)；40 cm 的土壤温湿度在土壤温度小于 10℃时呈显著正相关($P<0.05$)，当土壤温度小于 3℃时，60 cm 土壤温湿度呈显著正相关($P<0.05$)。研究发现，在旬尺度与日尺度下，气温与降水对各层土壤温湿度有着显著影响，并且不同时间尺度的相关性也存在差异，随着时间尺度的增大，其相关性也随之增强，在小时尺度下，降水与土壤温湿度均呈显著弱相关($P<0.01$)，而气温与土壤温湿度仍有较强的相关性($P<0.01$)；同时，气温对土壤温湿度的影响有 1 h 的滞后性。

参考文献：

[1] 韩炳宏，周秉荣，吴让，等. 青海南部高寒草地土壤冻融交替期水热特征分析[J]. 气象科技，2018，46(2)：361－368.

[2] 秦彧，宜树华，李乃杰，等. 青藏高原草地生态系统碳循环研究进展[J]. 草业学报，2012，21(6)：275－285.

[3] Seneviratne S I，Corti T，Davin E L，*et al*. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate：A review[J]. Earth-Science Reviews，2010，99(3－4)：125－161.

[4] Finch-Savage W E，Steckel J R A，Phelps K. Germination and post-germination growth to carrot seedling emergence：predictive threshold models and sources of variation between sowing occasions[J]. New Phytologist，1998，139(3)：505－516.

[5] Cheng H，Wang G，Hu H，*et al*. The variation of soil temperature and water content of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the headwater region of the Yellow River，China [J]. Environmental Geology，2008，54(8)：1755－1762.

[6] Shao M，Horton R，Jaynes D B. Analytical solution for one-dimensional heat conduction-convection equation[J]. Soil Science Society of America Journal，1998，62(1)：123－128.

[7] 张建兵，熊黑钢，李宝富，等. 干旱区农田土壤水分地温变化规律及其相互关系[J]. 干旱地区农业研究，2013，31(2)：127－133.

[8] 谢志清. 复杂地形及非均匀地表水热通量参数化问题的研究[D]. 南京：南京气象学院，2003.

[9] 戴黎聪，柯浔，张法伟，等. 青藏高原季节冻土区土壤冻融过程水热耦合特征[J]. 冰川冻土，2020，42(2)：1－10.

[10] 胡国杰，赵林，李韧，等. 青藏高原多年冻土区土壤冻融期间水热运移特征分析[J]. 土壤，2014，46(2)：355－360.

[11] 范继辉，鲁旭阳，王小丹. 藏北高寒草地土壤冻融循环过程及水热分布特征[J]. 山地学报，2014，32(4)：385－392.

[12] 范继辉，鲁旭阳，王小丹. 藏北高寒草地土壤冰融循环过程及水热分布特征[J]. 山地学报，2014，34(4)：385－392.

[13] Koster R D，Guo Z，Dirmeyer P A，*et al*. GLACE：The global land - atmosphere coupling experiment. Part I：overview[J]. Journal of Hydrometeorology，2006，7(4)：590－610.

[14] Zhang J，Wang W C，Wei J. Assessing land-atmosphere coupling using soil moisture from the Global Land Data Assimilation System and observational precipitation[J]. Journal of Geophysical Research，2008，113(D17)：D17119.

[15] 兰鑫宇，郭子祺，田野，等. 土壤湿度遥感估算同化研究综述[J]. 地球科学进展，2015，30(6)：668－679.

[16] 杜娟，刘朝顺，高炜. 基于集合卡尔曼滤波的土壤温湿度同化试验[J]. 气象科学，2016，36(2)：184－193.

[17] 沈润平，张悦，师春香，等. 长时间序列多源土壤湿度产

品在中国地区的比较分析[J]. 气象科技,2016,44(6):867－874.

[18] 买小虎,张玉娟,张英俊,等. 典型草原返青期土壤温度和水分动态变化[J]. 草原与草坪,2014,34(2):51－56.

[19] 张科利,彭文英,王龙,等. 东北黑土区土壤剖面地温和水分变化规律[J]. 地理研究,2007,26(2):314－320.

[20] 权晨,周秉荣,朱生翠,等. 青藏高原高寒湿地冻融过程土壤温湿变化特征[J]. 干旱气象,2018,36(2):219－225.

[21] 苗百岭,梁存柱,韩芳,等. 内蒙古主要草原类型植物物候对气候波动的响应[J]. 生态学报,2016,36(23):7689－7701.

[22] 张翀,雷田旺,宋佃星. 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析[J]. 生态学报,2018,38(6):2128－2138.

Soil water and temperature during spring ablation period and its response to meteorological factors in the southern margin of the desert steppe in Inner Mongolia

CHANG Yao-wen[1,2], ZHANG Rui-qiang[2], JIANG Hong-tao[1], ZHANG Li-xing[1], HAI Chun-xing[1]

(1. *College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot* 010022, *China*; 2. *The Institute of Water Resources for Pastoral Areas, Hohhot* 010020, *China*)

Abstract: This study investigated the change in soil water, heat and their interaction in the desert steppe during the spring ablation process. The study aimed to reveal the influence of meteorological factors on soil temperature and moisture, therefore providing scientific basis for adjusting the development model of animal husbandry and restoring ecological environment. Using the measured data on soil temperature and moisture, air temperature and precipitation on the southern margin of the desert steppe in Inner Mongolia from 2009 to 2018, statistical methods such as geostatistics, correlation and regression analysis were used to study the dynamic changes and mutual relationship between soil temperature and moisture during the spring ablation period. During this period, the soil temperature generally showed a rising trend, while the soil moisture initially increased followed by a decrease. The soil in the 100 cm layer was completely thawed in mid-April. The soil temperature and moisture in the top 20 cm layer showed a periodic day-night variation with a sine function line. The soil temperature and moisture of each soil layer showed a significant positive correlation, but when the soil temperature reached a certain level, the positive correlation between soil temperature and moisture weakened. Both air temperature and precipitation showed significantly positive correlation with soil temperature and moisture, and the correlations were different at different time scales. The influence of air temperature on both soil temperature and moisture had a lag effect. Soil temperature and moisture had obviously daily and diurnal changes. The phenomenon of soil melting during the day and freezing at night was obvious. The positive correlation between soil temperature and moisture was weaker when reaching a certain threshold. There were differences in the correlation between air temperature and precipitation on soil temperature and moisture at different time scales, and the influence of air temperature on soil temperature and moisture had a lag effect.

Key words: desert steppe; spring ablation period; soil temperature; soil moisture