

极干旱地区土壤与大气水分的相互影响

李红寿^{1,2}, 汪万福^{1,2,3}, 张国彬^{1,2}, 邱飞¹, 詹鸿涛¹

(1. 敦煌研究院 保护研究所, 甘肃 敦煌 736200; 2. 古代壁画保护国家文物局重点科研基地,

甘肃 敦煌 736200; 3. 兰州大学 生命科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于建立在莫高窟窟顶的密闭拱棚, 通过监测棚内凝结水量和空气温湿度, 对极干旱地区典型极干旱气候条件下土壤与大气水分的相互影响进行综合分析。棚内凝结水量和空气温湿度的监测结果表明, 在热动力作用下存在地下水向大气输送的过程, 其原因主要是在温度作用下土壤结合水分的分解蒸发与土壤盐分的吸湿吸附的交替作用。这也是形成所谓“土壤凝结水分”与“土壤水分呼吸”的根源。当温度升高时, 土壤结合水分解蒸发“呼出”水分, 当温度降低时土壤盐分吸湿吸附, “吸入”大气水分, 形成土壤与大气不对称水分交流。称质量实验表明: 土壤水分的变化与空气温度的变化完全对应; 有深层水分支持的土壤吸收大气水分的能力相对较差。极干旱地区土壤与大气水分的相互影响研究结果能为莫高窟珍贵文物的保护提供参考。

关键词: 水分; 土壤; 大气; 温度; 极干旱地区; 莫高窟

中图分类号: P412.13; P426; S152.7; P463.23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)02-0183-06

Moisture Interaction Between Soil and Atmosphere in Extreme Dry Area

LI Hong-shou^{1,2}, WANG Wan-fu^{1,2,3}, ZHANG Guo-bin^{1,2}, QIU Fei¹, ZHAN Hong-tao¹

(1. Institute of Conservation, Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, Gansu, China; 2. Key Scientific

Research Base of Conservation for Ancient Mural of State Administration of Cultural Heritage, Dunhuang 736200, Gansu, China; 3. School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Based on airproof plastic greenhouse which built on the top of Mogao Grottoes and was used to monitor condensation water and air temperature and humidity, the moisture interaction between soil and atmosphere under the condition of classic extreme dry climate in extreme dry area was discussed. The measuring result of condensation water and air temperature and humidity in greenhouse showed that the groundwater was transferred to atmosphere under the influence of thermal power, and the main reason was the alternation of decomposition of bound water and adsorption of soil salinity under the action of temperature. It also caused “soil condensing water” and “soil moisture respiration”. Bound water would “breath out” moisture when temperature rose, soil salinity would absorb and “inbreathe” moisture from atmosphere when temperature dropped, and it became unsymmetrical moisture interaction between soil and atmosphere. The weighing experiments indicated that changes of atmosphere temperature and bound water were unanimous; the soil supported by deep phreatic water absorbed atmosphere water slowly. The study on moisture interaction between soil and atmosphere in extreme dry area could provide some references for the protection of rare cultural relics in Mogao Grottoes.

Key words: moisture; soil; atmosphere; temperature; extreme dry area; Mogao Grottoes

0 引言

极干旱地区降水极少, 地表径流的分布差异形

成了绿洲与荒漠截然不同的气候系统^[1]。荒漠大气虽然十分干燥, 但仍可对土壤水分产生重要影响^[2]。张强等^[3]对敦煌戈壁大气研究认为, 荒漠近

收稿日期: 2009-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(40940005)

作者简介: 李红寿(1970-)男, 甘肃肃安人, 馆员, 从事于旱区环境和文物保护等研究。E-mail: dhlhs69@163.com

©1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地面大气逆湿的延伸直接影响到土壤水分的空间分布;反过来,土壤水分及浅层地下水对大气湿度也有重要影响^[4],土壤通过水分的“呼吸”与大气保持着交流^[2-3],干旱陆面与大气之间存在重要的水分关联^[5]。长期以来,中国学者对土壤凝结水分进行了较为广泛的研究,通常认为即使在极干旱地区,土壤也存在凝结水分^[6]。凝结水分大部分来源于大气,少量来源于土壤地下水分^[7]。

笔者通过对敦煌莫高窟地质、土壤、植被、气象等资料的综合调查与分析认为,在极干旱区即使潜水埋深超过 200 m,仍可能存在潜水蒸发^[8]。为了进一步验证,笔者通过拱棚法、隔绝法、模拟降雨等初步证明潜水是极干旱区土壤水分的重要来源^[9]。同时发现,拱棚法将土壤-大气这一开放系统转化为一个封闭系统,这为土壤-大气水分的研究提供了便利。笔者通过拱棚封闭系统内空气温湿度的监测,结合潜水来源的新发现,重新审视极干旱区土壤-大气水分的相互影响和土壤凝结水分。

表 1 莫高窟窟顶戈壁不同深度土壤易溶盐组成及其含量

Tab. 1 Composition and Content of Soil Lyotropic Salt in Different Depth of Gobi on the Top of Mogao Grottoes								
深度/cm	pH	含盐量	NaCl	Na ₂ SO ₄	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	KCl	MgSO ₄
0~10	8.54	9.187	5.362	1.370	1.969	0.048	0.103	0.057
10~30	8.65	4.462	0.850	2.298	1.130	0.053	0.041	0.016
30~50	8.52	2.230	0.431	0.592	1.019	0.057	0.023	0.010
50~70	8.60	1.775	0.313	0.294	1.218	0.055	0.015	0.008

注:含盐量、NaCl、Na₂SO₄、CaSO₄、Ca(HCO₃)₂、KCl、MgSO₄ 质量分数/%

研究区太阳辐射强度可高达 1.1 kW/m²,日照时数 3 257.9 h/a,日照率 71%;干燥指数 32;年平均温度 11.2 ℃,相对湿度 31%,风速 4.1 m/s (2005 年);平均降水量 42.2 mm/a^[11]。降水是影响该实验的关键因子,据莫高窟窟顶气象站的监测,2007 年全年 19 次总降雨 64.0 mm,末次为 9 月 30 日的 9.1 mm;拱棚实验期间(2008-06-27~2009-04-28)共有 5 次降雨,合计 10.8 mm,降水明显偏少,土壤及气候处于典型的极干旱状态。在降水显著偏少的年份进行实验,对极干旱地区的土壤、大气及相互影响来说更具代表性。6 次土壤水分的监测表明(图 1),土壤水分含量下降并未因降水的显著减少而持续下降,说明潜水水汽支持的存在。

2 材料与方法

用无滴 PVC 塑料膜在戈壁上搭建一个密闭半球形拱棚,高 1.8 m,半径 3.1 m,膜缘入土 30 cm。

另外,历经千年的莫高窟洞窟壁画由于围岩水分的蒸发富含盐分,产生了较为严重的酥碱、空鼓、泡疹、起甲等病害^[10]。这与地质年代更为久远的窟顶土壤盐分的形成机理完全一致^[9-10],因此,对窟顶土壤-大气水分研究可为大气对壁画影响的研究提供重要参考,对莫高窟的文物保护有重要意义。

1 研究区概况

实验区位于莫高窟窟顶戈壁距洞窟群 1 km 处。戈壁上层 4 m 为疏松砾砂,下层属第四纪酒泉组胶结砾砂岩,莫高窟就开凿于这组胶结砾砂岩层上。0~60 cm 深度粒径小于 0.25 mm 的细沙占 71%,下层细沙仅占 30%,土壤的孔隙度为 20%~30%。窟顶 0~50 cm 深度是一富盐层,按易溶盐离子计算的无水含盐量及构成如表 1。洞窟壁画地仗层及外围岩土含盐也相对较高,成分构成与此一致,数量和分布随洞窟结构的不同复杂多变^[10]。

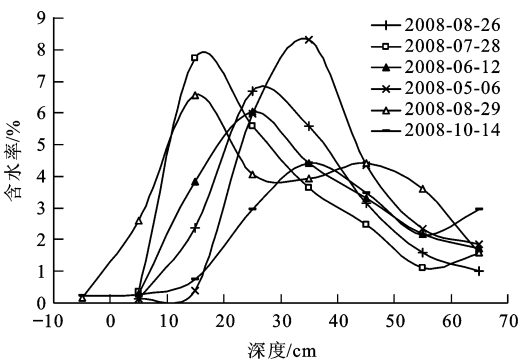


图 1 典型干旱气候条件下土壤水分分布

Fig. 1 Soil Water Distribution in Representative Dry Climate

在棚膜内壁粘贴塑料带,与棚膜成 V 字形(图 2),通过重力收集膜面的凝结水分。距该棚 1 km 的流沙区搭建同样大小的拱棚作为对照。极干旱地区水汽是土壤水分运移的重要形式^[12],在监测拱棚凝结水分的基础上,用 HOBO 温湿度监测仪监测棚



图 2 密闭塑料拱棚

Fig. 2 Airproof Plastic Greenhouse

内离地 50 cm 处的空气相对湿度、绝对湿度、温度, 在土壤中埋设 HOBO 监测仪监测 5、10、20、30、40、100 cm 土壤内空气的温湿度, 同时在棚外设立对照, 每 10 min 采集 1 次数据。在日尺度上分析土壤与大气水分的相互影响及土壤内部水分的活动规律。

用称质量法检验自然土壤是否从下层土壤或大气中吸收或释放水分, 验证实验的结果是否与温室效应有关。其方法是先挖取戈壁土壤 10 000 g, 装入口径 22 cm 的无底塑料桶 A、B 中, A、B 桶下垫细密纱网, 桶口用塑料膜密封, 与地面持平埋置于土壤中, 每日早晚称质量。监测 7 d 后, B 桶揭去密封塑料膜, 与有底塑料桶 C、D 同时称质量。然后在 C、D 桶中装入质量都为 9 840 g 的戈壁土壤, 置于土壤中, 每日 8:00、12:00 和 21:00 监测土壤的质量变化。

3 结果与分析

3.1 棚内水分变化分析

3.1.1 凝结量与棚内空气温湿度的变化

在 294 d(2008-07-21 ~ 2009-04-28)拱棚实验中, 从棚内共抽取膜面凝结水分 17 425 g, 折合棚内地表面积, 有 2.0 g/(m² · d) 的水分输出。在 167 d(2008-09-29 ~ 2009-03-16)流沙区对照拱棚内, 共收集到凝结水分 6 260 g, 平均为 1.3 g/(m² · d)。证明在潜水埋深 200 m 以下的敦煌莫高窟窟顶, 仍然存在潜水水分的持续运移与蒸发。在代表性天气下, 棚内温湿度变化如图 3。棚内温度、绝对湿度随着太阳辐射强度的增加而增大; 相对湿度变化随着太阳辐射和温度的增大而降低。根据棚内日最高与最低绝对湿度计算得到, 蒸发水分的 80% 随着温度降低又被土壤重新吸收, 仅有 20% 水分在膜面凝结。图 3 中太阳辐射(莫高窟气象站监测)与温度、相对

湿度、绝对湿度的相关系数分别为 0.934、-0.954、0.852; 温度与相对湿度、绝对湿度的相关系数分别为 -0.971、0.970; 相对湿度与绝对湿度的相关系数为 0.892。

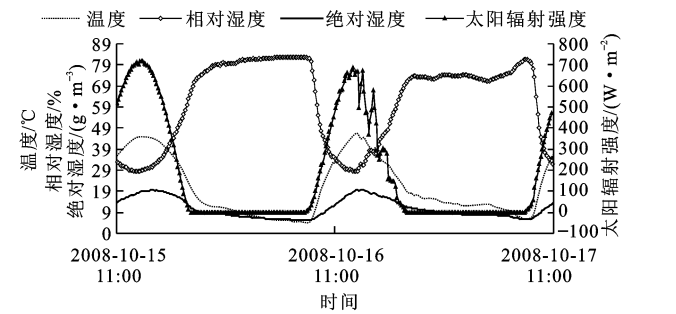


图 3 棚内空气温湿度随太阳辐射的日变化

Fig. 3 Daily Change of Air Temperature and Humidity in Greenhouse with Solar Radiant

图 3 中, 上午棚内(离地 50 cm 处)绝对湿度随太阳辐射强度及温度的增大而增大, 说明随着温度升高, 土壤水分蒸发, 并在棚内有所累积。随着温度降低, 水分又被土壤吸湿吸附, 土壤起到固着、存储水分的作用。土壤水分的分解与结合是双向的动态平衡移动过程, 在微观上同时存在水分的分解和结合过程。当温度升高时, 分解量大于结合量, 宏观上表现为蒸发和土壤水分的流失; 反之, 温度降低时则为吸湿吸附和土壤水分的增加, 其中温度条件是关键。一旦温度降低, 原来高温时分解的水分又会迅速被土壤盐分吸收, 重新形成结合水。棚内的绝对湿度表明, 土壤吸湿吸附大气水分的开始时间在午后, 直至次日日出, 与温度下降同步。午后较快的绝对湿度下降速率说明此时土壤吸收能力较强, 夜间即使考虑膜面凝结流失的部分, 土壤吸收水分的速率也不及午后。

在扣棚初期的 19 d 内, 棚内没有产生任何凝结水分, 但棚内绝对湿度较差, 最大可达 20 g/(m³ · d), 有 600 g 左右的水分蒸发。这些蒸发水分只是在棚内空气与土壤之间随温度变化来回运转; 流沙区对照拱棚内更甚, 在初期的 45 d 内也没有产生一滴凝结水分。这说明土壤有较强的水分吸收能力。棚内土壤水分的蒸发与土壤吸收、棚面凝结之间存在微妙的关联。棚内土壤经过较长时间的水分调整后, 当浅层土壤水分含量增大、吸收水分能力有所下降时, 棚内靠近膜面的相对湿度在外界温度影响下才有可能达到饱和湿度, 进而产生凝结水分。从实际监测看, 凝结水分一旦产生, 持续稳定。外部

环境温度在夜间的下降速率对凝结水分的形成量有重要影响,较快的下降速率可使棚内较多的蒸发水分在膜面形成凝结。棚内水汽密度分布并不均匀(图 3),离地 50 cm 处较低,一般夜间在 82%左右,靠近外围较高,在局部膜面可达到饱和,产生凝结。产生凝结的部位一般在无风的东北部,这可能与该区稳定的夜间西南下山风有关,风蚀摩擦下膜面温度较高,不易凝结。

3.1.2 棚内土壤温度与湿度的变化

棚内土壤温度与湿度变化如图 4。各层的绝对湿度、相对湿度伴随着各自的温度而同步波动变化,波动幅度随深度增加而迅速减小,在时序上随深度增加存在一定的迟滞。受温度日变化和迟滞的影响,浅层土壤(图 4 中地下 20 cm 曲线)的温度和绝对湿度可出现高于上下层的现象,使水分向上下层同时移动,出现上层与下层土壤水分含量较高的“双峰”现象(图 1 中 2008-08-29 曲线)。土壤空

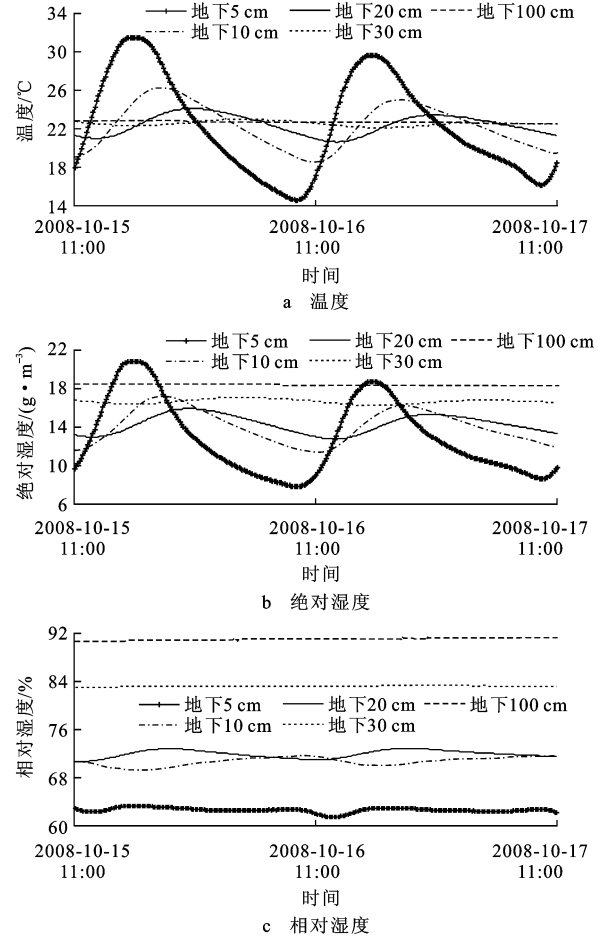


图 4 棚内土壤温度、绝对湿度和相对湿度变化

Fig. 4 Changes of Soil Temperature and Absolute and Relative Humidities in Greenhouse

气相对湿度随温度升高而升高,这不同于一般外部空间(图 3)相对湿度随温度升高而下降。说明土壤内部的结合水分在温度作用下及时分解,使土壤孔隙内的相对湿度也随之增高,当温度降低时,土壤颗粒和盐分又重新吸湿吸附水分,形成结合水。

土壤水分的运移方向取决于水势,水分从水势较高处向水势较低处运移。非饱和土壤水分的运移除了湿度影响外还与温度相关,较高的温湿度是保证水分向外运移的充分条件^[13-15]。深层土壤(图 4)的绝对湿度、相对湿度和温度一直高于上层,这样深层土壤水分就具备向上持续运移的充分条件;20 cm 深度左右土壤午后温度较高,理应持续形成向外蒸发,但可能受上层干燥土壤吸湿吸附和拱棚封闭的影响,棚内绝对湿度难以得到表达,甚至午后温度的持续下降使浅层土壤产生较强吸收作用,导致棚内空气水分含量降低。

3.1.3 棚外对照空气的温湿度

棚外对照空气的同期监测如图 5。大气和土壤的绝对湿度、相对湿度、温度与棚内格局完全一致,下层温湿度明显较高,存在水分向上传递的温湿度条件。相比之下,棚内受密闭环境的影响,温湿度明显增大,棚内地上 50 cm 的温度、绝对湿度、相对湿度较棚外对照分别增大 20.2 °C、8.4 g/m³、10.8%;土壤温湿度也普遍增高,地下 20 cm 土壤温度、绝对湿度、相对湿度平均分别增高 4.3 °C、4.5 g/m³、8.6%。棚内湿度的增加在一定程度上降低了湿度梯度及水汽压差,减小了土壤水分蒸发,因此,用拱棚凝结水分测定的蒸发量可能比实际蒸发量要小。但棚内土壤明显较高的温湿度排除了棚内凝结水分来源于外界土壤水平侧移的可能,相反,说明有部分从深层运转上来的棚内水分通过土壤的侧移而流失于外。

浅层土壤(如 5、20 cm 处)相对湿度随着温度的升高而升高,与棚内土壤一样,体现了土壤内水分分解与吸附非常及时的特性。从图 4、5 中地下 5、20 cm 的温湿度看,由于热量是从表层向下传导的,上层土壤在升温过程中水分被“驱赶”,大部分解的水分更易与下层温度较低的土壤盐分结合。上层土壤空气的绝对和相对湿度在上午升温过程中具备了土壤向干燥的大气输送水分的条件,有少部分蒸发逸失于外界大气。下午及夜间当表层土壤温度下降时,应与棚内相同,存在上层土壤从大气中吸湿吸附水分的现象,但从温湿度较高的下层获取

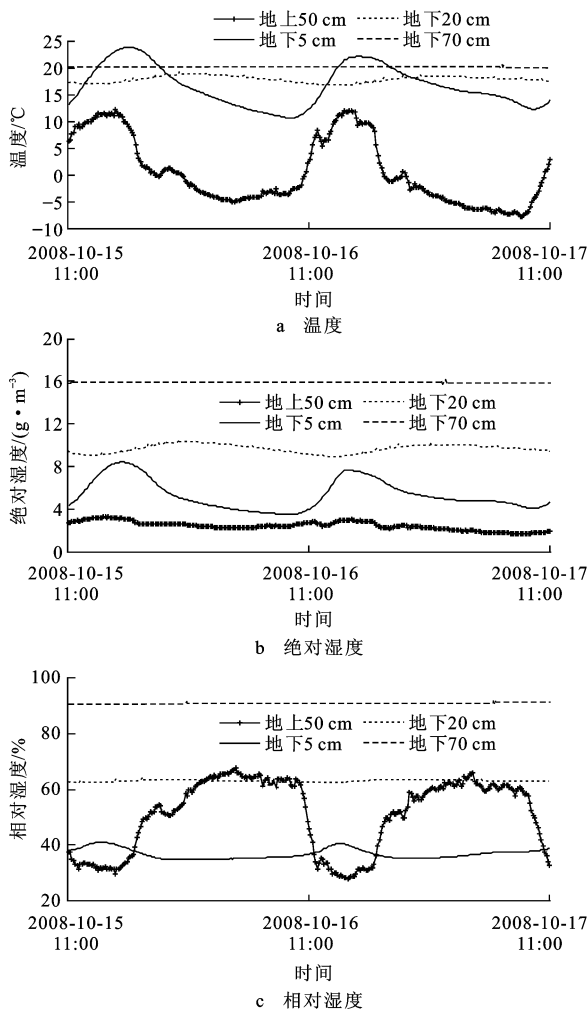


图 5 对照空气和土壤的温度、绝对湿度和相对湿度变化
Fig. 5 Changes of Temperature and Absolute and Relative Humidities of Contrast Soil and Air

的数量应更大, 这点在检验实验中得到了验证。

需要慎重指出的是, 相对湿度监测表明, 无论

棚内土壤还是棚外土壤不存在凝结现象, 空气相对湿度远未达到饱和。学界之前对中国干旱区土壤凝结水分的研究, 大多并没有充分证据表明有凝结发生, 因此将西北地区土壤吸湿吸附引起的水分变化称之为凝结水分是不妥的^[16]。在极干旱气候条件下, 土壤盐分的吸湿吸附和蒸发分解是形成土壤水分无凝结“干呼吸”的主要原因。敦煌干旱土壤内空气湿度的递增并非是大气逆湿的延伸^[1-3]。如棚内没有受到外部大气湿度的影响, 土壤依然存在较大的逆湿梯度; 反之, 即使干旱区近地逆湿程度达到如夜间棚内一样较高的湿度, 土壤内空气也未达到饱和程度。土壤湿度由潜水活动所主导, 潜水蒸发在一定程度上可缓解局部小气候极干旱化的压力, 土壤水分的“干呼吸”过程可对近地面大气湿度起到一定的稳定与平衡作用。

3.2 称质量实验结果分析

检验实验的监测结果与原质量相比, 质量变化如图 6。A、B 桶土壤的质量平均增加了 12 g, 在 ±10 g 范围内波动, 证明土壤下层存在水汽运行, 表层的密封使土壤湿度有所增加。一般早晨 9:00 温度较低时, 水分含量较大; 傍晚 20:30 土壤温度较高, 水分蒸发, 与前面温度对土壤吸湿吸附影响的分析相吻合。

C、D 桶没有下层土壤水汽的支持逐渐下降, 土壤质量下降了 48 g, 说明在干燥气候的影响下, 原土壤水分有一定的流失。从 2007 年 8 月 28、29 日的情况看, 的确存在早、晚土壤水分含量比中午高的情况(与拱棚实验完全一致), 这也与天气过程的影响关系密切, 如 2007 年 8 月 8 日至 30 日阴天空气湿度较高时, 全天的土壤质量持续增加。将 B 的

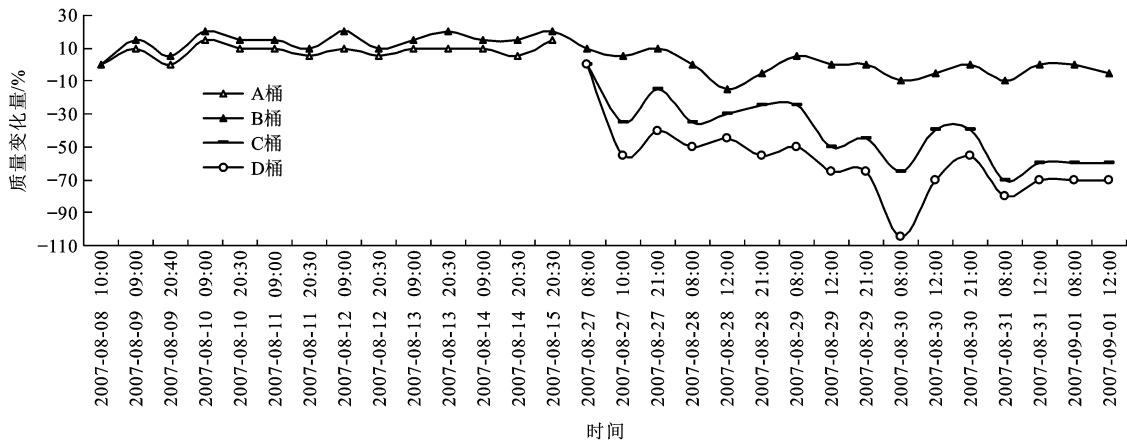


图 6 土壤质量的变化

Fig. 6 Change of Soil Weight

封闭塑料膜揭去后,受外界干燥大气的影响,质量减轻,但变化仍与 C、D 桶的变化走势一致,随着气候变化存在波动。然而,其波动幅度有所增大($\pm 15\text{ g}$),但明显小于更干燥 C、D 桶的变化幅度。

按本实验 B 桶后期的波动量计算,变化幅度较大,可达 $395\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,这与相应厚度土壤含水量的日变化基本一致(图 1),而与下层隔绝的 C、D 桶变动幅度更大。这说明这种富含盐的土壤(表 1)变得更干燥时,对水分非常敏感,吸湿吸附的能力增强,土壤与大气的水分“呼吸”趋于对称,这完全符合土壤颗粒和这些盐分的物理化学特性。大气水分和地下潜水对浅层土壤水分有重要影响,拱棚实验结果并非因其温室效应所致,这点对于莫高窟的文物保护来说也非常关键。

莫高窟上层洞窟和靠近崖面的壁画受太阳辐射及气温的影响较大,其相应的水盐病害较重,壁画受损严重,该实验结果对其成因有了一定的揭示。从莫高窟洞窟群整体层位分布来看,崖角、崖面和壁画地仗层不同程度暴露于大气环境中,越靠近崖面外围,受温度的影响越大,而得到崖体内水汽的支持越少。当温度升高时,这部分的岩层将变得更干燥,吸湿吸附能力将大大增强,远大于有较强地下水汽支持的围岩。因此,导致通过壁画表面的水汽通量增大。壁画盐分在水分的反复作用下结晶—分解,壁画反复收缩膨胀,导致碱酥、起甲、变色等病害^[10],这是外围壁画易于衰老的重要原因。

4 结语

在潜水埋深超过 200 m 的敦煌莫高窟极干旱区典型气候条件下,通过拱棚法、称质量法、土壤水分监测等方法,初步得出以下认识:

- (1)土壤与大气存在水分的不对称交流。浅层土壤在升温过程中有大量的结合水分分解蒸发,减缓了极干旱区小气候干旱化的压力;在降温过程中从深层土壤吸湿吸附较多的水分,也从大气中吸收少量水分,总有一定量的潜水水分流失于大气。
- (2)在热动力学作用下,存在潜水水分向上持续运移的温湿度条件,土壤水分主要源于潜水。
- (3)极干旱区浅层土壤不存在凝结水分,用称质量法监测到的质量变化(即所谓“凝结水分”)与

土壤水分“呼吸”本质上是同一回事,是土壤盐分的吸湿吸附与结合水分的分解蒸发引起的,这也是引起潜水蒸发的根本原因。

(4)称质量实验结果表明,当地下水汽的支持减少或富含盐分的土壤变得更干燥时,土壤对大气水分的吸湿吸附会急剧增强。对应于莫高窟壁画保护,这意味着通过壁画表面的大气水汽通量将增大,对文物的危害加重。因此,保持环境温湿度的稳定对保护文物非常重要。

参考文献:

[1] 陈梦熊.西北干旱区水文系统的演变与荒漠化[J].地球科学与环境学报,2005,27(1):1-4.

[2] 张 强,卫国安.邻近绿洲的荒漠表层土壤逆湿和对水分“呼吸”过程的分析[J].中国沙漠,2003,23(4):379-384.

[3] 张 强,赵 鸣.绿洲附近荒漠大气逆湿的外场观测和数值模拟[J].气象学报,1999,57(6):729-740.

[4] 马柱国,符淦斌,谢 力,等.土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J].地球科学进展,2001,16(4):563-568.

[5] 张 强,黄荣辉,王 胜,等.西北干旱区陆—气相互作用试验(NWC-A LIEX)及其研究进展[J].地球科学进展,2005,20(4):427-441.

[6] 庄艳丽,赵文智.干旱区凝结水研究进展[J].地球科学进展,2008,23(1):31-38

[7] 郭占荣,刘建辉.中国干旱半干旱地区土壤凝结水研究综述[J].干旱区研究,2005,22(4):576-580.

[8] 李红寿,汪万福,郭青林,等.敦煌莫高窟干旱地区水分凝聚的机理分析[J].生态学报,2009,29(6):3198-3205.

[9] Li H S, Wang W F, Zhan H T, et al. New Judgment on the Source of Soil Water in Extremely Dry Zone[J]. Acta Ecologica Sinica: International Journal, 2010, 30(1): 1-7.

[10] 李最雄.丝绸之路石窟壁画彩塑保护[M].北京:科学出版社,2005.

[11] 李红寿,汪万福,张国彬,等.影响莫高窟小气候的环境因子对比分析[J].干旱气象,2008,26(2):25-29.

[12] 闵安成,张一平.土壤气态水扩散特征初探[J].西北农业大学学报,1994(2):16-22.

[13] 托马斯·沃纳.沙漠气象学[M].魏文寿,崔彩霞,尚华明,等译.北京:气象出版社,2008.

[14] 朱学愚,钱孝星.地下水水文学[M].北京:中国环境科学出版社,2005.

[15] 曾亦键,万 力,王旭升,等.浅层包气带地温与含水量昼夜动态的实验研究[J].地学前缘,2006,13(1):52-57.

[16] 王积强.关于沙地凝结水测定问题——与蒋瑾等同志商榷[J].干旱区研究,1993,10(4):54-56.