

敦煌莫高窟干旱地区水分凝聚机理分析

李红寿^{1,3}, 汪万福^{1,2,3}, 郭青林^{1,3}, 范宇权^{1,3}, 李燕飞^{1,3}

(1. 敦煌研究院保护所, 敦煌 736200; 2. 兰州大学生命科学学院, 兰州 730000;

3. 古代壁画保护国家文物局重点科研基地, 敦煌 736200)

摘要:通过对敦煌莫高窟戈壁地质结构的调查和洞窟检测,结合气象资料对戈壁土壤水分凝聚机理进行了分析,并根据形成机理在野外进行了水分凝结的覆膜实验。结果表明,在莫高窟戈壁区的上层砾砂中,由于强烈的温度日较差变化,形成了凝结水分;另外源于地下深处的水分通过土壤盐分的吸湿吸附作用在地下 10~40cm 范围内相对富集,并由于剧烈的波动呈现时空异质性变化。将凝结、吸湿吸附等方式形成的土壤水分统称为凝聚水分。凝聚是水分存储于一定土壤的结构过程,与太阳辐射、温度、湿度等气候因子密切相关。变温层土壤的温度、盐分、湿度、结构、密闭程度、地热等对水分的凝聚有重要影响。水分的凝聚机理对干旱地区的生态建设和文物保护具有重要的现实意义。

关键词:敦煌;干旱地区;水分凝聚;机理分析

文章编号:1000-0933(2009)06-3198-08 中图分类号:Q149,S152.7 文献标识码:A

Mechanism analysis on water cohesion in arid area of Dunhuang Mogao Grottoes

LI Hong-Shou^{1,3,*}, WANG Wan-Fu^{1,2,3}, GUO Qing-Lin^{1,3}, FAN Yu-Quan^{1,3}, LI Yan-Fei^{1,3}

1 The Conservation Institute of Dunhuang Academy, Dunhuang, 736200, Gansu, China

2 The Life Science Academy of Lanzhou University, Lanzhou, 730000, Gansu, China

3 Key Scientific Research Base of Conservation for Ancient Mural (Dunhuang Academy) State Administration for Cultural Heritage, Dunhuang, 736200, Gansu, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3198~3205.

Abstract: Based on the investigation in the geologic structure at Dunhuang Mogao Gobi, and the inspection of the physical and chemical condition of the caves, associated with the weather data, the formation mechanism of the water cohesion in Gobi soil had been analyzed, and consequently, we did condensed water experiment by covering film. Results indicate that the rapid change of the wide range of daily temperature at the upper stratum of the gravel contributed to the formation of the condensed water. In addition, the water vapor from underground was adsorbed by salinity and soil particles, resulting in an enrichment of subterranean soil moisture in 10—40cm depth, and showing space-time heterogeneity by tempestuously fluctuation. The water formed by condensation and adsorption are all called by a joint name of the cohesion water in this paper. The cohesion is structure course of the water stored in some soil, closely correlated with the climate factors such as solar radiation, temperature and moisture. The temperature, salinity, moisture, gravel structure, coverage and subterranean heat flux within the layer with variable temperature have important effects on the water cohesion. The understanding of mechanism of the water cohesion has important practical application in environmental reconstruction and cultural relics preservation in arid area.

Key Words: Dunhuang; arid area; water cohesion; mechanism analysis

广义的地下水与狭义的地下重力潜水相对应,是指蓄存并运移于地表以下岩土中的水分。进行地下土壤

收稿日期:2008-01-05; 修订日期:2009-03-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dhlhs69@163.com

水分的研究对揭示水循环规律和生态保护有重要意义。研究极干旱地区土壤中的水分形成机理对荒漠化的防治尤为重要。万力等对包气带水分运动进行了模拟试验,发现温度变化对非饱和水分有明显的影响^[1]。我国自 20 世纪 60 年代对土壤凝结水进行了大量的研究,郭占荣等对当前土壤凝结分水的研究作了系统的综述,一般认为无论在砾砂区还是流沙区,日凝结量都非常小,最大不超过 0.5mm^[2]。凝结水在干旱地区土壤水分中占有重要位置。凝结是具有一定湿度的空气,当温度达到露点时气态水转化为液态水的过程。然而,盐分的吸湿和土壤的吸附作用对土壤水分的影响也不容忽视,它们可以从非饱和空气中吸收水分。本文将凝结水分、土壤盐分吸湿吸附的水分等统称为凝聚水分。凝聚是水分存储于一定土壤的结构过程。凝聚的概念较全面地概括了极干旱土壤中水分的不同来源形式。

以水分的凝聚概念为基础,通过对莫高窟周边戈壁及洞窟崖体中水分的调查,分析凝聚水分在这一区域形成的具体机制。这对于进一步认识水分的循环过程,减少无效蒸发,从宏观生态系统中争取最大的经济效益和生态效益有重要意义。莫高窟是多风沙地区,风沙对崖面壁画造成了严重的侵蚀,窟顶面临“薄顶之灾”。自 1992 年营造防沙林带以来,风沙的危害得到了有效的控制,取得了良好的生态效果^[3]。但是防沙林带进一步地发展也受到了水资源的严重限制。土壤水分形成机理的研究对于防沙林带生态用水的解决和敦煌生态环境与文物保护具有重要的现实意义。

莫高窟洞窟现存 4.5 万 m² 精美绝伦的壁画,是珍贵的世界文化遗产。然而泥质壁画的空鼓、起甲、变色等病害都与水分有关,崖体中水分与盐分的结合还造成了壁画的碱酥^[4],对壁画的危害尤为严重,故有“壁画癌症”之称。不过关于水分的来源及其形成机理,虽经多方努力目前尚不明确。因此,开展与洞窟一体的戈壁土壤水分形成机理的研究,对莫高窟文物本体的保护和病害的根治至关重要。

在其它地区已证明大气水分向土壤水分的转化确实存在^[2]。来源于大气中的凝结水分也属于凝聚水。但莫高窟的空气非常干燥,年平均相对湿度 31% (2005 年),大气水分的凝结极少发生,但土壤盐分通过吸湿吸附仍与大气进行着水分的交流。本文对敦煌莫高窟干旱戈壁区的水分凝聚进行机理分析。

1 分析资料与研究方法

1988 年敦煌研究院和美国盖蒂保护所合作,共同在莫高窟窟顶建立了先进的全自动气象监测站。1990 年、2002 年又在窟前和窟顶戈壁新建了 2 座自动化气象站。每 10min 或 15min 自动采集一组气温、湿度、太阳辐射强度、大气压、地表温度、风速、风向的数据,记录了全天候的气象状况,积累了翔实的气象资料。20 世纪 80 年代以来敦煌研究院与国外研究机构合作,不但对第 161、98、85、53 等洞窟的空气环境质量进行了长期监测,而且对洞窟岩体内的水汽、温度在不同方位、高度、深度上进行了细致的检测,取得了大量宝贵的数据。另外,敦煌研究院保存了大量关于莫高窟的地质考察、考古、发掘等方面的详细资料。这些都为水分的研究提供了良好的数据平台。

通过对莫高窟及周边地质、土壤、盐分、植被状况的调查,寻求它们与土壤水分之间的联系,并根据凝聚的物理学原理,分析地下岩土中是否具备凝聚条件,存在凝聚水分;应用莫高窟气象站的气象数据和洞窟内的检查监测资料进行综合分析,初步对莫高窟戈壁土壤及洞窟崖体内的水分形成做出科学合理的解释;根据水分凝聚机理,进行野外覆膜实验,依据实验中发现的土壤盐分状况,综合分析盐分对水分凝聚的影响,并利用水分在膜面的凝结建立水分的持续形成结构,初步验证凝聚机理的可靠性。做法是:将 9m × 10m、厚 0.01mm 的 PVC 棚膜铺于地表下 5cm 深处,观测膜面是否存在凝结水分,并应用烘干法对 60cm 深度内的土壤水分进行取样监测。2006 年的降水量为 52.7mm,自 2006 年 11 月 24 日降水 2.3mm 后,至 2007 年 4 月 12 日覆膜再无降水。

2 研究区域状况及调查

莫高窟地处干旱的内陆地区,位于三危山与鸣沙山交界的大泉河谷。本研究区域为莫高窟及周边戈壁,包括窟顶戈壁和洪积戈壁。窟顶戈壁属第四纪酒泉组。洪积戈壁是一个上层仍在发育的谷口洪积扇形区域,面积约 120km²。这里太阳辐射强度可高达 1.1kW/m²,年日照时数 3257.9h,年日照百分率为 71%。干燥指

数 32^[4], 年平均风速为 4.1m/s(2005 年), 年降水量为 42.2mm。

自 1995 年以来的大量调查发现, 莫高窟的主栽树种银白杨(*Populus alba* L.) 的根系主要分布于 10 ~ 130cm 内的土层内, 且随洪积粘土层呈明显的层状分布。这与土壤水分的分布有关, 粘重的土壤易于吸收和保存水分, 对水分有一定的富集作用, 因此植物的根系也随之成层状^[5,6]。利用这一发现, 在莫高窟新区 2000 ~ 2005 年的树木更新中, 采用挖沟后分层回填粘土与砂子的方法, 在干旱戈壁区的生态林带建设中产生了良好的效果。

洪积戈壁是以砾砂为主, 也呈层状分布, 粉砂含量不足 7%。2005 年 9 月对洪积戈壁区长达 10km, 深 1.4m 的开挖沟进行了现场调查。发现沙拐枣(*Calligonum kongolicum* Turcz.)、泡泡刺(*N. sphaerocarpa* Maxim) 等多年生植物的主要根系水平分布在 5 ~ 6cm 的表层, 而主根垂直向下延伸较深。其中一个特别的发现是在深约 1.3m、厚 3cm 的洪积粘土层内, 根系伴随粘土层又呈水平分布。而在粘土层上下沙层比较干燥(含水量 0.54%)的情况下, 该层土壤明显潮湿, 手捏尚可成团。经测定土壤含水量为 10.56%。该种土壤的粘粒含量是 57.6%, 最大持水量 32.5%。当年的降水量只有 49mm, 一次性的降雨量很小, 少量的降雨会很快蒸发到大气中, 初步可排除降雨下渗形成的可能。

3 地下水分的结构分析

水文地质在垂直剖面上可划分为两个带: 饱和带与包气带。饱和带岩土的所有孔隙均为水所充满, 包气带从地下水面向上延伸至地面, 是大气水、地表水和地下水发生联系并进行水分交换的地带, 是岩土颗粒、水、空气三者同时存在的一个复杂系统。它除了毛细水带外还包括土壤水带和中间带。土壤水带是植物根系主要分布的层带, 通常是由降水或灌溉形成的^[7]。莫高窟的戈壁区地下水属党河潜流, 洪积区中部水面埋深 141m, 窟顶戈壁的潜水埋深超过了 200m, 地层层系如图 1。

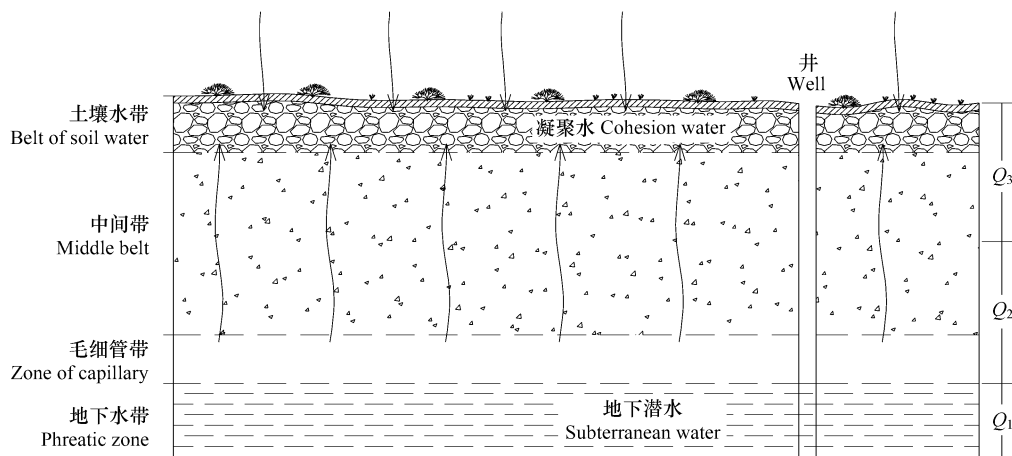


图 1 莫高窟地下水分结构图

Fig. 1 Mogao groundwater and structure map

毛细水带可引导大量的水分向上运动, 但通常高度不超过 2 ~ 3m。当地下水位很深, 像莫高窟中间带厚度达上百米以上时, 地下潜水可以通过气态形式通过中间带空隙到达地表。下面根据水分凝聚的物理原理, 分析这里是否具备水分凝聚的条件, 首先对主要的水分凝聚——潜水凝聚进行探讨。

4 潜水凝聚的形成机理

在莫高窟戈壁的砂砾地质条件下, 地下潜水面到地面之间岩土空隙中不可避免地充满水汽。这里包气带的空隙度为 20% ~ 30%, 这样莫高窟的地质条件、干燥气候为潜水水汽不断的向上运移提供了必要的条件。根据监测, 地表 25cm 以下的空隙中的相对湿度逐渐增大, 且层内常年基本保持稳定; 25cm 之上的相对湿度可随日温度的升高而增大, 但相应的波动峰值保持稳定。那么当砂砾温度降低时, 水分将凝聚于土壤, 水气压减

小,下层水汽向上运移^[8]。随着土壤温度周期性的降低,水分会不断地凝聚析出,形成薄膜水分,在变温层会有所聚积,并通过蒸发保持动态平衡。这样地表随日照的周期性变化,产生热动力学效应,源源不断地从地下“泵出”水分。

通常土壤属开放系统,地表呈半封闭结构。地表温度随太阳辐射的昼夜变化,变温层的温度也随之上下波动。温度降低时土壤盐分可产生吸湿吸附,当空气温度降到露点时就会出现水分凝结,随水汽量的不同所凝结的水量也不同。莫高窟土壤的层状结构具有较好的封闭性能,尤其是粘土层为地下空隙中保持了较高的相对湿度。这种封闭结构一旦形成,与稳定的地面温度日较差和地下潜水蒸发协同形成稳定的潜水凝聚机制,并与土壤向外的蒸散保持动态平衡。因此,可以认为在莫高窟戈壁区源于潜水的水汽是凝聚水分的基础来源。

戈壁地区夜晚的较低温度为实现水汽凝聚提供了保障。根据地表温度的变化,以不流动的饱和水汽评估土壤空隙单位体积的最大可能水分凝结量。按照 2005 年地表的日最高温度 26.9℃,日最低温度 5.2℃,那么,根据空气绝对湿度(AH)与相对湿度(RH)和温度(AT)的关系^[9]:

$$AH = \frac{13.2315RH}{273.15 + AT} e^{\left(\frac{17.25AT}{236.9 + AT}\right)} \quad (1)$$

在此温度较差下的水分年平均最大可能凝结量为 18g/m³。全年各月平均最可能日凝结量评估结果见图 2,6、7 月份的平均最大可能日凝结量为 54g/m³。纵使不向外界大气流失,也非常有限。然而考虑到水汽的运动和凝结的日积月累效应,上层砾砂的水分会有一定程度的增加,并与土壤蒸发和植被蒸腾保持相对的平衡。由于剧烈日温度变化在浅层土壤的交替,可通过浅层水分的凝聚—蒸发—凝聚交替作用进而引发水汽压的波动,带动深层水分的被动上移。因此,水分是通过凝聚与蒸发的交替作用实现潜水水分向上运转的。

在温度日较差及相对湿度相同情况下,根据公式(1),高温时的水分凝聚量远大于低温时的凝聚量。图 2 中根据地表温度日较差计算的最大可能凝结量的年变化正好与洞窟及壁面内空气水分的实际检测量(图3)

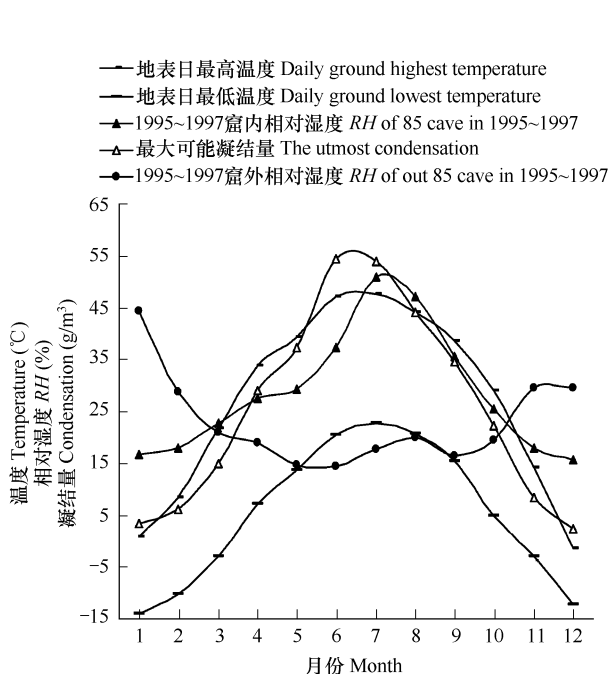


图2 地表日较差与水分凝结量及洞窟内外的温湿度

Fig.2 Ground daily temperature differences and condensation, RH of inside and outside of cave

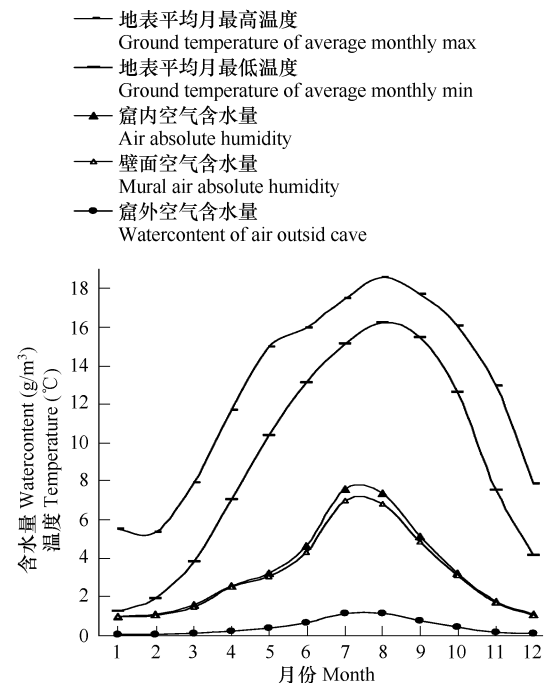


图3 1995~1997 年 85 窟内外平均温湿度

Fig.3 Average temperature and humidity inside and outside of 85 cave in 1995 ~ 1997

的年走向高度一致,6~8月份的水汽密度最高。洞窟围岩内(表1)的空气湿度监测表明相应深度的相对湿度保持基本稳定,那么根据公式(1),在日温度变化过程中吸湿吸附的水量也将随年基础温度的产生变化,凝聚水量与最大可能凝结量的走向相一致,只在数量上要比凝结小一些。郭宏等认为夏季洞窟相对湿度的突增是窟外灌溉与蒸散导致^[3],然而窟内相对湿度的实际监测与窟外湿度的走向相反(图2),这也绝非窟外空气流入时温度变化所能导致,窟内及壁面含水量远高于窟外(图3)。李最雄根据85窟1994~1997年监测的温度、相对湿度、太阳辐射等大量的数据资料,系统地进行了与水分相关性的分析,发现水分与温度的相关程度最高^[10]。因此,崖体内温度日变化产生的凝聚水分对洞窟内的湿度有独立的影响。

强烈的太阳辐射对顶层窟顶的温度影响很大,崖面太阳辐射对崖体温度也有较大的影响,而中下层洞窟崖体受到窟前树木和崖体自身遮荫的保护,太阳辐射总量减少了2/3^[11],其温度主要受气温的影响。莫高窟小气候受环境因子的影响明显,温度日较差仅为11.0℃,远小于窟顶地表日较差21.7℃,因此,相应的气温对水分凝聚的影响要小于地温的影响。这与长期莫高窟洞窟群的整体调查的结论相一致:顶层石窟

受外部环境的影响最大,下层次之,中层最小。位于中层的洞窟相对湿度的变化幅度小于顶层和下层的洞窟,壁画保存状况也相对较好^[3]。下层洞窟虽然与中层同受气温的影响而温度相近,但下层洞窟有较充足的地下水汽来源。也正是由于下层洞窟的存在,在一定程度上阻隔了水汽的向上的运行,故中层洞窟水分凝聚较少,壁画保存也为最好。

地温的变化随深度的增加而锐减,但土壤空隙内的空气湿度随深度的增加而增大。凝聚量的大小取决于土壤内部空气湿度与温度变化。土壤湿度随着地温的昼夜变化,在时空上呈异质分布和非稳定运移。从表层向下,砾砂的湿度锐增,达到一定深度后又随土壤深度逐渐减小,在戈壁砾砂上层变温区自然形成类似的土壤水带(图1)。2005年洪积区的白茎盐生草(*H. arachnoideus* Moq.)等1年生植物,在表层土壤粒度较小处形成覆盖度较高的生态缀块,这表明:较大的土壤空隙虽然对地下水汽的运移有利,但在干燥的气候条件下,表层空隙度较大更易使水分流失;表层质地越细,空隙越小,密封性能愈好,水分的析出与保存越好,愈有利于植物生存。

另外,地源热能的向上传导对地下水分的运移和潜水蒸发有一定的促进作用^[12]。近年来在莫高窟戈壁区发现有地热资源,已开采出水温55℃、距地下1600m的温泉水。这里的地热无疑对潜水蒸发有一定的影响,地热为潜水蒸发提供了稳定的能源保证,而潜水蒸发又为潜水凝聚提供了较充足的水汽来源。

5 土壤盐分对水分凝聚的影响

根据以上潜水凝聚的形成机理,在窟顶戈壁进行的野外覆膜实验,从4~6月份的土壤水分的观测结果(图4)看,水分在膜下10~40cm有较大波动,水分的垂直分布与之前的分析一致。但含水较高的20cm处并不是以稳定的峰值出现,而是随日期的不同在较剧烈地波动。也未如所期望的在膜面形成凝结水。分析认为:由于采样的时辰及其气候的不同,采样时土壤的温度也各不相同,使土壤的含水率存在较大的差异。因此有必要对土壤水分进行日变化的观测。6月12~13日,每4h一次对覆膜区域内不同深度的土壤取样,结果如图5。

图5,如前分析,水分随土壤温度变化存在较剧烈的波动,未覆膜对照的表现与图5类似,充分说明在土壤温度的交替作用下,有较大数量的水分在连续运移,10~40cm水分含量较高,类似于土壤水带。地温受太阳辐射的影响,随季节和昼夜的变化而变化,一般变温层的日变化深度在1.5m以内,年变化范围可达20~30m^[12]。虽然这里的太阳辐射强烈,日照百分率高,夏季地表温度可达70℃,冬季地表极端最低温度可达-37.4℃。但一年多的监测结果表明,这里的日变化深度反而较小,只有60cm。这主要是窟顶表层砾石的含

表1 围岩内的相对湿度(%)

深度 Depth(cm)	岩体方位 Orientation			
	NW	SW	SE	NE
0	34.3	30.7	30.7	30.4
10	64.9	70.4	83.1	67.1
20	73.7	73.6	83.3	75.9
30	94.5	89.6	99.5	94.2

水量很低,比热和导热率较小^[8,7],当热量向下传导时,下层富含水分的土壤比热较大,部分显热通量转化成了潜热,减弱了温度变化。另外,升温过程的水分分解吸热与降温过程的水分结合放热也对温度变化产生了重要的平衡与抑制作用。因此,浅层土壤的温度变化对水分的凝聚非常重要。

图 5 中,虽然 10cm 处 5:00 与 21:00 的含水率相差 5.1%,膜下 30cm 范围内的土壤水分的日变化总量高达 10.7mm(9:00 与 21:00 的差),但膜面并没有出现凝结水分。

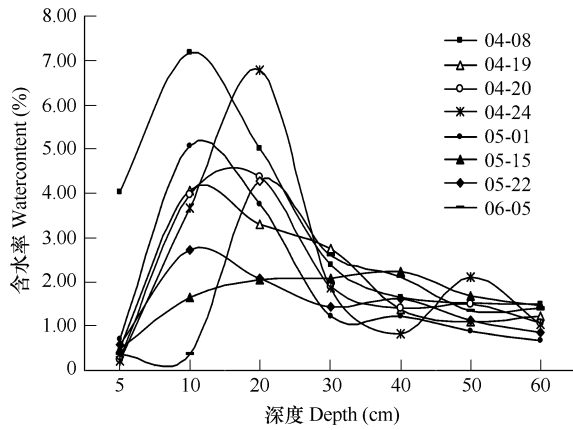


图 4 覆膜土壤水分在不同日期的变化

Fig. 4 The covered film soil water content change in different date

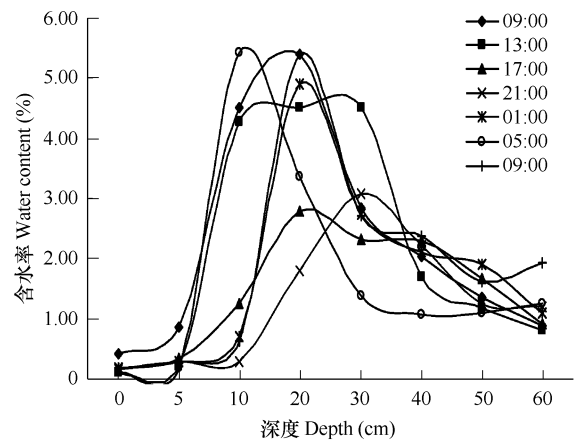


图 5 覆膜土壤水分的日变化

Fig. 5 The covered film soil water content daily change

分析认为,这主要是土壤盐分吸湿的影响。实验区域土壤与洪积扇区的一个显著差别是盐分含量较高,0~50cm 是一明显的含盐土层,盐分含量和成分如表 2^[4],干燥时较硬,可形成结块;水分较高时成白色结晶,占据相当的土壤空间,最高含水率可达 18.8%,高于盐分溶解后的最大持水含水率 13.3%。盐分 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 NaCl 、 Na_2SO_4 、 KCl 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 等在室温 25℃、相对湿度 29%~88% 时,就会潮解、结晶或溶解^[3],这些盐分在低于饱和湿度时就可通过分子引力和静电引力吸附水分,形成结合水。浅层土壤的盐分特性在很大程度上保存了在温度日较差作用下凝聚的水分,使浅层水分含量增大,形成非降水的富水带。若没有土壤盐分,凝聚水分也可能在干燥气候的影响下流失殆尽。

表 2 莫高窟崖顶戈壁 60cm 厚土层盐分分析 (g/kg)

Table 2 Analysis results of salinity in 60cm depth layer over the top surface Gobi of the Mogao Grottoes

层位 Depth (cm)	阴离子 Anion				阳离子 Cation				阴阳离子总数 Amount of Anion and cation	pH
	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+		
0	0.12	1.59	3.10	0.54	0.28	1.40	0.07	7.10	7.26	
0~20	0	0.10	0.10	0.90	0.18	0.10	0.10	0.01	1.49	7.56
20~60	0	0.09	0.13	3.02	0.84	0.23	0.15	0.03	4.49	7.32

如前面潜水凝结的机理分析,由于热动力学作用,可使水分源源不断地从地下“泵出”。深层水汽凝聚于沙粒的表面,可形成少量的薄膜水分。粘土层较高的水分也是粘粒吸附吸收这层膜状水分结果。溶解于膜状水分中的深层岩土矿物在运移至浅层土壤后,水分蒸发,矿物盐分滞留于蒸发面的土壤中,经过一定的地质时期,使窟顶戈壁形成了约 50cm 的富盐土壤层。这是地质年代更久远的窟顶戈壁盐分高于扇形戈壁区的主要原因,也是潜水凝聚存在的重要证据。但正是由于大量盐分的存在,当下层水汽运移至此富盐层时,纵使水分含量较高和温差较大,通常尚未凝结就被土壤盐分吸收,使到达塑料膜面的相对湿度一直较低,不足以发生凝结。盐分中结晶水分随温度的升高,分解生成水汽,在扩散至温度较低处时又与干燥失水的盐分会重新结合,形成浅层土壤水分受温度控制的波动运移,在浅层土壤中形成了的水分含量相对较高但土壤水势很低的“干”土壤特性。同时,受土壤温度波动的影响,可使部分分解的土壤水分逸失于大气,而形成蒸发现象。但

是,当温度降低时又可从干燥大气中吸湿吸附水分,形成土壤水分的“干呼吸”过程,通常“呼出”的水量应当大于“吸入”的水量^[13],形成潜水—土壤—大气水分运动的连续体。土壤盐层的存在在一定程度上降低了土壤水分向外的无效流失。因此,土壤盐分的吸湿吸附作用在水分凝聚中占有重要位置,用凝结的概念不足以全面概括极干旱区土壤水分的形成,存在一定的问题^[2]。

根据图 5 表现和以上分析,于 8 月 8 日在原覆膜区域旁进行另一 4m × 5m 的覆膜实验,覆膜深度调至 30cm 的位置,以减少干燥盐层对水分的吸湿。此时距前次降雨(2.8mm)已过 19d,认为降雨的影响已微乎其微。次日 7:00 膜面并未发现有凝结水分,但在移去覆土后数分钟,膜面内就出现了露珠,打开膜后,手在膜下摸到了液态水分。说明膜下有大量水汽,但膜上覆土过厚,温差不够。调整覆盖厚度至 20cm 后,于 8 月 10 日晨发现膜面有水珠,事先放置的吸水剂膨胀成白色果冻状,有凝结水分形成。

6 小结

敦煌干旱地区的生态十分脆弱,极易遭到破坏。一旦植被退化往往成为风沙源区,是荒漠化严重的区域。由于干旱少雨、水资源匮乏,荒漠化的生态恢复极其困难。因此,开展干旱地区土壤水分的研究,对生态建设和荒漠化治理具有极为重要的现实意义。通过对敦煌莫高窟气候、地质、土壤、植被的调查分析,结果表明干旱地区的土壤中存在较大数量的凝聚水分。干旱地区水分凝聚的机理是:由于变温层温度的剧烈变化,引起层内土壤空隙中的水汽凝聚,气压减小,使下层水汽向上运移扩散,在热动力的作用下形成了水分由潜水向地表迁移的连续体,至浅层土壤时由于较大的温度日较差作用、土壤盐分的吸湿吸附作用和干燥气候的影响,在浅层自然形成类似于土壤水带的富水干层,并与大气通过“干呼吸”过程保持着水分的动态平衡。水分的凝聚受气候、地质、盐分等众多因子的影响,其中水分的吸湿吸附与分解是关键。凝聚水分随日周期和季节变化在土壤中呈时空异质分布。

水分凝聚机理的研究对莫高窟的文物保护有着十分重要的意义。莫高窟崖体内的水分形成就是水分的凝聚过程,这为因凝聚水分造成的文物本体病害的根治奠定了理论基础。

根据干旱地区水分凝聚机理,初步在莫高窟野外进行了覆膜实验,并获得了凝结水分。膜面凝结水分具有非常重要的生态利用价值,对荒漠化的治理具有重要意义。凝聚水分对敦煌地区的生态建设和风沙治理具有重要的现实意义。凝聚水分若最终证明是来源于潜水,产量将十分可观,这将为干旱地区水分的利用开辟新的渠道。随着覆膜等综合配套技术的成熟,为干旱地区就地利用珍贵的水资源,通过机械化、产业化的模式恢复荒漠化的生态环境提供了可能。

References:

- [1] Wan L, Cao W B, Zhou X, *et al.* A testing study on the effect of the change of temperature on the occurrence of water content in unsaturated zone. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2004, 31(3): 25—28.
- [2] Guo Z R, Liu J H. An Overview on Soil Condensate in Arid and Semiarid Regions in China. *Arid Zone Research*, 2005, 22(4): 576—580.
- [3] Wang W F, Wang T, Li Z X, *et al.* The effects of blown sand on the shrub belt over the top of Mogao Grottoes. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2493.
- [4] Guo H, Li Z X, Qiu Y X, *et al.* Research on efflorescence of wall paintings in the Mogao Grottoes of Dunhuang. *Dunhuang Research*, 1999, 3: 153—175.
- [5] Wang J, LIU M S, Sheng S, *et al.* Spatial distributions of soil water, salts and roots in an arid arbor-herb community. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4120—4127.
- [6] Zhou A G, Sun Z Y. *Geo-ecology in Arid Regions: An Introduction*. Beijing: China Environmental Sciences Press, 2007. 34—47.
- [7] Zhang J S, Cheng S R, Lü S H, *et al.* *Physics Hydrology*. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2007. 422, 194.
- [8] Thomas T. Warner. *Desert Meteorology*. Beijing: China Meteorology Press, 2008, 136, 143—149.
- [9] Peking University atmosphere physics group editor in chief. *Atmosphere Physics*. Beijing: China Meteorology Press, 1987. 18
- [10] Li Z X. Conservation of the wall paintings and colored statues of the grottoes on the silk road. Beijing: Science Press, 2005. 360—371.
- [11] LI H S, Wang W F, Zhang G B, *et al.* Contrast analysis of environment factors influencing microclimate of Mogao Grottoes. *Arid Meteorology*, 2008, 26(2): 25—29.

- [12] Liu B P, Cai Y L, editor in chief. An introduction to earth science. Beijing: Higher Education Press, 2000. 4, 79
- [13] Zhang Q, Wei G A. Analysis of inverse humidity respiration process of surface soil in desert near oasis. Journal of Desert Research, 2003. 23(4): 379—384.

参考文献:

- [1] 万力, 曹文炳, 周训, 等. 包气带中温度变化对水分分布影响的实验研究. 水文地质工程地质. 2004, 31(3): 25 ~ 28.
- [2] 郭占荣, 刘建辉. 中国干旱半干旱地区土壤凝结水研究综述. 干旱区研究, 2005, 22(4): 576 ~ 580.
- [3] 汪万福, 王涛, 李最雄, 等. 敦煌莫高窟顶灌木林带防风固沙效应. 生态学报, 2004, 24(11): 2493.
- [4] 郭宏, 李最雄, 袁元勋, 等. 敦煌莫高窟壁画酥碱病害机理研究之三. 敦煌研究, 1999, 3: 153 ~ 175.
- [5] 王珺, 刘茂松, 盛晟, 等. 干旱区植物群落土壤水盐及根系生物量的空间分布格局. 生态学报, 2008, 28(9): 4120 ~ 4127.
- [6] 周爱国, 孙自永, 马瑞. 干旱区地质生态学导论. 北京: 中国环境科学出版社, 2007, 34 ~ 47.
- [7] 张济世, 陈仁升, 吕世华, 等. 物理水文学——水循环物理过程. 郑州: 黄河水利出版社, 2007. 422, 194.
- [8] 托马斯·T. 沃纳. 沙漠气象学. 北京: 气象出版社, 2008. 136, 143 ~ 149.
- [9] 北京大学大气物理学编写组. 大气物理学. 北京: 气象出版社, 1987. 18.
- [10] 李最雄编著. 丝绸之路石窟壁画彩塑保护. 北京: 科学出版社, 2005. 360 ~ 371.
- [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. 干旱气象, 2008, 26(2): 25 ~ 29.
- [12] 刘本培, 蔡运龙主编. 地球科学导论. 北京: 高等教育出版社, 2000. 4, 79.
- [13] 张强, 卫国安, 邻近绿洲的荒漠表面土壤逆湿和对水分的“呼吸”过程分析, 中国沙漠, 2003, 23(4): 379 ~ 384.