

DOI: 10.5846/stxb201301290185

李红寿, 汪万福, 詹鸿涛, 邱飞, 武发思, 张国彬. 应用拱棚-空调法对极干旱区降水的模拟回收. 生态学报, 2014, 34(21): 6182-6189.

Li H S, Wang W F, Zhan H T, Qiu F, Wu F S, Zhang G B. Application of a greenhouse air-conditioning method to simulate take-back of rainfall in an extremely arid area. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6182-6189.

应用拱棚-空调法对极干旱区降水的模拟回收

李红寿^{1,2,*}, 汪万福^{1,2}, 詹鸿涛¹, 邱飞¹, 武发思^{1,2}, 张国彬^{1,2}

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

摘要:拱棚法监测表明极干旱区存在潜水蒸发,而土壤温湿度监测表明,土壤水分具备向下运转的条件,这意味着拱棚所监测的水分可能来自降水,极干旱区并不存在深埋潜水蒸发。因此,研究降水的最终去向非常重要。为此笔者应用拱棚-空调法进行对极干旱区降雨模拟回收。结果表明,在极干旱条件下占该区85%以上频次的5 mm的降水经90 d可完全蒸发和回收。回收过程中,棚内地上50 cm的相对湿度(RH)和绝对湿度(AH)分别较棚外增高12.10%和3.50 g/m³,这使降水的回收时间大为延长;另外,土壤内部的温湿度监测表明,洒水后30 cm土壤的温度、RH、AH分别高于棚外对照1.46 °C、4.17%和2.50 g/m³,说明有一定数量的降水通过膜下土壤侧向流向了外部,增加了收集时间。回收实验证明极干旱区降水可完全蒸发,该区存在潜水蒸发与GSPAC(Groundwater-Soil-Plant-Atmosphere Continuum)水分的向上运转。

关键词:降水; 极干旱地区; 潜水蒸发

Application of a greenhouse air-conditioning method to simulate take-back of rainfall in an extremely arid area

LI Hongshou^{1,2,*}, WANG Wanfu^{1,2}, ZHAN Hongtao¹, QIU Fei¹, WU Fasi^{1,2}, ZHANG Guobin^{1,2}

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

2 Key Scientific Research Base of Conservation for Ancient Mural, Dunhuang Academy, State Administration for Cultural Heritage, Dunhuang 736200, China

Abstract: A preliminary greenhouse air-conditioning method demonstrates that there is phreatic water evaporation of deeply buried phreatic water in an extremely arid area. Soil-moisture monitoring shows that most daily fluctuation of moisture in the shallow soil layer of 0—60 cm enters deeper layers as water vapor; only 2‰ of this daily fluctuation water enters the atmosphere and evaporates. Monitoring of 0—500 cm soil depths shows that during May through October (the principal rainy season), temperature and absolute humidity in upper soil layers are greater than in lower layers. According to the law of water vapor migration, moisture moves from regions of higher temperature and humidity to those with lower temperature and humidity. Thus, in the aforementioned season within an extremely arid area, conditions may be suitable for rainwater vapor to move downward to the subsoil. This may mean that some rainwater does not evaporate into the atmosphere but penetrates the earth in such areas, and precipitation is likely the main source of deep soil moisture. This suggests there is no phreatic water evaporation of deeply buried phreatic water in extremely arid areas. Based on this hypothesis, a closed greenhouse with air-conditioning system was constructed in the arid area of the Mogao Grottoes in the Gobi Desert. In this greenhouse, we conducted a simulation recycling experiment of 5-mm precipitation via an air-conditioning condensation method. In this way, we first traced where rainwater went. Temperature and humidity were controlled by refrigeration and air-conditioning condensation, which made the temperature and humidity inside the greenhouse approach that of the outside. To understand

基金项目:国家自然基金项目(41363009, 31070344, 31260136); 国家科技支撑项目(2013BAC07B02); 甘肃省科技计划项目(1308RJZF290); 敦煌研究院院级课题(201306)

收稿日期:2013-01-29; **网络出版日期:**2014-03-13

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

characteristics of rainfall evaporation in extremely arid areas, the quantity of condensation water was monitored daily. We analyzed temperature and humidity variations, which were monitored by HOBO monitors in the soil, to understand the rainfall infiltration and evaporation process. This confirmed the ultimate flow direction of precipitation, and whether it completely evaporated. This approach was used to determine if there was phreatic water evaporation. The results showed that 5 mm of precipitation, which represented 85% of the frequency of precipitation in this area, completely evaporated. The relative and absolute humidities of the 50 cm above ground within the greenhouse were 12.10% and 3.50 g/m³ greater than outside it, respectively. These results caused the experimental time to be longer than for actual evaporation. In addition, soil temperature and humidity monitoring indicated that after water was sprinkled in the greenhouse, soil temperature, relative humidity and absolute humidity at 30 cm depth were greater by 1.46°C, 4.17% and 2.50 g/m³ than the outside control, respectively. This means that during evaporation, a certain amount of rainfall reached the outside through the greenhouse side soil, under the greenhouse film. This was another reason why the precipitation evaporation collection time was greatly extended. The collection time of 90 days may be much longer than the actual time for natural evaporation, but it confirmed the effectiveness of the rainfall recycling experiment. After complete take-back of all the simulated rainwater, soil moisture did not decline, but increased. The phreatic evaporation speed also increased, which means that precipitation pulsation has a certain control on evaporation of the phreatic water. It was demonstrated that there is phreatic evaporation, and soil water was supplemented by this water. Groundwater-Soil-Plant-Atmosphere Continuum (GSPAC) movement was upward, and the precipitation could completely evaporate.

Key Words: precipitation; extremely arid area; phreatic water evaporation

降水是水循环的重要环节,是地下水的主要来源^[1],也是决定土壤水分含量和植被分布的关键性因素^[2]。降水缺乏是导致荒漠化的主要根源^[3],在干旱半干旱区降水脉动对植被影响尤为明显^[4]。众多学者对降水过程进行了研究,目前降水及蒸发过程的研究一般是通过入渗深度的观察^[5]、土壤含水量的测定^[6]、蒸渗仪称重法^[7]或微波遥感^[8]等方法来进行的。

刘新平等研究发现,在科尔沁干旱流沙区小于13.4 mm的降水对深层土壤水分起不到补充作用^[9]。笔者在敦煌莫高窟调查发现,该极干旱区85%的降水小于5 mm,能够达到13.4 mm的降雨数年不足一次,而该区钻探发现150 m内的深层土壤含水量稳定在1.0%—1.5%之间^[10]。如果降水不是该深层土壤水分的来源,那么它们只能来自地下水。2008年笔者用称重法对5、10、16 mm模拟降水过程进行了的监测,结果表明,0—60 cm土壤水分经过8、12、16 d即可完全恢复到原来较低的含水量,据此推断该区降水可较快蒸发^[11];同时,由于拱棚监测发现,在远离降水时该区仍存在水分蒸发,由此判定:极干旱深埋潜水区存在潜水蒸发^[11]。

研究发现,0—60 cm土壤存在日温度下的水分

波动,即使远离降雨时,0—60 cm土壤内的日波动量高达9.27 mm^[11],这些水分99.8%在日波动过程中进入温湿度较低的下层,仅有2‰的形成有效蒸发,流失于大气^[12,13]。且进入土壤深处的水分主要是以水汽形式向下运移的,受土壤颗粒及盐分吸湿的影响,在进入过程中并不引起60 cm以下深层RH或AH的升高^[14]。从0—60 cm土壤空气的温湿度日波动看,白天的温湿度的确较高,具备水汽向下运移的条件^[12]。而随着研究的深入和土壤气温湿度监测范围的扩大,发现年尺度上深层土壤温度和AH变化与浅层日变化类似,存在年周期性的波动(图1)。

根据水汽运移规律,较高的温度、湿度是水分向外运移的充分条件。冬季上层土壤温度较低,AH也较低。显然,如果深层土壤水分立足于潜水来源,那么大约从10月到次年5月,存在潜水向上运移的充分条件;而5—10月上层温度较高,AH也较高,水汽浓度由上向下递减,存在水分由上向下运移的充分条件。同时夏季是主要的降雨期,由此推断深层水分可能来自于降水。因此,深层土壤水分到底是来源于潜水还是降水,亦即:在极干旱区土壤内水分循环宏观上是GSPAC(地下水→土壤→植被→大气)

向上运转还是降水向地下水(潜水)的循环,值得进一步的研究。它关系到干旱区盐分来源^[15]、矿物运

转^[16]等地球物理化学循环^[17]基本方向的定性。

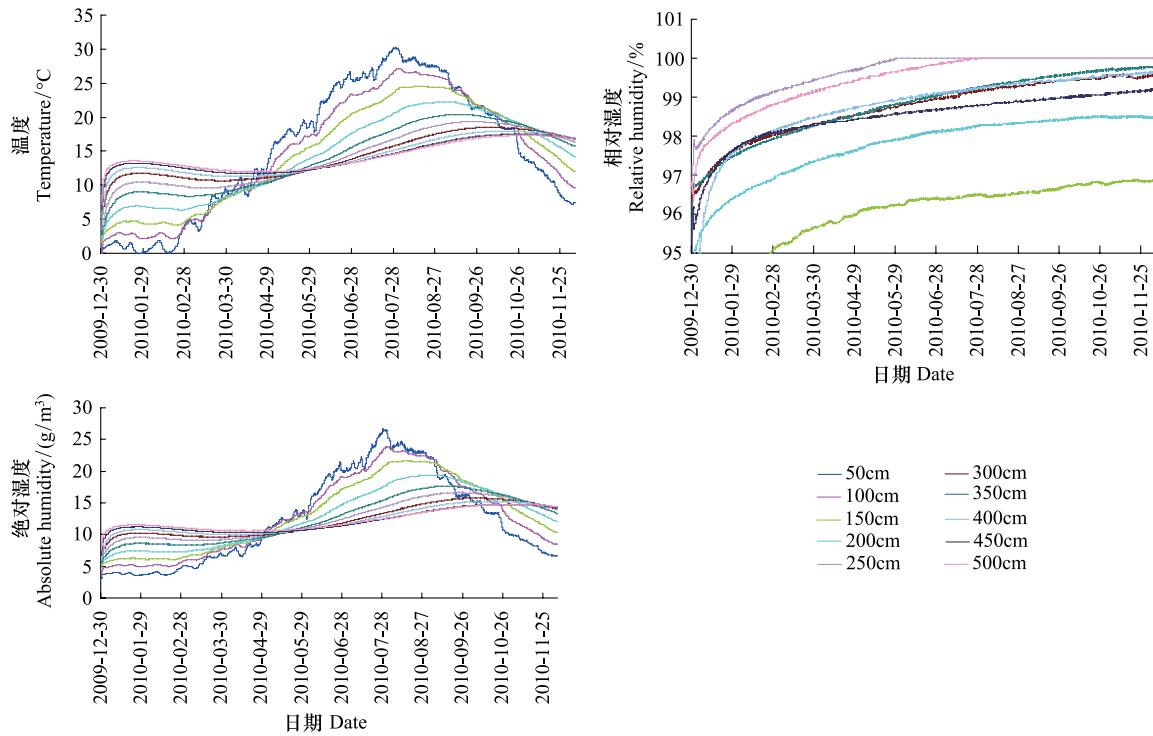


图1 深层土壤空气温湿度的年变化

Fig.1 Yearly changes of air temperature and humidity in deep soil

因此,当5—10月浅层土壤在降水作用下具备了较充足的水分时,降水有可能跟随日温度的波动以水汽形式“注入”深层,成为深层土壤水分的主要来源,然后在远离降雨时形成蒸发^[15]。降雨后由于干土层的保墒性能较强^[18],蒸发量较小,因此可长期保持蒸发存在。因而,之前用拱棚法测定的蒸发水分可能并非来自潜水,而通过降水入渗深度的观察和土壤含水量的测定等也都并不能确定降水的确切去向。因此,降水最终是蒸发于大气了还是以水汽形式进入了地下,无从得知,只是习惯性地认为蒸发于大气了。

更何况基于同样的水汽运移的基本理论和各自的监测的结果,众多研究者有类似的认识:张强等认为,在敦煌绿洲边缘存在大气水分向土壤深层的运移与补充^[19];李训华认为,沙漠包气带存在昼夜与季节性的水分向下运移和凝结^[20];张亚哲等认为,在西北地区日温差较大的夏秋季,白天气温和地表温度高于包气带温度,气态水在温度梯度作用下存在向包气带低温处的运移、凝结与聚集,使包气带含

水量增大^[21]。因此,确定降水的最终走向是极干旱土壤水分研究的关键。本文通过拱棚降水模拟回收,以确定降水的最后去向和降水的蒸发特征。

另外,水分是造成莫高窟洞窟珍贵文物劣变的主要原因,洞窟壁画彩塑的酥碱、霉变、起甲、空鼓等都有水分的参与^[10]。洞窟水分的来源一直是洞窟文物保护最为棘手的问题,如果能够确定戈壁深层土壤水分来自降水,这就意味着莫高窟洞窟水分也可能来自降水,那么,通过窟顶防水处理即可从根本上解决莫高窟洞窟水分问题,使珍贵壁画得以长久保存。因此,戈壁降水回收模拟实验对莫高窟珍贵文物的保护也具有特别的意义。

1 研究区域状况

实验于2009-07-06—2009-10-22日在莫高窟窟顶戈壁距洞窟群1 km处进行,图2。该区潜水埋深超过200 m,窟顶戈壁上层4 m为疏松砾砂,下层为胶结砾砂岩,属第四纪酒泉组^[10]。0—50 cm是一富盐层,平均含盐量为4.4%,主要以Na₂SO₄和NaCl为

主,含水量在2.0%—9.0%之间随日温度的变化波动^[14]。土壤空隙度在20%—30%之间。该区气候极其干燥,年平均RH为31%,年降水量42.2 mm,年潜在蒸发量为4347.9 mm;太阳辐射强度可高达1.1 kW/m,年日照率71%;温度11.23℃,风速为4.1 m/s(2005年)。根据莫高窟气象站记录,该区2008年5次共降水8.20 mm、2009年5月扣棚之前7次共降水1.80 mm。

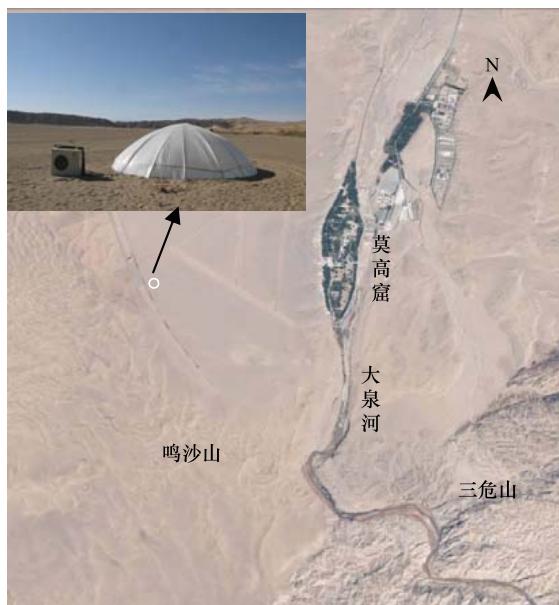


图2 实验区位置及拱棚-空调系统

Fig.2 The site of experiment and the greenhouse air-conditioning system

2 研究方法

常言道:覆水难收。笔者查阅了大量的国内外资料,并未找到有效回收降水的可靠方法。所幸的是,笔者为了测定深埋潜水的蒸发量,发明了拱棚-空调凝结法,它成功收集了蒸发水分^[13],该方法可完全应用于降水的模拟回收。该方法是在拱棚法^[11]的基础上在棚内安装空调。首先利用塑料拱棚的密闭性形成一个与大气完全隔绝的封闭系统,然后通过空气的内循环(根据空调风扇的循环量计算,相对于0.1 m/s的风速)和空调的冷凝来收集蒸发水分,降低棚内湿度,并利用空调的制冷作用抑制拱棚的温室效应,使棚内的温湿度保持与外界大气接近。

2009年5—7月,笔者正在利用这一方法进行潜水蒸发量的测定^[13],当笔者意识到降水去向研究的

重要性后,在测定了基本的蒸发数量后,及时转入了降水的模拟回收实验,针对降水水汽是否进入深层进行专门的研究。如果降水存在较大量水汽入地,那么在2008—2009年枯水背景下,土壤整体处于极干旱状态,较小的降水极易被土壤吸湿吸附,水汽入土后将难以完全回收。调查发现敦煌地区85%频次的降雨都小于5 mm,因此,首先以具有代表性的5 mm降雨进行测试,以确定降水蒸发基本特征、蒸发过程和降水是否能够完全回收。

实验回收的拱棚-空调系统的搭建与安装为:用聚氯乙烯塑料膜和竹材在戈壁上搭建一个密闭的拱棚,完全隔绝与外界大气的交流。拱棚呈半球形,高1.8 m,半径3.1 m,面积30 m²,体积30 m³,棚膜边缘埋入土壤30 cm;内置一台2 kW的春兰空调,自动调控棚内的温湿度(图2)。

同时,在棚内外的地上50 cm及棚内10、20、30、40 cm分别埋设HOBO温湿度监测仪,并在30 cm这一与棚膜埋深一致的关键层位埋设HOBO对照,每10 min记录1次数据。并通过烘干法检测洒水前后5、10、20、30、40、50、60 cm的土壤湿度(9:30)。一切就绪后,棚内均匀洒水5 mm(150 kg),通过空调的冷凝排水管将凝结水分导出棚外,用密闭塑料袋收集,用称重法监测日(8:30)蒸发量,并及时观测入渗深度。

该区水面蒸发实验表明,在当地7月份晴朗天气下可达8—22 mm^[22]。一般降雨过程有1—2 d的阴天,如果洒水后立即开启空调冷凝收集,水分极易蒸发而缺少入渗过程,实验可能失实。因此2009-07-06日洒水后为模拟自然蒸发状况,在当日和次日不开启空调,使水分能够有一个较充分的入渗。

另外,需要说明的是2010—2012年笔者在该实验点搭建同样大小的拱棚,用5 kW的空调对远离降雨的自然戈壁进行了长达3 a的监测。结果表明戈壁存在4.80 mm/a左右的稳定背景(潜水)蒸发。本文将结合该实验的部分结果加以分析。

3 结果与分析

3.1 降水蒸发量的收集与分析

7月8日、9日和10日前3d的蒸发水分的收集量分别为41.270、13.430、10.115 kg,之后的蒸发量如图3。98 d共收集水分152.896 kg,超过了原洒水量

(150 kg) 2.896 kg, 说明降水可完全蒸发。至 10 月 5 日完成降水回收后, 地表仍存在较稳定的蒸发, 表明

存在潜水来源。蒸发量受气候影响存在一定的波动, 阴天无蒸发。蒸发量随回收的完成逐渐减小。

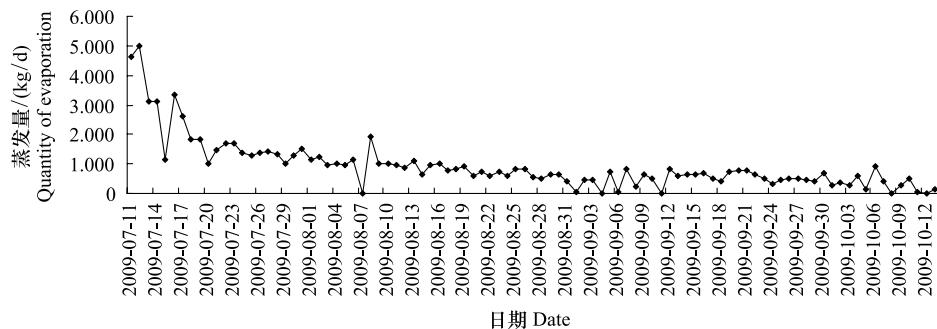


图 3 蒸发水分的收集过程

Fig.3 The evaporation water collecting process

回收数量充分表明, 5 mm 的降水可完全蒸发, 但完成的时间为 90 d, 远大于以前 5 mm 洒水实验 8 d 的实验结果^[11]。这固然有以前洒水实验未考虑阴天影响的原因, 但这样大的时间差异另有它因, 笔者结合拱棚内的具体情况加以分析。

3.2 棚内外的温湿度的对比分析

根据棚内外地上 50 cm 的 HOBO 监测, 棚内、外

的 RH 和 AH 分别为: 36.7%、24.6%; 8.4、4.9 g/m³, 外界大气湿度明显要低, 棚内较高的空气湿度是导致回收时间延长的主要原因。拱棚封闭使水分的蒸发受到较大的抑制, 尤其是洒水初期棚内(+50 cm) 湿度较高(图 4), 受空调功率的限制, 未能及时回收蒸发水汽, 使棚内湿度与外界一致。这与自然降水过程有较大的差异。

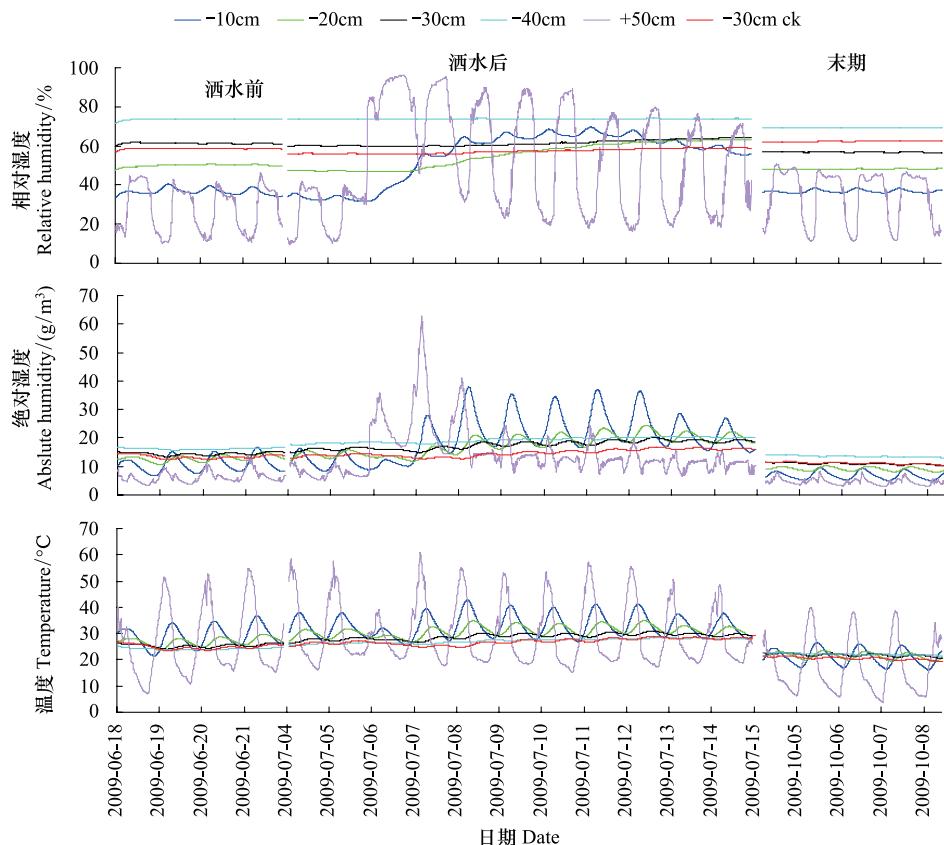


图 4 棚内洒水前后温湿度变化及与棚外 30 cm 的对比

Fig.4 Changes of temperature and humidity before and after water sprinkled in 30 cm soil of the greenhouse and the control

棚内洒水前、洒水后和蒸发末期土壤内的温湿度变化如图4。棚内洒水前的RH、AH较洒水后明显要小,而温度差异相对较小,主要受天气晴朗程度的影响。土壤入渗观测表明,降水入渗深度正好与空气湿度升高的层位与时间相吻合,虽然最大入渗深度为20 cm,但水汽的影响深度至少可到达30 cm,使其AH增高,说明有一定数量的水汽进入了下层。随着降水的蒸发和季节温度的下降,土壤内的温湿度都逐渐降低。但回收完成后湿度并未因降水的完全回收而突然降低,说明潜水支持作用的存在。受2009-09-30日0.76 mm降雨影响,棚外末期30 cm湿度高于棚内。

由于棚膜边缘入土30 cm,因此30 cm是土壤内外水分交流的关键层位。图4“洒水后”的10 d内30 cm棚内与棚外对照相比,AH平均高出3.30 g/m³,温度也明显高于棚外,这样可以确定有部分水分流失于棚外土壤。由于空调功率较小,空调未能完全抑制住拱棚的增温和封闭增湿效应。即使在洒水前的45 d,棚内30 cm的温度、RH和AH别高出外界对照0.53 °C、2.67%和1.04 g/m³。因此,纵使不做洒水模拟,棚内一直有部分源自地下的水分侧向流失于棚外^[13]。此次洒水后棚内30 cm全程的平均温度、RH和AH分别较棚外相应深度高1.46 °C、4.17%和2.50 g/m³。模拟降水使棚内湿度明显增大,导致较多的水分流失于棚外。因此,加大空调功率和棚膜的埋深深度,可有效降低水分的流失,缩短回收时间。

另外,空调风扇的循环量仅相当于0.1 m/s的风速,而棚外实际的风速为4.1 m/s,这也是导致降水回收时间加长的另一原因。在回收初期地面潮湿时风速对蒸发具有重要影响。另外棚膜的存在一定程度上降低了太阳辐射强度及温度,这也不利于水分的蒸发。

2010—2012年戈壁蒸发监测表明,潜水年蒸发量随季节温度的降低而降低。根据2009年监测的基础蒸发量^[13]和年蒸发趋势估算,即使在棚内较高湿度环境下,5 mm洒水至少应在洒水后的第40天左右完全蒸发。但为了收够尚差的27 kg水分,花费了50 d,实际上这些水分应当是背景蒸发,即来源于地下潜水的蒸发水分。这也就是说,至少有27 kg的水分流失于棚外。

在完成模拟降水的回收后(10-05—10-13),平均蒸发量为279 g/d,高于2010年同期的250 g/d。初步证明降水对潜水蒸发有较大的影响,具有一定的引导作用,可引导潜水蒸发量增大。需要说明的是2010年由于空调功率的加大,测定的蒸发量较2009年同期^[13]增大了44%。因此,若不存在降水的引导作用,降水蒸发完成后的蒸发量至少应明显小于2010年同期。拱棚的存在使降水蒸发完成后土壤形成了利于潜水蒸发的温湿度新边界条件。

当然,根据图3降水蒸发的递减特征,仍可怀疑最后的蒸发的存在是更早时期较大降水的遗存。但同样根据图3蒸发特征——降雨后的前11 d即可蒸发60%的水分,对2008—2009年的降水蒸发进行保守估算,结果表明,该拱棚在2009年洒水前不应当存在0.021 g m⁻² d⁻¹这样高蒸发量。而2010—2012年连续3 a测定的年蒸发量也应递减,且远小于远4.80 mm/a,而监测结果表明背景蒸发相当稳定。由此综合推断,戈壁土壤存在潜水来源与蒸发。

3.3 土壤水分的变化

从土壤水分含量看,棚内水分在洒水前与完成洒水收集后的土壤湿度如图5。

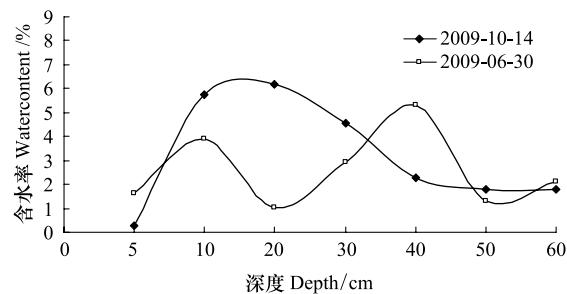


图5 棚内土壤在洒水前及回收完成后含水量状况

Fig.5 Soil water content status before sprinkling and after take-back water in the greenhouse

土壤含水量在洒水前的6月30日60 cm内的平均含水量为2.61%,回收完成后的10月14日为3.24%,不但未出现减少,反而出现了较明显的增加。这表明60 cm土壤得到了地下潜水的补充。

如果土壤水分完全来源于降水,那么其含水量必然受降水的主导与控制,当土壤经过长期的干旱蒸发过程后,土壤含水量将显著下降,极干土壤空气湿度也应随降水出现较大的波动,事实上图1中(2010-05-25—2010-05-31日共降水5.2 mm)的降雨在50 cm下看不到明显的升高,反而受温度降低的

影响,AH甚至有所降低;反过来,如本实验,若土壤水来源于降水,那么当完成降水回收后,土壤的水分含量至少而不应增加。这样,将深层土壤5—10月AH的增高(图1)理解为因温度增高,导致土壤结合水分(吸湿吸附水分、膜状水分和盐分结晶水)分解更为合理。

从图1的土壤温度的时空变化序列看,受外界气候的影响,土壤内不同层位的温度由上到下随时间存在年波动变化。在土壤开始由上到下的升温初期,结合水分分解,AH逐渐增大,但由于下层温度较高、AH更大,因此在温度升高过程中上层分解的结合水分大部分不能进入下层土壤,而只能蒸发于大气。当5月以后整体温湿度分布为上层高于下层时,根据水汽运移规律,上层土壤分解的水分会大量应向下层运转,但由于分解的水汽数量较大,向下的运转能力相对不足,因此有少量的水汽会逆向向上运转,进入日变温层(0—60 cm)的水分,在日温度影响下形成日波动蒸发。

当土壤温度随外界气候温度开始下降时,与升温过程的结合水分分解完全相反,随温度的下降土壤马上开始了对水分的吸收(吸湿吸附),但由于其下层温度的迟滞,此时下层仍有部分层位处在升温和分解水分过程,这部分分解形成的水汽不但可满足上层土壤因降温而吸收的水分数量,而且仍能穿透降温土层,形成较强的蒸发。因此,在5—10月温度完全逆转期500 cm整体上处于“水汽通胀”状态,形成了上层温湿度较高的分布格局,而并非降水水汽进入所致。因此,不能简单机械的看待水分分布,应从土壤温度在空间层位的时序变化中细致分析。10月至次年5月,深层上行水汽主要补充之前土壤蒸发流失的水分,蒸发的水分非常有限。

浅层土壤内含水量受日温度变化的影响,存在波动^[11-14],土壤空气湿度也随之波动,如图4。这种波动是土壤温度变化造成的,导致土壤水分的在上下空间来回波动运移。白天在太阳辐射下,土壤温度升高,结合水分分解形成水汽,水汽大部分会向温湿度较低的下层运移;夜间上层温度降低,下层的温湿度较高,水汽向上运移,恢复和补充白天高温下向下驱赶及蒸发的水分。0—60 cm的9.27 mm的水分就是这样在昼夜变化中上下来回运移,保持动态平衡的;年尺度(图5)上,深层水分的活动与浅层土壤

日尺度完全相似。

从5 mm模拟降水回收看,洒水后受外界干燥气候的影响,蒸发水汽绝大部分流失于大气,不存在降水通过水汽日波动大量“注入”深层的而不蒸发的情况,这可从洒水初期较大的回收量可以证明。2009年外部大气的AH不足6.0 g/m³,一直远低于50 cm下土壤湿度(图1),全年不存在大气水分进入深层土壤的可能;源自潜水的高浓度水汽明显抵制了降水水汽的大量进入。这对于莫高窟的文物保护来说,意味着进行窟顶防水处理不但不能从根本上预防水害,而且还有可能因表层的人为封闭而致使潜水蒸发受到抑制,进而增大进入洞窟内的水汽量,对洞窟文物产生不良的后果。因此,科学认识降水对深埋潜水蒸发的影响对极干旱区的文物保护、生态修复和水分循环等有重要意义。

4 结论

通过拱棚-空调法进行的5 mm降水模拟实验证明,极干旱区占莫高窟85%频次的5 mm的洒水能够完全蒸发,通过空调的凝结得到了充分的回收。土壤内温湿度监测表明,棚内温湿度较高,有较大量水分通过棚膜边缘侧向逸出到了棚外土壤,使洒水的蒸发回收时间延长。实验初步证明降水对深层水分的蒸发具有一定的引导作用。由于土壤温度的日波动,部分可降水通过水汽进入土壤深层,但实验排除了降水水汽大量“注入”深层不能蒸发的可能。在年尺度上,温度波动是引起土壤空气湿度变化的根源。5—10月土壤温度的升高导致了土壤结合水分的分解,使深层土壤“水汽通胀”,AH增高,抑制了降水水汽的进入,也使空气湿度呈现逆转分布;10月至次年5月,土壤深层温湿度较低,处于吸湿状态,吸收源自潜水的水分。降水模拟回收证明极干旱区存在潜水蒸发,降水可完全蒸发。在极干旱区包气带的水分循环是GSPAC向上运移,潜水蒸发使干旱戈壁形成了富盐土层,矿物成分透露了丰富的深层地矿信息。深埋潜水向上运转的确定在深埋潜伏矿物勘探和地球生态系统的物质循环中有重要意义。

References:

- [1] Chen X. Physical of Arid Land in China. Beijing: Science Press, 2010: 9-278.

- [2] Zhou A G, Sun Z Y. *Geo-ecology in Arid Regions: An Introduction*. Beijing: Higher Education Press, 2007: 46- 52, 22-41.
- [3] Ci L J, Yang X H. *Desertification and Its Control in China*. Beijing: Higher Education Press, 2010: 217-297.
- [4] Zhao W Z, Liu Y H. Precipitation pulses and ecosystem responses in arid and semiarid regions: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 243-249.
- [5] Liu Y B, Chen H S, Gao Q Z, Huang Z C, Yang S X, Lei Z D. Dynamic variations of soil moisture caused by rainwater infiltration in bare sandy land. *Journal of Desert Research*, 1995, 15(2): 143-150.
- [6] Wang X P, Li X R, Kang E S, Zhang J G, Zhou H Y, Yang S X, Lei Z D. The infiltration and redistribution of precipitation in revegetated sand dunes in the Tengger Desert, Shapotou, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1234-1241.
- [7] Song H Y, Liu C M, Zhang Y Q, Zhang X Y. Study on soil evaporation by using Micro-lysimeter. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (8): 114-118.
- [8] Zhang Y, Ding J L, Zhou P, Zhang X P. Model algorithm of soil moisture retrieval base on microwave remote sensing in arid regions. *Arid Land Geography*, 2011, 34(4): 671-678.
- [9] Liu X P, Zhang T H, Zhao H L, Yue G Y. Infiltration and redistribution process of rainfall in desert mobile sand dune. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(2): 166-171.
- [10] Guo Q L. *Origin of Water and Salts Responsible for Wall Paintings Disease at Dunhuang Mogao Grottoes* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [11] Li H S, Wang W F, Zhan H T, Qiu F, An L Z. New judgement on the source of soil water in extremely dry zone. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(1): 1-7.
- [12] Li H S, Wang W F, Zhang G B, Zhang Z M, Wang X W. GSPAC water movement by Greenhouse method in the extremely dry area. *Arid Land Geography*, 2010, 33(4): 572-579.
- [13] Li H S, Wang W F, Zhang G B, Zhao L Y. Measurement of deep buried phreatic water evaporation in extremely arid area. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6798-6803.
- [14] Li H S, Wang W F, Wu F S, An L Z. Salinity influence on soil moisture vertical distribution and transport in extremely dry area. *Soils*, 2011, 43(5): 809-816.
- [15] Пегров М П. *Desert of the World*. Translate by Hu M C, Li Y M. Beijing: China Environmental Sciences Press, 2010: 181-191, 141-161.
- [16] Wang X Q, Zhang B M, Liu X M. *Nanogeochimistry: Deep-penetrating geochemical exploration through cover*. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3): 101-112.
- [17] El Shazly E M, Barakat N, Eissa E A, Emara H H, Ali I S, Shaltout S, Sharaf F S. Geochemical exploration under extremely arid conditions. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 8(1/2): 305-323.
- [18] Liu X P, Zhang T H, Zhao H L, He Y H, Yun J Y, Li Y Q. Influence of dry sand bed thickness on soil moisture evaporation in mobile dune. *Arid Land Geography*, 2006, 29(4): 523-526.
- [19] Zhang Q, Wei G A. Analysis of inverse humidity and moisture respiration process of surface soil in desert near oasis. *Journal of Desert Research*, 23(4): 379-384.
- [20] Li X H. Study of the mechanism of moisture transport in desert unsaturated zone. *Coal Geology & Exploration*, 2004, 32(5): 38-39.
- [21] Zhang Y Z, Shen J M, Wang J Z. Reaserch progress of areration zone water. *Agro-Environment & Development*. 2009, (6): 94 [2012-06-25]. http://mall.cnki.net/onlineview/MagaView.aspx?fn=nhfz200906*1*
- [22] Li H S, Wang W F, Zhang G B, Qiu F, Zhan H T. The primary proof-testing of the evapotranspiration dissipative structure in the extreme dry area. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(6): 200-206.

参考文献:

- [1] 陈曦. *中国干旱区自然地理*. 北京: 科学出版社, 2010: 9-278.
- [2] 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: 46-52.
- [4] 赵文智, 刘鹤. 干旱、半干旱环境降水脉动对生态系统的影晌. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 243-249.
- [5] 刘元波, 陈荷生, 高前兆, 黄子琛, 杨诗秀, 雷志栋. 沙地降雨入渗水分动态. *中国沙漠*, 1995, 15(2): 143-150.
- [6] 王新平, 李新荣, 康尔泗, 张景光, 周海燕, 杨诗秀, 雷志栋. 腾格里沙漠东南缘人工植被区降水入渗与再分配规律研究. *生态学报*, 2003, 23(6): 1234-1241.
- [7] 孙宏勇, 刘昌明, 张永强, 张喜英. 微型蒸发器测定土面蒸发的试验研究. *水利学报*, 2004, (8): 114-118.
- [8] 张瑾, 丁建丽, 周鹏, 张喜英. 干旱区土壤水分微波遥感反演算法综述. *干旱区地理*, 2011, 34(8): 114-118.
- [9] 刘新平, 张铜会, 赵哈林, 岳广阳. 流动沙丘降雨入渗和再分配过程. *水利学报*, 2006, 37(2): 166-171.
- [10] 郭青林. *敦煌莫高窟壁画病害水盐来源研究* [D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [12] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 张正模, 王小伟. 用拱棚法对极干旱区GSPAC水分运转的分析. *干旱区地理*, 2010, 33(4): 572-579.
- [13] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 赵林毅. 极干旱区深埋潜水蒸发量的测定. *生态学报*, 2010, 30(24): 6798-6803.
- [14] 李红寿, 汪万福, 武发思, 安黎哲. 盐分对极干旱土壤水分垂直分布与运转的影响. *土壤*, 2011, 43(5): 809-816.
- [15] 彼得罗夫 M П. *世界荒漠*. 胡孟春, 李耀明, 译. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 181-191, 141-161.
- [18] 刘新平, 张铜会, 赵哈林, 何玉惠, 云建英, 李玉强. 流动沙丘干沙层厚度对土壤水分蒸发的影响. *干旱区地理*, 2006, 29(4): 523-526.
- [19] 张强, 卫国安. 邻近绿洲的荒漠表面上土壤逆湿和对水分“呼吸”过程的分析. *中国沙漠*, 2003, 23(4): 379-384.
- [20] 李训华. *沙漠包气带水分运移机理研究*. 煤田地质与勘探, 2004, 32(5): 38-39.
- [21] 张亚哲, 申建梅, 王建中. 包气带水研究进展. *农业环境与发展*, 2009, (6): 94 [2012-06-25]. http://mall.cnki.net/onlineview/MagaView.aspx?fn=nhfz200906*1*
- [22] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 邱飞, 詹鸿涛. 水分蒸散耗散结构的初步验证. *水土保持研究*, 2009, 16(6): 200-206.