

巴丹吉林沙漠高大沙山湿沙层水分特征

崔徐甲¹, 孙虎¹, 董治宝^{1,2}, 罗万银², 李继彦², 马延东¹, 李超¹

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 湿沙层水分及其运移过程是沙漠地区水循环的重要环节。巴丹吉林沙漠高大沙山湿沙层规模巨大, 本文对巴丹吉林沙漠高大沙山湿沙层水分特征进行了初步分析。结果表明: 湿沙层水分具有区域相似性特征, 含水量多小于3%; 吸附水和沙粒孔隙间的水汽是湿沙层水分两种主要的类型, 沙粒粒级级配影响吸附水水量变化, 两种水分在沙山垂直剖面上的运移过程及相互转化可能维持了湿沙层水分的相对平衡状态; 沙丘表层形成的“逆温层”以及由此引起的沿沙丘表层向沙丘内部的热量传递, 形成与湿沙层水分蒸发相反的空气运动方向, 使得湿沙层水分在夏季晴朗的白天受到保护; 夏季受温度梯度影响, 湿沙层中的水汽和膜状水向沙山底部缓慢运移; 冬季受温度梯度和水势的双重影响, 沙山底部潜水面附近的水汽和膜状水向上缓慢运移, 补给湿沙层; 湿沙层水分来源包括大气降水、大气水汽、凝结水及地下水等。

关键词: 湿沙层; 粒度; 水分运移; 高大沙山; 巴丹吉林沙漠

文章编号: 1000-694X(2017)02-0214-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00242

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

0 引言

干旱地区的水土流失、土地沙漠化、土地盐碱化等诸多环境问题, 都与区域水循环有着密切联系。在全球环境变化日益受重视的今天, 对于干旱地区水循环过程及水资源合理利用的研究显得愈发重要, 也成为全球变化研究的重要内容^[1-4]。沙漠地区水循环属于干旱地区水循环的组成部分。学者研究沙漠水循环的兴趣来源于沙丘表面生长的少量植被以及表面干沙层之下普遍存在湿沙层。这是因为沙漠地区常常被认为是水分的“负平衡”区域, 植被及湿沙层似乎又说明水分处于“正平衡”状态。而湿沙层特殊的位置, 即位于大气层与地下潜水面之间, 是大气水分与地下水之间水热交换的通道, 决定了其水分变化及运移规律是理解沙漠水循环过程的关键。

巴丹吉林沙漠(39°20′—42°N, 99°48′—104°14′E)位于内蒙古高原西部, 面积约49 000 km², 是中国第二大流动沙漠^[5]。沙漠南部以合黎山、北大山与黑山头山为界, 与河西走廊相隔, 东南部以雅布赖山脉为界, 与腾格里沙漠相隔, 西北部延伸至古鲁乃湖东岸, 北部延伸至拐子湖附近(图1)。该沙漠属极为干旱的温带大陆性气候, 多年平均降水量小于

90 mm, 年潜在蒸发量超过2 500 mm^[5-6], 沙漠东南部分布有世界沙海中独特的高大沙山与湖泊相间分布的地貌景观, 两者高差多在150~350 m, 最大超过400 m^[5]。沙山表面生长有稀疏的沙蓬、虫实、沙蒿及沙拐枣等植物^[7], 湿沙层普遍位于表面干沙层以下约20 cm(背风坡略厚)至地下潜水面(湖水面)之间^[8], 规模巨大。近年来, 研究者围绕该沙漠沙山区水循环过程, 开展了大量研究工作, 内容多集中在湖泊水来源、第四纪气候变迁与湖泊水面变化、湖泊与沙山关系及大气降水与地下水、湖泊水补给等方面^[9-20], 而对沙山湿沙层水分运移过程的研究还很少。沙山湿沙层作为联系大气水与地下水或湖泊水的纽带, 其垂直剖面上的水分运移规律应当作为该区水循环过程的一个重要研究内容。那么, 对沙山湿沙层而言, 会涉及两个关键性问题: ①干旱条件下如此规模巨大湿沙层得以存在的原因; ②湿沙层水分主要类型、影响因素、运移过程及来源。然而, 恶劣的自然环境以及交通、通信等条件的限制, 给该沙漠长期的野外水分观测带来了很大困难, 尤其是腹地地区。

在以往研究的基础上, 结合2013年9月对巴丹吉林沙漠腹地伊和吉格德湖区(39°46′12.17″N、

收稿日期: 2015-10-09; 改回日期: 2015-10-26

资助项目: 国家科技支撑计划农村领域科技基础性工作专项(2012BAD16B0303); 国家公益性行业(林业)科研专项(201304325); 中央高校基本科研业务费专项(GK201604011)

作者简介: 崔徐甲(1984—), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事风沙地貌研究。E-mail: cuixujia1984@163.com

102°09′05.33″E)沙山湿沙层水分的野外考察,对沙山湿沙层存在的两个关键性问题进行分析讨论,旨在为相关研究提供一定的科学参考和理论支持。虽

然沙山之间的丘间地也存在湿沙层,但由于距离地下潜水面近,水分多以毛管水的形式存在,与沙山湿沙层水分存在差异,未对该水分问题进行讨论。

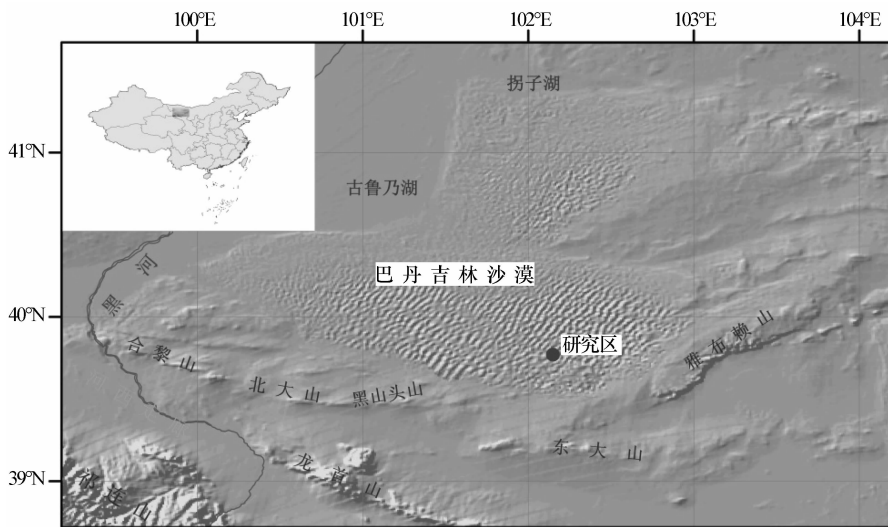


图1 巴丹吉林沙漠及野外考察点位置图

Fig. 1 The location of the Badain Jaran Sand Sea and field investigation area

1 沙山湿沙层含水量

湿沙层含水量测定,是研究沙山水分运移规律的前提条件。对巴丹吉林沙漠腹地伊和格德湖东侧沙山迎风坡不同部位剖面0~100 cm深沙层水分进行了野外采样与室内实验。采样时间为2013年9月11日上午,天气晴朗。野外选定的4个剖面(图2),表层为干沙层,基本不含水分,除B剖面湿沙层开始出现于10 cm外,其余均为20 cm。取样时从湿沙层开始,设置间隔10 cm,同一深度用铝盒取样两次,仅B剖面多采集了10 cm处的样品。共计样品74个,样品采集完成后,用天平(精度0.01 g)在野外及时称重。实验室水分测定采用了烘干称重法,水分含量以质量百分比表示,同时,对样品粒度进行测定。从图2可以看出:湿沙层含水量总体较低,不同剖面位置含水量略有差异。20~100 cm, A剖面含水量0.94%~1.88%,平均1.40%, B剖面1.51%~2.95%,平均2.19%; C剖面0.65%~1.91%,平均1.12%; D剖面1.62%~2.56%,平均2.09%; A、C剖面含水量低于B、D剖面,最大含水量出现在B剖面90 cm处,平均2.95%。各剖面在20 cm处的含水量大致相同,为1.74%~1.91%,平均1.82%,20 cm以下深度呈现不同的变化规律。

赵景波等^[16]测定了诺尔图湖东侧沙山湿沙层含水量,钻孔深度为5 m,其中,迎风坡下部湿沙层(0.2~5 m)平均含水量为1.74%~2.60%,迎风坡

中上部为1.24%~2.79%,并提出0.2~1.5 m为含水量较高但易变化的湿沙层,1.5 m之下为含水量较高、变化较小的湿沙层。马金珠等^[14]对巴彦尔湖东侧沙山迎风坡不同部位0~10 m钻孔沙层含水量的测定值多在1%~3%,并认为湿沙层水分在4 m左右逐渐趋于稳定。结合本文数据,沙山湿沙层含水量的区域差异不明显,多在3%以下,与中国荒漠带沙丘水分含量特征相同^[21]。然而,相比厚度约在150~350 m的湿沙层而言,这些剖面或者钻孔还很浅,或者缺少对沙山湿沙层水分时间变化方面的研究。Scanlon等^[22-23]通过野外监测及室内实验对美国德克萨斯州奇瓦瓦沙漠自然条件下不饱和带水分含量进行了长达3年的研究(剖面最深41 m,地下水面深度110~150 m),结果表明该沙漠0.3~41 m深沙层含水量月平均值在3年内基本无变化。奇瓦瓦沙漠多年平均降水量286 mm,但位于亚热带,蒸发更加强烈^[22],与巴丹吉林沙漠干旱的气候条件相似。对比奇瓦瓦沙漠,笔者认为虽然有少量降水会进入巴丹吉林沙漠沙山湿沙层,但水分通过再分布过程会很快达到平衡,这是由极为干旱的气候条件和强烈的蒸发过程决定的,因此,沙山湿沙层含水量也可能维持了一个长期的水分平衡状态,水分随时间的变化也不明显,尤其是较深的湿沙层。未来还需要更深的钻孔和更先进的水分观测仪器对沙山湿沙层水分含量及其时空变化进行更长期和详细的研究,但是恶劣的自然环境以及交通条件

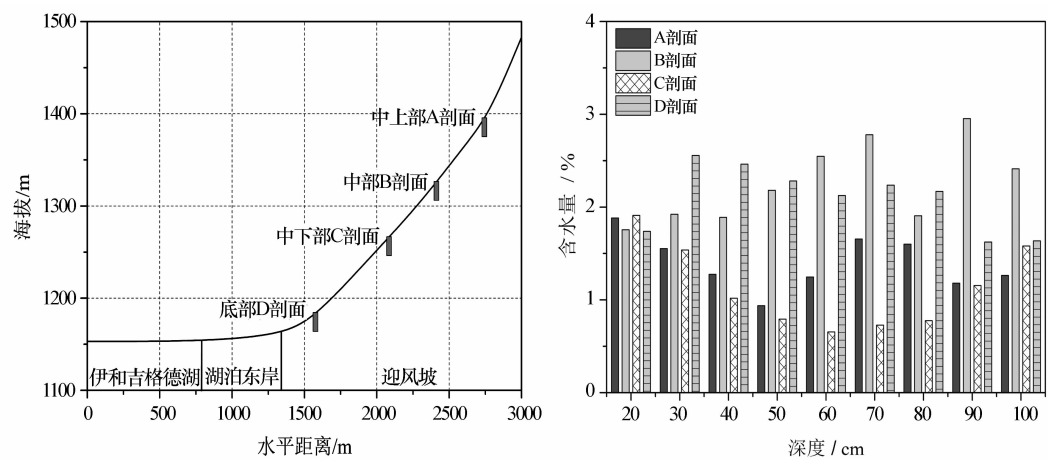


图 2 高大沙山湿沙层采样位置及含水量

Fig. 2 Sampling position and water content of wet sand layer for mega-dune

的限制给沙山水分研究带来了很大困难。

2 沙山湿沙层水分类型及影响因素

不同的水分类型具有不同的运移过程及影响因素，沙山湿沙层水分类型是研究者关心的问题之一。陈建生等^[12]认为沙山湿沙层是地下低温热水产生的水汽上升过程中遇到温度较低沙层并凝结在沙粒表面的结果。赵景波等^[16]认为沙山湿沙层水分主要以薄膜水的形式存在。对比其他干旱区沙漠，许廷官^[24]认为柴达木西部荒漠地区湿沙层水分运动主要是气态方式。一般来说，土壤水分通常包括吸附水（分吸湿水和膜状水）、毛细水、重力水以及土壤空气中所含水汽 4 种类型^[25-26]。就巴丹吉林沙漠而言，由于气候极为干旱，降水极其稀少，除有限的较强降水过程外，重力水在沙山中一般是不存在的。有关风积沙毛细现象实验表明风积沙最大毛细水上升高度不超过 1 m^[27]，如果将研究区伊和吉格德湖湖面作为地下水水平面，显然在与湖面相差约 330 m 的沙山内部，毛细水仅存在于沙山底部潜水面附近，大部分沙层是没有毛细水的，这也是由沙粒本身颗粒较粗的特性决定的。因此，沙山湿沙层中的水分应当有吸附水和存在于沙丘空隙间的水汽两种形式，两者间的相互转化及其运移过程是沙山非饱和带水分运动的基础，这与前面的观点是一致的，但略有差异。薄膜水属吸附水的一部分，也是沙粒表面吸附水汽的结果，其所受的分子引力较小，在 0.625~3 MPa^[25-26]，是可以缓慢移动的；同时，沙山中的水汽除源于地下水外，还可能包括大气中的水汽，因为水汽的运动主要是由于温度及水汽压梯度的共同影响^[25-26]。

吸附水与颗粒粒径关系密切，不同粒径沙粒表面吸附的水量及水膜厚度不同^[28]。湿沙层样品主要由细沙(2~3Φ)、中沙(1~2Φ)组成，其次为极细沙(3~4Φ)、粗沙(0~1Φ)，大多数样品不含粉沙(4~9Φ)、极粗沙(-1~0Φ)^[29]。对湿沙层含水量与粒径之间关系分析的结果如图 3 所示。可以看出，含水量受颗粒粒径影响，在总体含水量较低的状况下，沙山不同部位剖面湿沙层含水量的差异取决于颗粒的粒配组成。沉积物的平均粒径、中沙含量与湿沙层含水量之间有着极显著的负相关关系，即随平均粒径变大(Φ 值越大，粒径越小)、中沙含量增加，湿沙层中的含水量减小；而细沙、极细沙含量与湿沙层含水量之间有着极显著的正相关关系，即随细沙、极细沙含量的增加，湿沙层中的含水量增加。另外，含水量与粗沙含量间没有显著的相关关系。结合已有研究^[29]，沙山湿沙层含水量变化与沙粒粒级配变化呈现出很好的一致性特征，这个结果也进一步说明沙山湿沙层水分主要是颗粒吸附水汽的结果，水汽及吸附水在沙粒表面的相互转化及运移过程是沙山湿沙层水分运动的基础。然而，仍需要考虑更深层湿沙层水分与粒径的关系。Scanlon^[22]对奇瓦瓦沙漠的研究结果不仅表明该沙漠 0.3~41 m 深度水分含量月平均值在 3 年内基本无变化，还表明形成不同深度沙层含水量差异的主要影响因素是粒径。那么，对沙山更深层湿沙层水分而言，由于颗粒的粒径是确定的，水汽与吸附水在相互转化及运移的过程中可能维持了一个长期的平衡状态，不同深度湿沙层含水量的差异主要是颗粒粒级配差异影响的结果。文中沙山不同部位剖面含水量的差异也说明了这一点，但这个状况对潜水面附近的湿

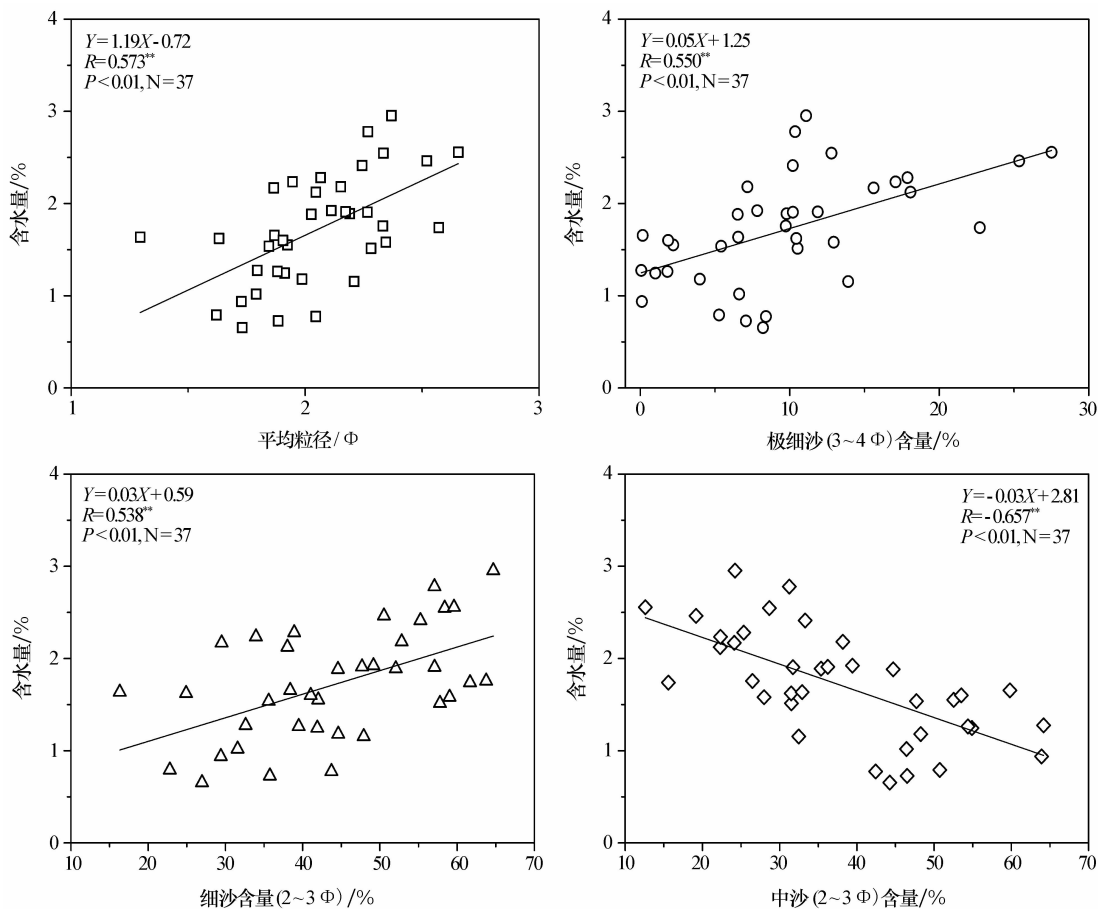


图 3 高大沙山湿沙层含水量与粒径的关系

Fig. 3 Relationship between water content and grain size of wet sand layer for mega-dune

沙层是不适用的,因为沙粒也具有微弱的毛细现象。总体来看,对于规模如此巨大的湿沙层,颗粒的粒级级配应当在湿沙层整个垂直剖面上的水分变化中起着最主要的作用,未来还需要对更深湿沙层粒径与水分间的关系进行分析。

3 湿沙层存在的原因——“逆温层”的保护作用

巴丹吉林沙漠气候极为干旱,潜在蒸发量大,那么,对如此大规模湿沙层存在原因的分析是十分必要的。拜格诺^[30]最早论述了湿沙层现象,他提出沙漠气温的变化对沙丘表层 20 cm 以下的影响微乎其微,沙丘内部温度的均匀性阻碍水分蒸发,使得水分得以保存数年。刘新平等^[31]研究了流动沙丘干沙层与土壤蒸发的关系,认为流动沙丘干沙层厚度是土壤水分蒸发的决定因素,随着干沙层厚度的增加,土壤蒸发量逐渐降低,两者之间存在显著的线性关系。湿沙层存在主要受沙漠表层气温和干沙层两方面因素影响。然而,对于非饱和带水分来说,驱动水分运动的主要因素是基质势梯度及重力势梯度^[25],

重力势梯度很小,往往忽略。显然,湿沙层水分的基质势要高于干沙层,在这种情况下,湿沙层水分运移进入干沙层后会被完全蒸发。热量是水循环和空气运动的主要驱动力,白天对流层中空气的垂直上升运动,是由于近地表空气从地面辐射中获取热量增温的结果,空气中的水分也被蒸发到高空,而当对流层中形成“逆温层”时,这个过程受到抑制。沙丘表面干沙层对湿沙层水分保护作用可能与“逆温层”具有相同的作用机理。即沙丘表面形成“逆温层”后,引起从沙丘表层向沙丘内部通过空气介质进行的热量传递,由于此时沙丘表层空气运动方向与水汽蒸发方向相反,从而抑制了湿沙层水分的蒸发,使得湿沙层水分得以保留,这对于其他沙漠湿沙层也是适用的。有关土壤水汽的研究也表明温度梯度的影响远远大于基质势梯度^[25-26]。

对沙漠地区温度日变化的研究表明:0~20 cm 深度是沙丘对外界气温变化最为敏感的区域,地温的日变化大,而 40 cm 深度沙层对外界气温变化不敏感,地温日变化很小^[18,32-33]。图 4 为塔克拉玛干沙漠腹地新月形沙丘表层地温的日变化图,从图中

也可以看出,沙丘表层“逆温”时段形成较大的温度梯度。李德帅等^[34]对陇中黄土高原 5、10 cm 深度土壤热通量的研究发现相似的作用过程,白天热量从表层土壤向下层土壤传递,夜间向大气传递热量,但夜间热通量值小于白天,与 5 cm 热通量相比,10 cm 热通量表现出一定的滞后性。但陇中黄土的干层集中在地表以下 5 cm。综合以上研究,我们认为沙丘表层干沙层形成“逆温层”是湿沙层水分得以保留的主要原因。虽然热量传递包括传导、辐射和对流 3 种形式,但前两者与物质本身有关,而后者由于沙物质颗粒较粗以及颗粒间空隙中有较多的空气,加强了空气向沙丘内部的移动。但夜间及冬季沙丘表层温度低于沙丘内部,不会有“逆温层”存在,因此,上述讨论结果在夏季晴朗的白天是适用的。

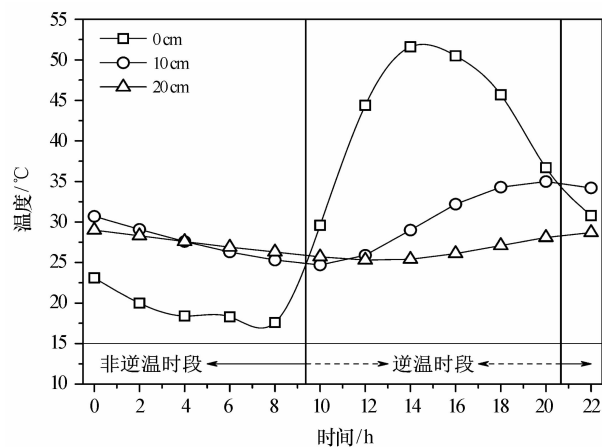


图 4 塔克拉玛干沙漠腹地新月形沙丘迎风坡 0~20 cm 地温变化(据金莉莉等^[32])

Fig. 4 Ground temperature change from 0 cm to 20 cm in the windward slope of barchan dune in the Taklimakan Desert

4 沙山湿沙层水分运移规律及来源

沙山湿沙层水分运移规律是学者最为关心的问题,对其运移规律的分析,也是理解湿沙层水分来源的关键。目前,就沙山湿沙层水分而言,不同学者直接或间接提出了两种观点。一种观点强调大气降水及降水的入渗。王涛^[9]提出沙山是大气降水的储存体,沙层透水性强,有利于降水的快速渗入,并在临界深度以下形成潜水源,进而补给地下水与湖泊。Yang 等^[13]提出当地降水对地下水补给有重要意义,湖水面高低的变化与全新世气候变化密切相关。赵景波等^[16]根据野外湿沙层剖面含水量特征,提出大气降水入渗到沙山沙层之后,形成薄膜水,薄膜水的运移可以补给地下水和湖泊。Wen 等^[18]研究了

诺尔图湖区沙山降水事件后沙层表面的感热和潜热通量变化,认为一部分降水可以渗入湿沙层,夜间大气负潜热通量值可能导致水汽在沙丘表面凝结,形成地下沙层孔隙水。另一种观点则认为沙山湿沙层水分来源于地下水,地下水汽上升为湿沙层提供了水分,大气降水对湿沙层水分或地下水、湖泊水没有明显补给作用。陈建生等^[10-12]提出发源于青藏高原黄河源头的鄂陵湖与扎陵湖的湖水通过深大断裂带补给巴丹吉林沙漠及周边地区,岩浆入侵造成深部断裂带中地下水的温度升高,地下低温热水产生的向上运动的水汽为沙山提供了水分。马宁等^[19]认为沙山经历 CP 和 OAM 事件后,降水分别约需 1~3 d 和 3~4 周被蒸发出地表,EP 事件后水分则需更长时间,沙山上的大气降水对地下水没有显著的补给作用。

虽然学者对于大气降水是否能补给沙山地下水或湖泊水还存在争议,但为沙山湿沙层水分运移规律及来源的分析提供了重要的参考依据。笔者认为对沙山湿沙层水分运移规律的讨论首先要分析水分运动的驱动力,但由于自然及交通条件的限制,对沙山而言,目前有关野外湿沙层水势及地温变化的长期观测还很少。Scanlon 等^[22-23]在研究瓦瓦沙漠自然条件下非饱和带水分运动时,就水分运移的驱动力问题提出了以下观点:①水势(基质势)由地表向内部增大,形成水分和水汽长期向上的驱动力,长时间干旱表层沉积物水势达-15.6 MPa,而降雨后表层水势最高,在湿润锋处急剧减小;相同深度夏季水势高于冬季。②夏季地温随深度的增加而减小,与水势梯度方向相反,形成热的水汽向下运动的驱动力;冬季地温随深度的增加而增加,与水势梯度方向相同,形成水分和等温水汽向上运动的驱动力。曾亦键等^[35]模拟了西北干旱、半干旱地区浅层包气带水汽昼夜运移规律,认为温度梯度是浅层包气带水汽运移的主控因素,当温度梯度向下时,水汽往地下运移,当温度梯度向上时,水汽往地表运移,土壤中的含水量减少。武秀珍等^[36]对人工沙丘水分运移机理进行分析,认为沙丘水分运动是势能梯度和温度梯度共同作用过程的耦合过程,降水事件后,当天气转晴,水分在水势和温度梯度的作用下向下运移。

综合以上有关湿沙层水分及其运移驱动力的分析,笔者认为在干旱的巴丹吉林沙漠,高大沙山湿沙层水分的运移规律不能以简单的水分入渗来进行描

述,而是受宏观和微观两方面作用影响。宏观方面,沙山湿沙层水分运移是水势梯度与温度梯度共同作用的结果,其在沙山整个垂直方向上的运移可能具有以下特点:①夏季沙山表层温度高于深部湿沙层,在温度梯度的影响下,水分以较热水汽的形式向沙山底部运动,并在低温处沙粒表面形成吸附水,其中的膜状水和水汽缓慢向下运移,对地下水 and 湖泊水有一定的补给作用。②冬季沙山表层温度低于深部湿沙层,受温度梯度和水势双重影响,沙山底部潜水面附近的水分以水汽的形式以向沙山上部运动,并在低温处沙粒表面形成吸附水,其中的膜状水和水汽缓慢向上运移,补给湿沙层水分。微观方面,沙山湿沙层水分运移过程还受沙粒的粒配组成、沙粒空隙度与空隙大小、吸附水的水膜厚度以及沙层水分饱和度等的影响。上述对沙山湿沙层水分宏观运移过程的讨论主要基于不包含下伏基岩地形的考虑,然而,Yang 等^[37]通过重力异常值的测定认为除受风力作用外,部分沙山包含有下伏基岩地形,进而影响沙丘形态。下伏基岩的存在可能阻断地下水与湿沙层之间的水分联系,形成湿沙层水分的异常区域。另外,沙山内部存在的钙质胶结层也可能形成隔水层,并随着沙山内部水分运移过程的积累以泉水的形式流出。未来还需要对沙山湿沙层水势及地温变化进行长期的定量观测来进一步分析沙山水分更为具体的运移过程。

巴丹吉林沙漠的降水集中在6—8月^[5],夏秋季节沙山湿沙层可以得到大气降水的补给。拜格诺^[30]最早指出沙漠湿沙层水分来源于沙漠中罕见的暴雨。曹文炳等^[38]研究了河西走廊流动沙漠半固定沙丘凝结水现象后,认为西北地区沙漠及荒漠化地区,包气带的水分来源除大气降水外,还包括凝结水。Agam 等^[39]、Kaseke 等^[40]对比了雾、露及大气水汽对沙漠地区土壤水分的影响,认为直接的大气水汽吸附是沙漠土壤水分的主要来源。结合本节相关论述,高大沙山湿沙层水分来源应当包括大气降水、大气水汽、凝结水及地下水等。

5 结论

巴丹吉林沙漠高大沙山湿沙层规模巨大,作为联系大气水与地下水的纽带,其水分及运移过程是该区水循环的一个重要环节,但目前对沙山湿沙层水分的研究还很少。本文对沙山湿沙层水分问题进

行了初步分析,得出的结论主要有:湿沙层水分显示出一定的区域相似性,含水量多低于3%,符合中国荒漠带沙丘水分含量特征;吸附水及沙粒空隙间的水汽是湿沙层水分两种主要的类型,吸附水水量变化主要受沙粒粒级级配影响,两者在沙山垂直剖面上运移过程及相互转化可能维持了湿沙层水分的相对平衡状态;沙丘表面形成的“逆温层”以及由此引起的沿沙丘表层向沙丘内部通过空气介质进行的热量传递,形成与湿沙层水分蒸发相反的空气运动方向,使得湿沙层水分在夏季晴朗的白天受到保护;夏季受温度梯度影响,湿沙层水分以较热水汽的形式向沙山底部运动,并在低温处形成吸附水,其中的膜状水与水汽共同向下缓慢运移,对地下水 and 湖泊水可能具有一定的补给作用;冬季受温度梯度和水势的双重影响,沙山底部潜水面附近的水分以水汽的形式向沙山上部运动,并在低温处形成吸附水,其中的膜状水与水汽共同向上缓慢运移,补给湿沙层;湿沙层水分来源包括大气降水、大气水汽、凝结水及地下水等。

参考文献:

- [1] 赵文智,程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. 科学通报,2001,46(22):1851—1857.
- [2] 陈发虎,黄伟,靳立亚,等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J]. 中国科学:地球科学,2011,41(11):1647—1657.
- [3] 《全球变化及其区域响应》科学指导与评估专家组. 深入探索全球变化机制——国家自然科学基金委重大研究计划的战略研究[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(6):795—804.
- [4] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报,2014,69(9):1295—1304.
- [5] Dong Z B, Wang T, Wang X M. Geomorphology of the megadunes in the Badain Jaran Desert[J]. Geomorphology, 2004, 60:191—203.
- [6] 马宁,王乃昂,朱金峰,等. 巴丹吉林沙漠周边地区近50 a 来气候变化特征[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1541—1547.
- [7] 崔徐甲,董治宝,逯军峰,等. 巴丹吉林沙漠高大沙山区植被特征与地貌形态的关系[J]. 水土保持通报,2014,34(5):278—283.
- [8] Dong Z B, Qian G Q, Lv P, et al. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on earth: China's Badain Jaran Sand Sea[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 120:20—39.
- [9] 王涛. 巴丹吉林沙漠形成演变的若干问题[J]. 中国沙漠, 1990, 10(1):29—40.
- [10] Chen J S, Li L, Wang J Y, et al. Groundwater maintains dune landscape[J]. Nature, 2004, 432:459

- [11] 顾慰祖,陈建生,汪集旻,等. 巴丹吉林高大沙山表层孔隙水现象的疑义[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 695—699.
- [12] 陈建生,赵霞,盛雪芬,等. 巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究[J]. 科学通报, 2006, 51(23): 2789—2796.
- [13] Yang X P, Ma N, Dong J F B, et al. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China[J]. Quaternary Research, 2010, 73: 10—19.
- [14] 马金珠,周向阳,王云权,等. 巴丹吉林沙漠南部高大沙丘包气带水分空间分布特征研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1365—1372.
- [15] 邵天杰,赵景波,董治宝,等. 巴丹吉林沙漠湖泊及地下水化学特征[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 662—672.
- [16] 赵景波,邵天杰,侯雨乐,等. 巴丹吉林沙漠高大沙山区沙层含水量与水分来源探讨[J]. 自然资源学报, 2011, 26(4): 694—702.
- [17] 郭永海,王海龙,董建楠,等. 关于巴丹吉林沙漠湖泊形成机制的初步看法[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2012, 37(2): 276—282.
- [18] Wen J, Su Z B, Zhang T T, et al. New evidence for the links between the local water cycle and the underground wet sand layer of a mega-dune in the Badain Jaran Desert, China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 371—377.
- [19] 马宁,王乃昂,赵力强,等. 巴丹吉林沙漠腹地降水事件后的沙山蒸发观测[J]. 科学通报, 2014, 59(7): 615—622.
- [20] 丁宏伟,郭瑞,田刚,等. 巴丹吉林沙漠湖泊与高大沙山形成的若干问题探讨[J]. 甘肃地质, 2015, 24(2): 9—17.
- [21] 冯起,程国栋. 我国沙地水分分布状况及其意义[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 225—236.
- [22] Scanlon B R. Water and heat fluxes in desert soil: I. field study[J]. Water Resources Research, 1994, 30(3): 709—719.
- [23] Scanlon B R, Milly P C D. Water and heat fluxes in desert soil: II. numerical simulation[J]. Water Resources Research, 1994, 30(3): 721—733.
- [24] 许廷官. 柴达木西部荒漠地区沙地湿沙层水分来源问题[J]. 南京大学学报:地理学, 1963, 1: 54—59.
- [25] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 98—118.
- [26] 关连珠. 普通土壤学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007: 84—86.
- [27] 程哲,裴敦思. 风积砂毛细现象的试验研究[J]. 地下水, 2012, 34(2): 14—17.
- [28] 罗戴. 土壤水[M]. 巴逢辰,乔樵,孙励敬,等译. 北京: 科学出版社, 1964: 55—58.
- [29] 崔徐甲,董治宝,罗万银,等. 巴丹吉林沙漠高大沙山沉积物粒度特征及其与植被、地貌的关系[J]. 中国沙漠, 2015, 35(4): 857—864.
- [30] 拜格诺. 风沙和荒漠沙丘物理学[M]. 钱宁,林秉南,译. 北京: 科学出版社, 1959: 227—279.
- [31] 刘新平,张铜会,赵哈林,等. 流动沙丘干沙层厚度对土壤水分蒸发的影响[J]. 干旱区地理, 2006, 29(4): 523—526.
- [32] 金莉莉,何清,李振杰,等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙丘温度特征浅析[J]. 干旱气象, 2010, 28(2): 134—141.
- [33] 韩晓. 巴丹吉林沙漠腹地土壤温度观测及其变化特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [34] 李德帅,王金艳,王式功,等. 陇中黄土高原土壤水分变化特征及其机理分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 140—147.
- [35] 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.
- [36] 武秀珍,张惠昌. 人工沙丘水分运移机理的研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1996, 32(3): 127—131.
- [37] Yang X P, Scuderi L, Liu T, et al. Formation of the highest sand dunes on Earth[J]. Geomorphology, 2011, 135: 108—116.
- [38] 曹文炳,万力,周训,等. 西北地区沙丘凝结水形成机制及对生态环境影响初步探讨[J]. 水文地质工程地质, 2003(2): 6—10.
- [39] Agam N, Berliner P R. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments—A review[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65: 572—590.
- [40] Kaseke K F, Mills A J, Brown R A, et al. Method for direct assessment of the "non rainfall" atmospheric water cycle: input and evaporation from the soil[J]. Pure and Applied Geophysics, 2012, 169: 847—857.

Wet Sand Layer Moisture of Mega-dunes in the Badain Jaran Sand Sea

Cui Xujia¹, Sun Hu¹, Dong Zhibao^{1,2}, Luo Wanyin², Li Jiyan², Ma Yandong¹, Li Chao¹

(1.College of Tourism & Environment Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China; 2.Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Wet sand layer moisture and its movement process is the important link for water cycle in desert areas. The mega-dunes in the Badain Jaran Sand Sea contain very huge wet sand layer. The result showed that there was a regional similarity characteristics for wet sand layer moisture with water content less than 3%. Adsorbed water and water vapor existed in the pore among sand grains were the two primary water types for wet sand layer, and their movement process and reciprocal transformation along the vertical section of mega-dunes might maintain the relatively poised state of wet sand layer moisture, and grain size distribution had important influence on adsorbed water and its water content. The formation of "thermal inversion layer" in the dune surface layer caused the movement of heat and air to the dune interior, which had an opposite air flow direction with the moisture evaporation of wet sand layer. This was why wet sand layer moisture could maintain in sunny days of summer. Affected by temperature gradient in summer, the water vapor and film water contained in wet sand layer moved slowly toward the bottom of the mega-dunes. Under the dual influence of temperature gradient and water potential gradient in winter, the water vapor and film water near phreatic surface in the bottom of mega-dune moved upward to the top of the mega-dunes and recharged the wet sand layer. The wet sand layer could get recharged water from atmospheric precipitation, water vapor, condensate water and underground water.

Key words: wet sand layer; grain size; moisture movement; mega-dune; Badain Jaran Sand Sea