

赵景波, 陈志青, 马延东, 等. 巴丹吉林沙漠沙山区高含量薄膜水与水分平衡研究[J]. 地理科学, 2017, 37(6): 960-966. [Zhao Jingbo, Chen Zhiqing, Ma Yandong et al. Film Moisture with High Content in Sand Layer and Its Movement in Mega-dune of the Badain Jaran Desert. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(6): 960-966.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.06.019

巴丹吉林沙漠沙山区高含量薄膜水与水分平衡研究

赵景波^{1,2}, 陈志青¹, 马延东¹, 罗小庆¹, 陈宝群¹, 邵天杰¹

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘要:通过野外实地考察和实验分析,在巴丹吉林沙漠的呼和吉林湖东沙山、呼和吉林湖西沙山和伊利克敖包沙山斜坡上发现了高含量薄膜水和带状分布的灌木植被。分析表明:①沙山沙层中出现了含量在3%~5%之间、占据厚度为0.5~3.0 m之间的高含量薄膜水,并出现了一部分水分含量大于5%的重力水,这在极端干旱的沙山斜坡沙层中是非常少见的。②沙层中的含水量垂向分布与重力水的存在指示,在当年雨季末期,大气降水就完全能够通过沙层入渗达到2~4 m或更大深度,从而避免了蒸发作用的消耗,确保了沙层水分能够通过入渗向深层运移。③沙山沙层中高含量薄膜水和重力水的存在以及灌木植被带的发育充分证明,该区大气降水在经过蒸发与蒸腾消耗之后,仍有剩余的水分渗入地下,显示了沙山区沙层水分为明显的正平衡。高含量薄膜水的存在和带状植被的发育的表明大气降水至少是该区地下水和湖水的重要补给来源之一。④沙山表层1~4 m深度范围有时存在含量大于5%的重力水,表明沙山表层水分运移动力很强。沙层入渗率高,沙层水受蒸发影响的深度小,利于大气降水向地下水的转化,这也是该区大气降水能够补给地下水的重要原因。

关键词:高含量薄膜水;带状植被;水分平衡;运移动力;湖水来源;巴丹吉林沙漠

中图分类号:S1521.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2017)06-0960-07

关于沙漠地区沙层中的含水量,前人已做了较多工作^[1-4]。目前已认识到,沙漠地区2 m以上沙层含水量一般可分为3层,第1层为上部的含水量很低、厚度一般小于20 cm的干沙层^[1-3],第2层是中部的20~100 cm深度之间含水量容易变化的活跃层,第3层是位于约100 cm之下的含水量较高、变化较小的稳定层^[2]。研究表明,沙漠地区沙层含水量通常很低,干沙层含水量常常小于1%^[1-3],而湿沙层含水量大多在1%~5%之间^[3]。虽然过去对沙漠区沙层含水量进行了一些研究,但对2 m以下深层水分研究较少。

关于巴丹吉林沙漠沙层含水量研究还很少,对沙层2~4 m深度含水量几乎没有开展研究。该区发育了全球高差最大的沙山^[5],而且沙山区湖泊众多,自然景观独特。该区湖水的来源是近年来学界争论的焦点。许多学者认为,该区湖水来自大气降水的入渗^[6,7],但目前尚缺少直接的证据;也

有研究者认为,该区湖水主要是通过深大的断裂从青藏高原输送来^[8],然而这一观点受到了国内研究者的强烈反对。本文通过采访调查和对巴丹吉林沙漠大沙山斜坡4 m深度范围沙层含水量的采样分析,研究该区大气降水对地下水与湖水补给的可能性和水分平衡。

1 研究区概况与采样点设置

巴丹吉林沙漠位于内蒙古自治区阿拉善右旗境内,风沙地貌类型复杂,沙丘类型多。研究区年平均气温为约7~8℃,年降水量约105 mm^[9]。

通过野外考察,我们在该区大沙山斜坡上发现了呈带状分布的灌木植被带。选择了带状植被发育好的呼和吉林湖东沙山,呼和吉林湖西沙山和伊利克敖包沙山进行采样分析。沙山与采样点的海拔、经纬度、采样间隔等列于表1。呼和吉林湖东沙山采样点与呼和吉林湖西沙山采样点相距

收稿日期:2016-06-17; **修订日期:**2016-09-23

基金项目:教育部“长江学者”特聘教授项目(810803)、国家自然科学基金项目(40672108)资助。[Foundation: Ministry of Education “The Yangtze River Scholar” Distinguished Professor Project(810803), National Natural Science Foundation of China(40672108).]

作者简介:赵景波(1953-),男,山东滕州人,博士,教授,博士生导师,主要从事第四纪与自然地理研究。E-mail: zhaobjb@snnu.edu.cn

表1 巴丹吉林沙漠沙山背风坡采样点概况
Table 1 A survey of sampling points in megadunes of Badain Jaran Desert

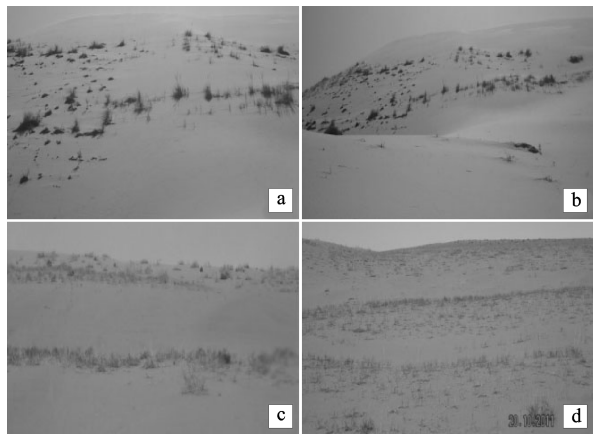
沙山名称	沙山海拔(m)	经纬度	剖面数(个)	采样点海拔(m)	样品间隔(cm)	样品总数(个)
呼和吉林湖东沙山	1671	39°51'N, 102°30'E	6	127,112,231,201	10	240
呼和吉林湖西沙山	1584	39°52'N, 102°27'E	4	12,451,217	15	108
伊力克敖包沙山	1457	39°37'N, 102°18'E	4	13,121,390	10	160

约4.5 km,这2个采样点与伊力克敖包沙山采样点相距约25 km。在每个植被带采集了2个钻孔剖面的样品,钻孔深度一般为4 m,钻孔间隔为约5 m。上述钻孔剖面采样时间是在雨季之末的9月中旬。利用轻便人力钻采集沙层样品,利用烘干称重法测定沙层含水量。

2 结果与分析

2.1 灌木植被的带状分布

野外调查得知,在沙山区有时可见植被带状分布。植被带不仅分布在沙山下部,而且在沙山的中部和上部有时也存在(图1)。带状植被的植物组成以灌木为主,分布宽度一般为2~6 m。植被带多见于沙山中下部地形较平缓处,但也见于坡度较大地段(图1a,b)。



注:a和b为诺尔图湖东沙山植被的带状分布;c和d为伊力克敖包与呼和吉林湖西沙山植被带。

图1 大沙山植被的带状分布
Fig.1 Zonal distribution of vegetation in the mega-dunes

植被带的发育要求沙层具有较高的含水量,植被带的分布能够说明2个问题,一是表明大气降水向下入渗到达了蒸发影响深度以下的沙山的较深处,二是表明植被带分布的沙层水分有一定富

集,含水量较高决定了植被的发育。

2.2 呼和吉林湖东沙山背风坡沙层含水量

由呼和吉林湖东沙山背风坡6个剖面的沙层含水量测定结果(图2)可知,各钻孔沙层含水量变化趋势很类似。a孔的40个样品的含水量在0.2%~6.0%之间,平均为3.0%。根据含水量变化,可将a孔剖面分为3个层。第1层位于0~1 m之间,含水量最低,在0.2%~2.8%之间,平均为2%。第2层位于1~2.2 m之间,含水量在2.8%~6.0%之间,含水量最高,平均为4.3%。第3层位于2.2~4.0 m之间,含水量居中,在1.8%~3.5%之间,平均为2.8%。b孔40个样品的含水量在0.7%~4.1%之间,平均为2.3%。b孔1~2.2 m之间含水量在2.6%~4.1%之间,平均为3.3%。c孔40个样品含水量变化在0.5%~5.9%之间,平均为3.0%。c孔1~4.0 m之间含水量较高,平均含量大于3.3%。d孔40个样品含水量变化与c孔相似,含量在0.2%~5.2%之间,平均为3.0%,在1.1~4.0 m之间含量大于3%。e孔40个样品含水量变化在0.2%~5.0%之间,平均为3.0%。该孔1~4.0 m之间,含水量在2.1%~5.0%之间,平均大于3.1%。f孔40个样品含水量变化在0.2%~4.2%之间,平均为2.8%。该孔0.6~3.9 m之间含水量平均大于3%。

由上述可见,呼和吉林湖东沙山背风坡沙层含水量有2个特点:①沙层含水量较高,6个钻孔剖面中都有含水量大于3%~5%的沙层出现;②在a孔、c孔和d孔剖面中出现了在极端干旱的沙漠区很少见的含量大于5%的重力水。

2.3 呼和吉林湖西沙山和伊力克敖包沙山沙层含水量

由呼和吉林湖西沙山背风坡4个剖面的沙层含水量(图3a, b)得知,a孔的27个样品含水量变化在0.2%~5.0%之间,平均为2.6%。该剖面1.8~4 m之间含水量在3.7%~5.0%之间,平均含量接近4.0%。b孔27个样品含水量在0.2%~4.8%之间,平均为2.8%。该孔1.6~4.0 m平均含水量略大于

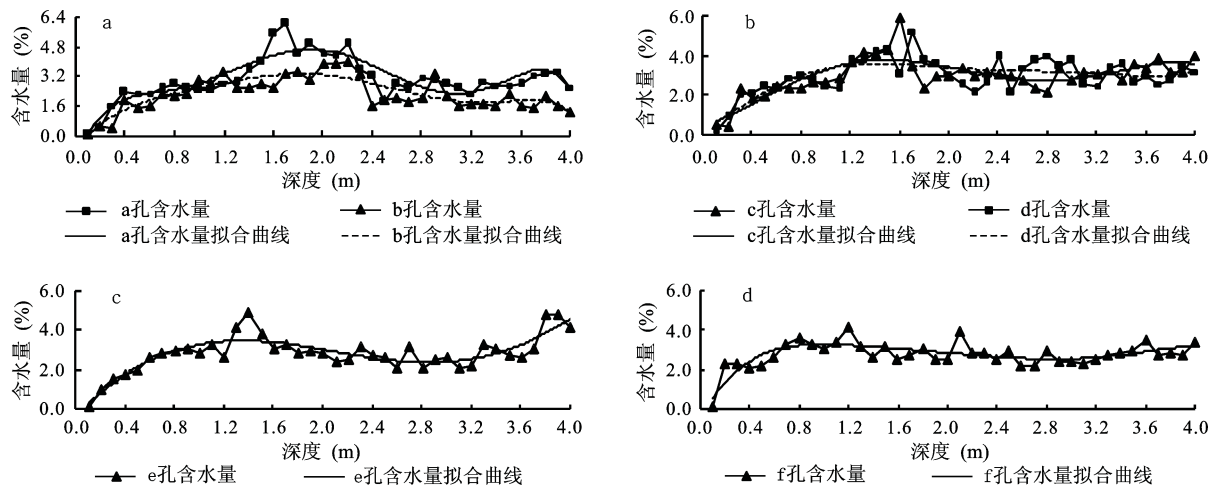
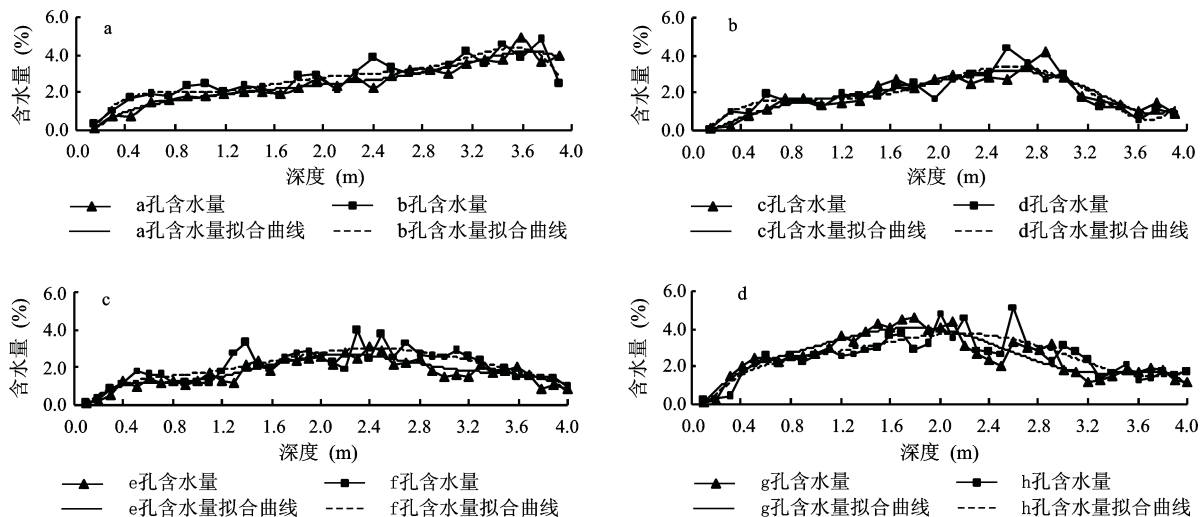


图2 呼和吉林湖东大沙山背风坡沙层含水量及拟合曲线

Fig.2 Moisture content and its fitting curves in sand layer on lee-side of a mega-dune at eastern Huhejilin Lake



注:a、b为呼和吉林湖西沙山背风坡采样点;c、d为伊利克敖包沙山采样点。

图3 沙山背风坡沙层含水量及拟合曲线

Fig.3 Moisture content and its fitting curves in sand layer on lee-side of mega-dune

3%, 3~4 m之间平均含水量为4.0%。c孔和d孔含水量也较高, 1.5~2.8 m之间含水量略大于3%。

伊利克敖包沙山背风坡4个剖面的沙层含水量测定(图3c, d)显示, 4个钻孔剖面都存在含水量大于3%的层位。其中e孔含水量大于3%的沙层厚度很小, f孔含水量大于3%的层位在1.2~3.0 m之间, 厚度1.8 m。g孔与h孔含水量大于3%的沙层在1~3 m之间, 厚度为2 m左右, 平均含水量分别为3.3%和3.6%。

上述8个钻孔沙层水分含量测定表明, 8个剖面均有含水量大于3%~5%的较高含水量沙层出现, 一

般出现在1~3 m或4 m之间, 厚度一般在1~3 m之间。

3 讨论

3.1 沙山高含水量薄膜水与重力水的形成

在年降水量不足100 mm的极端干旱的荒漠地区, 沙层中的水分含量一般低于2%^[1,10], 甚至低于1%。而细砂为主的沙层中薄膜水最高含量一般为5%, 高于5%的水分含量属于重力水^[1,10]。因此, 沙层中3%~5%之间的水分已是含量很高的薄膜水了, 我们称之为高含量薄膜水。高含量薄膜水的划分对揭示大气降水对地下水的补给有重要

作用。高含量薄膜水层一般在年均降水量 150~200 mm 之间的固定沙丘分布区较为常见^[3,10],在年降水量 100 mm 左右的沙漠区很少存在。过去缺少对巴丹吉林沙漠沙山区 1~4 m 深度含水量研究,也就没有认识到高含量薄膜水的存在。研究区高含量薄膜水存在可能是降水较为集中的结果。观测表明,研究地区确实存在能够为深部沙层水分提供来源的有效降水,单次降水量可达 25 mm 左右^[10]。从高含量薄膜水层位有生长较好的灌木植被带(图 1)推断,高含量薄膜水是多年存在的。沙山沙层缺少隔水层,高含量薄膜水的形成是含量大于 5% 的重力水分在向下运移时其含量降低形成的。在所研究的剖面中,在 1~3 m 深度范围内还残留少量含量大于 5% 的重力水(图 2,图 3),也表明该区高含量薄膜水是由重力水转变而来的。

研究区沙层中存在含水量大于 5% 的重力水(图 2 和图 3)。这些剖面中的重力水分布在 1~2 m 深度范围的沙层中,考虑到在这一深度范围内没有隔水层存在,因此可以确定分布在 1~2 m 深度范围内的重力水是大气降水入渗补给的结果。沙山沙层中存在重力水是该区存在单次降水量大于 15 mm 的有效降水决定的。

3.2 高含量薄膜水和重力水运移对湖水的补给动力

研究表明,黄土高原现代和过去的大气降水主要是以薄膜水的形式通过入渗补给地下水的^[11~14]。薄膜水的运移是受水膜厚度的控制,即从水膜较厚处向水膜较薄处运移。薄膜水含量越高,水膜厚度越大,与下部层位薄膜水的水膜厚度差就越大,运移就越快。黄土中的薄膜水研究表明,含量很低的薄膜水运移非常缓慢,高含量薄膜水运移较快,每年移动距离可达 2 m 以上^[11,12]。沙山沙层中高含量薄膜水与相邻下伏低含量薄膜水之间具有明显的水膜压力差,这是沙层薄膜水向下运移的动力。目前国内外尚未见对薄膜水运移动力划

分的成果发表,为了认识薄膜水运移动力和对地下水的补给作用,对薄膜水运移动力进行划分是很必要的。根据我们对土壤水的多年研究^[11,12]可知,薄膜水动力强弱一是取决于其含量的多少或水膜的厚度,二是取决于薄膜水在土层中占据的厚度大小。在分析以往研究成果的基础上,对薄膜水运移动力和对地下水的补给作用进行划分(表 2)。表 2 显示,沙层中较高含量的薄膜水能够为地下水提供有效补给,高含量薄膜水占据厚度越大,补给动力越强;含水量低于 2% 的薄膜水为极弱动力或不能成为补给动力,水分含量在 2%~3% 之间的薄膜水具有弱运移动力,水分含量在 3%~4% 之间的薄膜水具有中等运移动力,水分含量在 4%~5% 之间的薄膜水具有强运移动力,水分含量大于 5% 的重力水具有极强运移动力(表 2)。根据研究区高含量薄膜水含量在 3%~4% 之间偶尔在 4%~5% 之间(图 2,图 3)、占据厚度一般为 2 m 左右(图 4)确定,该区薄膜水运移动力为中等或较强动力,能为地下水和湖水提供较强的补给动力,当年入渗深度至少可达 2~4 m。

如果高含量薄膜水占据厚度很小且在蒸发影响的深度范围内,这种高含量薄膜水通常不能构成补给动力,只有高含量薄膜水占据厚度较大或位于蒸发影响带之下,这种高含量薄膜水才能成为地下水的较强补给动力。如后所述,沙层受蒸发影响的深度只有 0.4 m,而高含量薄膜水分布深度显著大于受蒸发的深度,所以研究区高含量薄膜水能够成为补给地下水的较强动力。此外,研究区有些剖面中还存在含水量大于 5% 的重力水的补给动力。根据研究剖面当年入渗深度至少达到了 2~4 m,快速入渗避免了蒸发作用造成的损失,利于大气降水向地下水转化。

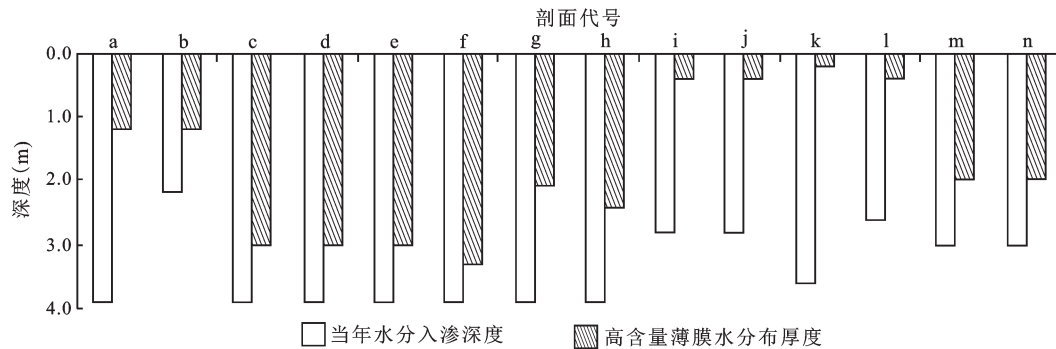
3.3 沙山区大气降水当年入渗的深度

根据沙层中重力水的分布,可以判断大气降

表 2 包气带沙层水分含量与运移动力划分

Table 2 Division of moisture content and transport dynamics in sand air zone

沙层水分运 移动力划分	水分运移 极强动力	水分运移 强动力	水分运移 中等动力	水分运移 弱动力	水分运移 极弱动力
沙层含水量	> 5%	4%~5%	3%~4%	2%~3%	< 2%
水分类型	重力水	高含量 薄膜水	高含量 薄膜水	低含量 薄膜水	极低含量 薄膜水
补给类型	极强补给	强补给	较强补给	弱补给	极弱或无补给
占据厚度	约 2 m 或更大	约 2 m 或更大	约 2 m 或更大	约 2 m 或更大	可大可小



注:a~f为呼和吉林湖东沙山6个剖面;g~j为呼和吉林湖西沙山4个剖面;k~n为伊力克敖包沙山4个剖面。

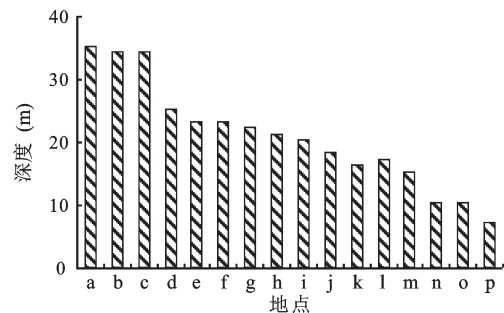
图4 沙山区高含量薄膜水当年雨季末期入渗深度和高含量薄膜水分布厚度

Fig.4 Infiltration depth of film water at the end of rainy season and film moisture thickness with high content

水当年入渗深度。重力水是运移速度最快的水分,在黄土高原地区的黄土层中,丰水年大气降水产生的重力水在当年的入渗深度可达4 m多^[11,12]。沙层孔隙连通性好,其中的重力水运移更快。在沙层中的重力水运移过程中,由于下部沙层含水量低,这使得重力水在入渗过程中与低含量薄膜水混合而使其含量变低,并逐渐转化为薄膜水,所以重力水在沙层中存在的时间过程是短暂的。在黄土高原地区的正常降水年,重力水主要在当年雨季存在,当年年底就基本转变成为含量较低的薄膜水^[11,12]。在我们研究的沙山区剖面中,2~3 m深度范围内常常残留含量大于5%的重力水(图2,图3),这表明当年的大气降水通过入渗已经到达了这一深度。由此可以确定,沙山区当年大气降水在雨季之末入渗深度至少达到了2~3 m的深度。

3.4 干沙层指示的蒸发深度

研究表明,风沙沉积通常以细砂为主^[16-19],其次为中砂。巴丹吉林沙漠区风沙沉积粒度较其他沙漠略粗,细砂与中砂含量接近^[20]。细砂和中砂为主的沙层毛管孔隙发育差,蒸发作用影响的深度很小。对干沙层分布深度的测定表明,巴丹吉林沙山区干沙层分布的深度一般为0.2~0.3 m(图5)。根据干沙层的分布深度得知,研究区沙层蒸发影响深度一般小于30 cm,其它沙漠区沙层蒸发深度类似^[3],一般小于0.4 m。因此,大气降水入渗到达40 cm之下就不受蒸发作用影响了,就能够成为地下水的来源。由此可见,沙漠中的干沙层对渗入其下的水分具有有效的保护作用,阻碍了30 cm或40 cm以下沙层水分的蒸发损失,起到了增加水分,有效入渗的作用,促进了大气降水向地下



注:a~c为巴丹吉林沙山陡坡;d~f为巴丹吉林沙山高地;g~i为丹吉林沙山平地;j~l为巴丹吉林沙山洼地;m,n为古尔班通古特沙漠与乌兰布和沙漠干沙层;o,p为库不齐漠与乌素沙地干沙层

图5 西北沙漠干沙层分布深度

Fig.5 Distribution depth of dried sand layer in deserts of northwestern China

水的转变。

3.5 高含量薄膜水与重力水指示的水分平衡及湖水来源

土壤水分平衡的构成包括输入量、储存量和输出量^[14]。该区沙层水分输入量为大气降水,为储存于沙层中前一年的水量,输出量包括蒸发与蒸腾量,一般没有地表径流。当输出量大于输入量时为正平衡,反之就为负平衡。由于该沙漠区降水少,蒸发量很高,所以人们多认为这样的地区是水分负平衡的地区。然而下面3条证据显示,大沙山区确实存在水分的正平衡。在不受蒸发作用影响的地表之下1~2 m沙层中存在的含量大于3%的高含量薄膜水(图2,图3),指示该区大气降水对地下水的补给动力较强,大气降水在经过蒸发、植物蒸腾之后,仍有一些剩余的水分入渗达到了蒸发作用影响的深度之下,这部分水分完全能够成为

地下水的补给来源。在有些沙层剖面中蒸发影响深度之下存在含量大于5%的重力水(图2,图3),指示大气降水可以在沙层上部运移很快动力很强,也指示大气降水完全能够补给地下水。在沙山上部、中部、下部可见灌木为主的植被的带状分布(图1),这指示大气降水渗入地下是多年经常发生的,而且大气降水已经入渗到达了沙山的中下部。

4 结论

1) 巴丹吉林沙山区存在含水量为3%~5%的高含量薄膜水,占据厚度一般为0.5~3.0 m,高含量薄膜水层位有生长较好的灌木植被带发育,表明高含量薄膜水不是短暂出现的现象,而是多年经常出现的自然现象。沙山区高含量薄膜水是由重力水在向下运移过程中因含量降低转变而成的。

2) 该区薄膜水运移动力较强,能够对该区地下水形成较强动力的有效补给。沙山上部有时存在含量大于5%的重力水,表明沙层上部的水分运移动力很强。

3) 该区大气降水入渗较快,当年入渗深度至少达到了2~4 m,快速的入渗避免了蒸发作用造成的损失,利于大气降水向地下水转化。

4) 沙层水分确实存在水分正平衡,表明在极端干旱的高大沙山区,大气降水经过蒸发和蒸腾的消耗之后,还有剩余的水分通过入渗向纵深运移,并至少可以成为该区湖水的补给源之一。

5) 沙山区存在有效降水,沙层水受蒸发影响的深度小,利于大气降水向地下水的转化,这是该区大气降水能够补给地下水的主要原因。

参考文献(References):

- [1] 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.[Feng Qi, Cheng Guodong. Moisture distribution and movement in sandy lands of China. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 225-236.]
- [2] 郭柯,董学军,刘志茂.毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点——兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J].植物生态学报,2000,24(3):275.[Guo Ke, Dong Xuejun, Liu Zhimao. Characteristics of soil moisture content on sand dunes in Muus sandy grassland: why *Artemisia Ordosica* declines on old fixed sand dunes. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 275.]
- [3] 陈荷生,康跃虎,冯今朝.腾格里沙漠沙坡头地区植物生长与水分平衡的初步研究[J].中国沙漠,1991,11(2):1-10.[Chen Hesheng, Kang Yuehu, Feng Jinchao. Preliminary study on the plant growth and water balance in Shapoto area, Tengger desert. *Journal of Desert Research*, 1991, 11(2): 1-10.]
- [4] Shao T J, Zhao J B, Dong Z B. Grain-size distribution the aeolian sediment and its effect on the formation and growth of mega-dunes in the Badan Jaran desert, north-west China[J]. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 2015, 59(3): 273-286.
- [5] 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. *Earth - Science Reviews*, 2013, 120: 20-39.
- [6] Yang Xiaoping. Chemistry and late quaternary evolution of ground and surface waters in the area of Yabulai Mountains, western Inner Mongolia, China[J]. *Catena*, 2006, 66: 135-144.
- [7] Ma Jinzhu, Edmunds W M. Groundwater and lake evolution in the Badain Jaran Desert ecosystem, Inner Mongolia[J]. *Journal of Hydrogeology*, 2006, 14(7): 1231-1243.
- [8] Chen Jiansheng, Li L, Wang J Y, et al. Groundwater maintains dune landscape[J]. *Nature*, 2004, 432(716): 459-460.
- [9] 王乃昂,马宁,陈红宝,等.巴丹吉林沙漠腹地降水特征的初步分析[J].水科学进展,2013,24(2):153-160.[Wang Naiang, Ma Ning, Chen Hongbao et al. A preliminary study of precipitation characteristics in the hinterland of Badain Jaran desert. *Advances in Water Science*, 2013, 24(2): 153-160.]
- [10] 赵景波,郁科科,邵天杰,等.腾格里沙漠沙层水分状况初步研究[J].资源科学,2011,33(2):259-264.[Zhao Jingbo, Yu Keke, Shao Tianjie et al. A preliminary study on the water status in sand layers and its sources in the Tengger desert. *Resources Science*, 2011, 33(2): 259-264.]
- [11] 赵景波,周旗,陈宝群,等.咸阳地区近年苹果林地土壤含水量动态变化[J].生态学报,2011,31(18):5291-5298.[Zhao Jingbo, Zhou Qi, Chen Baoqun et al. Research of dynamic variation of moisture in Apple orchard soil in the area of Xianyang in recent years. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5291-5298.]
- [12] 赵景波,王长燕,岳应利,等.西安地区人工林土壤干层与水分恢复研究[J].自然资源学报,2007,22(6):890-895.[Zhao Jingbo, Wang Changyan, Yue Yingli et al. The research on the dried layer and the moisture restoration of the soils in the planted forests in Xi'an area. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(6): 890-895.]
- [13] 杨文治.黄土高原土壤水资源与植树造林[J].自然资源学报,2001,16(5):433-438.[Yang Wenzhi. Soil water resources and afforestation in Loess plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 433-438.]
- [14] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000.[Yang Wenzhi, Shao Mingan. Study on soil moisture in Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2000.]
- [15] Zhao Jinbo, Gu Jing, Du Juan. Climate and soil moisture environment during development of the fifth paleosol in Guanzhong Plain[J]. *Science in China(Series D)*, 2008, 51(5): 665-676.
- [16] 陈渭南.塔克拉玛干沙漠84°E沿线沙物质的粒度特征[J].地理学报,1993,48(1):33-46.[Chen Weina. Grain size parameters of aeolian sediments in the vicinity of the longitude 84°E, Taklamakan deser. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(1): 33-46.]

- [17] 哈斯, 王贵勇. 沙坡头地区新月形沙丘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 271-275. [Ha Si, Wang Guiyong. Characteristics of grain size over crescentic dunes in shapotou, shoutheastern tengger desert. Journal of Desert Research, 2001, 21(3): 271-275.]
- [18] 哈斯, 庄燕美, 王蕾, 等. 毛乌素沙地南缘横向沙丘粒度分布及其对风向变化的响应[J]. 地理科学进展, 2006, 25(6): 42-51. [Ha Si, Zhuang Yanmei, Wang Lei et al. Grain-size Variation on a Transverse Dune and Response to Wind Direction Changes on Southern Edge of Mu Us Desert. Progress in Geography, 2006, 25(6): 42-51.]
- [19] 钱亦兵, 吴兆宁, 杨海峰, 等. 古尔班通古特沙漠南部风沙土粒度分布的空间异质性[J]. 干旱区地理, 2009, 32(5): 655-661. [Qian Yibing, Wu Zhaoning, Yang Haifeng et al. Spatial heterogeneity for grain size distribution of eolian sand soil in the southern Gurbantunggut Desert. Arid Land Geography, 2009, 32(5): 655-661.]
- [20] 赵景波, 张冲, 董治宝, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山粒度成分与沙山形成[J]. 地质学报, 2011, 85(8): 1389-1398. [Zhao Jingbo, Zhang Chong, Dong Zhibao et al. Particle size composition and formation of the mega-dune in the Badain Jaran desert. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(8): 1389-1398.]

Film Moisture with High Content in Sand Layer and Its Movement in Mega-dune of the Badain Jaran Desert

Zhao Jingbo^{1,2}, Chen Zhiqing¹, Ma Yandong¹, Luo Xiaoqing¹, Chen Baoqun¹, Shao Tianjie¹

(1. College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, Shaanxi, China;

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Earth Environment Institute, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Through field investigations and experimental analysis, film moisture with high content and zonal distribution of vegetation were discovered on the slope of megadunes of eastern Huhejilin lake, western Huhejilin lake and Yilikeaobao megadune in the Badain Jaran Desert. The experimental results show that the sand layer has appeared film moisture with high content from 3% to 5% and with about 0.5-3 m a thick, even appeared the gravity water with a content above 5% in a small part of sand layers, which in extreme arid desert area is rare in sand layer on slope of mega-dune. The vertical distribution of moisture content and the presence of gravity water indicate that, at the end of rainy season, precipitation infiltration will be able to reach through the sand layer about 2-4 m at least or more than that, thus avoiding the evaporation effect, to ensure that the sand layer water can reach to deep megadune through infiltration. The existence of the film moisture with high content, gravity water in sand layer and zonal distribution of vegetation prove sufficiently that there are still remaining water infiltrations into underground after evaporation and transpiration, which shows that the water in sand layer of the megadune area is a significant positive balance. The film moisture with high content in sand layer and zonal distribution of vegetation indicates that precipitation is at least an important supply source of groundwater and lake water. The water film pressure difference between film water with high content and film water with low content in adjacent underlying sand layer is the driving force of atmospheric precipitation infiltration into groundwater. Content and distributive thickness of film water with high content indicate that and its migration force is stronger and can effectively supply the groundwater in this area. Sometimes there is gravity water with content of more than 5% in 1-4 m deep in the surface layer of megadune, indicating that migration force is very strong in the surface layer of the megadune. The rainy season is the supply period of sand layer water. Rapid infiltration and small depth affected by evaporating in sand layers are beneficial to the conversion of precipitation to groundwater, which also is an important reason for the precipitation can supply groundwater.

Key words: high content of film moisture; zonal vegetation; water balance; remove dynamics; origin of lake water; Badain Jaran Desert