

腾格里沙漠宁夏中卫沙层含水量研究

赵景波^{1,2}, 马延东¹, 邢闪¹, 郁科科¹, 董治宝^{1,3}

(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 710075 3. 中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了揭示腾格里沙漠地区沙层含水量、水分存在形式、运移和水分平衡等问题, 对该沙漠东南部不同沙丘进行了含水量研究。结果显示, 腾格里沙漠沙层含水量空间变化大, 沙丘中、上部含水量低, 下部与洼地含水量高。毛管水层指示毛管水上升高度一般为 60 cm 左右, 毛管水层平均含水量为 14.9%。由于研究区相对降水量偏多, 沙层水分存在饱和和重力水、毛管水、高含量薄膜水和低含量薄膜水等多种形式, 在毛管水层之上的沙层水分一般均为薄膜水, 5% 左右的高含量薄膜水的存在是该区沙层水分含量的突出特点。沙层中薄膜水带的上、中、下部均有含水量较高的层段, 表明该区大气降水经蒸发、蒸腾之后, 仍有剩余的水分向下入渗, 并成为地下水的补给来源。

关键词: 腾格里沙漠; 沙层含水量; 水分运移; 水分存在形式; 毛管水

中图分类号: P641.131 P941.73

文献标识码: A

沙漠地区气候干旱, 降水稀少, 沙层水分缺乏。研究沙漠地区沙层含水量及其变化对沙漠的防治有着重要的实际意义, 对认识沙漠地区沙层水分存在形式、运移和循环有着重要科学意义。前人对腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、古尔班通古特沙漠部分地区和毛乌素沙地的部分地区^[1-7]进行了研究。目前已认识到, 沙漠地区 2 m 以上沙层含水量可分为 3 层, 第 1 层为上部的厚度一般小于 20 cm 含水量很低的干沙层^[1-5, 8], 第 2 层是中部的 20~100 cm 深度之间含水量易于变化的活跃层, 第 3 层是位于 100 cm 左右之下含水量较高、变化较小的稳定层^[5]。干沙层含水量通常小于 1%^[1-5], 而湿沙层含水量一般在 2%~5% 之间^[6]。虽然关于腾格里沙漠沙层含水量的研究成果也较多^[6, 9-11], 但研究的土层深度大于 2 m 的沙层含水量论文仅有 2 篇^[9, 11]。本文试图通过对腾格里沙漠 0~4 m 或 6 m 深度沙层打钻取样, 研究腾格里沙漠沙层含水量特点、水分存在形式、运移和水分循环等问题, 为认识该沙漠的水分状

况和沙漠的防治提供参考依据。

1 研究地区概况与研究方法

研究地区位于腾格里沙漠东南缘的中卫市沙坡头区境内, 采样地点在中国科学院风沙科学观测场(图 1)内, 距中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头试验站东北方向约 11 km。该地区沙丘高度一般在 5~30 m 之间, 平均海拔 1 250 m。年平均气温 9.6℃, 最高温度 38.1℃, 最低气温 -29.2℃, 夏季沙面温度最高可达 74℃^[6]。年均降水量一般为 180 mm^[12], 且主要集中在夏季的 6~8 月^[13]。最大风速为 4.2 m/s, 最小风速为 2.2 m/s^[14]。沙漠区植物稀少, 在沙丘中下部或丘间低地生长有稀疏灌木与草本植物。地形地貌复杂, 多为链状新月形沙丘, 也有格状沙丘。

我们利用轻型人力钻打孔取样, 各钻孔采样间距均为 10 m, 样品重量一般为 50~60 g, 含水量

收稿日期 (Received date): 2010-02-14; 改回日期 (Accepted): 2010-07-28.

基金项目 (Foundation item): 教育部长江学者项目 (801813) 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室项目 (SKLLQG0911). [Changjiang Scholars project in the Ministry of Education (801813); the project of State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology Chinese Academy of Sciences (SKLLQG0806).]

作者简介 (Biography): 赵景波 (1953-) 男, 博士, 教授, 博士生的导师, 主要从事第四纪与自然地理研究。 [Zhao Jingbo (1953-), male, PH.D. Professor, mainly engaged in the Quaternary geology and physical geography.] E-mail: zhaobj@snnu.edu.cn

测定利用烘干称重法。为防止水分散失,在现场进行烘干前的样品称重。样品带回实验室后,在105℃的温度条件下烘干24h以上,直到样品达到恒重。土壤含水量由 $W = (W_1 - W_2) / W_2 \times 100\%$ 公式算出,式中 W 为所测样品的土壤含水量, W_1 为烘干前土壤样品的重量, W_2 为烘干后土壤样品的重量。

2 沙丘沙层含水量测定结果

2009-10-14 我们在吊坡梁风沙观测场选择了15个采样点进行打钻采样,钻孔深度2~6m,含水量测定结果如下所述。

沙丘间洼地沙层含水量测定结果

选择了3个高大沙丘之间的洼地作为采样点1、2、3。由于洼地含水量较高,2.2m深处已到地下水。

根据第1采样点含水量测定结果(图2(a)),可将剖面分为3层。第1层在0~1.05m间,含水量变化在2.3%~5.9%间,平均为4.3%。第2层在1.05~1.65m间,含水量显著增加,变化在6.0%~23.0%间,平均为13.7%,为毛管水层。第3层在1.65~2.1m间,含水量很高,变化在27.9%~28.9%间,平均为28.3%,为饱和重力水层。

根据第2采样点含水量测定结果(见图2(a)),可将剖面分为3层。第1层在0~1.05m间,含水量变化在1.9%~4.6%间,平均为3.2%。第2层在1.05~1.35m间,含水量显著增加,变化在8.4%~23.8%间,平均为20.7%,为毛管水层。第3层在1.35~2.0m间,含水量很高,变化在26.1%~30.3%间,平均为28.8%,为饱和重力水层。

根据第3采样点含水量测定结果(见图2(a)),可将剖面分为3层。第1层在0~1.05m间,含水量

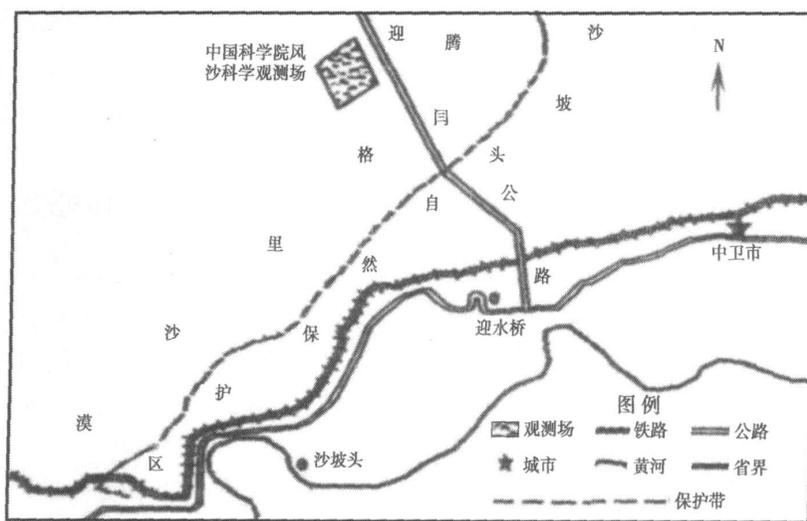
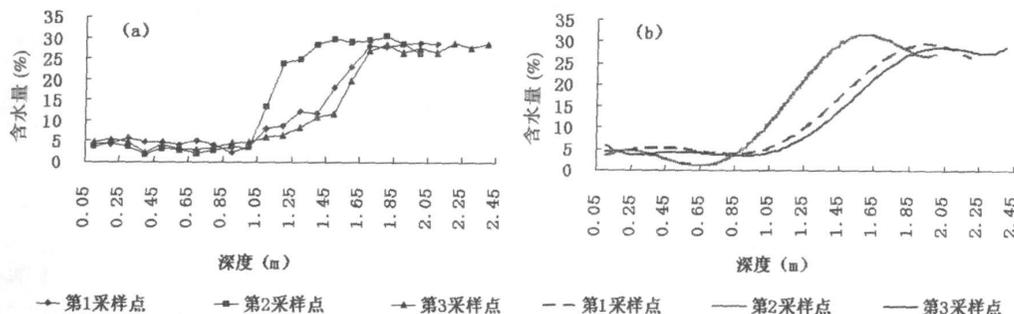


图1 采样点位置(据文献[14] 绘制)

Fig. 1 Location of collecting sample sites



(a)、(b) 分别为第1、第2、第3 采样点沙层含水量曲线和拟合后曲线

图2 腾格里沙漠洼地含水量和拟合后曲线

Fig. 2 Moisture content of sand layer at a low-lying-land in the Tengger Desert and fitted curves

变化在 2.4% ~ 5.5% 间, 平均为 4.1%。第 2 层在 1.05 ~ 1.65 m 间, 含水量显著增加, 变化在 5.4% ~ 23.3% 间, 平均为 10.5%, 为毛管水层。第 3 层在 1.65 ~ 2.4 m 间, 含水量很高, 变化在 26.4% ~ 28.6% 间, 平均为 27.6%, 为饱和重力水层。

半固定沙丘沙层含水量测定结果

选择了 3 个相对高度 8 m 左右的流动沙丘的顶部作为采样点 4、5、6 其中第 6 采样点钻孔深为 6 m。根据第 4 采样点含水量测定结果 (图 3(a)), 可将剖面分为 2 层。第 1 层在 0 ~ 1.05 m 间, 含水量较低且呈下降趋势, 变化在 0.3% ~ 4.4% 间, 平均为 2.2%。第 2 层在 1.05 ~ 4.0 m 间, 含水量较低, 变化在 1.4% ~ 3.6% 间, 平均为 2.2%。

根据第 5 采样点含水量测定结果 (见图 3(a)), 可将剖面分为 2 层。第 1 层在 0 ~ 1.05 m 间, 含水量较低且呈下降趋势, 变化在 1.3% ~ 4.9% 间, 平均为 3.0%。第 2 层在 1.05 ~ 6.0 m 间, 含水量略有增加, 变化在 1.1% ~ 4.3% 间, 平均为 2.2%。

根据第 6 采样点含水量测定结果 (见图 3(a)), 可将剖面分为 3 层。第 1 层在 0 ~ 1.05 m 间, 含水量呈下降趋势, 变化在 1.1% ~ 5.4% 间, 平均为

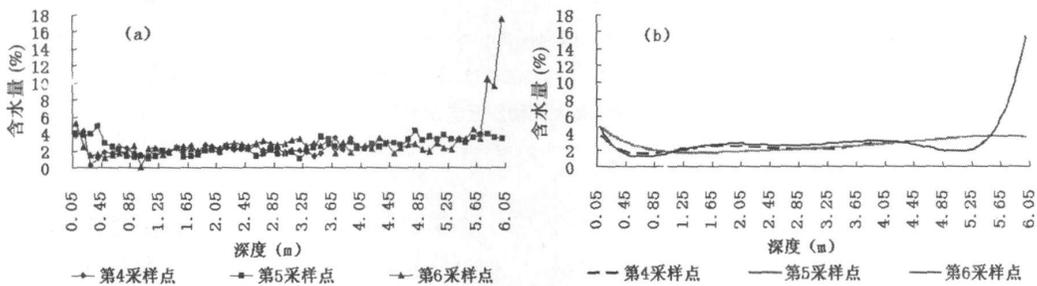
2.2%。第 2 层在 1.05 ~ 5.75 m 间, 含水量较低, 变化在 1.5% ~ 4.5% 间, 平均为 2.6%。第 3 层在 5.75 ~ 6.0 m 间, 含水量显著增加, 变化在 7.0% ~ 17.5% 间, 平均为 12.6%, 为不完整毛管水层。

低矮流动沙丘沙层含水量测定结果

选择了 3 个相对高度不超过 6 m 的流动沙丘的顶部作为第 7、8、9 采样点。

根据第 7 采样点含水量测定结果 (图 4(a)), 可将剖面分为 2 层。第 1 层在 0 ~ 3.25 m 间, 含水量变化在 1.1% ~ 4.8% 间, 平均为 2.5%。第 2 层在 3.25 ~ 3.85 m 间, 含水量显著增加, 变化在 5.3% ~ 23.5% 间, 平均为 14.2%, 为毛管水层。第 3 层在 3.85 ~ 4.0 m 间, 含水量变化在 24.2% ~ 24.6% 间, 平均为 24.4%, 为饱和重力水层。

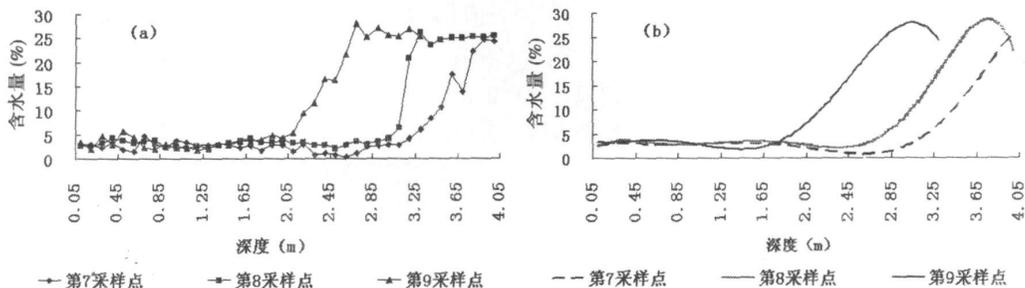
根据第 8 采样点含水量测定结果 (图 4(a)), 可将剖面分为 3 层。第 1 层在 0 ~ 3.05 m 间, 含水量变化在 2.1% ~ 4.4% 间, 平均为 3.1%。第 2 层在 3.05 ~ 3.45 m 间, 含水量显著增加, 变化在 5.4% ~ 23.5% 间, 平均为 19.3%, 为毛管水层。第 3 层在 3.45 ~ 4.0 m 间, 含水量很高, 变化在 24.7% ~ 25.4% 间, 平均为 25.1%, 为饱和重力水层。



(a)、(b) 分别为第 4、第 5、第 6 采样点沙层含水量曲线和拟合曲线

图 3 腾格里沙漠半固定沙丘顶部含水量和拟合曲线

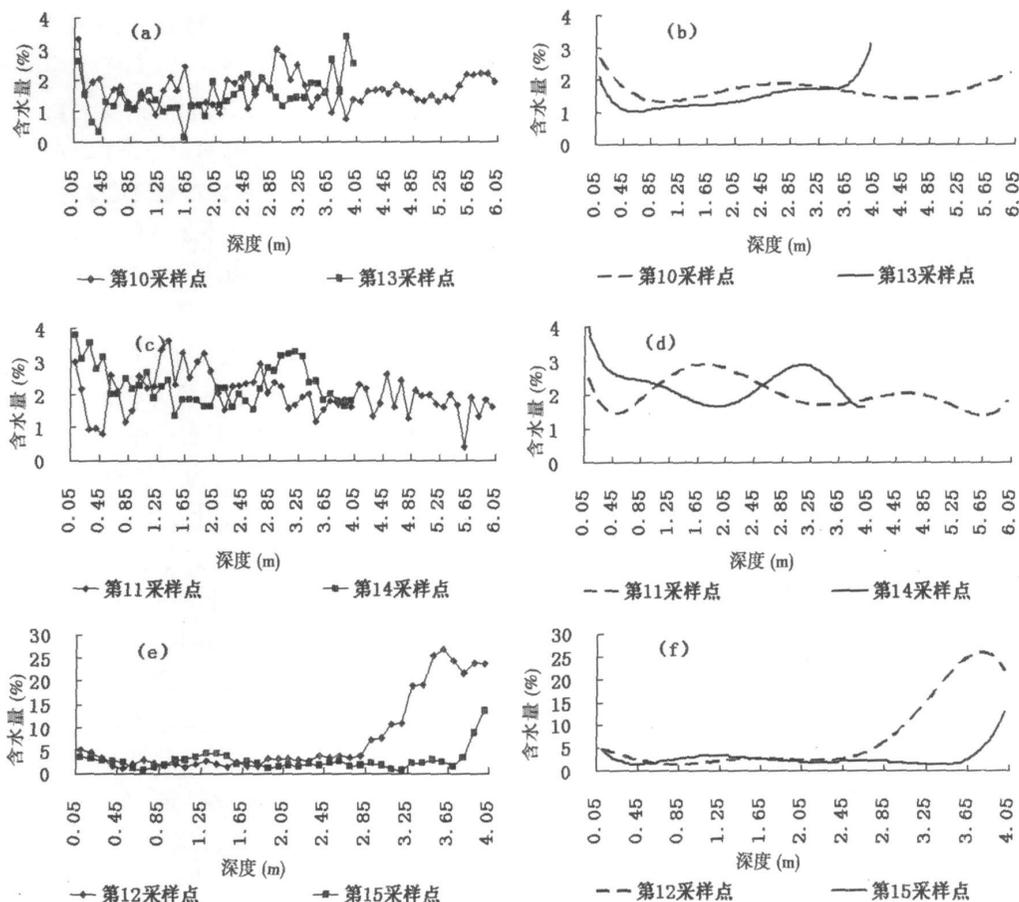
Fig. 3 Moisture content of sand layer at the top of a half-fixed sand dune in the Tengger Desert and fitted curves



(a)、(b) 分别为第 7、第 8、第 9 采样点沙层含水量曲线和拟合曲线

图 4 腾格里沙漠低矮流动沙丘顶部含水量和拟合曲线

Fig. 4 Moisture content of sand layer at the top of a lower moving sand dune in the Tengger Desert and fitted curves



(a)、(b)分别为顶部第10、13采样点沙层含水量曲线和拟合曲线,(c)、(d)分别为中部第11、14采样点沙层含水量曲线和拟合曲线,(e)、(f)分别为底部第12、15采样点沙层含水量曲线和拟合曲线

图5 腾格里沙漠高大流动沙丘含水量和拟合曲线

Fig 5 Moisture content of sand layer at a moving mega-dune in the Tengger Desert and fitted curves

根据第9采样点含水量测定结果(见图4(a)),可将剖面分为3层。第1层在0~2.05m间,含水量变化在2.0%~5.7%间,平均为3.3%。第2层在2.05~2.65m间,含水量显著增加,变化在5.0%~22.1%间,平均为13.5%,为毛管水层。第3层在2.65~3.3m间,含水量很高,变化在25.3%~27.1%间,平均为26.3%,为饱和重力水层。

高大的流动沙丘沙层含水量测定结果

在2个相对高度达30m左右的大沙丘迎风坡的顶部、中部、底部各进行了2个点的采样,每个点大钻2个。第10、11号钻孔深为6m,第12、13、14、15号钻孔深为4m。

第10采样点含水量测定结果(图5(a))显示剖面可分为2层。第1层在0~0.55m间,由上向下含水量呈下降趋势,变化在1.3%~3.3%间,平均为2.0%。第2层在0.55~6.0m间,含水量变化在0.8%~3.0%间,平均为1.6%。

第11采样点含水量测定结果(图5(c))显示剖面可分为2层。第1层在0~0.55m间,含水量较低,变化在0.8%~3.0%间,平均为1.6%。第2层在0.55~6.0m间,含水量变化在1.2%~3.6%间,平均为2.1%。

第12采样点含水量测定结果(图5(e))显示剖面可分为4层。第1层在0~0.65m间,含水量变化在1.1%~5.2%间,平均为3.1%。第2层在0.65~2.85m间,含水量较低,变化在1.3%~3.9%间,平均为2.5%。第3层在2.85~3.45m间,含水量显著增加,变化在5.5%~22.4%间,平均为12.4%,为毛管水层。第4层在3.45~4.0m间,含水量很高,变化在21.7%~26.8%间,平均为24.3%,为饱和重力水层。

第13采样点含水量测定结果(见图5(a))显示剖面分为2层。第1层在0~0.55m间,含水量变化在0.4%~2.6%间,平均为1.3%。第2层在

0.55 ~ 4.0 m 间, 含水量略有增加趋势, 变化在 0.2% ~ 3.4% 间, 平均为 1.5%。

第 14 采样点含水量测定结果 (图 5(c)) 显示剖面可分为 2 层。第 1 层在 0 ~ 0.55 m 间, 含水量呈下降趋势, 变化在 2.8% ~ 3.8% 间, 平均为 3.3%。第 2 层在 0.55 ~ 4.0 m 间, 含水量变化在 1.4% ~ 3.3% 间, 平均为 2.2%。

第 15 采样点含水量测定结果 (图 5(e)) 显示剖面可分为 3 层。第 1 层在 0 ~ 0.75 m 间, 由上向下含水量呈下降趋势, 变化在 1.2% ~ 3.7% 间, 平均为 2.7%。第 2 层在 0.75 ~ 3.85 m 间, 含水量变化在 0.7% ~ 4.3% 间, 平均为 2.3%。第 3 层在 3.85 ~ 4.0 m 间, 含水量显著增加, 变化在 6.1% ~ 13.6% 间, 平均含水量为 11.2%, 为不完整毛管水层。

3 讨论

腾格里中卫沙层含水量的空间分布特点

根据上述 15 个剖面含水量测定结果可知, 腾格里沙漠东南缘沙层毛管水层含水量平均为 14.9%。饱和和重力水层平均含水量为 26.4%。洼地毛管水层之上沙层平均含水量为 3.9%, 低矮的流动沙丘毛管水层之上沙层平均含水量为 3.0%, 半固定沙丘毛管水层之上沙层平均含水量为 2.4%。高大的流动沙丘平均含水量, 顶部为 1.6%、中部为 2.3%、底部毛管水层之上为 2.5%。可知洼地平均含水量最大, 低矮的流动沙丘次之, 半固定沙丘最小, 高大的流动沙丘的底部平均含水量最大, 中部次之, 顶部最小。由此可见, 腾格里沙漠沙层含水量空间变化大, 沙丘中、上部含水量低, 沙丘下部与洼地含水量高, 这表明该区大气降水主要是通过低洼地区向下入渗并补给地下水的。

沙层水分来源及运移

在 15 个剖面中有 9 个剖面含水量达到或接近该地区的饱和含水量, 采样时可以看到有水分由沙样品中流出。这 9 个剖面均处在地势较低处, 特别是洼地和低矮的流动沙丘上。前人对该地区地下水研究显示, 腾格里沙漠地下水资源丰富, 地下潜水位埋深约 1.2 ~ 4.0 m^[1, 15]。我们的含水量测定结果显示腾格里沙漠东南缘地下水埋藏较浅, 埋深约 2.0 ~ 3.0 m, 这一特点有利于大气降水对地下水的入渗补给。

过去的研究认为, 干沙层的形成与地表蒸发有

着紧密的关系^[16], 干沙层可以降低水分蒸发速率^[1, 17]。在我国沙漠地区, 干沙层分布深度一般小于 0.20 m^[1-9]。在中卫沙漠区, 干沙层厚度一般为 10 cm 左右。干沙层对湿沙层具有有效地保护作用, 有利于大气降水向地下入渗和对地下水的补给。因沙层蒸发影响深度小于 0.5 m^[11], 所以入渗到达 0.5 m 左右深度的水分就能够到达 2 m 或到达更大的深度。该区沙层 0.5 m 以下水分也较高, 表明大气降水是该地区地下水的重要来源之一。

我们根据钻孔剖面含水量, 利用最小二乘法 6 次拟合后的曲线显示, 各沙层剖面中出现了若干含水量的高值段 (图 2(b), 图 3(b), 图 4(b), 图 5(b, d, f)), 表明沙层水分能够向下运移, 显示出大气降水对该地区的沙层水分具有补给作用。根据前人研究, 腾格里沙漠沙层水分主要是雨季降水造成的^[14]。有的研究表明, 单次降雨并不能造成土壤深处含水量的增加, 而是降雨的积累, 深处的含水量才能渐渐增加起来^[14]。在我们划分的第 1 层和毛管水层之间的沙层含水量拟合曲线出现若干高值段, 应该是不同时期大气降水向下入渗的结果。

沙层水分存在形式

土壤水分存在形式主要包括毛管水、薄膜水和重力水。毛管水是在毛管力作用下保持和移动, 毛管水包括毛管悬着水和毛管上升水。据前人研究, 腾格里沙漠东南缘以占 60.5% ~ 66.2% 的细沙颗粒为主^[18, 19], 细沙颗粒为主的沙层田间持水量为 5% 左右^[1]。在沙层含水量低于 5% 时, 在土粒的引力作用下水分以薄膜水的形式存在。在沙层含水量高于 5% 时, 水分就转化为受重力作用影响的重力水。薄膜水是从水膜厚的地方向水膜薄的地方移动, 移动速度很缓慢。重力水在重力作用下自上而下运动, 运移速度快。由含水量测定结果可知, 毛管水层和饱和重力水层以重力水的形式存。其他沙层含水量一般 < 5%, 主要以薄膜水的形式存在。在黄土高原区, 大气降水也是以薄膜水的形式缓慢入渗补给地下水的^[20-23]。

通过与其他地区沙漠沙层水分的对比可知, 腾格里中卫沙层水分的突出特点是薄膜水带出现了高含水量的薄膜水, 即常出现了含水量为 5% 左右的层位, 已接近重力水的起始含量。特别是在洼地沙丘高含量的薄膜水更为常见, 在低矮沙丘和半固定沙丘也可见到高含量的薄膜水出现。沙层含水量的这一突出特点也表明沙层水分对地下水的补给作用

较强。

沙层毛管水上升高度与含量

从沙层毛管水出现到饱和重力水层之间的沙层水分为毛管水,在研究地区毛管水含量等于或大于5%,小于饱和含水层。从地下水水面到毛管上升水所能达到的高度为毛管水上升高度。我们根据7个剖面的含水量测定结果,可确定出毛管水上升高度一般为60 cm,仅个别剖面毛管水<60 cm。该区沙层毛管水比前人确定的毛管水上升高度为54.5 cm^[1]略大,应当与该区位于腾格里沙漠东南部沙层粒度成分较细有关。在毛管水与薄膜水分界处和毛管水向饱和重力水分界处沙层含水量具有突变特点(图2~5)。

由于过去对沙漠区深部沙层水分研究很少,关于腾格里沙漠沙层毛管水含水量高低几乎未见报道。6个完整毛管水带沙层含水量的资料显示,沙层毛管水带顶部含水量一般为5%左右,底部含量接近25%,6个剖面毛管水带平均含水量为14.9%。

4 结 论

综上所述,可得出如下结论:

1. 腾格里沙漠沙层含水量空间变化大,沙丘中、上部含水量低,沙丘下部与洼地含水量高。洼地薄膜水层平均含水量为3.9%,低矮流动沙丘薄膜水层平均含水量为3.0%,半固定沙丘薄膜水层平均含水量为2.4%。高大流动沙丘薄膜水层顶部平均含水量为1.6%、中部平均为2.3%、底部平均为2.5%。

2. 研究区毛管水层上升高度为60 cm左右,毛管水层顶部含水量为5%左右,底部最高接近25%,整个毛管水层平均含水量为14.9%。沙层饱和重力水层平均含量为26.4%。

3. 由于研究区降水量较一般沙漠偏多,该区沙层水分存在形式具有多种,包括饱和重力水、毛管水、高含量薄膜水和低含量薄膜水。在毛管水层之上的沙层水分一般均为薄膜水。高含量薄膜水较为普遍的存在是该区沙层水分含量的突出特点。

4. 中卫沙层高含量的薄膜水的存在、薄膜水带的上部、中部与下部含水量常常较高,表明该区大气降水经蒸发、蒸腾之后,仍有剩余的水分通过入渗成为地下水的补给来源。

致谢:参加研究工作的还有陈颖,古力扎提,胡

建,张鹏飞,谨此致谢。

参考文献 (References)

- [1] Feng Qi Cheng Guodong. Moisture distribution and movement in sandy lands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica* 1999 36(2): 225~236 [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]
- [2] Qin Jiaqi Tuo Ya Ye Dongmei et al. The research on soil moisture characteristics of different sandy land types in Wulanbuhe [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* 2004 25(2): 23~27 [秦佳琪,托亚,叶冬梅,等.乌兰布和沙漠不同沙地类型土壤水分特征的研究[J].内蒙古农业大学学报,2004 25(2): 23~27]
- [3] Zhu Yuwei Chen Qinia Liu Maoxiu et al. Spatiotemporal distribution of moisture content in sand dunes of the unrigated forestation along the southern marginal zone of Gurbantunggut Desert [J]. *Pratacultural Science* 2008 25(12): 6~12 [朱玉伟,陈启民,刘茂秀,等.古尔班通古特沙漠南缘沙丘水分的时空分布特征[J].草业科学,2008 25(12): 6~12]
- [4] Ge Rile Zhang Li Liu Jun et al. Soil moisture dynamic rule of artificial haloxylon ammodendron forest in Kubuqi desert [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* 2006 20(6): 173~178 [格日乐,张力,刘军,等.库布齐沙漠人工梭梭林地土壤水分动态规律的研究[J].干旱区资源与环境,2006 20(6): 173~178]
- [5] Guo Ke Dong Xuejun Liu Zhinao. Characteristics of soil moisture content on sand dunes in Mu Us Sandy grassland why *artemisia ordosica* declines on old fixed sand dunes [J]. *Acta Phytocologica Sinica* 2000 24(3): 275~279 [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): 275~279]
- [6] Chen Hesheng Kang Yuehu Feng Jinhao. Preliminary study on the plant growth and water balance in Shapotou Area Tengger Desert [J]. *Journal of Desert Research* 1991 11(2): 1~10 [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]
- [7] Feng Qi. Soil moisture conditions and its dynamic laws in sandy land of semihumid regions Tengger Desert [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas* 1995 13(1): 26~30 [冯起.半湿润沙地水分状况及动态规律研究[J].干旱地区农业研究,1995 13(1): 26~30]
- [8] Matsuda A Yano T Cho T. Studies on the micrometeorology in the sand dune (1) on the radiation balance [J]. *Journal of Agricultural Meteorology* 1972 28: 11~17
- [9] Li Xinrong Ma Fengyun Long Liquan et al. Soil water dynamics under sand-fixing vegetation in Shapotou Area [J]. *Journal of Desert Research* 2001 21(3): 217~222 [李新荣,马凤云,龙立群,等.沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J].中国沙漠,2001 21(3): 217~222]
- [10] Wang Rui Sun Quan Wu Xiangwei. The spatial dynamics of the soil moisture under different terrain conditions in the southeast edge of Tengger Desert [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* 2009 31(4): 756~759 [王锐,孙权,吴向伟.腾格里沙漠东南缘不同地形下土壤水分空间变化动态研究[J].江西农业大学学报,2009 31(4): 756~759]
- [11] Liu Yuanbo Chen Hesheng Gao Qianzhao et al. Dynamic variations of soil moisture caused by rainwater infiltration in bare sandy

- land[J]. *Journal of Desert Research* 1995 15(2): 143~150 [刘元波, 陈荷生, 高前兆, 等. 沙地降雨入渗水分动态[J]. 中国沙漠, 1995 15(2): 143~150]
- [12] Wang Xinping Zhang Jingguang Li Xinrong et al. Distribution trends and variability of precipitation in Shapotou Region [J]. *Journal of Desert Research* 2001 21(4): 260~264 [王新平, 张景光, 李新荣, 等. 沙坡头地区多年降水分布特征、趋势及其变率[J]. 中国沙漠, 2001 21(4): 260~264]
- [13] Li Jingui. Analysis of precipitation characteristics in Shapotou Region [J]. *Journal of Desert Research* 1991 11(1): 44~49 [李金贵. 沙坡头降水特点分析[J]. 中国沙漠 1991 11(1): 44~49]
- [14] Lv Ping Dong Zhibao Zhang Zhengsi et al. Characteristics of wind velocity temperature and humidity profiles of near-surface layer in Tengger Desert [J]. *Journal of Desert Research* 2009 29(5): 977~981 [吕萍, 董治宝, 张正德, 等. 腾格里沙漠近地面层风、气温、湿度特征[J]. 中国沙漠, 2009 29(5): 977~981]
- [15] Tan Zengren Zhou Xingzhi. Problem of groundwater exploitation in Tengger Desert and western water-rich zone [J]. *Journal of China Hydrology* 1985 (4): 16~22 [谭增任, 周兴智. 腾格里沙漠地下水及西部富水带的开发问题[J]. 水文, 1985 (4): 16~22]
- [16] Wang Zhi Wang Lei Liu Linyou et al. Preliminary study on soil moisture content in dried layer of sand dunes in the Mu Us Sandland [J]. *Arid Zone Research* 2006 23(1): 89~92 [王志, 王蕾, 刘连友, 等. 毛乌素沙地沙丘干沙层水分特征初步研究[J]. 干旱区研究, 2006 23(1): 89~92]
- [17] Li Pinfang Li Baoguo. Study on some characteristics of evaporation of sand dune and evapotranspiration of grassland in Mu Us desert [J]. *Shui Li Xue Bao* 2000 (3): 24~28 [李品芳, 李保国. 毛乌素沙地水分蒸发和草地蒸散特征的比较研究[J]. 水利学报, 2000 (3): 24~28]
- [18] Ha Si. Grain-size characteristics and mechanism of network dune in the southeastern Tengger Desert [J]. *Geographical Research* 1998 17(2): 178~184 [哈斯. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘粒度特征与成因探讨[J]. 地理研究, 1998 17(2): 178~184]
- [19] Ha Si, Wang Guiyong. Characteristics of grain size over crescentic dunes in Shapotou southeastern Tengger Desert [J]. *Journal of Desert Research* 2001 21(3): 271~275 [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]
- [20] Zhao Jingbo Sun Guizhen Yue Yingli et al. Research of dried earth layer and its formation in the artificial forest land of Guanzhong Plain [J]. *Geographical Research* 2007 26(4): 763~772 [赵景波, 孙桂贞, 岳应利, 等. 关中平原人工林地的干层及其成因[J]. 地理研究, 2007 26(4): 763~772]
- [21] Zhao Jingbo Du Juan Chenqun Baoqun. Dried earth layers of artificial forestland in the Loess Plateau of Shaanxi Province [J]. *Journal of Geographical Sciences* 2007 26(4): 114~126
- [22] Zhao Jingbo Gu Jing Du Juan. The effect of climate and soil water environment on the Fifth Paleosol developed in Guanzhong Plain [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2008 38(3): 364~374 [赵景波, 顾静, 杜娟. 关中平原第 5 层古土壤发育时的气候与土壤水环境研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008 38(3): 364~374]
- [23] Yang Wen zhi Shao Ming an. The Study of Soil Moisture on the Loess Plateau [M]. Beijing Science Press 2000 1~350 [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 1~350]

Study on Moisture Content in Sand Layers of Tengger Desert in Zhongwei, Ningxia

ZHAO Jingbo^{1,2}, MA Yandong¹, XING Shan¹, YU Keke¹, DONG Zhibao^{1,3}

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

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology Institute of Earth Environment Chinese Academy of Science Xi'an 710075 China

3. Key Laboratory of Desert and Desertification Chinese Academy of Sciences Lanzhou 730000 China)

Abstract: In order to reveal the moisture content in sand layers, the forms of the moisture, the moisture migration and equilibrium in the Tengger desert, we study the moisture content of different sand dunes in the southeastern part of Tengger Desert. The results show that the spatial variation of moisture content of sand layers in Tengger Desert is very great, and the upper part of sand dunes have low moisture content, while the lower part of sand dunes and the low-lying land have high moisture content. Capillary water layer indicates the height of capillary water is about 60 cm and the average moisture content of capillary water is 14.9%. Because of more precipitation in the studied area, there are saturation gravity water, capillary water, high moisture content and low moisture content of film water and other forms of water in this sand layer. Film water is usually in the up layer of capillary water, and the presence of about 5% of the high content film water is outstanding features in the area. The upper, middle and lower layers of film water in the sand layer have higher moisture content, indicating that the precipitation in this area still has residual moisture infiltrating downward after evaporation and transpiration, and becomes a source of groundwater recharge.

Key words: Tengger desert; moisture content in sand layer; moisture migration; forms of moisture; capillary water