

# 陕西省靖边县沙地水分与植被建设

罗小庆<sup>1</sup>, 赵景波<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:** 根据毛乌素沙地靖边县海则滩镇钻孔剖面沙层水分含量的测定,研究了该区沙地剖面水分分布特点、沙层水分存在形式、水分平衡、大气降水对地下水的补给以及植被建设等问题。结果表明,该区500 cm深度范围内沙层剖面含水量的变化特点是草地0—200 cm和灌木林地0—300 cm含水量较低,草地200—500 cm和灌木林地300—500 cm含水量较高;草地沙层含水量明显高于灌木林地,草地含水量变化范围为1.0%~6.0%,平均为3.4%;灌木地含水量变化范围为0.7%~2.8%,平均为1.5%。草地沙层剖面200 cm以下有含量大于3%的高含量薄膜水和含量大于5%的重力水存在,显示大气降水对地下水的补给较强。灌木林地沙层中一般缺少重力水和高含量薄膜水,指示灌木林地降水对地下水补给较弱。该区水分为正平衡,其原因除了降水较多之外,沙层入渗率高和受蒸发消耗较少也是重要原因。由于靖边县沙地区降水量较多,沙地水分活跃层分布深度在200~300 cm之间,较沙漠区分布深度增加了100—200 cm。沙层水分含量的剖面变化表明,该区沙层水分能够满足耐旱灌木生长的需要,适于发展防风固沙效果好的灌木林。

**关键词:** 沙地含水量; 水分平衡; 高含量薄膜水; 水分补给; 植被建设

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0299-06

中图分类号: S152.74, Q948

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.058

## Moisture and Vegetation Reconstruction in Sandy Lands of Jingbian County in Shaanxi Province

LUO Xiao-qing<sup>1</sup>, ZHAO Jing-bo<sup>1,2</sup>

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an,

Shaanxi 710062, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology,

Environmental Institute of Earth, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

**Abstract:** According to moisture content in sand layers of the drilling sections in Haizetan Town of Jingbian County of Shaanxi Province, Mu Us sandy grassland, we studied the characteristics of moisture distribution in sandy lands, existing forms, water balance, supply of atmospheric precipitation to groundwater and appropriate vegetation. The result showed that variation of moisture within the depth of 500 cm was that the upper part contained less water and the lower contained more. The moisture content were found also high both below the depth of 200 cm in grassland and below the depth of 300 cm in shrub land. Sand moisture in grassland was significantly higher than that in shrub land. The moisture content of grassland ranged from 1.0% to 6.0%, with an average of 3.4%, and that of shrub land was 0.7% to 2.8% with an average of 1.5%. There were film water exceeding 3% and gravity water exceeding 5% below 200 cm on the sand section in grassland, which indicated the obvious supply of precipitation to groundwater. While the sand layers in shrub land was usually lacking of gravity water and high content of film water, it suggested that supply of atmospheric precipitation to groundwater was actually weak in the area. The important reasons why this area has positive water balance were high infiltration rate and small evaporation effect of sand layers, in addition to more precipitation. Owing to much rainfall in sandy lands of Jingbian County, active layer of sand moisture distributed at the depth of 200—300 cm, which was 100 cm to 200 cm deeper than that of desert area. Varia-

收稿日期: 2013-11-25

修回日期: 2013-12-10

资助项目: 国家级特色专业项目“陕西师范大学旅游与环境学院地理科学国家级特色专业建设”(SXSFDX006); 陕西师范大学勤工助学学科创新基金项目(QZZD11 027); 国家科技支撑计划项目(07BAC30B01); 中国科学院黄土与第四纪国家重点实验室项目(SKLLQG1214)

作者简介: 罗小庆(1989—),女(汉族),陕西省岐山县人,本科生,研究方向为自然地理。E-mail: luoxq0815@126.com。

通信作者: 赵景波(1953—),男(汉族),山东省滕州人,博士,教授,博士生导师,主要从事自然地理研究。E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn。

tion of moisture in the sand layers showed that sand moisture in the area could meet the needs for the growth of drought-resistant shrub, which was suitable for the development of shrub with good sand-fixing effect.

**Keywords:** moisture content in sandy lands; water balance; high content of film water; water supply; vegetation construction

土壤水是指由地面向下至地下水面上土壤层中的水分,亦称土壤中非饱和带水分。我国自 20 世纪 50 年代以来,围绕着农业发展和生态建设对黄土高原土壤水分进行了大量研究<sup>[1-5]</sup>。关于沙漠地区沙层含水量,前人也做了许多研究,在国内研究地区包括腾格里沙漠、古尔班通古特沙漠、乌兰布和沙漠及毛乌素沙地的部分地区<sup>[6-11]</sup>。现已认识到,沙漠地区 2 m 以上沙层含水量一般可划分为 3 层,第 1 层深度一般小于 20 cm,为含水量很低的干沙层<sup>[6-9]</sup>。第 2 层位于 20—100 cm 深度之间,是含水量易于变化的活跃层,为湿沙层的上部。第 3 层位于 100 cm 左右深度之下,是含水量较高、变化较小的稳定层<sup>[5]</sup>,为湿沙层的中下部。研究<sup>[6-9]</sup>得出,沙漠地区沙层中的含水量一般都很低,干沙层中含水量通常不足 1%,而湿沙层含水量一般在 2%~5% 之间<sup>[6]</sup>,沙层中一般都是薄膜水。虽然过去对我国沙漠区沙层含水量进行了许多研究,但对 2 m 以下深层剖面水分的研究很少,对靖边沙地深层水分的系统研究则更少。国外对土壤含水量和动态变化做了大量研究,研究的重点是土壤水的运移规律、植物蒸腾和气候变化对土壤水的影响<sup>[12-15]</sup>,并侧重于建立数学模型。Koster<sup>[12]</sup> 研究认为不同地区土壤湿度与降水存在不同的定量关系,土质差异是主导因素之一。Bartalis<sup>[13]</sup> 通过卫星观测和典型土壤水分数据分析,认为据此可以准确预报 10 a 内全球范围的土壤水分的变化序列。Holsten 等<sup>[14]</sup> 通过模拟实验研究了气候变化对土壤水动态影响,认为到 21 世纪中期气候暖干化将使美国勃兰登堡地区可利用土壤水减少 4%~15%。Seneviratne 等<sup>[15]</sup> 研究了气候变化与土壤水分的相互作用,指出土壤水分是反映气候系统变化的钥匙,土壤水对气候有多方面的指示作用。

我国的沙地水分研究中,存在的主要问题是沙地含水量能否满足人工灌木林生长的需要认识不清,对沙层薄膜水的含量类型缺少划分,关于沙层水分对地下水的补给认识不明确。沙层水分的研究对揭示沙层的剖面分布和沙层水分的科学利用和改善干旱地区的生态环境有着极为重要的意义。本研究根据位于毛乌素沙地南部的陕西靖边沙地较深钻孔采样和含水量测定,分析该地区沙层水含量、水分存在形

式和水循环等问题,为该区沙地水资源利用和植被建设提供科学依据。

## 1 采样点概况及研究方法

研究区位于靖边县城北 20 km 处的海则滩乡,该乡西与内蒙古自治区接壤,为毛乌素沙地组成部分。采样点所在的靖边县年平均气温 7.8℃,年平均降水量为 395 mm,无霜期 120 d 左右<sup>[16]</sup>。采样点的植被有草地和人工灌木林地两种,人工灌木树种为沙柳和柠条。为揭示沙地含水量空间差异和植被不同对沙地水分的影响,于 7 月中旬分别在草地和灌木林采集了 8 个 5 m 深度剖面的含水量样品。8 个草地和 8 个灌木地剖面均在沙丘中部。沙丘长度为 20~30 m,沙丘高差为 5~10 m。利用轻便人力钻采集样品,采样间距为 10 cm。含水量测定采用烘干法。

## 2 沙地含水量测定结果

### 2.1 草地含水量测定结果

沙层剖面水分一般可分为 3 层<sup>[5]</sup>,由于采样期间受降小雨的影响,沙层剖面上部 20 cm 厚度的干沙层不明显,所以根据含水量变化,将剖面水分分为 2 层。因为草地剖面一般在 200 cm 深度水分含量明显增加,所以将 200 cm 深度作为草地沙层剖面水分分层的深度。灌木林地一般在 300 cm 深处含水量明显增多,将灌木林地剖面 300 cm 深度作为分层的深度。

由含水量测定结果(图 1)得知,位于第 1 个沙丘中部的剖面 1 沙层含水量变化在 1.4%~4.2% 之间,平均值为 2.6%。据沙层含水量在垂向上的变化,可将其分为 2 层。第 1 层位于 0—200 cm,含水量变化在 1.4%~2.7% 之间,平均为 1.9%。第 2 层位于 200—500 cm,含水量变化在 2.3%~4.2% 之间,平均为 3.2%。位于第 2 个沙丘中部的剖面 2 土壤含水量变化在 1.5%~5.2% 之间,平均值为 3.6%。据含水量在垂向上的变化,也可分为 2 层。第 1 层位于 0—200 cm 之间,含水量变化在 1.7%~5.2% 之间,平均为 3.0%。第 2 层在 200—500 cm 之间,含水量变化在 1.5%~5.0% 之间,平均值为 4.2%。剖面 2 位于较大沙丘中部,这是其含水量比位于较小沙丘中部的剖面 1 含水量高出 0.8% 的原因。

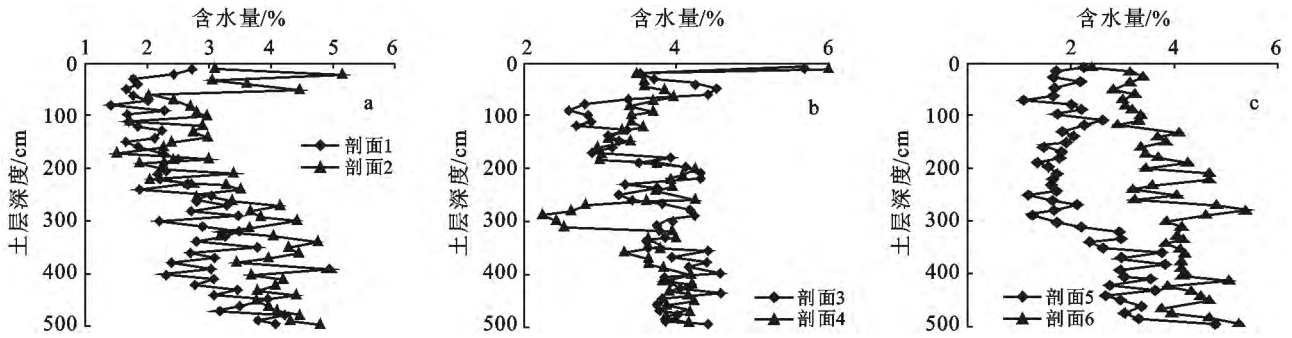


图 1 靖边县海则滩乡草地沙层含水量

由含水量测定结果得知(图 1),位于第 3 个沙丘中部的剖面 3 含水量变化在 2.6%~5.7%之间,平均为 3.8%。据沙层含水量在垂向上的变化,可将其分为 2 层。第 1 层位于 0—200 cm 之间,含水量变化在 2.6%~5.7%之间,平均为 3.5%。第 2 层位于 200—500 cm 之间,含水量变化在 2.9%~4.6%之间,平均为 4.0%。位于第 4 个沙丘中部的剖面 4 沙层含水量(图 1)变化趋势与剖面 3 基本相同,含水量变化在 2.2%~6.0%之间,平均值为 3.6%。据沙层含水量在垂向上的变化,也可分为 2 层。第 1 层在 0—200 cm 之间,含水量变化在 3.1%~6.0%之间,平均为 3.4%。第 2 层在 200—500 cm 之间,含水量较低,变化在 2.2%~4.3%之间,平均为 3.7%。

由含水量测定结果得知(图 1),位于第 5 个沙丘中部的剖面 5 沙层含水量变化在 1.0%~4.8%之间,

平均值为 2.3%。据含水量在垂向上的变化,可将其分为 2 个层次。第 1 层位于 0—200 cm 之间,含水量变化在 1.0%~2.7%之间,平均为 1.8%。第 2 层位于 200—500 cm 之间,含水量变化在 1.2%~4.8%之间,平均为 3.5%。

位于第 6 个沙丘中部的剖面 6 沙层含水量变化在 2.4%~5.4%之间,平均为 3.9%。据沙层含水量在垂向上的变化,可分为 2 层。第 1 层在 0—200 cm 之间,含水量变化在 2.4%~4.2%之间,平均为 3.4%。第 2 层在 200—500 cm 之间,含水量变化在 3.2%~5.4%之间,平均为 4.3%。剖面 6 比剖面 5 含水量高出 1.6%。位于第 7 和第 8 个沙丘中部的剖面 7 和剖面 8 沙层含水量与前述 6 个剖面类似,从剖面上部向下部含水量增加,整个剖面平均含水量在 3.4%~3.6%之间(表 1)。

表 1 靖边县沙地沙层含水量

| 草地剖面 | 0—200 cm<br>平均值 | 200—500 cm<br>平均值 | 0—500 cm<br>平均值 | 灌木地<br>剖面 | 0—300 cm<br>平均值 | 300—500 cm<br>平均值 | 0—500 cm<br>平均值 |
|------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 剖面 8 | 3.0             | 3.9               | 3.6             | 剖面 8      | 1.3             | 1.6               | 1.4             |
| 剖面 7 | 3.1             | 3.6               | 3.4             | 剖面 7      | 1.4             | 2.0               | 1.6             |

2.2 灌丛地含水量测定结果

由含水量测定结果得知(图 2),位于第 1 个灌木沙丘中部的剖面 1 沙层含水量变化在 0.8%~2.6%之间,平均值为 1.5%。据沙层含水量在垂向上的变化,可将其分为 2 层。第 1 层位于 0—300 cm 之间,含水量变化在 0.8%~2.2%之间,平均为 1.4%。第 2 层位于 300—500 cm 之间,含水量变化在 1.2%~2.6%之间,平均为 2.2%。位于第 2 个灌木沙丘中部的剖面 2 沙层含水量(图 2)变化趋势与剖面 1 基本相同,含水量变化在 1.1%~2.8%之间,平均为 1.6%。据沙层含水量在垂向上的变化,可分为 2 层。第 1 层在 0—300 cm 之间,含水量变化在 1.1%~1.7%之间,平均为 1.4%。第 2 层在 300—500 cm 之间,含水

量变化在 1.4%~2.9%之间,平均为 2.1%。剖面 2 含水量比剖面 1 高出约 0.1%。由含水量测定结果得知,位于第 3 个灌木沙丘中部的剖面 3 沙层含水量(图 2)变化在 0.8%~2.4%之间,平均值为 1.4%。据沙层含水量在垂向上的变化,可将其分为 2 层。第 1 层在 0—300 cm 之间,含水量变化在 0.8%~1.8%之间,平均为 1.2%。第 2 层在 300—500 cm 之间,含水量变化在 1.3%~2.4%之间,平均值为 1.7%。位于第 4 个灌木沙丘中部的剖面 4 沙层含水量(图 2)变化趋势与剖面 3 基本相同,含水量变化在 0.7%~2.3%之间,平均值为 1.4%。据沙层含水量在垂向上的变化,可分为 2 层。第 1 层位于 0—300 cm 之间,含水量变化在 0.7%~2.0%之间,平均值为

1.3%。第 2 层位于 300—500 cm 之间,含水量增高,变化在 1.2%~2.3%之间,平均为 1.6%。含水量测定显示,位于第 5 个灌木沙丘中部的剖面 5 土壤含水量(图 2)变化在 0.9%~2.3%之间,平均值为 1.5%。据沙层含水量在垂向上的变化,可将其分为 2 层。第 1 层在 0—300 cm 之间,含水量变化在 0.9%~1.9%之间,平均为 1.4%。第 2 层在 300—500 cm 之间,含水量变化在 1.3%~1.9%之间,平均值为 1.7%。位于第 6 个灌木沙丘中部的剖面 6 沙层含水量变化趋

势与剖面 5 基本相同,含水量变化在 0.9%~2.2%之间,平均为 1.5%。据沙层含水量在垂向上的变化,可分为 2 层。第 1 层在 0—300 cm 之间,含水量变化在 0.8%~1.9%之间,平均为 1.2%。第 2 层在 300—500 cm 之间,含水量变化在 1.3%~2.2%之间,平均为 1.9%。位于第 7 和第 8 个灌木沙丘中部的剖面 7 和剖面 8 沙层含水量与前述 6 个灌木沙丘剖面类似,从剖面上部向下部含水量增加,整个剖面平均含水量在 1.4%~1.6%之间(表 1)。

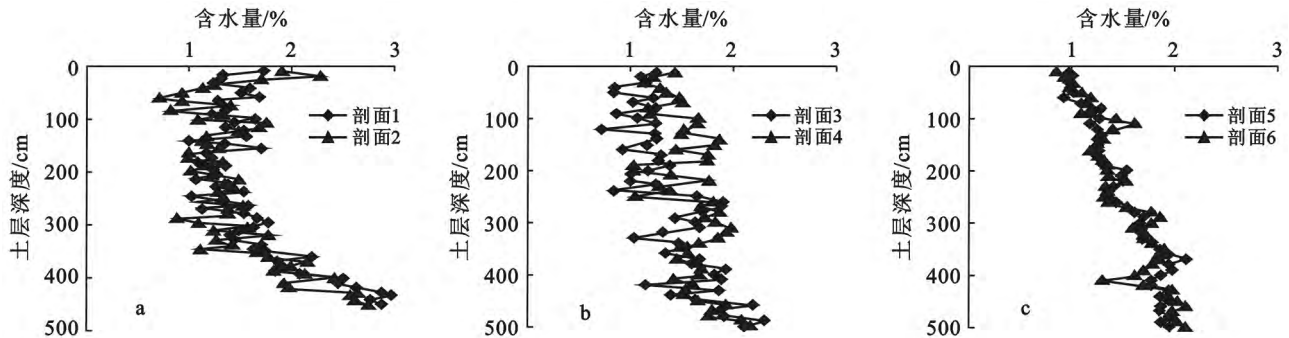


图 2 靖边县海则滩乡沙柳灌木林地沙层含水量

### 3 结果讨论

#### 3.1 靖边县沙地含水量分层与分布深度

靖边县沙地不论是草地还是灌木地,都可以分为 2 层,草地第 1 层和第 2 层的分界深度在 200 cm 左右,灌木沙地第 1 层和第 2 层的分界深度为 300 cm 左右。在草地和灌木地剖面 2 个层次中,都是上部层段含水量较低,下部层段含水量较高。过去的研究<sup>[6]</sup>认为,沙漠区沙层水分一般可分为 3 层,第 1 层为厚度小于 20 cm 含水量很低的干沙层,第 2 层为深度在 20—100 cm 之间的含水量易于变化的活跃层,第 3 层为 100 cm 左右深度之下含水量较高、变化较小的稳定层<sup>[6]</sup>。靖边县沙地含水量测定结果表明,采样剖面顶部没有干沙层出现,这是由于采样前曾出现降雨造成的。在非降雨时期,该区干沙层也是存在的<sup>[10]</sup>。该区含水量易于变化的活跃层分布深度在 200~300 cm 之间,比通常认识的要大 1~2 m,这是该区降水量较多造成的。一般沙漠区年平均降水量在 150 mm 以下<sup>[17]</sup>,甚至不足 100 mm,而靖边沙地区年平均降水量接近 400 mm<sup>[18]</sup>,所以水分活跃层分布深度较大。由此可以得出,在年均降水量为 400 mm 左右的沙地区,沙层水分活跃层分布深度在 2~3 m 之间。

#### 3.2 植被对沙层含水量的影响和适于生长的植被

由图 3 可以看出,靖边县草地与灌木地含水量的垂直变化基本相同,从上往下含水量总体呈现升高的

变化趋势,但草地含水量要比沙柳地高。草本沙地含水量变化范围为 1.0%~6.0%,平均为 3.3%;灌木沙地含水量变化范围为 0.7%~2.8%,平均为 1.5%。沙草地含水量比灌木沙地含水量高 1.8%。由于草地植被根系分布深度小,叶片面积小,蒸腾耗水较少,所以沙层含水量较高。而灌木枝高叶片大,根系深<sup>[3]</sup>,蒸腾耗水较多,使得灌木沙地含水量较高。

靖边县沙地灌木林地沙层含水量低,能否适于灌木林生长是值得讨论的问题。沙层水分适于什么植被生长,要根据沙层有效水含量的多少和凋萎湿度来确定。根据巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠沙层水分的研究<sup>[6-8,17-18]</sup>得知,沙层水分含量一般在 0.1%~5%之间,干沙层中的水分含量一般低于 0.5%,表明沙地持水量很低,也表明沙层对水分的吸附性很弱,可以认为沙层中含量大于 0.5%的水分都是有效水。根据沙层含水量一般较低分析,沙层含水量在 3%~5%之间就是含量很高的了,含水量在 2%~3%之间也是较高的。靖边草地平均含水量大于 3.4%,指示该区沙地水分不但能够满足草原植被生长的需要,而且还有较多剩余。靖边灌木地沙层水分含量平均为 1.5%,位于 2~5 m 深度范围之间第 2 层含水量为 2%左右,表明在灌木吸收利用之后还存在 1%的有效水。按凋萎湿度为田间持水量的 60%计算<sup>[19]</sup>,田间持水量为 5%的靖边沙层凋萎湿度为 3%。根据凋萎湿度分析,虽然靖边沙地水分基本能够满足灌木林

生长的需要,但水分不够充足。本次采样在雨季刚开始的 7 月份,是沙层水分含量较低的时期,如果在雨季之后的秋季采样,沙层含水量还会高一些。由此可以确定,该区发展灌木林是适宜的。灌木的防风固沙效果显著大于草本,该区应该大力发展耐旱的沙柳和柠条等为主的灌木林。

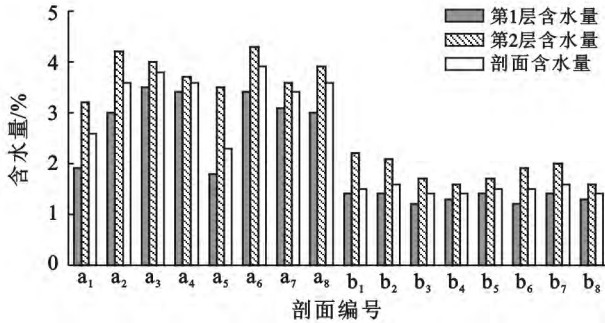


图 3 靖边县海则滩乡草地与灌木林地沙层含水量对比  
注: a<sub>1</sub>—a<sub>8</sub> 表示草地剖面 1—8; b<sub>1</sub>—b<sub>8</sub> 代表灌木林地剖面 1—8。下同。

### 3.3 沙层剖面中水分存在形式和对地下水的补给

土壤水存在的主要形式为重力水和薄膜水<sup>[2,20]</sup>。据过去对许多沙层的研究可知,细砂颗粒为主的沙层的田间持水量为 5% 左右<sup>[6]</sup>。细砂层中的含水量大于 5% 就会有重力水存在,小于 5% 时一般为薄膜水。靖边县沙地所在的毛乌素沙地,沙层粒度成分和我国其他沙漠区粒度成分类似,但粒度略偏粗<sup>[21]</sup>,该区沙层含水量高于 5% 的水分无疑是重力水。靖边县沙地 12 个钻孔的一般含水量都小于 5%,少数层段含水量在 5%~6% 之间,表明该区沙层水一般为薄膜水,个别层段为重力水。在极端干旱的沙漠区,重力水非

常少,但在降水偏多的古尔班通古特沙漠、乌兰布和沙漠区的沙层中可见含水量高于 5% 的重力水出现<sup>[7,8]</sup>。靖边县沙地区年均降水量接近 400 mm,是降水较多的沙地区,应该含有少部分重力水。我们采样在雨季刚开始的 7 月中旬,是沙层水分含量较少的时期,这是其重力水较少的重要原因。

虽然靖边沙地区沙层中重力水出现很少,但薄膜水的含量较高,有高含量薄膜水出现,指示沙层水分含量较高。黄土高原的研究<sup>[20,23-24]</sup>表明,高含量薄膜水的水膜压力是该区黄土中水分向下运移的动力。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<sup>[20,23-24]</sup>。黄土中薄膜水的研究<sup>[20,22]</sup>显示,含量很低的薄膜水运移非常缓慢,而高含量薄膜水运移较快,它的运移不受重力作用影响,而是受水膜厚度的影响,即从水膜厚处向水膜薄处运移。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越大,薄膜水的运移越快,运移快的薄膜水每年运移距离可达 2 m 以上。

通过对薄膜水含量的分析,我们将薄膜水的含量分为 5 个等级,即高含量薄膜水、较高含量薄膜水、中等含量薄膜水、低含量薄膜水和极低含量薄膜水(表 2),它们对地下水的补给强弱也有很大不同(表 2)。表 2 显示,薄膜水含量在 5%~4% 之间为高含量薄膜水,对地下水补给强。薄膜水含量在 3.9%~3% 之间为较高含量薄膜水,对地下水补给较强。薄膜水含量在 2.9%~2% 之间为中等含量薄膜水,对地下水补给中等。薄膜水含量在 1.9%~1% 之间为低含量薄膜水,对地下水补给弱。薄膜水含量小于 1% 为极低含量薄膜水,对地下水补给极弱或无补给。

表 2 包气带沙层薄膜水含量等级与运移动力划分

| 沙层含水量    | 大于 5%     | 5%~4%     | 3.9%~3%   | 2.9%~2%   | 1.9%~1%   | 小于 1%    |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 水分分类类型   | 重力水       | 高含量薄膜水    | 较高含量薄膜水   | 中等含量薄膜水   | 低含量薄膜水    | 极低含量薄膜水  |
| 沙层水分运移动力 | 水分运移动力极强  | 水分运移动力强   | 水分运移动力较强  | 水分运移动力中等  | 水分运移动力弱   | 水分运移动力极弱 |
| 补给地下水强度  | 极强补给      | 强补给       | 较强补给      | 中等补给      | 弱补给       | 极弱补给     |
| 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 | 约 2 m 或更大 | 可大可小     |

从靖边草地沙层薄膜水平均含量剖面变化(图 4)可以确定,该区夏季 7 月草地沙层主要为高含量薄膜水和较高含量薄膜水(图 4),对地下水的补给较强;灌木地沙层主要为低含量薄膜水和少数中等含量薄膜水,对地下水的补给较弱。如果在雨季之后,草地和灌木地沙层水分的含量等级与补给强度还会增加。

### 3.4 靖边沙地水分平衡

土壤水分平衡的构成包括输入量、储存量和输出量<sup>[2,20]</sup>。当输出量大于输入量时为正平衡,反之为负平衡。水分平衡的研究对揭示沙漠区地下水来源和水分运移具有特别重要的作用。由于沙地区降水较少,蒸发量很高,所以一般会认为接近干旱的毛乌素沙地是水分负平衡的地区。然而研究显示,靖边县沙

地区为水分的正平衡。一是靖边县草地沙层剖面中存在部分含水量大于 5% 的重力水,表明大气降水经过蒸发与蒸腾之后,还有较多的剩余水分渗入沙层中(图 1)。二是草地和灌木地沙层剖面含水量均呈现从上向下由低到高的变化趋势(图 1—2),而且剖面下部沙层水分含量较高,指示大气降水已经通过沙层入渗到了沙层剖面 5 m 深度之下。在黄土高原地区,人工林分布区年降水量要略多于 600 mm 土壤水分才能达到正平衡<sup>[2]</sup>。靖边县沙地区年平均降水量为 396 mm 就达到了正平衡,这与沙层入渗率很大有关。据研究<sup>[24-25]</sup>,沙层入渗率是黄土入渗率的 10 倍左右。很高的沙层入渗率加快了大气降水的入渗,增强了大气降水向地下水的转化,使得蒸发与蒸腾量大幅度减少。另外,沙层粒度较粗,毛管孔隙不发育,使得沙层水分受蒸发影响的深度一般小于 0.5 m<sup>[6,18]</sup>,显著小于黄土受蒸发影响到 2 m 的深度,也减少了蒸发作用对沙层水分的消耗,促进了水分正平衡的形成。

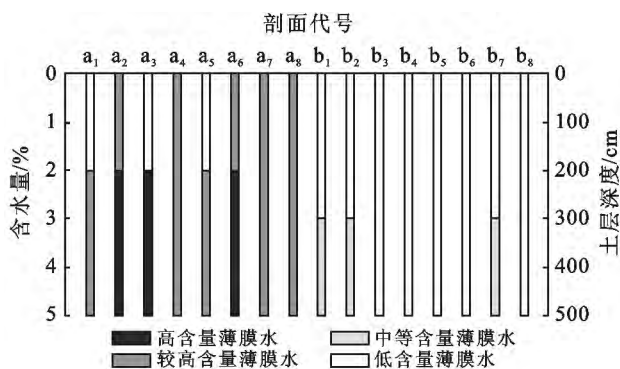


图 4 靖边沙地薄膜水含量分级

## 4 结论

(1) 靖边沙地 500 cm 深度范围内沙层剖面含水量的变化特点是草地 0—200 m 和灌木地 0—300 cm 含水量较低,草地 200—500 cm 和灌木地 300—500 cm 含水量较高;草地沙层含水量明显高于灌木林地,草地含水量变化范围为 1.0%~6.0%,平均为 3.4%;灌木地含水量变化范围为 0.7%~2.8%,平均为 1.5%。

(2) 草地沙层 200 cm 以下有含量大于 3% 的高含量薄膜水和部分含量大于 5% 的重力水存在,显示大气降水对地下水的补给明显。灌木林地沙层中一般缺少重力水,高含量薄膜水也较少,指示灌木林地降水对地下水补给较弱。

(3) 靖边沙地水分为正平衡,其原因除了降水较多之外,沙层入渗率高和蒸发与蒸腾消耗较少也是重要原因。

(4) 由于靖边县沙地区年均降水量偏多,沙地水分活跃层分布深度在 200—300 cm 之间,比极端干旱的沙漠区水分活跃层分布深度大 100~200 cm。

(5) 靖边县沙层水分含量的剖面变化表明,该区沙层水分能够满足耐旱灌木林生长的需要,适于发展防风固沙效果好的灌木林。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 侯庆春. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 76-83.
- [2] 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: 71-75.
- [3] 王国梁, 刘国彬, 周生路. 黄土高原土壤干层研究述评[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 156-159.
- [4] 曹扬, 赵忠, 渠美, 等. 刺槐根系对深层土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 765-768.
- [5] 黄明斌, 杨新良, 李玉山, 等. 黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 7-13.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation[J]. Science, 2004, 305(5687): 1138-1140.
- [13] Bartalis Z, Wagner W, Naeimi V, et al. Initial soil moisture retrievals from the METOPA Advanced Scatterometer (ASCAT)[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(20): 1-5.
- [14] Anne H, Tobias V, Katrin V, et al. Impact of climate change on soil moisture dynamics in Brandenburg with a focus on nature conservation areas[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(17): 2076-2087.
- [15] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2010, 99(3): 125-161.

(下转第 310 页)

- [5] Gomi K, Shimada K, Matsuoka Y. A low-carbon scenario creation method for a local-scale economy and its application in Kyoto City[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 4783-4796.
- [6] Hughes N, Strachan N. Methodological review of UK and international low carbon scenarios[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(10): 6056-6065.
- [7] Böhringer C, Rutherford T F. Transition towards a low carbon economy: A computable general equilibrium analysis for Poland[J]. *Energy Policy*, 2013, 55(1): 16-26.
- [8] Babiker M H. Climate change policy, market structure, and carbon leakage[J]. *Journal of international Economics*, 2005, 65(2): 421-445.
- [9] Sperling D, Yeh S. Toward a global low carbon fuel standard[J]. *Transport Policy*, 2010, 17(1): 47-49.
- [10] Vatalis K I, Laaksonen A, Charalampides G, et al. Intermediate technologies towards low-carbon economy: The Greek zeolite CCS outlook into the EU commitments[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 3391-3400.
- [11] 付加锋, 郑林昌, 程晓凌. 低碳经济发展水平的国内差异与国际差距评价[J]. *资源科学*, 2011, 33(4): 664-674.
- [12] 李晓燕. 基于模糊层次分析法的省区低碳经济评价探索[J]. *华东经济管理*, 2010, 24(2): 24-28.
- [13] 张欣, 赵涛. 基于 DEA 的我国省级区域低碳经济的效率评价研究[J]. *西安电子科技大学学报: 社会科学版*, 2011, 21(5): 61-67.
- [14] 杨颖. 四川省低碳经济发展效率评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(6): 52-56.
- [15] 白雪勤, 孙文生. 低碳经济评价方法及实证分析[J]. *广东农业科学*, 2012, 48(7): 218-220.
- [16] 郑林昌, 付加锋, 李江苏. 中国省域低碳经济发展水平及其空间过程评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(7): 80-85.
- [17] 唐笑飞, 鲁春霞, 安凯. 中国省域尺度低碳经济发展综合水平评价[J]. *资源科学*, 2011, 33(4): 612-619.
- [18] 李磊, 韩雪莹. 省域低碳经济发展分类及评价研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(18): 34-42.
- [19] 王怡. 基于突变级数法的中国低碳经济复杂系统综合评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(5): 525-532.
- [20] 唐志鹏, 刘卫东, 周国梅, 等. 基于突变级数法的中国 CO<sub>2</sub> 减排的影响要素指标体系及其评价研究[J]. *资源科学*, 2009, 31(11): 1999-2005.
- [21] 谷松林. 突变理论及应用[M]. 甘肃兰州: 甘肃教育出版社, 1993.
- [22] 武克军, 王小鹏, 施亚岚, 等. 基于突变级数法的甘肃省生态环境敏感度评价[J]. *人民黄河*, 2010, 32(10): 11-13.
- [23] 魏婷, 朱晓东, 李杨帆. 基于突变级数法的厦门城市生态系统健康评价[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6312-6320.
- [24] 王卉彤, 王妙平. 中国 30 省区碳排放时空格局及其影响因素的灰色关联分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(7): 140-145.
- [25] 何逢标. 综合评价方法的 Matlab 实现[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2010.
- [26] 潘文砚, 王宗军. 基于协调度模型的低碳竞争力评价指标体系研究[J]. *情报杂志*, 2012, 31(10): 76-82.
- [27] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(1): 105-112.
- [28] 赵媛, 沈璐. 江苏省能源与经济系统协调发展评价[J]. *地理科学*, 2012, 32(5): 557-561.

(上接第 304 页)

- [16] 榆林市编纂委员会. 榆林市志[M]. 陕西西安: 三秦出版社, 1996.
- [17] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论[M]. 修订版. 北京: 科学出版社, 1980.
- [18] 赵景波, 马延东, 邢闪, 等. 腾格里沙漠宁夏中卫沙层含水量研究[J]. *山地学报*, 2010, 28(6): 653-659.
- [19] 王力, 邵明安, 侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 87-90.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 赵景波, 牛俊杰, 杜娟, 等. 咸阳市三原县新庄不同植被土层含水量研究[J]. *地理科学*, 2008, 28(2): 247-252.
- [23] 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.
- [24] 赵景波, 王长燕, 邢闪. 陕西省洛川县第 3—4 层黄土和古土壤水分特征研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(4): 10-15.
- [25] 赵景波, 马延东, 邢闪, 等. 腾格里沙漠宁夏回族自治区中卫市沙层水分入渗研究[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(3): 13-16.