

## 采煤塌陷对风沙土含水量的影响

崔向新<sup>1</sup>, 高永<sup>1</sup>, 刘彩云<sup>2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古自治区水文总局, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** 摸清塌陷区土壤水分状况是采煤塌陷退化生态系统恢复和重建的前提。根据相似可比原则, 应用空间对比法研究毛乌素沙地东南缘补连塔矿区 0 ~ 100 cm 层土壤含水量对采煤塌陷的响应, 探索半干旱风沙区采煤塌陷地土壤水分退化的空间变化, 为困难立地土地复垦提供理论指导。试验结果表明: 采煤塌陷增大了沙丘水分损失量, 塌陷程度与土壤含水量呈强负相关, 相关系数为- 0.73( $P < 0.05$ )。与对照区相比, 塌陷区含水量在时间和空间变化上均表现出一定的规律性。从时间角度来看, 不论降雨季节还是干旱季节, 塌陷区含水量均低于对照区, 与对照区相比, 2005 年和 2004 年塌陷区土壤含水量分别降低了 16.55% 和 14.73%; 从空间位置来讲, 对照区不同深度土壤含水量均高于塌陷区相应深度; 对照区不同坡位含水量均高于 2 个塌陷区相应位置(除了 2004 年塌陷区坡顶外)。图 3 表 2 参 13

**关键词:** 恢复生态学; 荒漠化防治; 采煤塌陷; 风沙土; 含水量; 毛乌素沙地

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2008)04-0491-06

## Water content in aeolian sandy soils experiencing mining subsidence

CUI Xiang-xin<sup>1</sup>, GAO Yong<sup>1</sup>, LIU Cai-yun<sup>2</sup>

(1. Ecology Environment College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Hydrologic Bureau, Huhhot 010010, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Research on the spatio-temporal variation law of soil water content in a subsidence area, especially in a semi-arid mining area, was conducted to help reestablish a sound ecological system. In this study, water loss in sandy soils of the Bulanta coal mining area in the southeast part of the Mu Us Desert was analyzed and discussed using a spatial contrast method and correlation analysis in 2005 and 2006. One sand dune without mining was the control, and the others subsided respectively in March of 2005 and July of 2004. Results showed that the degree of soil collapse was significantly and negatively correlated ( $r = -0.73$ ,  $P < 0.05$ ) to the water content of sand dunes. For 0 - 100 cm depths, during both the rainy and drought seasons, 1) water content of non-collapsed dunes was significantly greater ( $P < 0.01$ ) than collapsed dunes; 2) at different depths, water content in non-collapsed dunes was significantly greater ( $P < 0.01$ ) than corresponding depths in collapsed dunes, except of 60 - 100 cm depths; and 3) except for the top of 2004-year collapsing dune, for different locations, water content of non-collapsed dunes was significantly greater ( $P < 0.05$ ) than corresponding locations of collapsed dunes. [Ch, 3 fig. 2 tab. 13 ref.]

**Key words:** restoration ecology; combating desertification; mining subsidence; aeolian sandy soil; water content; Mu Us Desert

地处黄河中游晋陕蒙地区的神府-东胜矿区, 是我国目前已探明煤炭储量最丰富的地区, 煤炭储量占全国储量的三分之一<sup>[1]</sup>。该区地处毛乌素沙地与黄土高原两大结构系统之间的生态环境脆弱带, 降水稀少, 蒸发强烈, 环境总体处于水分亏缺状态, 水分是决定当地生态系统结构与功能的关键因子<sup>[2]</sup>。

---

收稿日期: 2007-09-13; 修回日期: 2008-01-18

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2006BAD03A0307; 2006BAD26B0102)

作者简介: 崔向新, 副教授, 从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: cuixx\_999@yahoo.com。通信作者: 高永, 教授, 博士, 博士生导师, 从事荒漠化和沙尘暴防治等研究。E-mail: gaoyong315@yahoo.com.cn

近年来,当地大规模的地下采煤活动破坏了采空区上覆岩层的原始应力平衡,使它们发生了冒落、断裂和弯曲等移动变形<sup>[3]</sup>,地表产生了大面积裂缝(隙)和不均匀沉陷,裂缝最宽达20 cm,垂直位移最大达90 cm。潜水沿覆岩冒落带发生垂向渗漏,减弱了包气带上层与潜水的联系;土壤中发育的垂向裂隙,增大了水分蒸发面积和蒸发强度<sup>[4]</sup>,致使水资源大量流失,植被由于缺水而枯萎死亡,使本来已十分脆弱的生态环境进一步恶化<sup>[5]</sup>。文章通过毛乌素沙地南缘补连塔矿区的对比性试验,揭示了该地区植物生长季和非生长季土壤水分的分布特征和空间差异,阐述了土壤含水量对采煤塌陷作用的响应,以期为西北内陆干旱和半干旱地区的矿区塌陷地生态恢复与重建提供一定理论指导。

## 1 研究区概况

补连塔煤矿位于毛乌素沙地东南缘,属中温带半干旱气候,干旱少雨多风沙。多年平均降水量368 mm,集中于7~9月<sup>[6]</sup>,蒸发量1319 mm;矿区主要土壤类型为风沙土,土壤疏松,抗蚀力差,易遭受流水侵蚀和风蚀;矿区地质条件复杂,基岩上覆有古风沙和风积沙等,形成夹层现象;主要地貌类型为波状沙地,沙丘起伏,相对高差10~40 m;水资源贫乏,植被稀疏,沙生植物占优势,主要植物种有沙柳 *Salix psammophila*,小叶杨 *Populus simonii*,羊柴 *Hedysarum laeve*,油蒿 *Artemisia ordosica*,沙竹 *Psammochloa villosa*,虫实 *Corispermum heptapotamicum* 和沙米 *Agriophyllum pungens*等。

## 2 试验样地选择及土壤取样、测定方法

### 2.1 试验样地选择

选择下垫面条件比较相近的3个沙丘作为试验样地,沙丘平均海拔约为1187 m,平均高度为3.0~3.5 m,迎风坡倾角约11°~14°,背风坡倾角约30°~34°,植被盖度约30%,相邻样地之间距离约120 m。第1个沙丘尚未进行地下开采,完全没有塌陷,设为对照区;第2个沙丘背风坡2005年3月发生塌陷;第3个沙丘背风坡2004年7月发生塌陷。

### 2.2 土壤取样与测定

在对照区和2个塌陷区沙丘背风坡坡顶、坡中、坡底和丘间低地分别布设2个剖面,距离约3 m。2005年7月、8月和11月,用TSC-V型水分仪测定每个剖面5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85和95 cm层的体积含水量(用符号 $v$ 表示),每层平行测定5次。无降雨时每3~5天测1次;降雨后每2 d测1次,连续测量3次,以后再恢复为每3~5 d测量1次。2006年3~4月沙丘上层部分土层处于冻结状态,采用烘干法测定其质量含水量(用符号 $m$ 表示)。

为便于比较分析,根据公式: $v = \frac{m}{\rho}$ ,其中: $\rho$ 为风沙土容重( $g \cdot cm^{-3}$ )。把质量含水量换算成容积含水量。

## 3 结果与分析

### 3.1 对照区和塌陷区水分时空动态差异分析

3.1.1 塌陷对风沙土含水量月变化的影响 3个样地土壤水分含量顺序为:对照区>2004年塌陷区>2005年塌陷区(图1),对照区和2个塌陷区含水量月变化情况主要取决于塌陷程度和降水补给量。

根据塌陷裂缝(隙)多少和裂缝(隙)大小调查结果将3个试验样地划分为3个塌陷等级:零度塌陷——对照区,中度塌陷——2004年塌陷区,重度塌陷——2005年塌陷区。塌陷程度与含水量相关分析结果表明:塌陷程度与含水量呈较强的负相关,相关系数为-0.73( $P < 0.05$ )。

对照区和塌陷区含水量随时间的变化与当地实测

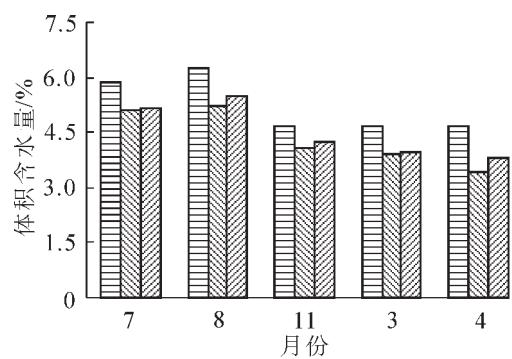


图1 不同月份对照区和塌陷区平均含水量

Figure 1 Variation of monthly average water content in check area and collapsing area

的月平均降水量变化趋势基本一致。当地降水主要集中于 7 月、8 月和 9 月, 且以 7 月和 8 月最为集中, 3 月和 4 月降水量极小且水分蒸发强烈, 3 个样地含水量也表现为 7 月和 8 月较高, 11 月、3 月和 4 月较低。

与对照区相比, 2005 年和 2004 年塌陷区含水量分别降低了 16.55% 和 14.73%。对 3 个样地各样点含水量数据进行方差分析, 结果表明: 不论在降雨季节还是在干旱季节, 对照区含水量均始终明显高于 2 个塌陷区 ( $P < 0.01$ )。这主要是由于采煤塌陷造成了采空区上方风沙土孔隙度增大和垂向裂隙(缝)发育, 土壤内部的水汽直接从均一、较粗直的裂隙(缝)扩散到大气中去, 比经过弯曲度极大的土壤孔隙快得多<sup>[4]</sup>, 加强了风力挟走土壤水分的能力<sup>[7]</sup>。2 个塌陷区含水量相比, 2004 年塌陷区比 2005 年塌陷区高 3.96%。这是由于 2004 年塌陷区塌陷较早, 试验时已处于塌陷稳定期, 且风蚀掩埋了大部分裂隙(缝), 而 2005 年塌陷区沉陷相对较晚, 试验时正处于塌陷加速期, 土壤裂隙(缝)较多且较宽。多重均值检验表明 2004 年和 2005 年塌陷区含水量并无显著差异( $P > 0.05$ )。

**3.1.2 塌陷对风沙土含水量日变化的影响** 在不同观测日, 对照区和塌陷区含水量变化趋势基本一致, 且对照区含水量均高于塌陷区(表 1)。2005 年 7 月和 8 月, 在试验区未形成有效降雨时(试验区自 2005 年 6 月 15 日至 7 月 19 日均未能形成有效降雨), 对照区含水量比 2005 年和 2004 年塌陷区分别高出 0.47% 和 0.37%; 形成有效降雨时(7 月 20 日和 8 月 9 日形成有效降雨), 对照区含水量比 2005 年和 2004 年塌陷区分别高出 0.96% 和 0.84%。冬季(2005 年 11 月)在沙丘表层干沙层和干沙层以下冻结层的保护作用下, 对照区和塌陷区的水分含量差异较小。春季(2006 年 3 - 4 月)随着地温的升高, 土壤冻结层解冻, 失去其拦截水分蒸发作用, 塌陷区受塌陷裂缝和裂隙影响水分损失量增大, 对照区和塌陷区水分含量差异逐渐增大。

表 1 对照区和塌陷区 0 ~ 100 cm 层平均含水量日变化

Table 1 Daily variation of average water content within 100 cm depth layer

观测日期/ (月-日)	样 地			观测日期/ (月-日)	样 地		
	对照区	2005 年塌陷区	2004 年塌陷区		对照区	2005 年塌陷区	2004 年塌陷区
07-08	4.58	4.10	4.19	11-26	4.64	4.10	4.25
07-13	4.54	4.06	4.13	11-29	4.59	4.03	4.13
07-18	4.47	4.01	4.15	03-17	4.70	4.07	4.10
07-22	7.19	6.53	6.06	03-20	4.65	4.11	4.04
07-24	7.03	5.98	5.93	03-23	4.73	4.04	4.00
07-26	6.67	5.72	5.87	03-26	4.74	3.76	3.92
07-31	6.48	5.55	5.77	03-29	4.66	3.53	3.79
08-10	6.54	5.52	5.83	04-01	4.79	3.49	3.81
08-12	6.33	5.23	5.45	04-04	4.87	3.67	3.86
08-14	6.05	5.03	5.37	04-07	4.55	3.38	3.81
11-17	4.72	4.17	4.47	04-10	4.50	3.23	3.64
11-20	4.75	4.16	4.45	04-13	5.92	4.48	4.52
11-23	4.74	4.15	4.41	04-16	5.73	4.47	4.50

**3.1.3 沙丘不同坡位含水量对塌陷作用的响应** 图 2a 是对照区和塌陷区 2005 年 7 月和 8 月不同坡位平均体积含水量变化。由图 2 可知, 在降雨季节, 2 个塌陷区不同坡位含水量变化趋势基本一致。除了 2004 年塌陷区坡顶外各样点含水量波动均较小, 变动范围为 4.53% ~ 5.63%; 相比之下, 对照区含水量波动较大, 变动范围为 5.20% ~ 6.59%。

图 2b 是对照区和塌陷区 2005 年 11 月和 2006 年 3 - 4 月不同坡位平均含水量变化。由图 2 可知,

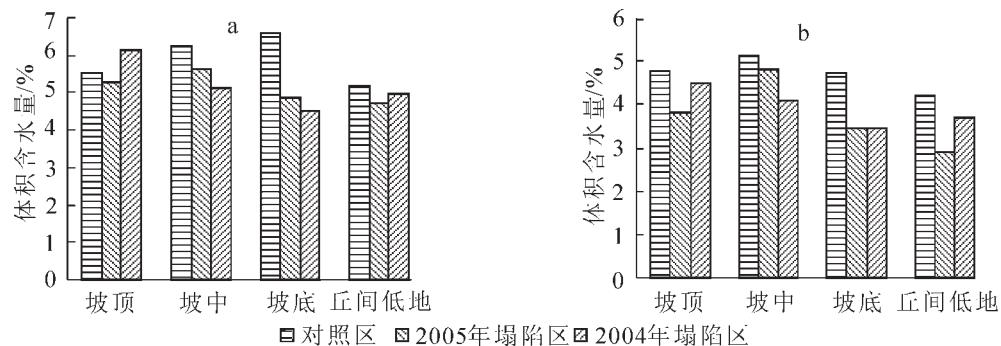


图2 对照区和塌陷区不同坡位水分变化

Figure 2 Variation of soil content of different location in check area and collapsing area

在干旱季节,对照区和2004年塌陷区含水量变化较小,对照区含水量变动范围为4.20%~5.14%,2004年塌陷区含水量变动范围为3.46%~4.51%;2005年塌陷区各样点含水量出现大的波动,变动范围为2.90%~4.81%。

综合图2可知:不论降雨季节还是干旱季节,除了2004年塌陷区坡顶外,2个塌陷区不同坡位含水量均低于对照区相应位置。在降雨季节,2004年塌陷区坡顶含水量大于对照区坡顶,主要是因为该处位于塌陷边缘的外侧,裂缝密度仅为100条·km<sup>-1</sup>,且塌陷时间较早已被沙埋,加之该处半径10 m范围内无任何植被,蒸腾作用较弱;相比之下对照区坡顶生长有小叶杨,蒸腾作用较强。在干旱季节,对照区和塌陷区的植物蒸腾作用对土壤水分的影响趋于相等;3月和4月该地区大风多且强度大<sup>[8]</sup>,2004年塌陷区植被盖度小于对照区,其风速大于对照区,加速了坡顶水分蒸发,因此在干旱季节2004年塌陷区坡顶含水量低于对照区。

3.1.4 沙丘不同层次含水量对塌陷作用的响应 图3a是对照区和塌陷区2005年7月和8月剖面不同深度的平均含水量变化。2005年和2004年塌陷区各层含水量变化基本一致,且波动较小,变动范围为4.47%~5.55%;对照区各层含水量波动较大,变动范围为4.77%~6.79%,表层0~10 cm和底层60~100 cm含水量较低,中间层10~60 cm含水量较大,在55 cm层达到最大值6.79%。

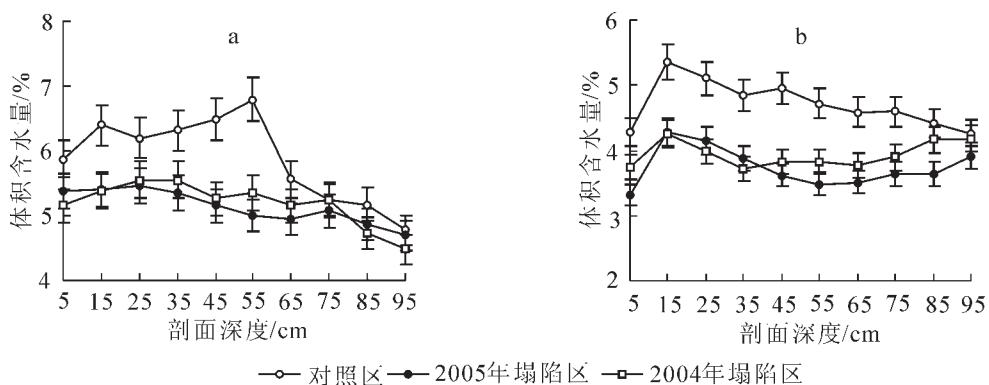


图3 对照区和塌陷区水分垂直变化

Figure 3 Vertical variation of soil content in check area and collapsing area

图3b 是对照区和塌陷区2005年11月和2006年3~4月剖面不同观测深度的平均含水量变化。对照区和2个塌陷区各层含水量变化趋势基本一致,表现为表层0~10 cm含水量较低,在10~20 cm层含水量达最大值,20~100 cm层含水量变化较小。2个塌陷区含水量变动范围为3.31%~4.28%,对照区含水量变动范围4.27%~5.36%。

综合图3可知:不论是在降雨季节还是在干旱季节,0~100 cm层含水量,对照区不同深度均高于塌陷区相应深度,这与李惠娣等<sup>[5]</sup>和何志斌等<sup>[9]</sup>的研究结果一致。在降雨季节,塌陷后沙丘大孔隙

度增多(另文已报道), 岩土持水性变差, 且降雨时产生裂隙流, 水分入渗深度变大, 使得风沙土上层含水量相对降低, 沙丘上下各层含水量趋于一致。包气带 0~60 cm 层, 塌陷区含水量始终明显低于非塌陷区( $P < 0.01$ ), 2005 年和 2004 年塌陷区 0~60 cm 含水量分别比对照区降低了 16.56% 和 15.30%; 包气带 60~100 cm 层, 对照区含水量分别比 2005 年和 2004 年塌陷区的提高了 5.78% 和 5.59%, 但无明显差别 ( $P > 0.1$ )。在干旱季节, 3 月和 4 月沙丘表层形成 7.5 cm 厚的干沙层, 它割断了沙丘表层与下层的毛细管作用, 在一定程度上抑制了下层水分的蒸发, 3 个样地 10 cm 以下土层含水量变化幅度均较小。由于这一时期内未能形成有效降雨, 而降雨又是毛乌素沙区水分的主要补给源, 因此, 3 个试验样地包气带水分严重亏缺。在塌陷区潜水沿覆岩冒落带和裂缝(隙)发育处发生垂向渗漏, 减弱了包气带与潜水的联系<sup>[4]</sup>; 加之土壤中发育的大量垂向裂隙, 增加了土壤水的蒸发面积和蒸发强度, 使得 0~100 cm 层 2 个塌陷区含水量均明显低于对照区( $P < 0.01$ ), 2005 年和 2004 年塌陷区含水量分别比对照区降低了 20.59% 和 16.35%。

### 3.2 采煤塌陷对土壤水分损失量的影响

土壤储水量是指一定面积和厚度土壤中含水的绝对数量, 用水深 ( $D_w$ ) 表示, 即指在一定厚度( $h$ )一定面积土壤中所含的水量相当于相同面积水层的厚度, 0~100 cm 土壤储水量计算方法<sup>[10]</sup>如下:

$$D_{w,100} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot h_i$$

其中:  $n$  为 100 cm 土体划分的层数,  $t_i$  为第  $i$  层土壤体积含水量 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ),  $h_i$  为第  $i$  层土壤厚度 (cm),  $D_{w,100}$  为 100 cm 土体含水深度(cm)。

2005 年 7 月 20 日和 8 月 9 日试验区均有较强降雨, 7 月 20 日到 8 月 9 日降雨间歇期研究塌陷对土壤水分损失量的影响。7 月 20 日试验区降雨 39.6 mm, 3 个样地水分最大入渗深度为 60 cm。60~100 cm 层水分含量变化较小, 可近似认为 3 个样地 100 cm 以下水分运动状况相等。水分损失量( $Q$ )用公式表示为:  $Q = D_{w1,100} - D_{w2,100}$ 。其中:  $D_{w1,100}$  和  $D_{w2,100}$  分别表示不同观测日 3 个样地的储水量。

不同观测日内, 3 个样地土壤水分损失量顺序: 2005 年塌陷区 > 2004 年塌陷区 > 对照区(表 2)。观测期末(8 月 5 日), 2005 年和 2004 年塌陷区土壤水分损失量分别比对照区多 0.57 和 0.17 cm; 2 个

表 2 对照区和塌陷区不同坡位水分损失量

Table 2 Water loss amount of different location in check area and collapsing area

试验样地	观测日期/ (年-月-日)	储水量/cm				水分损失量/cm
		坡顶	坡中	坡底	丘间低地	
未塌陷区 (对照)	2005-07-22	6.44	7.25	8.13	5.93	—
	2005-07-24	6.37	7.43	7.80	5.72	0.11
	2005-07-26	5.98	7.17	7.95	5.57	0.27
	2005-07-31	6.24	6.42	7.74	5.52	0.46
	2005-08-05	5.42	6.34	7.35	5.25	0.85
	2005-07-22	6.55	7.23	5.76	6.59	—
2005 年塌陷区	2005-07-24	6.32	6.68	5.62	5.27	0.56
	2005-07-26	6.06	6.56	5.45	4.80	0.81
	2005-07-31	5.77	6.43	5.32	4.69	0.98
	2005-08-05	5.39	5.97	4.79	4.31	1.42
2004 年塌陷区	2005-07-22	7.73	6.07	5.72	5.70	—
	2005-07-24	7.61	5.95	4.55	5.61	0.38
	2005-07-26	7.60	5.68	4.77	5.44	0.44
	2005-07-31	7.44	5.59	4.84	5.21	0.54
	2005-08-05	6.20	5.26	4.55	5.15	1.02

塌陷区相比, 2005年塌陷区的损失量比2004年塌陷区多0.40 cm。观测期末, 不同坡位水分损失量: 2005年塌陷区各坡位和2004年塌陷区坡顶、坡底的水分损失量均高于对照区相应位置; 2004年坡中和丘间低地水分损失量与对照区相应位置趋于相等。其中2005年塌陷区丘间低地的水分损失量明显大于对照区丘间低地( $P < 0.05$ ), 两者差值1.60 cm, 这主要是因为2005年塌陷区丘间低地受塌陷扰动较大, 塌陷后物理性黏粒含量明显减少(另文已报道), 且裂缝密度较大, 达500条·km<sup>-1</sup>。

#### 4 结论与讨论

沙丘含水量与采煤塌陷程度呈较强负相关, 相关系数为-0.73 ( $P < 0.05$ ), 塌陷致使沙丘含水量降低, 尤其是在降雨后和春季土壤解冻后一段时间内表现的较为突出。0~100 cm层含水量时间变化情况为: 不论在降雨季节还是在干旱季节, 对照区含水量月平均值和观测日内的平均值始终高于2个塌陷区, 与对照区相比, 2005年和2004年塌陷区含水量分别降低了16.55%和14.73%。0~100 cm层含水量空间变化情况为: 对照区不同深度土壤含水量均高于塌陷区相应深度的含水量; 对照区不同坡位含水量均高于2个塌陷区相应位置的含水量(除了2004年塌陷区坡顶外)。

采煤塌陷致使沙丘水分损失量增大。形成有效降雨后, 塌陷区水分总损失量比对照区增大, 且2005年塌陷区水分损失量相对更多; 在干旱季节, 包气带土壤水分长期处于亏缺状态时塌陷裂缝(隙)对土壤水分损失的影响有待进一步研究。

该区地下水埋深在15 m以下, 多在20~40 m<sup>[6]</sup>, 且采煤破坏了隔水层, 造成地下水位下降, 减弱了潜水与包气带的水分联系<sup>[11, 12]</sup>, 而试验区毛管水上升高度仅为43 cm<sup>[13]</sup>, 理论上沙丘表层0~100 cm含水量受潜水影响作用微弱。受实验条件和研究区试验样地具体地下水文资料所限, 样地包气带0~100 cm层是否受潜水和上层滞水影响有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 周文凤. 晋陕蒙接壤区水土保持的忧思[J]. 中国水土保持, 1993(2): 6-10.
- [2] 王兵, 崔向惠, 白秀兰, 等. 荒漠化地区土壤水分时空格局及其动态规律研究[J]. 林业科学, 2002, 15(2): 143-149.
- [3] 陈龙乾, 邓喀中, 赵志海, 等. 开采沉陷对耕地土壤物理特性影响的空间变化规律[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 586-590.
- [4] 张发旺, 侯新伟, 韩占涛, 等. 采煤塌陷对土壤质量的影响效应及保护技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 67-70.
- [5] 李惠娣, 杨琦, 聂振龙, 等. 脆弱生态环境对干旱区采矿的响应与对策[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(5): 30-35.
- [6] 侯庆春, 汪有科, 杨光. 神府-东胜煤田开发区建设对植被影响的调查[J]. 水土保持研究, 1994, 1(4): 127-137.
- [7] 赵明鹏, 张震斌, 周立岱. 阜新矿区地面塌陷灾害对土地生产力的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 77-80.
- [8] 王文龙, 李占斌, 张平仓. 神府东胜煤田人为滑坡崩塌泥石流及其防治对策[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(1): 81-84.
- [9] 何志斌, 赵文智. 半干旱地区流动沙地土壤湿度变异及其对降水的依赖[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 359-362.
- [10] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 101-102.
- [11] 杨选民, 丁长印. 神府东胜矿区生态环境问题及对策[J]. 煤矿环境保护, 2000, 14(1): 69-72.
- [12] 陈武, 叶贵钧. 鄂尔多斯煤田侏罗纪煤矿区环境地质评述[J]. 煤炭经济研究, 2002(3): 76-77.
- [13] 魏江生, 贺晓, 胡春元, 等. 干旱半干旱地区采煤塌陷对沙质土壤水分特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 84-88.