

黄土丘陵区土壤水分时空变化特征对采煤沉陷的响应

魏江生, 何金军, 高永, 贺晓, 卢立娜

(内蒙古农业大学 生态环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019)

摘 要: 神府—东胜煤田采煤沉陷区土壤水分补给以降水为主, 土壤水分是维系该地区植被发育主要的限制因子。以大柳塔煤矿为例, 利用中子仪对不同年份沉陷区及未采区不同坡位、层次土壤水分动态进行了对比研究。(1) 未采区与沉陷区土壤水分在垂直方向均呈现先增大后减小态势, 基于标准差和变异系数两个指标的定量方法, 土壤水分在垂直方向划分为水分速变层、活跃层、稳定层。与未采区相比较, 沉陷区土壤含水量均显著低于未采区。(2) 土壤含水量由大到小顺序依次为 5 月、8 月、6 月、7 月。(3) 与未采区相比较, 沉陷区坡顶、坡中处土壤水贮量损失均高于未采区, 而坡底处土壤水贮量损失低于未采区。采煤沉陷造成土壤水分显著减小。

关键词: 采煤沉陷; 黄土丘陵区; 土壤水分; 时空异质性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008) 05-0066-04

中图分类号: S152.7

Response of Spatial and Temporal Characteristics of Soil Moisture to Mining Subsidence in Loess Hilly Region

WEI Jiang sheng, HE Jir jun, GAO Yong, HE Xiao, LU Li na

(College of Ecenvironment Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract: Soil moisture is mainly replenished by rain water in the subsided area of Shenfir dongsheng coal field. It is a crucial factor in maintaining vegetation development. By taking Daliuta coal mine for an example, soil moisture in different slope positions and layers is studied using neutron probe. Results show that in vertical direction, soil moisture increases firstly and then decreases. By using standard deviation and variation coefficient, vertical distribution of soil moisture may be divided into the rapid change layer, active layer, and stable layer. Soil moisture in the subsided area is lower than that in the non mining area. Soil moisture is low in June and July during observation and high in May and August. Comparing with the non mining area, soil moisture loss at the top and bottom of slope is higher in the subsided area, while it is significantly lower at the middle of slope. Mining subsidence causes soil moisture decrease significantly.

Keywords: mining subsidence; loess hilly area; soil moisture; spatial and temporal heterogeneity

土壤水分是土壤最重要的组成部分之一, 是自然界水循环的一个重要环节, 处于不断的变化和运动中, 也势必影响到植物的生长和土壤中许多化学、物理和生物学过程^[1]。作为气候、植被、地形及土壤因素等自然因素的综合反映, 土壤水分是干旱、半干旱黄土丘陵区生态系统和植被恢复建设的基础。土壤水分动态变化正在引起水文学界的广泛关注。研究表明, 土壤水分具有不同的时空特征, 土壤水分时空动态变化研究一直是水文学、土壤学的一个热点^[2-5]。

位于陕西、内蒙古、山西交界处的神府—东胜煤田被誉为世界八大煤田之一。近年来, 由于长期采煤

导致大面积地区沉陷与地裂缝(隙), 地下水断流, 土地沙化日益剧烈, 水土流失严重, 造成了土地生产力不断下降, 土地资源日益枯竭。由于降水稀少, 且季节分配不均匀, 蒸发强烈, 土壤水分是该地区植物生长和植被恢复的主要限制因子, 所以土壤水分动态一直是该地区水分的研究重点之一。本文以神府—东胜煤田大柳塔煤矿为研究对象, 对不同年份沉陷区与未采区不同坡位、土层的土壤水分时空特征变化进行了对比研究, 试图了解采煤沉陷对黄土丘陵区土壤水分时空特征影响规律, 为矿区沉陷对环境的影响和寻找合理的复垦技术措施提供科学的理论依据。

收稿日期: 2008-03-04

修回日期: 2008-06-12

资助项目: “十一五”科技支撑项目(2006BA D03A0307); 国家自然科学基金项目(30771765; 2006GB24320403)

作者简介: 魏江生(1969—), 男(汉族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为荒漠土壤水分。E-mail: jiangshengwei@hotmail.com。

1 研究区自然概况

研究区位于陕西省神木县北部, 府谷县西部, 内蒙古伊金霍洛旗和东胜市南部。该地区属于典型的大陆性半干旱干草原气候, 气温夏季炎热, 冬季严寒, 日均温 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均积温 $3\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$, 无霜期 $130\sim 180\text{ d}$, 光照充足, 全年日照时数 $2\ 740\sim 3\ 000\text{ h}$ 。多年平均风沙日 70 d 左右, 沙暴日 $4\sim 9\text{ d}$, 最长达 43 d 。大风和沙暴多集中于 $3\sim 5$ 月, 尤以 $3\sim 4$ 月为甚^[6]。平均降水量 $350\sim 400\text{ mm}$, 分配不均, 多为暴雨。

研究区观测期内的降水与气温变化状况如图 1 所示。干旱、大风及暴雨是该区气候的主要特征, 也是该区环境脆弱的重要表现。主要地貌类型为黄土丘陵, 梁峁起伏, 沟壑纵横, 相对高差 $10\sim 40\text{ m}$, 地面组成物质为黄土母质上发育的栗钙土, 多钙结核, 结构紧实。

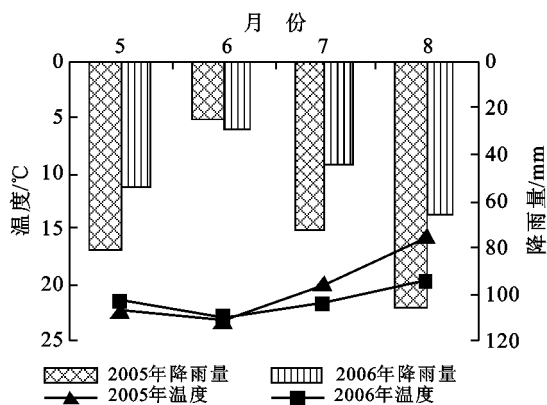


图 1 研究区观测期内降水与气温变化

2 研究方法

2.1 样点确定及测定方法

实验期为 2005 年 5—8 月, 2006 年 5—8 月。调查样地位于大柳塔矿三盘区上方, 选择下垫面情况比较相近(坡走向、高度、坡度近似相等, 植被种类和盖度相当)的 5 个典型坡作为试验样地, 分别为: 未采区(对照区)和 2002 年、2003 年、2004 年、2005 年沉陷区。土壤样品的采集及测定方法主要根据不同沉陷年份、坡位(坡顶、坡中、坡底)、层次(5, 15, 25, ..., 165 cm, 每层重复 3 次)进行取样、监测, 分别测定其土壤含水量及水分特征常数。其中土壤含水量采用烘干法($105\text{ }^{\circ}\text{C}$)与北京 CNC503DR 型中子水分仪相结合, 监测深度 170 cm , 每次降雨后的前 3 d 每天监测一次, 以后每隔 5 d 监测一次, 直到下次降雨之前。降雨量应用 TRM-ZS1 型自动气象站监测。数据分析利用统计软件 SAS9.0。

2.2 土壤水贮量的计算方法^[7]

土壤水贮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。 D_w 与 θ_v 的关系如下

$$D_w = \theta_v \cdot h \quad (1)$$

式中: θ_v ——容积含水量(cm^3/cm^3)。

分层计算公式表示如下

$$D_{w100} = \sum_i^n \theta_i \cdot h_i \quad (2)$$

式中: n ——10 cm 土体划分的含水量均一的层次数; θ_i ——第 i 层土壤容积含水量; h_i ——第 i 层土壤厚度(cm); D_{w100} ——100 cm 土体含水深度(cm)。

降雨后土壤水分损失量(Q)计算公式表示如下

$$Q = D_{w1} - D_{w2} \quad (3)$$

式中: D_{w1} ——降雨后第一天的土壤水贮量(mm);

D_{w2} ——降雨后某天的土壤水贮量(mm)。

3 结果与分析

3.1 土壤水分垂直变化特征

土壤水分含量在垂直方向的分布受降水、蒸发、土地利用类型和植被等的影响很大^[8]。通过对未采区土壤水分垂直变化(图 2)进行分析可知, 土壤水分在垂直方向随着土壤深度增加呈先增大后减小趋势。基于标准差和变异系数两个指标的定量方法^[9], 应用聚类分析方法对标准差和变异系数进行划分, 判定土壤水分垂直变化类型, 划分结果如表 1 所示。(1)水分速变层($0\sim 40\text{ cm}$)。降雨初期土壤由于受到降雨影响, 土壤的入渗深度一般在距地表 40 cm 之内, 这是由于该地区土壤属于黄土母质, 物理性黏粒含量较高、结构紧密, 透水性较差, 且降雨强度大, 大部分雨水在地表形成径流, 而入渗量少, 所以入渗深度较浅。 $0\sim 40\text{ cm}$ 内土壤水分变化剧烈, 随着降雨后天数延长, 土壤水分含量显著减小($P < 0.05$)。由此可见, 地表蒸发量和植物蒸腾量等土壤水分损失量主要发生在土壤深度 $0\sim 40\text{ cm}$ 之间, 这是由于入渗后的水量多集中于表层, 植物根系多集中于此层内, 所以其水分损失较快, 水分含量变化较大。(2)水分活跃层($40\sim 100\text{ cm}$)。仅存在少许灌木和半灌木根系, 土壤水分受气候和植被影响相对较小, 降雨初期该层土壤可以起到贮水作用, 随着降雨后天数延长, 植被强烈蒸腾, 该层土壤又可以向速变层供水, 其土壤水分变化活跃, 土壤水分随着降雨后天数延长变化显著($P < 0.05$)。(3)水分稳定层(110 cm 以下)。降雨初期深层土壤由于没有雨水的补给, 再加上没有植物根

系的分布,水分损失小,含水量随着降雨后天数延长变化不显著($P=0.1$)。

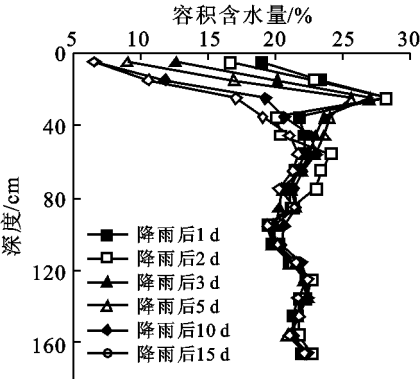


图 2 未采区土壤水分垂直变化

通过对沉陷区土壤含水量垂直分层结果(表 1)分析,与未采区一致,同样也分为速变层(0—40 cm),活跃层(40—100 cm),稳定层(100 cm 以下)。土壤水分随着土壤深度增加表现为先增大后减小趋势。由图 3 可知,与未采区相比较,沉陷区土壤含水量显著低于未采区($P<0.05$)。这是由于未采区地表无裂缝(隙),且植被覆盖度高,土壤保水蓄水性能高;而沉陷区由于地表产生大量裂缝(隙),植被覆盖度相对低。降雨后,降水入渗方式也由未采区的“活塞式”入渗转变为以“捷径式”入渗为主,部分水在地表形成径流后沿冲蚀沟流失,部分水沿地表裂缝(隙)向下渗漏,

导致土壤保水蓄水性能低。再者采煤后采空区上方地表发生大面积沉陷、地下水位下降,沉陷区地表产生大量裂缝(隙),增大了土壤蒸发表面积,从而导致土壤含水量降低。

沉陷区土壤含水量,与降雨后 1 d 相比较,降雨后 15 d 0—40 cm 范围内土壤含水量显著降低($P<0.05$),具体表现为沉陷区土壤各层次含水量低于未采区,而深层次土壤含水量变化不明显。不同沉陷年份间土壤水分变化显著($P<0.05$),具体表现为随着沉陷年限延长,土壤含水量呈递减态势。这是由于沉陷年限愈长,土壤水分累积损失量愈多,但随着沉陷年限延长,土壤结构特性趋于稳定,再加上多数地表裂缝(隙)经过风蚀、水蚀作用被填埋,土壤水分变化趋势并非一直递减,而是表现出一定回升趋势。

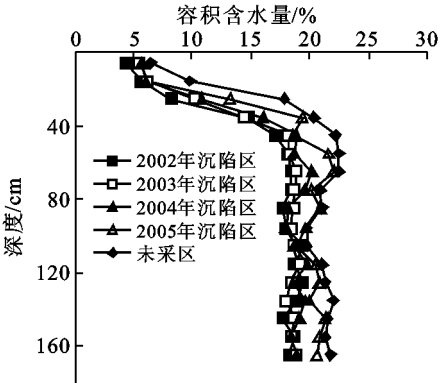


图 3 沉陷区降雨后 15 d 土壤水分垂直变化

表 1 土壤水分垂直分层结果

深度/ cm	平均值/ %		标准差/ %		变异系数/ %		层 次
	未采区	沉陷区	未采区	沉陷区	未采区	沉陷区	
5	11.69	8.07	2.31	2.69	29.44	48.08	速变层
15	17.62	13.62	2.27	2.43	29.47	49.42	
25	24.25	17.60	2.11	2.28	26.64	40.29	
35	21.55	18.81	2.03	2.14	27.42	41.61	
45	22.16	20.43	2.18	1.99	14.25	16.64	活跃层
55	22.75	20.15	1.12	1.86	13.69	16.52	
65	22.00	20.25	1.57	1.76	13.52	15.27	
75	21.28	19.63	1.25	1.47	13.19	16.03	
85	21.21	19.14	1.24	1.50	10.67	14.82	
95	19.84	18.87	1.42	1.29	11.58	14.03	稳定层
105	20.04	19.10	0.99	0.92	4.64	6.34	
115	21.39	19.86	0.96	0.87	4.21	6.02	
125	22.32	19.48	0.89	0.86	4.60	6.81	
135	22.15	19.57	0.59	0.74	3.99	4.28	
145	21.57	19.61	0.45	0.42	2.26	3.83	
155	21.31	19.13	0.34	0.39	2.49	2.98	
165	22.21	19.36	0.30	0.58	2.36	3.12	

3.2 土壤水分月变化特征

对未采区土壤水分月变化(图 4)分析表明,表层(0—10 cm)土壤在雨季保持在较低的水平,仅为 6.51%~8.1%。距地表 40 cm 内土壤水分变化剧烈,土壤水分随着土壤深度的增加而增加,这是由于大部分植物根系分布在土壤表层,植物蒸腾和地表蒸发造成表层土壤水分大量减少的结果。观测期内,平均含水量 6—7 月份低;5,8 月份高,这是由于 6—7 月份降雨量少,气温高,空气干燥,蒸发力强,导致表层土壤水分亏缺严重;而 5 月份由于冬季降雪以及当月有效降雨(降雨量大于 10 mm)较多,造成其含水量高于其它月份。8 月份土壤含水量高,则是由于 8 月份降雨增多,蒸发力降低,因此其含水量相对高。通过对 5—8 月降雨量统计表明,0—40 cm 土层内土壤月平均含水量与当月降雨量存在一定关系,即月平均含水量随着当月降雨量增加而显著增加($P < 0.05$),属于受降雨影响速变层。深层 100—170 cm 深度土壤由于没有雨水补给,在观测期内始终变化一致,受地面气象因素影响小,属于水分稳定层。

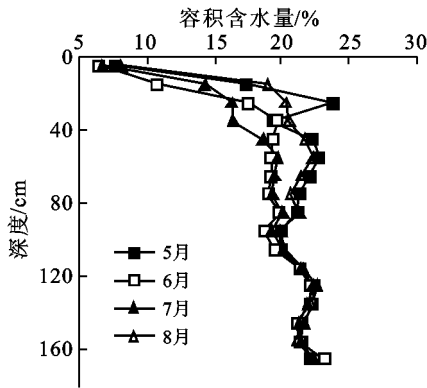


图 4 未采区土壤水分月变化

从沉陷区土壤水分月变化(图 5)可知,与未采区相比较,土壤含水量除 2005 年沉陷区在 5 月份较高外(22.60%),各沉陷区在降雨期月平均含水量均显著低于未采区($P < 0.05$),这与采煤沉陷区产生大量裂缝(隙),导致土壤自身结构破坏以及地表植被覆盖度降低有关。观测期内,无论是沉陷区还是未采区,土壤含水量由大到小顺序依次为 5 月、8 月、6 月、7 月。这是由于 5 月份有效降雨(降雨量大于 10 mm)次数多,且 5 月份蒸发力低,植被耗水少,减少了土壤水分损失。8 月份由于 5—7 月份的降雨补充了一部分地表水分,再者 8 月份降雨增多,蒸发力降低,因此其含水量相对较高。6 月和 7 月虽然有降雨,但有效降雨次数少,蒸发力强,植被正处于生长期,需水耗水高,导致其土壤含水量低于其它两个月份。

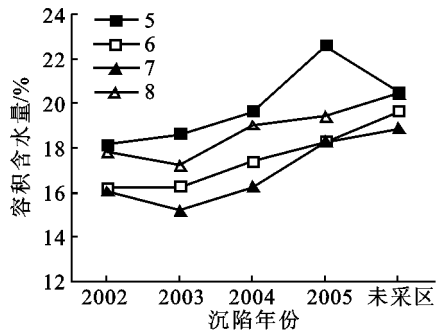


图 5 沉陷区土壤水分月变化

3.3 土壤水贮量损失变化特征

土壤水分贮量的变化,是土壤内部水分向上蒸散,向下渗透及外部降水共同作用,动态平衡的结果^[10]。研究区属于黄土高原与毛乌素沙地两大结构系统之间的生态环境脆弱地带,气候干燥,常年干旱,土壤含水量很难达到或接近饱和,100 cm 以下多钙结核层,水分下渗量极少,水贮量主要受降水、蒸散量以及地表植被利用等因素的制约。

结合研究区土壤水分时空异质性以及土壤水分垂直变化层次划分研究表明,0—100 cm 土层(水分速变层与活跃层)范围内土壤水分变化异常。为进一步探讨采煤沉陷是否对黄土丘陵区土壤水分造成一定影响,我们对一个降雨期内(15 d)不同坡位处 0—100 cm 范围内土壤水贮量损失变化(表 2)进行了分析。与未采区相比较,沉陷区坡顶、坡中处土壤水贮量损失均高于未采区,而坡底处土壤水贮量损失远低于未采区($P < 0.05$)。这是由于采煤沉陷导致地表产生大量裂缝(隙),增大了土壤蒸发的表面积,地下水形成自上而下的水分动力差,地下水体过多地渗漏损失,造成表层植物根系水分的减少,影响植被的生长,地表植被覆盖度降低,地表裸露使土壤水分损失加快,土壤含水量降低。而未采区坡底处由于降雨产生地表径流积蓄了大量的水分,地表蒸发和植物蒸腾都处于最大蒸发势的状态缘故,坡顶、坡中处土壤水分向下渗透少,故其土壤水贮量损失小。以上论述充分说明,采煤沉陷造成土壤含水量显著减小。

表 2 不同坡位 0—100 cm 土壤水贮量损失 mm

坡位	沉陷区				未采区
	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	
坡 顶	20.38	42.16	49.71	45.97	16.93
坡 中	49.38	55.24	52.30	49.39	37.55
坡 底	29.96	37.27	40.61	33.52	72.35

[4] 王改玲, 郝明德, 李仲谨. 不同覆盖物和蒸发抑制剂对土壤蒸发影响的研究初报[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 133—136.

[5] 李建玲, 刘殿红, 辛小桂, 等. 保水肥、液态地膜对仁用杏土壤水分和生长的影响[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 23—25.

[6] 谢伯承, 薛绪掌, 王纪华, 等. 保水剂对土壤持水性状的影响[J]. 水土保持通报, 2003, 23(6): 44—46.

[7] Fernandez J E, moreno F, Murillo J M, et al. Evaluating the effectiveness of a hydrophobic polymer for conserving water and reducing weed infection in a sandy loam soil [J]. Agricultural Water Management, 2001, 51: 29—51.

[8] Peter Cookson, Hayder Abdel Rahman, Pierre Hirsbrunner, et al. Evaluation of the water saving potential of a hydrophobic polymer (Guilspare[®]) in irrigated soils of the sultanate of Oman, Southern Arabia [C]// Proceedings of the 2nd Inter-Regional Conference on Environment Water. Lausanne Switzerland: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes 2005: 1—8.

[9] Cookson P, Hayder Abdel Rahman, Hirsbrunner P, et al. Evaluation of the water saving potential of a hydrophobic polymer (“ GUILSPARE”) in irrigated soils of the Sultanate of Oman, Southern Arabia [J]. Proceedings on CD of 2nd Inter Regional Conference on Environment Water, 1999: 1—3.

[10] Bouranis D L, Theodoropoulos A G, Drossopoulos J B. Designing synthetic polymers as soil conditions [J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis 1995, 26: 1455—1480.

[11] Arkin G F, Ritchie J T, Adams J E. A method for measuring first stage soil water evaporation in the field [J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc, 1974, 38: 951—954.

[12] 顾峰雪, 文启凯, 潘伯荣, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地风沙土的理化性质研究[J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(1): 74—79.

[13] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红, 等. 干旱、盐胁迫下的植物水势研究与进展[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 744—749.

[14] 宋耀选, 周茂先, 张小由, 等. 额济纳绿洲主要植物的水势与环境因子的关系[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 498—451.

[15] 李洁, 朱清科, 郭小平. 不同土壤水分对幼龄梨树生理特性及生物量的影响[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 79—82.

(上接第 69 页)

4 结 论

(1) 未采区与沉陷区土壤水分在垂直方向均呈先增大后减小态势, 基于标准差和变异系数两个指标的定量方法, 土壤水分在垂直方向划分为水分速变层、活跃层、稳定层。与未采区相比较, 沉陷区土壤含水量均显著低于未采区。

(2) 土壤含水量由大到小顺序依次为 5 月、8 月、6 月、7 月。

(3) 与未采区相比较, 沉陷区坡顶、坡中处土壤水贮量损失均高于未采区; 而坡底处土壤水贮量损失低于未采区。采煤沉陷造成土壤水分显著减小。

[参 考 文 献]

[1] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 69—72.

[2] 刘春利, 邵明安, 张兴昌, 等. 神木水蚀风蚀交错带退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 132—135.

[3] Wendroth O, Pohl W, Koszinskis, et al. Spatial temporal patterns and coariance structures of soil water status in two Northeast German field sites sites[J]. Journal of Hydrology, 1999, 215: 38—58.

[4] Zhou Q Y, Shimada J. Temporal stability of the spatial distribution pattern of soil water[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(5): 683—690.

[5] Kachanoski R G. Scale dependence and the temporal persistence of spatial patterns of soil water storage[J]. Water Resources, 1988, 24(1): 85—91.

[6] 康世勇, 郝峙. 神府东胜煤田自然环境特点与矿区生态环境保护[J]. 煤矿环境保护, 1999(3): 15—16.

[7] 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(9): 84—88.

[8] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 74—81.

[9] 李忠锋. 准格尔旗土地利用变化与影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2003, 23(3): 42—44.

[10] 蒲金涌, 姚小英, 贾海源, 等. 甘肃陇西黄土高原旱作区土壤水分变化规律及有效利用程度研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 483—486.