

DOI: 10. 11766/trxb201303080106

# 采煤塌陷裂缝对降雨后坡面土壤水分的影响<sup>\*</sup>

马迎宾<sup>1,2</sup> 黄雅茹<sup>2</sup> 王淮亮<sup>3</sup> 党晓宏<sup>1</sup> 汪季<sup>1</sup> 高永<sup>1†</sup>

(1 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019)

(2 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古磴口 015200)

(3 河北省水利技术试验推广中心, 石家庄 050061)

**摘要** 为探究采煤塌陷裂缝对坡面储蓄降水的影响, 本文对降雨后不同坡向上裂缝两侧的不同土层水分动态变化特征进行了研究。结果表明: 降雨主要补充坡面地表 0 ~ 20 cm 土层土壤水分, 且在雨后 0 ~ 20 cm 土层土壤水分散失也较为严重; 雨后阴坡土壤含水率最高, 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层土壤水分差异显著 ( $p < 0.05$ )。降雨结束 8 d 后, 裂缝附近的土壤水分变化幅度较大, 尤以坡面裂缝上部边缘处最为明显, 裂缝处与远离裂缝的土壤水分之间差异显著 ( $p < 0.05$ ); 阳坡土壤水分损失最高, 阳坡裂缝周边土壤水分平均损失量高达 3.31%。可见, 裂缝的出现会在一定程度上打破坡面储蓄降水的格局, 加剧坡面局部土壤水分散失, 这一点在植被恢复与建设过程中不容忽视。

**关键词** 半干旱区; 矿区; 采煤塌陷裂缝; 坡面; 土壤含水量

**中图分类号** S152.7 **文献标识码** A

煤炭资源在我国经济发展中起了不可代替的作用, 而且煤炭的能源支柱作用短期内不会改变。我国依靠井工开采的煤炭产量占总量的 95% 以上。神府—东胜煤田是我国最重要的能源供应基地之一。其地处毛乌素沙地与黄土高原两大结构系统之间, 属于生态环境脆弱带, 采矿对当地生态环境的影响很大<sup>[1]</sup>。井矿采煤活动导致地表沉陷, 形成土壤裂缝或裂隙 (图 1c), 增加了土壤水分损失<sup>[2-11]</sup>, 而水分是决定矿区生态系统结构与功能的关键因子<sup>[12]</sup>。降雨侵蚀与地表粗糙度有一定的关系<sup>[13]</sup>, 裂缝增加了地表粗糙度, 在研究区, 采矿形成的地裂缝分布广泛, 研究雨后地裂缝附近土壤水分特征, 进而揭示矿区沉陷地表降雨入渗及蓄集水过程, 对干旱和半干旱地区的矿区植被恢复与重建具有重要的现实意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于陕西省神木县活鸡兔乡高家畔村

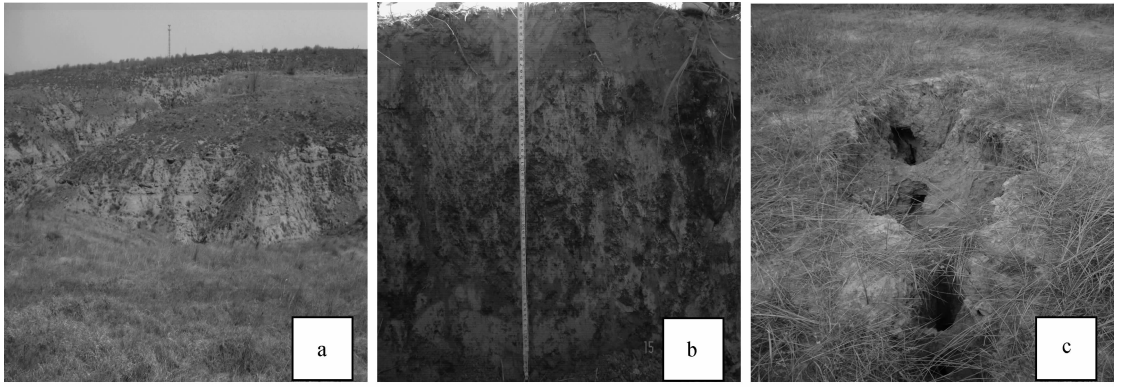
境内, 地处风沙区与黄土丘陵区的过渡地带, 风水混合侵蚀很强烈, 矿区属于平缓的丘陵山体, 坡面比较陡峭。矿区地理坐标介于东经 109°45' ~ 110°40', 北纬 38°50' ~ 39°50' 之间, 属于干旱半干旱大陆性季风气候: 气候干旱, 蒸发量大, 年降水量 368.2 mm。秋末和冬春盛行西北风, 多年平均风速 2.5 ~ 3.6  $\text{ms}^{-1}$ , 最大风速 24  $\text{ms}^{-1}$ , 年均大风日数 42.2 d。总之, 干旱、少雨、多风是矿区主要的气候特征, 也是矿区生态环境脆弱的表现。地貌类型属于剥蚀梁地 (图 1a), 包括无覆沙的硬梁地、薄层覆沙硬梁地以及厚层覆沙硬梁地。研究区地带性土壤是栗钙土, 主要分布在硬梁地上的小型洼地中, 梁地顶部土层厚度大多不足 20 cm, 有机质含量小于 10  $\text{g kg}^{-1}$ , 下层为较硬的矸子泥, 土壤剖面 (图 1b) 发育不完整, 无明显的腐殖质层和钙积层, 土壤机械组成粗, 在 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40 cm 三个土层, 大于 0.1 mm 的机械组成均达到 90% 以上, 砂粒含量高, 物理性黏粒少, 土壤疏松, 蓄水保墒能力差。

\* 国家林业局林业公益行业科研专项 (201104002-5) 资助

† 通讯作者, E-mail: 13948815709@163.com

作者简介: 马迎宾 (1988—), 男, 河北秦皇岛人, 助理工程师, 研究方向: 荒漠化防治。E-mail: mayingbin1988@126.com

收稿日期: 2013-03-08; 收到修改稿日期: 2013-11-28



a.研究区地形地貌; b.土壤剖面; c.采煤塌陷裂缝  
a.Landform; b.Soil profile ; c.Collapse fissures caused by coal mining

图1 研究区地质地貌

Fig.1 Geological landform of the study area

1.2 试验方法

选择比较典型的坡面作为试验样地,在阴坡、阳坡和坡顶分别选取规模相似的采煤塌陷裂缝,为了避免其他裂缝影响,选取的坡面在垂直等高线方向上除所选定的裂缝以外,无其他裂缝,并且在裂缝两端水平外延 5 m 范围内亦无其他裂缝存在。坡面上的裂缝位于坡中位置,裂缝走向与等高线一致,坡顶裂缝与坡面上的裂缝走向一致。所研究裂缝的宽度介于 0.2 ~ 0.7 m 之间,深度为 0.5 ~ 0.9 m。

试验地 2013 年 6 月 28 日降雨 26.3 mm,雨强较小,而雨强影响坡面片流产流<sup>[14]</sup>,所以所选裂缝周边在雨后未形成地表径流。6 月 29 日开始测定雨后土壤含水量,每天测定一次,到下一次降雨时结束测定。由于所选择的裂缝处于塌陷稳定后的

区域,因此在降雨期间和降雨后裂缝都处于稳定状态。测定点分布如图 2 所示,阴坡裂缝和阳坡裂缝分为裂缝上部和裂缝下部,在距裂缝 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、5.0 m 以及超过 5 m (以 CK 代替)的 9 个距离上确定测定样点,裂缝上部和裂缝下部测定样点对称(图 2a)。由于坡顶裂缝处于平缓地带,因此只测定裂缝单侧土壤含水量,测定距离与阴坡阳坡一致(图 2b)。黄土丘陵区降雨后土壤入渗深度在 40 ~ 50 cm<sup>[15]</sup>,因此每个测定点分三层测定土壤含水量,分别为 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40 cm。土壤含水量用时域反射仪(TDR)测定,每个样点在不同层次平行测定 10 次,数据处理时,取 10 次平行测定的平均值。采用 Excel 软件对数据进行整理及初步分析,采用 SPSS17.0 对数据进行描述统计,采用 SAS9.0 进行方差分析。

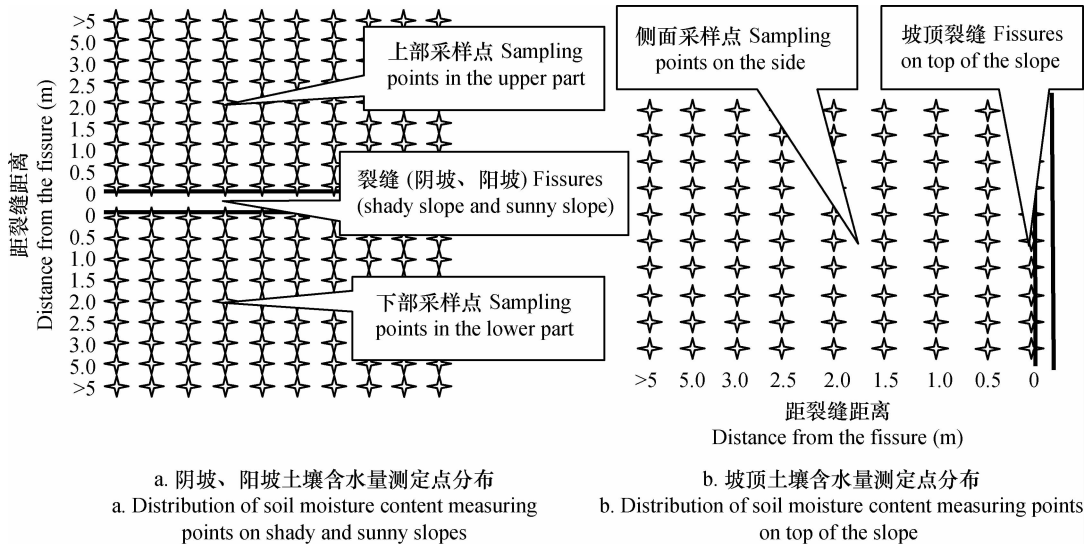


图2 测定土壤含水量样点分布示意图

Fig.2 Distribution of soil moisture content measuring points

## 2 结 果

选取降雨后第 1 天以及下一次降雨前一天(即 6 月 29 日和 7 月 6 日)的土壤水分数据,为了方便研究及试验结果分析,将坡顶裂缝单侧土壤水分数据扩展为两侧,分别对比研究阴坡、阳坡和坡顶裂缝在不同深度、不同日期及不同测定样点的土壤水分变化。

### 2.1 降雨后裂缝周边 0 ~ 10 cm 土层土壤水分变化

三个坡向上 0 ~ 10 cm 土层土壤含水量变化规律如图 3 所示。

6 月 29 日,阴坡裂缝周边土壤含水量分布在 12.64% ~ 14.44% 范围内,阳坡为 11.28% ~ 13.35%,坡顶为 12.10% ~ 14.02%。经方差分析,在 0 ~ 10 cm 土层,三个坡向的裂缝处与其他各样点的土壤水分差异均不显著( $p > 0.05$ ),阴坡与坡顶以及阳坡与坡顶裂缝周边土壤水分差异不显著( $p > 0.05$ ),但是阴坡裂缝周边土壤含水量与

阳坡裂缝差异非常显著( $p < 0.01$ )。由此可见,降雨能够很好地补给研究区 0 ~ 10 cm 土层的土壤水分,由于阳坡土壤水分含量原本就比较低,导致降雨后阳坡裂缝周边土壤水分与阴坡仍有一定差距。7 月 6 日,三个坡向在距裂缝中心不同距离上的各样点土壤含水量较降雨后第一天明显降低,并且三个坡向上的土壤含水量分布状况一致。阴坡和阳坡土壤含水量最小值均出现在裂缝上部 0 m 处,分别为 8.81% 和 5.66%。坡顶在裂缝 0 m 处最低,为 7.59%。随着测定样点与裂缝距离的增加而趋于稳定。方差分析结果表明,在 0 ~ 10 cm 土层,三个坡向上裂缝周边的土壤水分之间相互差异显著( $p < 0.05$ ),裂缝 0 m 处与其他距离上的土壤水分亦差异显著( $p < 0.05$ )。在 0 ~ 10 cm 层次的土壤水分受外界因素影响较大,降雨结束后,三个坡向上裂缝周边的土壤含水量差异很小。而降雨 8 d 后,由于裂缝的存在增加了侧向蒸发,再加上土壤水分的垂直损失,因此导致裂缝 0 m 处水分含量最低。

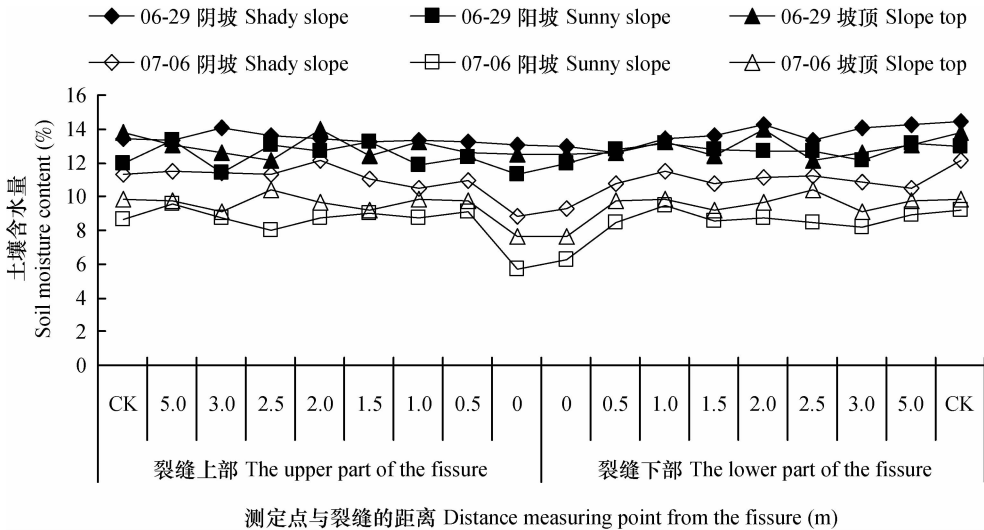


图 3 土壤层次 0 ~ 10 cm 的水分随日期、坡向及测定点的变化

Fig. 3 Variation of soil moisture content in the 0 ~ 10 cm soil layer with date, slope direction and measuring point

### 2.2 降雨后裂缝周边 10 ~ 20 cm 土层土壤水分变化

10 ~ 20 cm 土层土壤含水量变化规律如图 4 所示。

6 月 29 日,在 10 ~ 20 cm 土层,三个坡向的土壤水分差异均不显著( $p > 0.05$ ),阴坡和阳坡的土壤含水量最小值出现在裂缝上部 0 m 处,坡顶出现在裂缝 0 m 处,分别为 12.44%、12.06% 和 12.28%。三个坡向除去裂缝处,其他部位含水量之间差异不明显。三个坡向裂缝 0 m 处与其他各样点

的土壤水分差异非常显著( $p < 0.01$ ),这与 0 ~ 10 cm 层次的土壤水分状况有一定差异,主要是因为裂缝壁有一定倾斜角度,雨水不能直接补给到裂缝边缘深处。7 月 6 日,在 10 ~ 20 cm 土层,阴坡、阳坡和坡顶的土壤含水量变化趋势一致,在裂缝处出现最小值,随着与裂缝之间距离的增加,各采样点的土壤含水量趋于平缓。方差分析结果表明,阴坡、阳坡和坡顶裂缝周边的土壤水分之间差异显著( $p < 0.05$ )。阴坡和阳坡的土壤含水量最小值均出

现在裂缝上部 0 m 处,分别为 10.10% 和 6.74%,坡顶土壤含水量最小值在裂缝 0 m 处,为 8.89%。三个坡向裂缝 0 m 处与其他各样点的土壤水分差异显

著( $p < 0.05$ ),这还不如降雨 1 d 后显著,主要是因为裂缝处得到的雨水补给不多,以及其他各样点的水分损失较大。

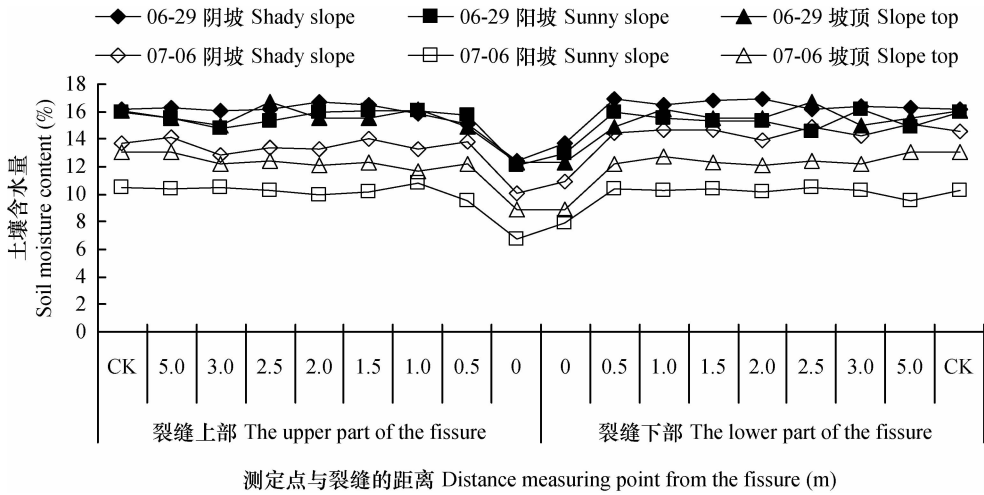


图 4 土壤层次 10 ~ 20 cm 的水分随日期、坡向及测定点的变化

Fig. 4 Variation of soil moisture content in the 10 ~ 20 cm soil layer with date, slope direction and measuring point

### 2.3 降雨后裂缝周边 20 ~ 40 cm 土层土壤水分变化

20 ~ 40 cm 层次土壤含水量变化规律如图 5 所示。

6 月 29 日,在 20 ~ 40 cm 土层,三个坡向在不同距离上的各样点的土壤水分变化趋势大体一致,阴坡和阳坡在裂缝上部 0 m 处土壤含水量最小,坡顶土壤含水量最小值出现在裂缝处,分别为 11.19%、10.59% 和 10.93%。经方差分析,三个坡向上 20 ~ 40 cm 土层的土壤水分彼此间均差异不显著( $p > 0.05$ )。因为本次降雨对 20 ~ 40 cm 土层的土壤水分影响很小,而且裂缝处土壤水分散失量较其他距离上各样点大,所以在 20 ~ 40 cm 土层上,三个坡向的裂缝处与其他距离上的各样点土壤水分

差异非常显著( $p < 0.01$ )。7 月 6 日,阴坡、阳坡和坡顶裂缝周边各样点的土壤含水量变化趋势与降雨后第 1 天基本一致,三个坡向上的土壤水分彼此间均差异不显著( $p > 0.05$ )。阴坡、阳坡的裂缝上部 0 m 处和坡顶裂缝 0 m 处出现相应的最低土壤含水量,其值分别为 9.34%、8.18% 和 9.06%。经方差分析,三个坡向的裂缝处与其他距离上的各样点土壤水分差异非常显著( $p < 0.01$ )。在 20 ~ 40 cm 土层,土壤含水量随着时间的变化出现不同程度的降低,在裂缝上部 0 m 与裂缝下部 0 m 处下降程度最为明显,由于裂缝的存在,在裂缝处增加了雨后土壤水分的散失。

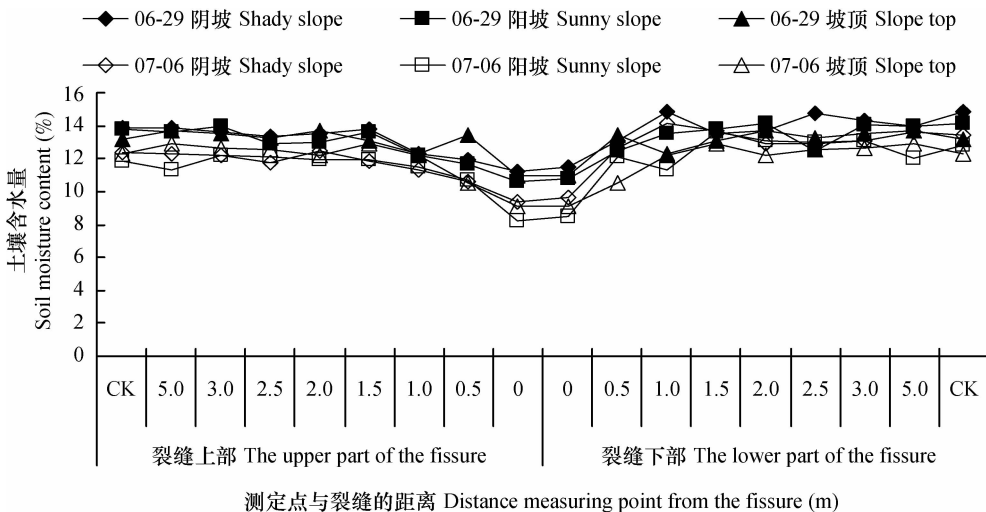


图 5 土壤层次 20 ~ 40 cm 的土壤水分随日期、坡向及测定点的变化

Fig. 5 Variation of soil moisture content in the 20 ~ 40 cm soil layer with date, slope direction and measuring point

## 2.4 降雨后不同坡向上的裂缝周边土壤水分变化

综合 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 三个土层的土壤水分,对阴坡、阳坡和坡顶上的裂缝周边的土壤含水量进行描述统计,如表 1。降雨后第 1 天(6 月 29 日)土壤含水量最高达到 16.93%,最低为 10.59%。降雨后 1 d,不同坡向上的平均土壤含

水量分布规律是:阴坡(14.30%) > 坡顶(13.75%) > 阳坡(13.60%)。方差分析结果表明,降雨后阴坡和阳坡裂缝周边土壤水分差异显著( $p < 0.05$ ),阴坡和坡顶以及阳坡和坡顶的土壤水分差异不显著( $p > 0.05$ )。这说明降雨后,不同坡向上的土壤含水量变化趋势一致。

表 1 不同坡向土壤含水量描述统计

Table 1 Descriptive statistics of soil moisture contents relative to slope direction

坡向 Slope aspect	日期 Date(mm-dd)	最小值 Minimum value(%)	最大值 Maximum value(%)	平均值 Average value(%)	标准偏差 Standard deviation
阴坡 Shady slope	06-29	11.19	16.93	14.30	1.49
	07-06	8.81	15.14	12.25	1.65
阳坡 Sunny slope	06-29	10.59	16.20	13.60	1.53
	07-06	5.66	13.64	10.29	1.83
坡顶 Slope top	06-29	10.93	16.76	13.75	1.47
	07-06	7.59	13.08	11.16	1.64

7 月 6 日裂缝周边土壤含水量最大值为 15.14%,最小值仅为 5.66%。三个坡向上的裂缝周边平均土壤含水量为阴坡(12.25%) > 坡顶(11.16%) > 阳坡(10.29%)。方差分析表明,阴坡、阳坡和坡顶裂缝周边的土壤水分之间均差异显著( $p < 0.01$ )。这说明经过 8 d 的水分损失,各坡向上的土壤含水量之间的差异逐渐明显。

## 2.5 降雨后裂缝周边土壤水分损失状况

一次降雨后 8 d 内,三个坡向裂缝周边土壤水分损失量最大值均在裂缝处(表 2)。阴坡和阳坡以及阴坡和坡顶在距裂缝不同距离的各样点处土壤水分损失量差异显著( $p < 0.05$ );阳坡和坡顶在距

裂缝不同距离的各样点处的土壤水分损失量差异不显著( $p > 0.05$ );这是由于阳坡与坡顶阳光照射强烈,水分蒸发量均较大。裂缝 0.5 m 以外的土壤水分损失量趋于平缓,水分损失最大的是阳坡裂缝上部 0 m 处,为 4.45%。由于阳坡光照强烈,气温高造成蒸散量比较大,阳坡整体水分损失较大。裂缝上部的土壤水分损失较裂缝下部高,阴坡裂缝上部和下部土壤水分损失均值分别仅为 2.18% 和 1.93%,而阳坡裂缝上部和下部土壤水分损失均值分别达到 3.38% 和 3.24%。裂缝的存在增加了土壤水分蒸发面积,在裂缝处水分蒸发除了垂直蒸发,同时还存在侧向蒸发。

表 2 雨后裂缝周边土壤水分损失量

Table 2 Soil moisture losses(%) from soils around the fissure after rainfall

坡向 Slope aspect	样点部位 Position of sampling points	距裂缝距离 Distance from the fissure								
		0 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m	2.5 m	3.0 m	5.0 m	CK
阴坡 Shady slope	裂缝上部 The upper part of the fissure	2.80	1.64	1.78	2.20	2.55	2.24	2.45	2.16	1.80
	裂缝下部 The lower part of the fissure	2.77	1.57	1.52	1.64	2.28	1.80	2.22	1.77	1.80
阳坡 Sunny slope	裂缝上部 The upper part of the fissure	4.45	3.42	2.85	3.62	3.34	3.33	2.91	3.44	3.03
	裂缝下部 The lower part of the fissure	4.37	3.39	3.38	2.76	3.03	2.61	3.12	3.47	3.04
坡顶 Slope Top	平均值 Average value	3.39	2.87	2.32	2.22	3.11	2.23	2.39	2.19	2.59
		3.56	2.58	2.37	2.49	2.86	2.44	2.62	2.60	2.45

由表3可知,三个坡向的雨后土壤水分在不同层次上的损失量不同。在阴坡和坡顶,土壤水分损失量:0~10 cm > 10~20 cm > 20~40 cm;而阳坡则是10~20 cm 土层土壤水分损失量最高,20~40 cm 最低。三个土壤层次上的土壤水分损失量相互之间差异均非常显著( $p < 0.01$ ),但是在三个土壤层

次上,裂缝上部和下部土壤水分损失量差异均不显著( $p > 0.05$ )。土壤水分损失量最大值出现在阳坡裂缝上部10~20 cm处,损失量为4.82%;而土壤水分损失量最小值出现在阴坡裂缝下部20~40 cm处,损失量仅为0.97%。由此可见,0~20 cm 土层土壤水分损失较为明显。

表3 雨后不同土层土壤水分损失量

Table 3 Soil moisture losses(%) in different soil layers after rainfall

坡向 Slope aspect	样点部位 Position of sampling points	土层深度 Soil depth			平均值 Average value(%)
		0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	
阴坡 Shady slope	裂缝上部 The upper part of the fissure	2.76	2.42	1.36	2.18
	裂缝下部 The lower part of the fissure	2.76	2.06	0.97	1.93
阳坡 Sunny slope	裂缝上部 The upper part of the fissure	3.90	4.82	1.41	3.38
	裂缝下部 The lower part of the fissure	4.12	4.52	1.09	3.24
坡顶 Slope top		3.44	3.23	1.10	2.59

### 3 讨 论

降雨1 d后,除阴坡和阳坡裂缝周边0~10 cm 层次的土壤水分差异显著( $p < 0.05$ ),三个坡向上各层的土壤水分差异均不显著( $p > 0.05$ )。说明如果上方无来水,降雨入渗结束后坡面各层土壤水分趋向一致<sup>[16]</sup>。在黄土丘陵区,不同坡向对土壤水分状况有明显影响<sup>[17]</sup>,研究区降雨后阴坡裂缝周边土壤含水量高于坡顶,阳坡最低,降雨8 d后仍遵循这个规律;阳坡裂缝周边土壤水分损失最大,阴坡最小。孙中峰等人<sup>[18]</sup>认为降雨会导致土壤水分的变异系数迅速减小,并随着干旱天数的增加而增大,通过分析,研究区坡面裂缝周边土壤平均含水量在降雨结束后亦是如此。

采煤沉陷区土壤水分蒸发量大<sup>[3,5-7,9]</sup>,坡面上的裂缝对裂缝上部的土壤水分蒸发影响更大。尤其在阳坡,由于阳光直射,导致裂缝附近土壤水分极低,不利于植物生长。因此,植被恢复和重建要充分考虑到蓄水、集水等措施,避免植物因缺水而影响成活率和保存率。本次降雨对0~20 cm 层次土壤水分影响较大,对20~40 cm 影响较小,这与李笑吟等<sup>[19]</sup>以及陈龙乾等<sup>[20]</sup>的研究结果一致,并且土

壤水分蒸发也主要表现在0~20 cm 土层。土壤水分再分布过程中,由于重力的作用,土壤水分有沿坡向下递增的趋势<sup>[21]</sup>,坡面上的裂缝打破这一趋势,采煤塌陷裂缝造成雨水在坡面上的重新分布,在裂缝处土壤水分含量较低,且裂缝下部高于裂缝上部。

### 4 结 论

坡面上的采煤塌陷裂缝破坏了坡面原本的完整性,改变雨后坡面土壤水分的局部分配格局,增大其附近土层水分的散失,特别是土壤表层水分散失,但是裂缝的存在没有改变不同坡向之间的土壤水分差异。由于此次研究的降雨过程无产流,所以坡面裂缝的截流蓄水作用如何,仍需在更大强度降雨时做更多的观测研究,并且还应深入研究坡面上裂缝存在的利与弊。

### 参 考 文 献

- [1] 周文凤. 晋陕蒙接壤地区水土保持的忧患. 中国水土保持, 1993(2):6—10. Zhou W F. Worry about soil and water conservation in contiguous areas of Shanxi and Shaanxi and Inner Mongolia (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 1993(2):6—10

- [ 2 ] 杨选民,丁长印. 神府东胜矿区生态环境问题及对策. 煤矿环境保护,2000,14(1):69—72. Yang X M, Ding C Y. Ecological environmental and countermeasures in Shenfu Dongsheng mining area (In Chinese). Coal Mine Environmental Protection, 2000, 14(1):69—72
- [ 3 ] 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. 地理与地理信息科学,2003,19(3):67—70. Zang F W, Hou X W, Han Z T, et al. Impact of coal mining subsidence on soil quality and some protecting technique for the soil quality (In Chinese). Geography and Geo-information Science, 2003, 19(3):67—70
- [ 4 ] 臧荫桐,汪季,丁国栋,等. 采煤沉陷后风沙土理化性质变化及其评价研究. 土壤学报,2010,47(2):262—269. Zang Y T, Wang J, Ding G D, et al. Variation of physico-chemical properties of Aeolian sandy soil at coal mining subsidence and its evaluation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(2):262—269
- [ 5 ] 侯新伟,张发旺,韩占涛,等. 神府东胜矿区生态环境脆弱性成因分析. 干旱区资源与环境,2006,20(3):54—57. Hou X W, Zhang F W, Han Z T, et al. Analysis on the formation of environment fragility in Shenfu-Dongsheng Mine (In Chinese). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(3):54—57
- [ 6 ] van Roosendaal D J. Longwall mine subsidence of farmland in Southern Illinois; Nearsurface fracturing and associated hydrogeological effects// Robert E D, Barnhisel R I, Darmody R G. Proceeding of 1992 national symposium on prime farmland reclamation. USA: University of Illinois Press, 1992:147—158
- [ 7 ] 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. 水土保持研究,1994(4):127—137. Hou Q C, Wang Y K, Yang G. Influence of coal mining on the vegetation in the Shenfu-Dongsheng coal field (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 1994(4):127—137
- [ 8 ] 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. 干旱区资源与环境,2006,20(5):84—88. Wei J S, He X, Hu C Y, et al. Influence of ground collapse caused by coal mining activities on the water characteristics of sandy soil in arid and semi-arid area (In Chinese). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(5):84—88
- [ 9 ] Datta K K, Jong C. Adverse effect of water logging and soil salinity on crop and land productivity in northwest region of Haryana, India. Agricultural Water Management, 2002(57):223—238
- [ 10 ] 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. 中国地质灾害与防治学报,2003,14(1):77—80. Zhao M P, Zhang Z B, Zhou L D. The influence of land collapse on land productivity in Fuxin diggings (In Chinese). The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(1):77—80
- [ 11 ] Seils D E, Darmody R G, Simmons F W. The effects of coal mine subsidence on soil macroporosity and water flow// Robert E D, Barnhisel R I, Darmody R G. Proceeding of 1992 national symposium on prime farmland reclamation. USA: University of Illinois Press, 1992:137—146
- [ 12 ] 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. 林业科学研究,2002,15(2):143—149. Wang B, Cui X H, Bai X L, et al. Research on temporal and spatial patterns and dynamic laws of soil water content in desert area (In Chinese). Forest Research, 2002, 15(2):143—149
- [ 13 ] 赵龙山,张青峰,王健,等. 黄土坡面不同微坡位上糙度对降雨侵蚀的响应. 土壤学报,2013,50(4):637—642. Zhao L S, Zhang Q F, Wang J, et al. Effect of soil surface roughness on rainfall erosion as affected by slope position on loess slope (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(4):637—642
- [ 14 ] 刘俊娥,王占礼,高素娟,等. 黄土坡面片流产流过程模拟研究. 土壤学报,2013,50(2):268—274. Liu J E, Wang Z L, Gao S J, et al. Simulated-rainfall experimental study on runoff of sheet flow on loess hillslope (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2):268—274
- [ 15 ] 何金军,魏江生,贺晓,等. 采煤塌陷对黄土丘陵区土壤物理特性的影响. 煤炭科学技术,2007,35(12):92—96. He J J, Wei J S, He X, et al. Ground subsidence caused by mining affected to soil physics features in loess hills (In Chinese). Coal Science and Technology, 2007, 35(12):92—96
- [ 16 ] 张学栋,姜述孟. 黄土降雨入渗过程中水分分布平衡点运动规律的研究. 水土保持通报,1986,6(1):58—63. Zhang X D, Jiang S M. Research on loess in the process of rainfall infiltration moisture distribution balance motion law (In Chinese), Bulletin of Soil and Water Conservation, 1986, 6(1):58—63
- [ 17 ] 刘梅,蒋定生,黄国俊,等. 不同坡面位置土壤水分差异规律分析. 水土保持通报,1990,10(2):16—20. Liu M, Jiang D S, Huang G J, et al. An analysis to the differences of soil water in varied places of hillslopes (In Chinese), Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10(2):16—20.
- [ 18 ] 孙中峰,张学培,张晓明,等. 晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究. 干旱地区农业研究,2004,22(2):81—86. Sun Z F, Zhang X P, Zhang X M, et al. Heterogeneity of soil moisture and its influencing factors on forest land in the loess hilly areas (In Chinese), Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(2):81—86
- [ 19 ] 李笑吟,毕华兴,李俊,等. 晋西黄土区土壤剖面水分动态研究. 中国水土保持科学,2006,4(4):72—77. Li X Y, Bi H X, Li Jun, et al. Dynamics of moisture of soil profile in Loess area of western Shanxi (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(4):72—77
- [ 20 ] 陈龙乾,邓略中,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. 煤炭学报,1999,24(6):586—590. Chen L Q, Deng K Z, Zhao Z H, et al. Space variation law of physical characteristics about farmland soil due to mining subsidence (In Chinese). Journal of China Coal Society, 1999, 24(6):586—590
- [ 21 ] Philip J R. Hillslope infiltration: Planar slopes(USA). Water Resources Research, 1991, 27(1):109—117

## EFFECTS OF COLLAPSE FISSURES CAUSED BY COAL MINING ON SOIL MOISTURE IN SLOPE LANDS AFTER RAIN

Ma Yingbin<sup>1,2</sup> Huang Yaru<sup>2</sup> Wang Huailiang<sup>3</sup> Dang Xiaohong<sup>1</sup> Wang Ji<sup>1</sup> Gao Yong<sup>1†</sup>

(1 College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

(2 Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China)

(3 Hebei Extension and Experiment Center for Water Technology, Shijiazhuang 050061, China)

**Abstract** To explore effects of collapse fissures caused by coal mining on soil water holding capacity of slope lands after rainfalls, post-rainfall dynamics of soil water in different soil layers on either side of a collapse fissure in slope lands different in aspect was studied. Results show that on slope lands rains bring some water mainly into the 0 ~ 20 cm soil layer, but the water in the soil layer is quickly lost after the rain; after rainfall, the soil on the shady slope is higher in moisture content and soil moisture contents in the soil layers of 0 ~ 10, 10 ~ 20 and 20 ~ 40 cm differ sharply ( $p < 0.05$ ). Eight days after rainfall, soil moisture contents around the fissures vary greatly, especially along the edge of the upper part of a fissure, and the difference in soil moisture content between the soil of the fissure and that far from the fissure is significant ( $p < 0.05$ ). On sunny slopes soil moisture loss after rainfall is high and the mean soil moisture loss around the fissures may reach as high as 3.31%. It is quite obvious that the appearance of fissures to a certain extent breaks the slope rain water holding pattern and aggravates soil moisture loss in some parts of a slope, which should not be neglected in the process of revegetation and construction.

**Key words** Semi-arid region; Mining area; Collapse fissures caused by coal mining; Slope; Soil moisture content

(责任编辑:汪枫生)