

黄土高原小流域坝地水分时空分布特征

袁水龙^{1,2}, 李占斌^{2,3}, 张 扬^{1,2}, 董起广¹, 王 丹²

(1. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 西安 710075; 2. 西安理工大学
西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048; 3. 中国科学院 水利部
水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为有效认识黄土高原淤地坝坝地土壤水分时空分布特征, 通过对王茂沟小流域 2 号坝坝地土壤水分长期监测, 分析了坝地土壤水分的统计特征。结果表明: (1) 坝地各层土壤水分均表现为中等变异, 表层土壤含水量的极差较大, 0~2.40 m 土层土壤平均含水量变化范围为 9.92%~23.70%, 随深度的增加, 土壤平均含水量表现为先减小后增大的趋势; (2) 坝地土壤水分具有明显的分层现象, 多数监测点的土壤水分在时间上属于中等变异, 表层土壤水分变化剧烈, 随着深度的增加变异系数开始变小, 水分变化程度减弱; 根据变异系数的大小, 坝地土壤水分可以划分为 4 个层次: 水分剧变层(0~0.20 m), 水分活跃层(0.20~0.60 m), 水分次活跃层(0.60~1.40 m), 水分相对稳定层(1.40 m 以下); (3) 坝前各层土壤含水量均明显高于坝中和坝后, 在 0~0.40 m 坝地的含水量明显高于坡地, 0.40~1.40 m 坡地含水量高于坝地, 1.40 m 以下坝地含水量高于坡地, 且坝地各层土壤含水量随时间的变异系数均小于坡地。

关键词: 淤地坝; 分层淤积; 土壤水分; 时空分布

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0029-06

Impact of Layered Deposition on Temporal and Spatial Distribution Characteristic of Soil Moisture of Check Dam Land

YUAN Shuilong^{1,2}, LI Zhanbin^{2,3}, ZHANG Yang^{1,2}, DONG Qiguang¹, WANG Dan²

(1. Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to effectively understand the spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the check dam land of the Loess Plateau, we analyzed the statistical characteristic of soil moisture in check dam land through the long-term monitoring of soil moisture of the check dam No. 2 in the Wangmaogou watershed. The results showed that: (1) the soil moisture in different soil layers moderately varied, among which the range of the surface layer was relatively larger; the water content of layer 0~2.4 m was between 9.92% and 23.70%, which tended to decrease at first and then increase with the increase of soil depth; (2) soil moisture of check dam land had an obvious stratification, which were moderately variable over time in most monitoring sites; the surface soil moisture changed sharply and its variation coefficient began to decrease with the increase of depth, which means the water change degree reduced; based on the variation coefficient, the soil moisture of check dam land could be divided into four levels: the drastic change layer (0~0.20 m), the active layer (0.20~0.60 m), the less active layer (0.60~1.40 m), the relatively stable layer (below 1.40 m); (3) soil moisture contents of the different layers in front of dam were obviously higher than those of the dam and behind the dam. The soil moisture between 0~0.4 m and below 1.4 m layers of check dam land were significantly higher than that of slope land, while those between 0.40~1.40 m layer

收稿日期: 2017-07-27

修回日期: 2017-08-21

资助项目: 国家自然科学基金重点项目黄土高原生态建设的生态—水文过程响应机理研究(No. 41330858); 陕西省重点科技创新团队计划项目(2016KCT-23)

第一作者: 袁水龙(1990—)男, 陕西扶风人, 硕士, 助理工程师, 主要从事水文模型与水土保持研究。E-mail: yuanshuilong@163.com

通信作者: 李占斌(1962—)男, 河南镇平人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhanbinli@126.com

showed an opposite trend, and the variation coefficients of water contents over time of different soil layers in check dam land were all less than those of slope land.

Keywords: check dam; layered deposition; soil moisture; temporal and spatial distribution

淤地坝是黄土高原水土流失治理中最主要的沟道治理措施,2003 年被列为水利部三大“亮点工程”之一。淤地坝建设的一个重要产物就是坝地,坝地的形成不仅可以有效控制水土流失,而且可以增加农田面积,增加粮食产量^[1]。坝地是由多场降雨径流携带的泥沙淤积形成的,泥沙在沉积过程中往往是粗颗粒先沉积,细颗粒会被携带到更远的地方后沉积,导致坝地具有明显的分层结构和较强的空间异质性^[2]。坝地作为影响小流域水文循环的重要土地类型之一,其土壤含水量的多少影响到水分的入渗和径流的产生,从而间接影响到对洪水的拦蓄和坝体自身的安全,因此研究坝地土壤水分时空分布特征对于农业增收和淤地坝安全运行具有重要意义。前人对坝地土壤水进行了大量研究,张红娟等^[3]对绥德县韭园沟流域三角坪坝和团圆沟 1# 坝地土壤水分分析结果表明:三角坪坝和团圆沟 1# 坝赋存水量分别占到 1954—1997 年间韭园沟流域年均径流量的 6.12% 和 1.87%。已淤平坝地存贮了大量水资源,在一定程度上减少了地表径流量。徐学选等^[4]对延安燕沟流域土壤水资源研究认为:各类土地利用方式中坝地土壤含水量最高,梯田次之,灌木林最低。黄金柏等^[5]对黄土高原北部淤地坝区域土壤水分进行了模拟,结果表明,计算时段内研究区的土壤水分有效性参数值受同期表层土壤含水量和蒸散发的影响较大。也有学者对土壤水分时空分布特征进行了研究,研究主要集中在土壤水分的时间稳定性,土壤水分空间变异影响因素等方面,研究的对象主要为林地、草地、耕地和荒地^[6-10]。目前对坝地土壤水分时空分布特征的研究还鲜有报道,因此本研究通过对王茂沟 2 号坝坝地土壤水分长期监测数据统计分析,研究淤地坝坝地土壤水分时空分布特征,以期对黄土高原淤地坝安全运行及坝地农业产量提高提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

王茂沟流域地处陕西省榆林市绥德县境内,位于东经 110°20′26″—110°22′46″,北纬 37°34′13″—37°36′03″,属于无定河流域韭园沟中游左岸的一条支沟。流域面积 5.97 km²,主沟道长度 3.80 km,流域海拔 940~1 188 m,沟床平均比降 2.70%,沟壑密度 4.30 km/km²。气候为温带半干旱大陆性季风气候,

四季分明,温差较大。根据绥德水土保持试验站多年实测资料统计,王茂沟流域多年平均气温 8℃,最高温度 39℃,最低温度 -27℃,多年平均无霜期 175 d 左右,水面年蒸发量为 1 519 mm,最大 1 600 mm,干旱冰雹等自然灾害频发。多年平均降水量 475.10 mm,年最大降水量 735.30 mm(1964 年),最小年降水量 232 mm(1956 年),年降水量极值比为 3.17;年际变化大且年内分布不均,每年 7—9 月降雨量占全年降水量 65% 左右。王茂沟流域从 20 世纪 50 年代开展水土保持工作,截至 2012 年底,王茂沟正常运行的淤地坝共有 17 座,其中骨干坝 2 座,中型坝 6 座,小型坝 9 座(图 1)。

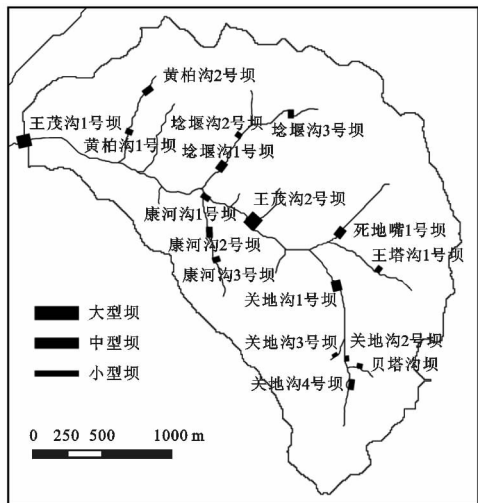


图 1 王茂沟流域淤地坝布置

1.2 监测点布设

在王茂沟 2 号坝的坝地及两岸坡地分别布设 PC 管监测土壤含水量,坝地总共布设 9 根 PC 管,两岸坡地布设 5 根 PC 管。坝地的监测点分别布设在坝前(3 根)、坝中(3 根)、坝后(3 根),9 根 PC 管沿坝地平行分布,其中坝前 3 根 PC 管距离坝体 3 m,间距为 25 m,坝中 3 根 PC 管距离坝体 133 m,间距为 25 m,坝后 3 根 PC 管距离坝体 273 m,间距为 25 m(图 2)。

从 2015 年 8 月到 2016 年 3 月对 9 个监测点的土壤体积含水量进行监测,测定深度为 2.40 m。为了表述方便,本研究将深度为 0—0.20 m,0.20—0.40 m,0.40—0.60 m,0.60—0.80 m,0.80—1.00 m,1.00—1.20 m,1.20—1.40 m,1.40—1.60 m,1.60—1.80 m,1.80—2.00 m,2.00—2.20 m 及 2.20—2.40 m 的土层分别用 A₁, A₂, A₃, A₄, A₅, A₆, A₇, A₈, A₉, A₁₀, A₁₁ 和 A₁₂ 表示。2015 年 8 月 10 到 8 月 30 日约每天测量一

次,共计22次,2015年9月到2016年3月约每个月测量两次,共计9次。

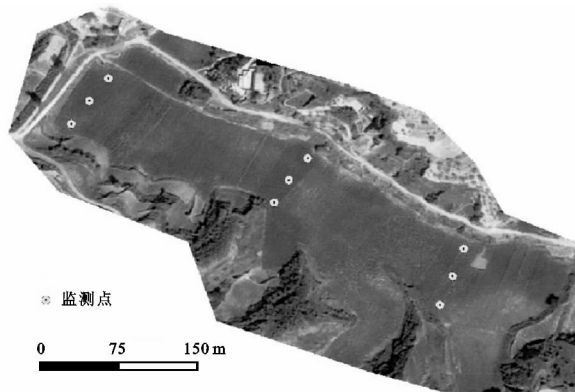


图2 坝地土壤水分监测点位置

1.3 含水量测定与数据分析

采用德国IMKO公司生产的TRIME—PICO IPH/T3型TDR测定在土壤含水量,当土壤含水率为0%~40%时,测量精度为-2%,每层测量3次,取其均值作为该土层的土壤含水量值。本研究数据采用SPSS 19.0和Excel 2013等软件处理,文中相关图表采用Excel 2013, Origin 8.5和ArcGIS 10.1软件绘制。

2 结果与分析

2.1 坝地表层土壤含水量统计特征

土壤表层作为大气圈和土壤圈的交接部分,大量的物质和能量在土壤表层交换,导致其水分运动极其活跃,不断发生着水分的输入和输出,即土壤水分的蒸发和入渗^[11]。表1为王茂沟流域坝地表层(0—20 cm)土壤含水量的统计特征。由表1可以看出:在一次测量过程中,坝地表层土壤含水量的极差较大,最大达到21.10%,这是因为土壤含水量与土壤颗粒组成密切相关,因此坝地颗粒组成特征决定了土壤水分极差的大小。根据Nielson分级系统^[12]:弱变异 $CV \leq 10\%$,中等变异 $10\% < CV < 100\%$,强变异 $CV \geq 100\%$ 。由表1可以看出,坝地表层土壤水分空间分布均属于中等变异,这是由于坝地的淤积过程也是颗粒筛选、重新分配的过程,泥沙被径流运移、携带,大颗粒一般先沉降,小颗粒随着径流被运移到较远的地方,不同粒径的颗粒聚集在不同的地方,继而造成了坝地表层土壤水分的极大差异。K-S检验结果表明,多次坝地表层土壤水分观测结果呈正态分布。

2.2 不同土层深度下坝地土壤含水量统计特征

坝地是由降雨径流携带的泥沙淤积而形成的。黄土高原地区坝地的泥沙往往是由汛期的几场短历时高强度暴雨形成的^[13]。坝地剖面分析表明,土粒在沉降过程中由粗至细逐级沉降落淤,一般是第一层

为沙层,第二层为黄土层,第三层为灰棕色的胶泥层,第四层为红胶土层,最后一层为含有机质特别丰富的淤积物薄层^[14]。坝地的分层淤积会影响不同土层深度下的土壤含水量分布,因此对坝地不同土层深度下的土壤含水量进行了统计分析(表2)。

由表2可以看出,12个土层深度下土壤平均含水量变化范围为9.92%~23.70%,低于田间持水量(25%),并远低于饱和含水量(45%)。坝地 A_1 (0.60—0.80 m)平均含水量最低, A_{12} (1.80—2.00 m)平均含水量最高,土壤平均含水量从上到下表现为先减小后增大的趋势。从表2中可以看出, A_1 , A_2 和 A_3 层的土壤含水量变异系数CV值分别为19.24%,13.43%,13.46%,属于中等变异,其他土层的土壤含水量变异系数均小于10%,属于弱变异。坝地0—0.60 m土层的土壤含水量变异系数明显大于其他土层,其中表层(0—0.20 m)的土壤含水量变异系数最大,这主要是由于表层容易受到降雨、蒸发等因素的影响。K-S检验结果表明,坝地不同深度下土壤含水量均服从正态分布。

2.3 坝地土壤含水量的时间变化特征

图3为不同监测点各土层的土壤平均含水量及其时间变异系数分布图,其中图3A为不同监测点各土层土壤平均含水量,图3B为不同监测点各土层土壤含水量时间变异系数。由图3A可以看出,坝地土壤含水量沿着土层深度先减小后增大,这与表2的统计结果一致。同时,坝地土壤水分具有明显的分层现象,这可能与坝地的分层淤积结构有关。由图3B可以看出,多数监测点的土壤水分在时间上属于中等变异,也有部分监测点在较深的土层下表现为弱变异,说明坝地深层土壤水分在时间上具有一定的稳定性。同时可以看出,坝地表层土壤水分变化剧烈,随着深度的增加变异系数开始变小,水分变化程度减弱。按照变异系数的大小,并结合其他学者的研究成果^[15-16],坝地土壤水分可以划分为4个层次:水分剧变层(0—0.20 m),水分活跃层(0.20—0.60 m),水分次活跃层(0.60—1.40 m),水分相对稳定层(1.40 m以下)。

2.4 坝地土壤含水量空间变化特征

由于坝地土壤的空间异质性,坝地不同部位的土壤含水量会有明显的差别。图4为坝地不同部位土壤含水量及变异系数随土层深度变化过程图。由图4A可以看出,坝前、坝中和坝后的土壤含水量随土层深度增加均表现为先减小后增大。这是因为表层容易受到降水的补给,所以含水量较高;0.20—1.20 m土层中作物根系大量分布,作物吸水量多,而又不

受到降水和地下水的补给,导致土壤含水量较低;到了深层 1.20 m 以下,蒸发和作物吸水减少,因此土壤含水量又逐渐增加。对比坝地不同部位含水量可以看出,坝前各个土层深度的含水量均明显高于坝中和坝后。有研究表明,坝地土壤水分和黏粉粒含量成正相关,细颗粒含量高的地方含水量也较高^[17]。径流在挟带泥沙运动过程中,随着挟沙力的减小,一般

是粗颗粒先沉积,细颗粒后沉积,大量的细颗粒泥沙在坝前淤积,因此坝前的含水量要高于坝中和坝后。由图 4B 可以看出,坝前、坝中和坝后的土壤含水量变异系数相差不大,均呈极显著相关($p<0.01$),而且随土层深度增加而减小,说明坝地表层土壤水分变化剧烈,降雨和蒸发都可以使表层土壤水分含量发生变化,土壤水分随着深度的增加而趋于稳定。

表 1 坝地表层土壤含水量统计特征(0—20 cm)

观测日期	最小值/%	最大值/%	平均值/%	极差/%	CV/%	标准差	偏度	峰度	K-S 检验
2015-08-10	10.42	26.50	17.68	16.08	29.53	5.22	-0.04	-0.29	0.57
2015-08-12	9.94	28.37	18.32	18.43	31.09	5.70	-0.05	0.38	0.58
2015-08-12	12.62	27.50	18.38	14.88	24.56	4.51	0.82	1.13	0.43
2015-08-13	10.77	27.75	18.79	16.98	24.72	4.65	0.32	1.62	0.47
2015-08-14	9.94	25.41	17.61	15.47	24.81	4.37	-0.10	1.00	0.68
2015-08-15	8.85	27.55	16.82	18.70	30.91	5.20	0.70	2.00	0.76
2015-08-16	12.00	25.94	17.74	13.94	23.47	4.16	0.64	0.84	0.51
2015-08-17	9.04	27.46	17.12	18.42	31.36	5.37	0.32	1.15	0.62
2015-08-18	9.22	27.18	16.46	17.96	32.52	5.35	0.59	1.40	0.59
2015-08-19	9.48	26.73	16.29	17.25	31.20	5.08	0.73	1.69	0.65
2015-08-20	10.10	25.58	16.52	15.48	27.22	4.50	0.52	1.70	0.77
2015-08-21	8.46	25.28	15.10	16.82	32.15	4.85	0.84	2.01	0.82
2015-08-22	6.75	23.67	13.99	16.92	32.68	4.57	0.86	2.54	0.71
2015-08-23	10.46	25.85	16.58	15.39	32.72	5.42	0.80	-0.36	0.52
2015-08-24	9.30	25.11	15.32	15.81	30.84	4.72	0.88	1.64	0.60
2015-08-25	7.18	26.07	15.14	18.89	34.93	5.29	0.74	1.99	0.69
2015-08-26	4.13	25.23	14.23	21.10	37.76	5.38	0.31	3.47	0.82
2015-08-27	8.94	25.71	15.23	16.77	29.81	4.54	1.51	4.05	0.77
2015-08-28	11.22	26.24	14.80	15.02	30.52	4.52	2.45	6.63	0.93
2015-08-29	5.31	25.70	13.33	20.39	41.82	5.57	1.15	3.28	0.90
2015-08-30	9.13	24.97	13.60	15.84	34.46	4.69	2.07	5.03	0.83
2015-09-15	13.40	24.98	18.57	11.58	22.16	4.11	0.05	-1.10	0.53
2015-09-28	4.93	25.42	14.97	20.49	43.71	6.55	0.27	-0.53	0.49
2015-08-10	10.44	28.16	17.75	17.72	33.14	5.88	0.44	-0.60	0.37
2015-10-13	12.18	28.27	20.70	16.09	25.75	5.33	-0.35	-0.73	0.42
2015-11-01	10.19	28.57	23.94	18.38	24.45	5.85	-1.86	3.90	0.64
2015-11-15	7.45	27.07	17.86	19.62	35.82	6.40	-0.24	-0.82	0.35
2015-12-15	8.26	17.39	11.90	9.13	21.91	2.61	1.04	1.85	0.62
2016-01-01	8.58	13.92	10.51	5.34	14.95	1.57	1.18	2.30	0.52
2016-01-31	4.91	12.71	8.77	7.80	25.54	2.24	-0.02	0.74	0.50
2015-03-01	8.25	18.44	13.58	10.19	21.83	2.96	0.02	0.74	0.67

坝地土壤水分具有明显的分层现象,图 5 对比了坝地和坡地土壤含水量及其变异系数随深度的变化过程。

由图 5A 可以看出,在 0—0.40 m 坝地的含水量明显高于坡地,0.40—1.40 m 坡地含水量高于坝地,1.40 m 以下坝地含水量高于坡地,总的来说坝地的含水量要高于坡地,说明坝地具有良好的储水作用。这可能与坝地汇聚径流和坝地的分层淤积结构有关,坝地的这种分层淤积结构为土壤产生优先流和指状

流提供了条件^[18-20]。对比坝地和坡地土壤含水量随深度变化可以发现,坝地土壤含水量波动剧烈,而坡地含水量的变化则比较稳定。由图 5B 可以看出,坝地各层土壤含水量随时间的变异系数基本介于 10%~30%,属于中等变异;坡地 0—0.80 m 变异系数介于 10%~20%,属于中等变异,0.80 m 以下坡地含水量变异系数均属于弱变异,由图可以看出坝地各层土壤含水量变异系数明显小于坡地,坝地各层土壤水分在时间上的变异性小于坡地。

表 2 不同深度下坝地土壤含水量统计特征

土层深度	最小值/%	最大值/%	平均值/%	CV/%	标准差	偏度	峰度	K-S 检验
A ₁	8.77	23.94	15.93	19.24	3.06	−0.06	1.00	0.62
A ₂	11.07	20.13	15.45	13.43	2.08	0.06	0.57	0.69
A ₃	8.69	15.45	10.88	13.46	1.46	1.90	3.97	1.27
A ₄	9.17	11.44	9.92	5.81	0.58	1.48	1.74	1.56
A ₅	10.41	12.91	11.23	4.95	0.56	0.74	1.12	0.60
A ₆	11.19	13.75	11.91	4.15	0.49	1.58	5.44	0.87
A ₇	10.42	13.83	12.31	4.77	0.59	−0.33	3.85	0.97
A ₈	13.80	18.07	15.82	5.34	0.84	0.38	1.65	0.90
A ₉	17.06	22.46	20.11	5.25	1.06	−1.11	3.69	0.95
A ₁₀	20.22	24.98	22.80	4.08	0.93	0.15	1.93	1.08
A ₁₁	18.90	23.93	21.20	4.93	1.05	0.46	0.50	0.74
A ₁₂	21.39	25.95	23.70	4.07	0.97	−0.13	1.16	0.92

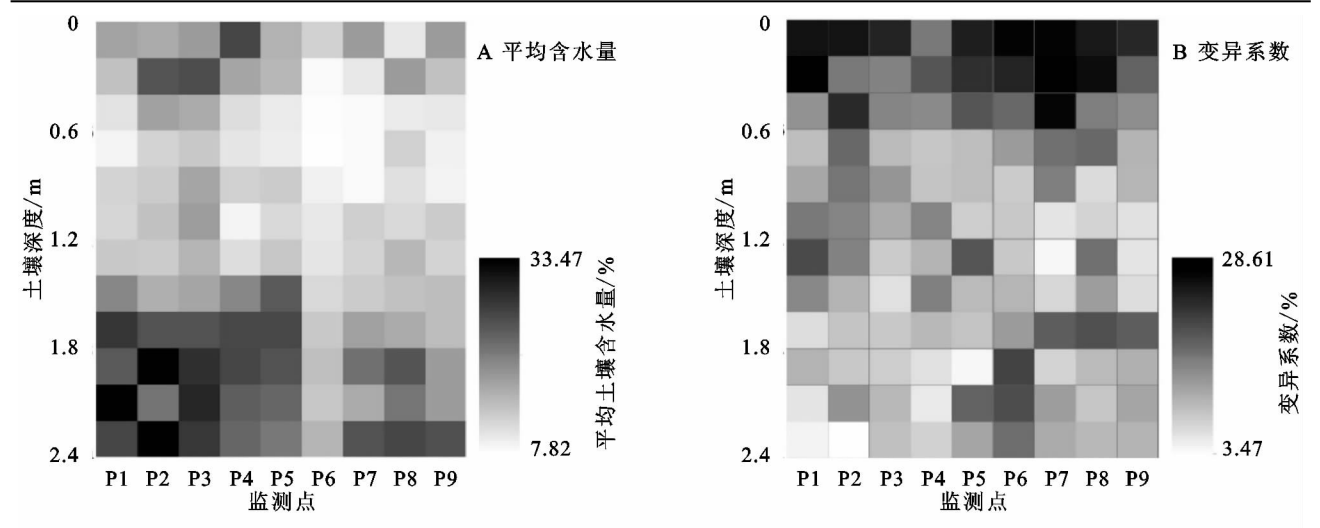


图 3 各监测点不同土层深度的平均含水量及变异系数分布

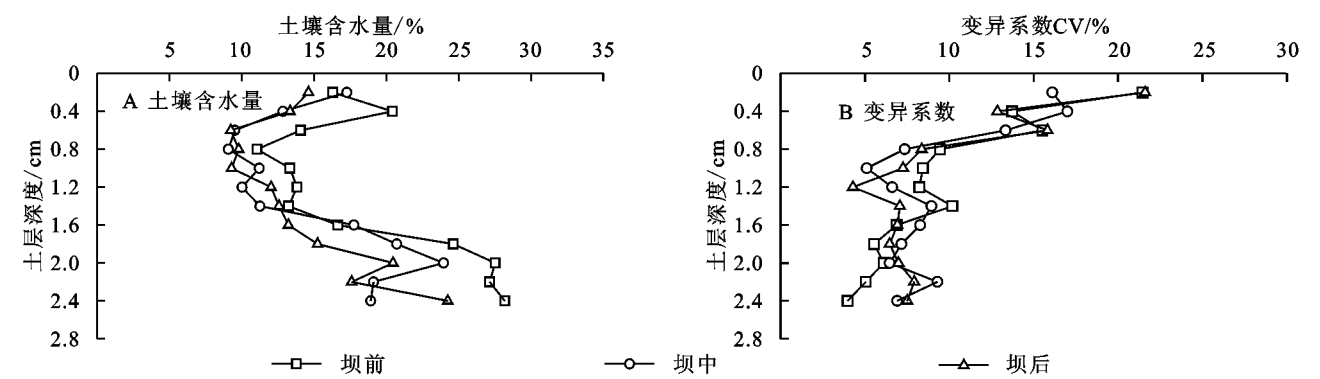


图 4 坝地不同部位土壤含水量及变异系数随深度变化过程

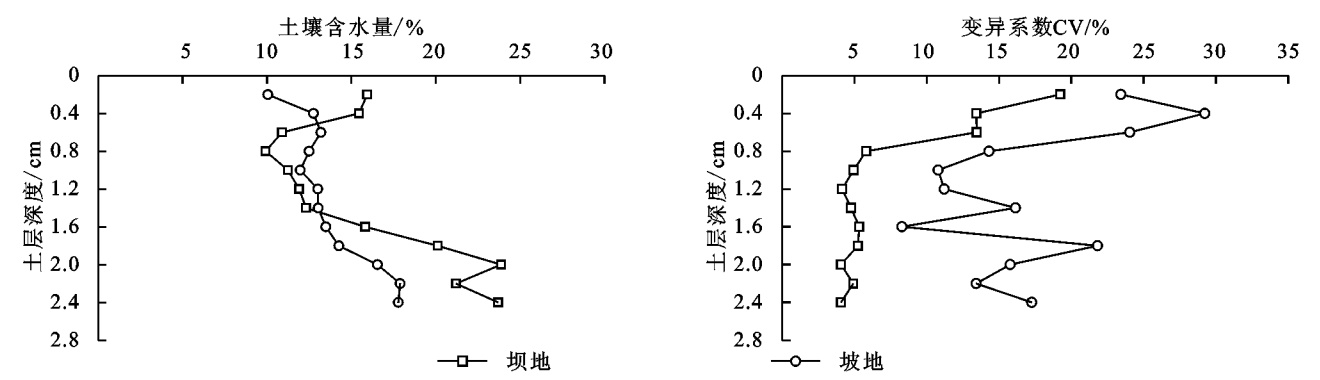


图 5 坝地和坡地土壤含水量及变异系数随深度变化过程

3 结论

(1) 坝地各层土壤水分均表现为中等变异,而且在一次测量过程中,表层土壤含水量的极差较大;12个土层深度下土壤平均含水量变化范围为9.92%~23.70%,其中 A_4 (0.60—0.80 m)平均含水量最低, A_{12} (1.80—2.00 m)平均含水量最高,土壤平均含水量从上到下,表现为先减小后增大的趋势。

(2) 坝地土壤水分具有明显的分层现象,多数监测点的土壤水分在时间上属于中等变异,表层土壤水分变化剧烈,随着深度的增加变异系数开始变小,水分变化程度减弱;根据变异系数的大小,坝地土壤水分可以划分为4个层次:水分剧变层(0—0.20 m),水分活跃层(0.20—0.60 m),水分次活跃层(0.60—1.40 m),水分相对稳定层(1.40 m以下)。

(3) 坝前、坝中和坝后的土壤含水量随土层深度均表现为先减小后增大,坝前各层土壤含水量,均明显高于坝中和坝后;在0—0.40 m坝地的含水量明显高于坡地,0.40—1.40 m坡地含水量高于坝地,1.40 m以下坝地含水量高于坡地,且坝地各层土壤含水量随时间的变异系数均小于坡地。

参考文献:

- [1] 李勉,杨吉山,杨二,等.黄土丘陵区小流域淤地坝建设对生态环境的影响[C]//中国地理学会2011年学术年会,2011.
- [2] 魏霞,李占斌,李勋贵,等.基于灰关联的坝地分层淤积量与侵蚀性降雨响应研究[J].自然资源学报,2007,22(5):842-850.
- [3] 张红娟,延军平,周立花,等.黄土高原淤地坝对水资源影响的初步研究:以绥德县韭园沟典型坝地为例[J].西北大学学报:自然科学版,2007,37(3):475-478.
- [4] 徐学选,张北赢,白晓华.黄土丘陵区土壤水资源与土地利用的耦合研究[J].水土保持学报,2007,21(3):166-169.
- [5] 甄自强,黄金柏,王斌,等.黄土高原北部淤地坝区域土壤水分模拟及水分有效性:以六道沟流域为例[J].水资源与水工程学报,2016,27(3):226-232.
- [6] 李洪建,王孟本,柴宝峰.黄土高原土壤水分变化的时空

- 特征分析[J].应用生态学报,2003,14(4):515-519.
- [7] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河.黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J].生态学报,2012,32(16):4961-4968.
- [8] 赵磊磊,朱清科,聂立水,等.陕北黄土区陡坡土壤水分变异规律研究[J].生态环境学报,2012,21(2):253-259.
- [9] 李谦,郑锦森,朱青,等.太湖流域典型土地利用类型土壤水分对降雨的响应[J].水土保持学报,2014,28(1):6-11.
- [10] 赵文举,李晓萍,范严伟,等.西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J].农业工程学报,2015,31(17):144-151.
- [11] Jacobs J M, Mohanty B P, Hsu E C, et al. SMEX02: Field scale variability, time stability and similarity of soil moisture[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,92(4):436-446.
- [12] Cerdà A. Soil erosion after land abandonment in a semi-arid environment of southeastern Spain[J]. Arid Soil Research & Rehabilitation, 1997,11(2):163-176.
- [13] 魏霞,李占斌,沈冰,等.陕北子洲县典型淤地坝淤积过程和降雨关系的研究[J].农业工程学报,2006,22(9):80-84.
- [14] 黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站.水土保持试验研究成果汇编(第二集)[R].绥德水土保持科学试验站,1985.
- [15] 王继夏,孙虎,王祖正.延安碾庄沟流域梯田与坝地土壤水分对比分析[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):88-93.
- [16] 惠波.黄土高原小流域淤地坝系淤积特征及其生态效应研究[D].西安:西安理工大学,2015.
- [17] 赵培培.黄土高原小流域典型坝地土壤水分和泥沙空间分布特征[D].北京:中国科学院研究生院,2010.
- [18] Heilig A, Steenhuis T S, Walter M T, et al. Funneled flow mechanisms in layered soil: field investigations[J]. Journal of Hydrology, 2003,279(1/4):210-223.
- [19] Walter M T, Kim J S, Steenhuis T S, et al. Funneled flow mechanisms in a sloping layered soil: laboratory investigation[J]. Water Resources Research, 2000,36(4):841-849.
- [20] Hilberts A G J, Troch P A, Paniconi C. Storage-dependent drainable porosity for complex hillslopes[J]. Water Resources Research, 2005,41(6):294-311.