

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.002.

张斌艳, 熊东红, 刘琳, 等. 干热河谷冲沟沟床土壤水分时空分异特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 83-90.

ZHANG Binyan, XIONG Donghong, LIU Lin, et al. Spatial and Temporal Variability of Soil Moisture in Gully Bed of Dry-Hot Valley[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 83-90.

# 干热河谷冲沟沟床土壤水分时空分异特征

张斌艳<sup>1,2</sup>, 熊东红<sup>1</sup>, 刘琳<sup>1</sup>, 唐永发<sup>1,3</sup>, 张宝军<sup>1</sup>, 李小英<sup>2</sup>

(1.中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;

2.西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224; 3.四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安 625014)

**摘要:**为探究干热河谷冲沟沟床土壤水分时空分异特征,选取了元谋干热河谷1条典型冲沟,对其不同分段(沟头、上游、中游、下游)下10,20,30,40,60,100 cm土层的土壤水开展定位监测。结果表明:(1)沟床不同分段各土层(除100 cm土层外)含水量整体变化趋势一致,均表现为明显的干湿季特征;湿季(5—10月)土壤水分相对较高(7.64%~28.91%),受降雨影响大;干季(11—次年4月)则长期处于较低水平(6.11%~11.97%)。(2)沟床土壤水分从沟头至下游沿程变化在干湿季有明显差异,湿季表现为先减小后增加,下游(17.36%)显著高于沟头(15.46%)和上游(12.19%);干季则是先减小后增加再减小,沟头(10.64%)显著高于上游(6.74%)和下游(9.10%)。不同土层深度上,浅层(10—20 cm)和深层(60—100 cm)土壤水分含量在干湿季均较高,水分最小值出现在30—60 cm土层,其中干季30 cm土层水分亏缺严重。(3)沟床土壤水分最高日期通常出现在7日内累积降雨达76.1 mm以上的年最大降雨月当月;最低日期通常出现在持续无降雨条件下,如干季末期,直至雨季初期出现首次有效降雨(>2 mm)。综上,应充分考虑沟床干湿季、不同分段及剖面土壤水分变化规律,因时因地对冲沟沟床进行植被恢复。

**关键词:**土壤水分; 时空分异; 冲沟沟床; 干热河谷

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0083-08

## Spatial and Temporal Variability of Soil Moisture in Gully Bed of Dry-Hot Valley

ZHANG Binyan<sup>1,2</sup>, XIONG Donghong<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>1</sup>, TANG Yongfa<sup>1,3</sup>, ZHANG Baojun<sup>1</sup>, LI Xiaoying<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory of Mountain Surface Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China;

2.College of Ecology and Environment, Southwestern Forestry University, Kunming 650224, China; 3.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

**Abstract:** A typical gully in the dry-hot valley of Yuanmou County was selected to study the spatiotemporal variation of soil moisture in the gully bed, and the soil moisture in soil layers of 10, 20, 30, 40, 60 and 100 cm from different plots (gully head, upstream, midstream and downstream) was monitored. The results showed that: (1) the water contents of all soil layers (except 100 cm soil layer) in different plots of the gully bed showed obvious characteristics of dry and wet seasons; the soil water contents during wet season (May to October) were high (7.64%~28.91%) and greatly influenced by rainfall, while those during dry season (November to April of the next year) were low (6.11%~11.97%); (2) the soil moisture from the gully head to the downstream of the gully bed decreased firstly and then increased in wet season, and the water content in the downstream (17.36%) was significantly higher than those in the gully head (15.46%) and the

收稿日期:2021-11-10

修回日期:2021-12-07

资助项目:中国科学院战略性先导科技(A类)专项(XDA20020401);中国科学院“西部之光”西部青年学者B类项目(2019);中科院成都山地所青年基金(SDS-QN-2103)

第一作者:张斌艳(1996—),女,云南曲靖人,在读硕士研究生,主要从事土壤水分与水土保持研究。E-mail:zhangbinyan@swfu.edu.cn

通信作者:熊东红(1974—),男,江西奉新人,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持、土壤生态方面研究。E-mail:dhxiong@imde.ac.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

upstream (12.19%); in dry season, the soil moisture in the gully head (10.64%) was significantly higher than that in the upstream (6.74%) and downstream (9.10%); the water contents in the soil layers of 10—20 cm and 60—100 cm were higher both in dry and wet seasons, while those in the soil layers of 30—60 cm was low, and the most severe water deficit was observed in the 30 cm soil layer in dry season; (3) the max value of soil moisture in gully bed usually occurred in the month with the largest rainfall and the accumulated rainfall more than 76.1 mm within 7 days, and the min value usually occurred under continuous no rainfall conditions, such as from the end of dry season to the beginning of the rainy season with the occurrence of first effective rainfall ( $>2$  mm). In conclusion, the soil water characteristics of dry and wet seasons, different positions of the stable gully beds and profile water distribution should be taken into account to select planting vegetation.

**Keywords:** soil moisture; spatial and temporal variability; gully bed; dry-hot Valleys

土壤水分是生态系统中最活跃的因子之一,也是干旱环境下影响植物生存、生长发育的关键因子,土壤水分研究对于生态系统的组成、发展、稳定及物质循环和流动功能等具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。土壤水分变化特征是植被恢复研究的重要内容之一。目前,国内学者对于土壤水分的时空分布规律进行了大量研究,研究区域主要集中于黄土高原丘陵区、西北干旱绿洲地区及荒漠地带、东北黑土地地区以及西南岩溶地区<sup>[4-7]</sup>。由于干热河谷区具有“炎热干燥、降雨集中、干湿季分明”的特点,土壤水分成为干热河谷区农业生产和生态治理的主要限制因素<sup>[8]</sup>。近年来,干热河谷区植被恢复的焦点从传统荒坡逐渐转移到冲沟侵蚀劣地,尤其是冲沟发育后期地势开阔且稳定的沟床。长期观察发现,沟床植被较冲沟其他部位生长更迅速,对沟床、沟岸的固定作用更佳,因而成为植被恢复关注的重点区域。由于沟床沿程(从沟头到沟口)立地生境存在差异,加之干热河谷区干湿季分明的特殊气候导致土壤水分具明显的季节性特征<sup>[9]</sup>,致使沟床土壤水分时空分布迥异,因而传统单一的植被恢复模式不完全适用于沟床植被恢复。然而针对干热河谷区土壤水分前期研究也多集中在坡面上不同林草植被、不同土地整治方式、不同土地利用类型和不同集水保水措施的土壤水分动态变化<sup>[10-13]</sup>,仅吴汉等<sup>[9]</sup>学者就冲沟集水区、沟头、沟床的土壤水分时空变化特征开展了研究,但针对沟床沿程土壤水分变化缺乏深入分析。

本文以元谋干热河谷典型冲沟沟床为研究对象,根据沿程沟头—沟口进行分段,并开展土壤水分定位监测,结合室内数据分析,查明沟床不同分段土壤水分的时空动态变化及其时空分异特征,以期为该地区沟道植被恢复的物种选择、空间布局、水分管理等提供指导。

## 1 研究区概况

研究区位于云南省元谋县黄瓜园镇境内中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所与云南省农

业科学院合建的干热河谷沟蚀崩塌观测研究站(以下简称“元谋站”)内(101°35′—102°06′E, 25°23′—26°06′N),该区是南亚热带季风气候,具有“炎热干燥、降雨集中、干湿季分明”的特征<sup>[14]</sup>。年均气温 21.9℃,年均降水量为 615.1 mm,且主要集中在 6—10 月,年蒸发量高达 3 911.2 mm,为年降水量的 6.4 倍,年干燥度为 2.8。自然植被方面为稀树灌草丛,以禾草为主,乔木稀少,自然植被覆盖率仅为 15%~20%<sup>[15]</sup>,乔木以桉树(*Eucalyptus robusta* Smith)为主,灌木主要有车桑子(*Dodonaea viscosa*)和银合欢[*Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit.],草本植物则以扭黄茅(*Heteropogon contortus*)和孔颖草(*Botriochloa portusa*)为主。土壤以燥红土与变性土为主,该地区的基带土壤为燥红土<sup>[16]</sup>。燥红土区的侵蚀沟总长为 124.06 km,主沟长度多小于 400 m,平均长度为 203.29 m<sup>[17]</sup>;侵蚀沟中宽均值约为 14 m,口宽约为 19 m,均宽约为 16 m<sup>[18]</sup>;半稳定沟阶段侵蚀沟占侵蚀沟总数的 68.15%<sup>[19]</sup>。元谋组地层广泛分布,主要为第四纪河湖沉积物,并具有“结构松散、胶结度差、易侵蚀”等特征。独特的气候条件和岩土性质,使得该区冲沟极为发育,冲沟年均溯源侵蚀速率为 50 cm/a,最大可达 200 cm/a<sup>[20]</sup>。近年来当地开始对当地冲沟区进行植被恢复,银合欢因具有生长迅速、抗旱能力强的特性,被作为生态恢复的先锋物种而大量引进,现已在冲沟发育区尤其是沟床部位大面积生长,对冲沟发育起到了良好的遏制效果。

## 2 数据监测与数据处理

### 2.1 数据监测

对元谋站内的冲沟开展土壤、植被和地形等基础参数进行调查,最终选择 1 条典型冲沟(101°49′20″—101°48′20″E, 25°50′46″—26°50′31″N)沟床作为研究对象。该冲沟主沟全长 153.2 m,沟均宽 15.6 m,沟床均宽 6.3 m。采用等距法(距离 50 m),从沟头至沟

口将沟床划分为上、中、下 3 段,每段中部设置 1 组监测点;此外,由于沟床上段靠近沟头部位,崩塌频发、土壤性质变异大且雨季跌水坑蓄水等因素,在该处增设 1 组监测点,共计 4 组监测点(沟头、上游、中游、下游),样点布置见图 1,各样点基本情况详见表 1,每组埋设 2 根 FDR 土壤水分探管,进行定位监测。采用

土壤剖面水分仪(英国 Delta-T Device Ltd.公司生产,型号:PR2/6)进行 10,20,30,40,60,100 cm 土层深度的监测,监测时段为 2016 年 1 月 6 日—2018 年 12 月 26 日,监测日期为每月 6 日、16 日、26 日,每年监测 36 次,共计 108 次。降雨数据从元谋站 DAVIS 自动气象站获取。

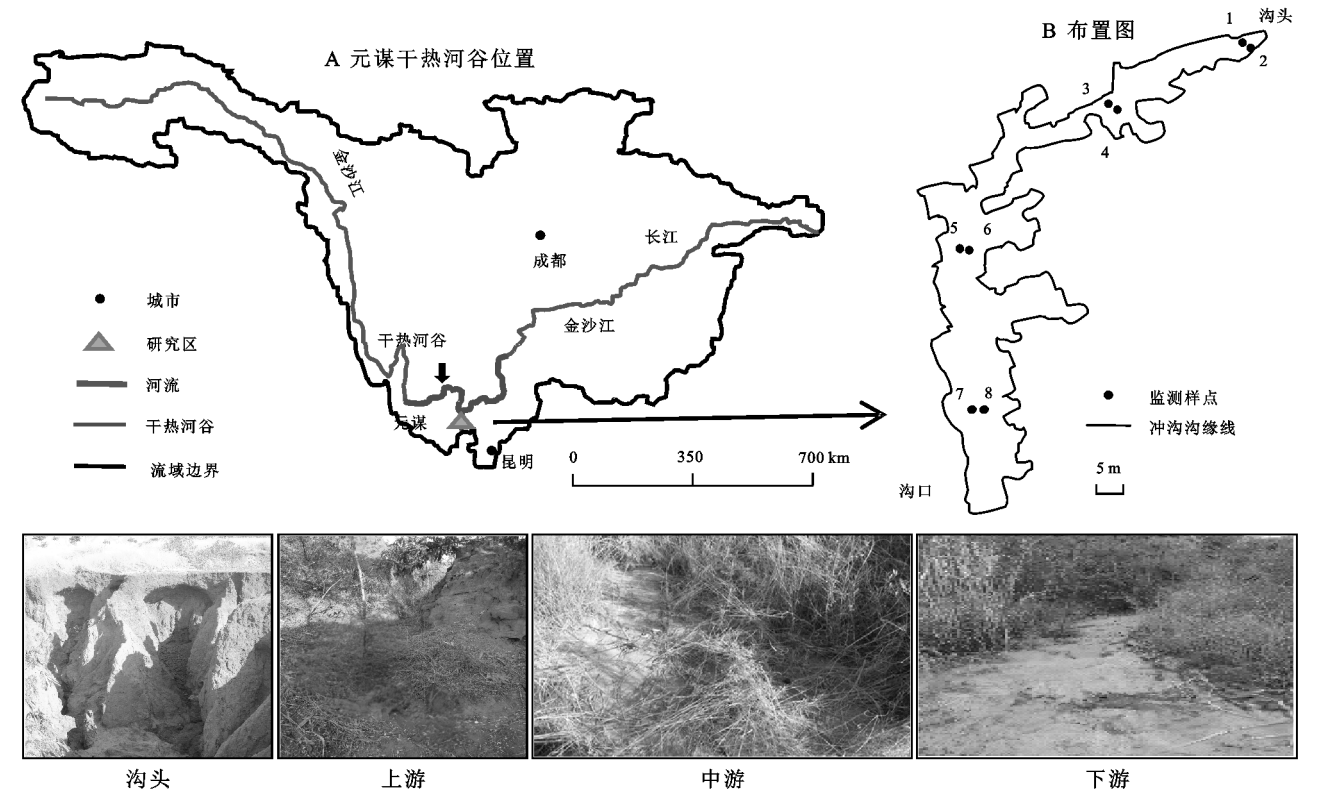


图 1 元谋干热河谷位置和样点布置  
表 1 沟床不同分段样点基本情况

| 分段 | 监测点<br>序号 | 坡度/<br>(°) | 植被         |      | 断面<br>宽度/m | 土壤<br>类型 | 土壤性质                                    |
|----|-----------|------------|------------|------|------------|----------|---|
|    |           |            | 种类         | 盖度/% |            |          |   |
| 沟头 | 1         | 12         | 银合欢幼苗      | 5    | 1.5        | 燥红土      | 以崩塌堆积燥红土为主,土壤容重低,总孔隙度大,土质疏松,有机质含量较低     |
|    | 2         | 11         | —          | 0    |            |          |   |
| 上游 | 3         | 13         | 象草+柱花草     | 40   | 3.2        | 冲积土、燥红土  | 表层为淤积砂土,底层主要为燥红土;总体土壤有机质含量低,砂土含量低,黏土含量高 |
|    | 4         | 11         | 木豆         | 30   |            |          |   |
| 中游 | 5         | 8          | 象草+柱花草     | 60   | 7.4        | 冲积土      | 长期淤积砂土,有机质含量较低,砂粒含量较高,黏土含量较低            |
|    | 6         | 7          | 象草         | 70   |            |          |   |
| 下游 | 7         | 3          | 象草+柱花草     | 40   | 8.6        | 冲积土      | 长期淤积砂土,有机质含量最低,砂土含量最高,黏土含量最低            |
|    | 8         | 4          | 象草+柱花草+扭黄茅 | 60   |            |          |   |

2.2 数据处理

本研究中 FDR 土壤水分探管测量结果为土壤水分体积百分数(%). 变异系数  $C_v$  能够衡量观测值的变异程度, $C_v \leq 10\%$  时为弱变异性, $10\% < C_v < 100\%$  时为中等变异性, $C_v \geq 100\%$  时为强变异性。冲沟沟床不同分段土壤水分之间的差异显著性分析采用最小显著性差异法(LSD 法),数据整理在 Excel 中完成,所有统计分析方法采用 SPSS 22 软件完成,图形由 Origin 2018 软件绘制。

3 结果与分析

3.1 沟床土壤水分时间动态变化特征

整个监测期内各分段土壤水分随时间变化趋势基本一致,均表现为明显的季节性波动(图 2)。参考研究区多年平均降雨分布特征和《元谋县志》资料,将降雨集中的 5—10 月划定为湿季,降雨稀少的 11 月—次年 4 月则划定为干季。故本研究重点选取了 2017 年 5 月—2018 年 4 月期间的监测数据分析了不同分段土壤水分的干、湿季分异特征。

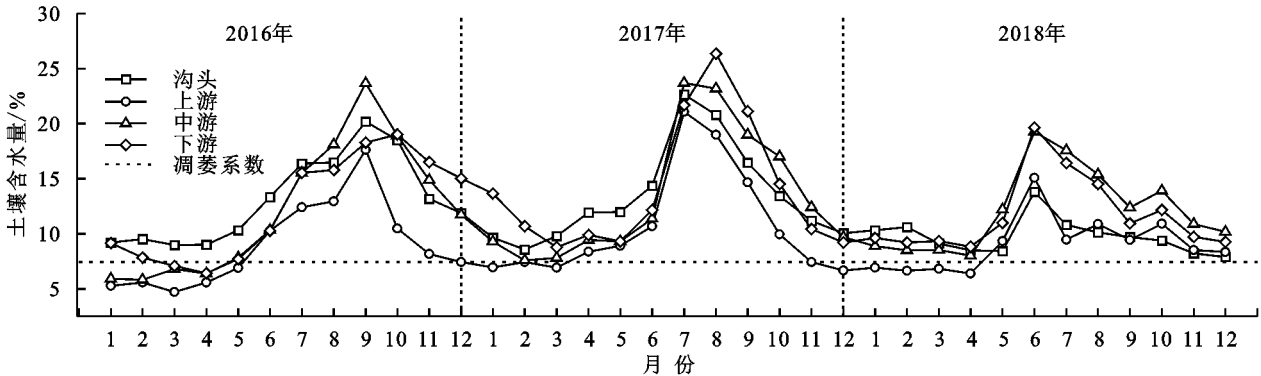


图 2 监测期内沟床不同分段土壤含水量动态变化

沟床不同分段土壤水分在一个干湿季内变化趋势一致,均随时间序列先增加后减少,最终趋于稳定,且降雨集中的湿季土壤水分状况(7.64%~28.91%)明显好于干季(6.11%~11.97%)(图 3)。湿季土壤水分均值大于 20% 的日期集中在 7 月、8 月,其中沟头(22.93%)、上游(21.36%)、中游(25.53%)均在 7

月 26 日达极值,下游在 8 月 6 日达极值(28.91%)。干季降雨稀少,持续期长,不同分段土壤水分长期处于较低水平,各部位土壤水分最小值均出现在干季末期(4 月 26 日)。结合研究区燥红土凋萎系数分析<sup>[21]</sup>,发现沟床上游土壤水分在干季长期低于凋萎系数(7.43%)。

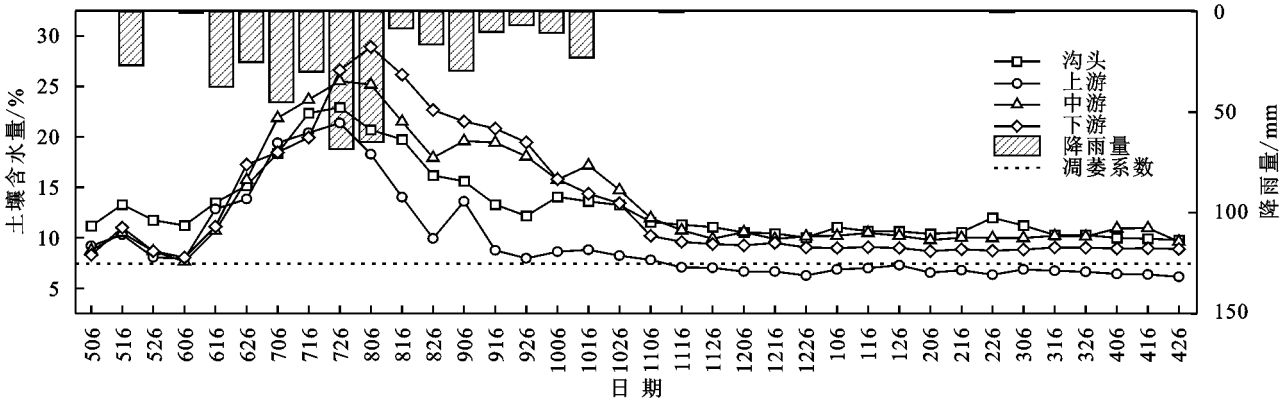


图 3 沟床不同分段干湿季内土壤水分动态变化

沟床不同分段土壤水分,除 100 cm 土层外,其余土层均具明显的干湿季特征(图 4)。湿季各部位土壤水分均是先增加后减小,变化幅度较大;干季则均趋于稳定,波动较小。10—30 cm 土层,湿季冲沟不同分段土壤水分变化特征一致,6—10 月高值小幅波动;干季各分段各土层土壤水分变化均是低值小幅波动,土壤含水量均较低,尤其是 30 cm 土层各分段土壤水分均低于凋萎系数,水分亏缺严重。40, 60 cm 土层,湿季各分段土壤水分变化均先增大后减小,均在 8 月 6 日达极值,中、下游变化更剧烈;无论干湿季,60 cm 土层沟头含水量整体较低,且显著低于其他分段。100 cm 土层,沟头、中游和下游土壤水分变化趋势一致,湿季各分段的土壤水分差异随时间序列先增加后减小;干季各分段(除下游)均高于对应的其他深度土层土壤含水量,且各分段之间差异显著,具体表现为:沟头 > 上游 > 中游 > 下游。

3.2 沟床土壤水分空间分异特征

干热河谷冲沟土壤水分状况从沟头至沟床下游

表现出明显的空间分异特征(图 5)。湿季土壤水分沿程变化是先减小后增加,下游(17.36%)显著高于沟头(15.46%)和上游(12.19%),而与中游(16.80%)差异不显著;干季土壤水分沿程变化则是先减小后增加,再减小,沟头(10.64%)显著高于上游(6.74%)和下游(9.10%),而与中游(10.30%)差异不显著;干季土壤水分显著低于湿季,沟头、上游、中游、下游湿季土壤水分分别为干季的 1.5, 1.8, 1.6, 1.9 倍。无论干湿季,沟床上游均显著低于其他分段。

冲沟沟床不同分段土壤水分垂直变化特征基本一致,均随着土层深度增加呈波动变化趋势(图 6)。浅层(10—20 cm)和深层(60—100 cm)土壤含水量在干湿季均较高,含水量最小值出现在 30—60 cm 土层,其中干季 30 cm 土层土壤水分亏缺严重。10—20 cm 土层,湿季土壤含水量 8.1%~19.7%,各分段均波动降低;干季土壤含水量 2.8%~10.6%,除上游持续降低,其他分段均波动降低。30 cm 土层湿季土壤含水量 7.8%~16.3%,干季土壤含水量 0.8%~5.5%。



60—100 cm 土层,湿季土壤含水量 19.3%~29.4%,土壤水分增加趋势明显;干季土壤含水量 9.3%~29.2%,除下游土壤水分减小,其余分段土壤水分增加趋势明显。湿季土壤含水量最大值除沟床下游出现在表层 10 cm,

其余分段均出现在最底层(100 cm),最小值出现在 30—60 cm 土层;干季含水量最大值除沟床下游出现在 40 cm 土层,其余分段均出现在最底层(100 cm),最小值出现在 30 cm 或 60 cm 土层。

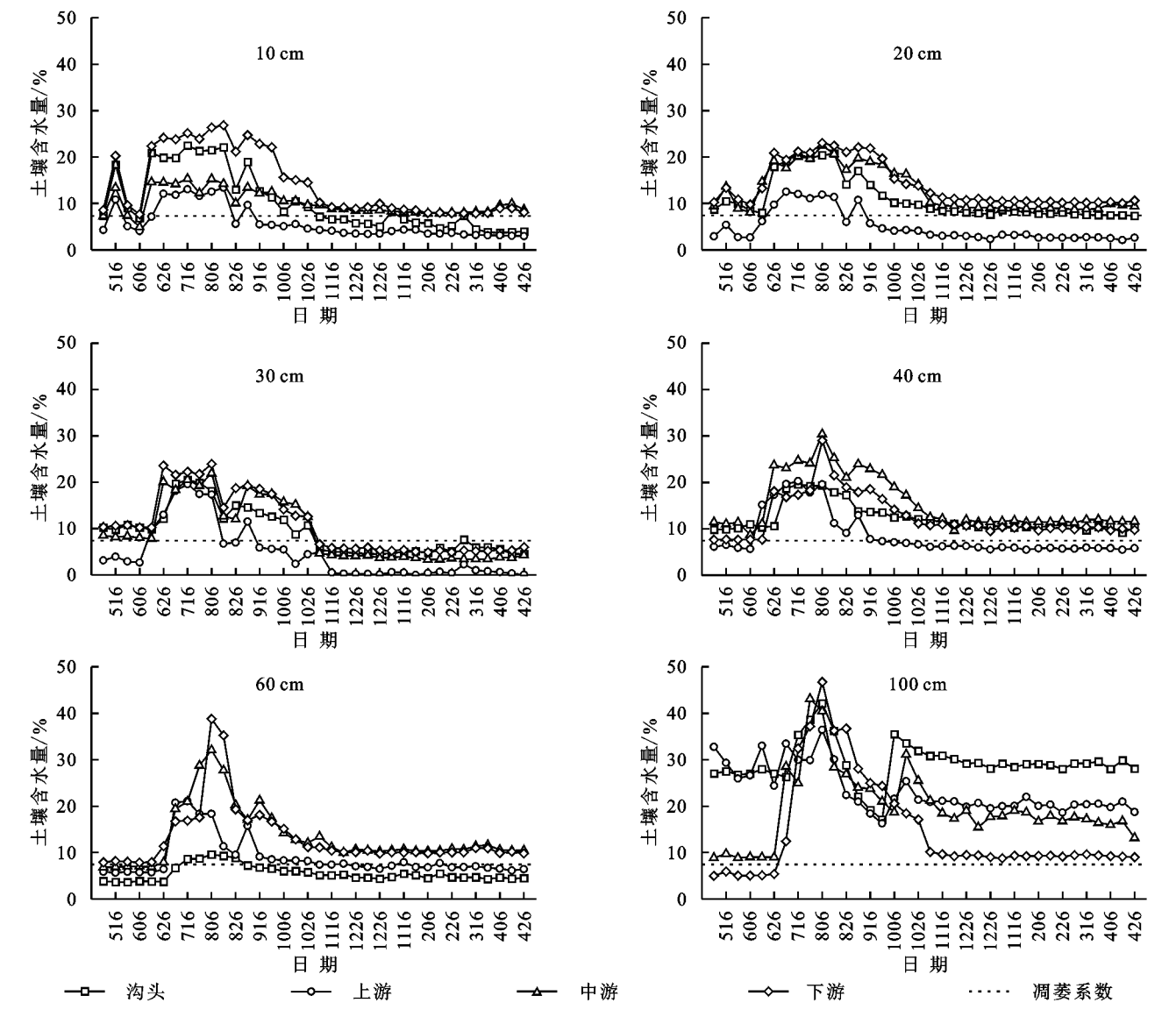
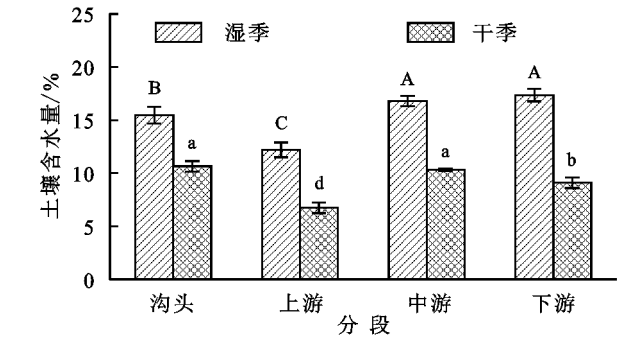


图 4 沟床不同分段干湿季内不同土层土壤水分动态变化



注:不同大写字母表示不同分段湿季之间土壤含水量在  $p<0.05$  水平上存在显著差异,不同小写字母代表不同分段干季之间土壤含水量在  $p<0.05$  水平上存在显著差异。

图 5 沟床不同分段干湿季土壤含水量

沟床不同分段土壤水分垂直变异系数呈不同变

化趋势,沟床上游变异系数呈先增加后减小趋势,其余分段变异系数则呈波动型变化(表 2)。10—30 cm 土层沟床上游土壤水分变异系数逐渐增大,在 30 cm 时达最大值(99.78%),在 40—100 cm 土层,变异系数逐渐减小,在 100 cm 土层达最小值(28.67%)。沟头在 10 cm 土层变异系数达最大(53.54%),其余土层在 28.48%~45.27%;中游在 30 cm 土层最大(60.07%),其余土层在 34.21%~47.26%;沟床下游 100 cm 土层达最大(70.21%),其余土层在 30.40%~50.24%。综上所述,冲沟沟床上游 20—30 cm 土层为水分活跃层,而表层(10—20 cm)和深层(40—100 cm)则为稳定层;沟头水分活跃层是 10 cm 土层,沟床中、下游的水分活跃层分别为 30 cm 和 100 cm 土层。

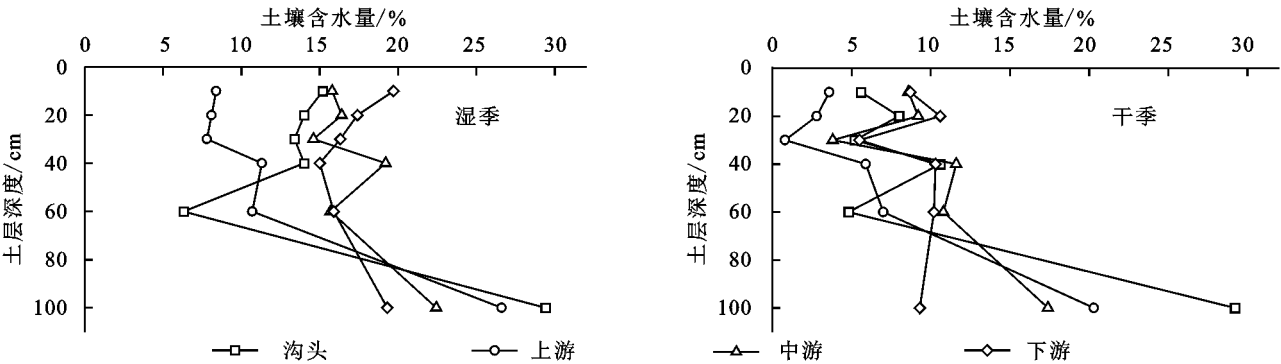


图 6 沟床不同分段干湿季土壤水分随土层深度变化

表 2 沟床不同分段不同土层深度土壤水分特征值

| 分段 | 深度/cm | 均值/%    | 变异系数<br>Cv/% |
|----|-------|---------|--------------|
| 沟头 | 10    | 10.39Cc | 53.54        |
|    | 20    | 10.95Cc | 40.98        |
|    | 30    | 9.29Bd  | 45.27        |
|    | 40    | 12.28Bb | 28.48        |
|    | 60    | 5.52Ce  | 51.86        |
|    | 100   | 29.30Aa | 31.09        |
| 上游 | 10    | 5.9Dc   | 51.41        |
|    | 20    | 5.45Dc  | 64.47        |
|    | 30    | 4.29Cd  | 99.78        |
|    | 40    | 8.59Cb  | 46.27        |
|    | 60    | 8.85Bb  | 44.33        |
| 中游 | 100   | 24.31Ba | 28.67        |
|    | 10    | 12.18Bd | 36.87        |
|    | 20    | 12.83Bc | 34.21        |
|    | 30    | 9.23Be  | 60.07        |
|    | 40    | 15.39Ab | 35.31        |
|    | 60    | 13.38Ac | 44.28        |
| 下游 | 100   | 19.92Ca | 47.26        |
|    | 10    | 14.21Aa | 43.54        |
|    | 20    | 14.03Aa | 30.40        |
|    | 30    | 10.89Ad | 50.24        |
|    | 40    | 12.62Bc | 34.06        |
|    | 60    | 13.07Ab | 42.31        |
|    | 100   | 14.29Da | 70.21        |

注:不同大写字母代表不同分段相同土层之间土壤含水量在  $p<0.05$  水平上存在显著差异;不同小写字母代表相同部位不同土层之间土壤含水量在  $p<0.05$  水平上存在显著差异。

3.3 沟床不同分段极值日土壤水分特征

极值日反映了土壤水分季节变化的极端情况,探明极值日出现规律可为当地植被恢复和作物种植的种植时间、植被搭配及水分管理等提供实践指导。通过实测数据的对比分析(累积 4 个及以上土层土壤水分含量达到年内最大值或最小值),找出监测期三年

中每一年土壤水分的极值日(最高日和最低日),经归纳总结,发现其出现规律如下:最高日期通常出现在 7 日内累积降雨达 76.1 mm 以上的年最大降雨月当月;沟床中、下游到达含水量最高日的时间存在滞后性。由表 3 可知,最高日土壤含水量 8.10%~37.63%,平均含水量为 21.40%,为干湿季平均值(7.62%)的 2.8 倍,最大值均出现在 100 cm 土层。最低日期通常出现在持续无降雨条件下,如干季末期,直至雨季初期出现首次有效降雨( $>2$  mm)。由表 3 可知,最干日土壤含水量 0.45%~26.62%,最低值出现在 40—60 cm 土层。沟床中、下游因蒸发和植物根系对水分利用的影响,最低日会提前出现。

4 讨论

4.1 不同分段土壤水分干湿季差异

本研究发现沟头—下游沿程土壤水分变化随干湿季的不同存在差异。湿季沿程土壤水分是先减小后增加,下游含水量最高。当土壤水分含量较高时,地形和坡度将是影响坡面土壤水分分布的主导因子<sup>[22]</sup>。径流由于重力作用从沟头流向沟口过程中往往地势较低的沟口流经时间更长<sup>[23]</sup>。植被生长可以减小地表风速,有效减少水分蒸发。因而在湿季处于地形平坦、坡度较缓的沟床中、下游含水量更高,土壤水分的增长也滞后于沟头和上游。干季土壤水分沿程变化是先减小后增加,再减小;沟头含水量最高。当土壤水分含量较低时,土壤物理性质和植被将是影响坡面土壤水分分布的主导因子<sup>[12]</sup>。干季中游到下游土壤水分逐渐降低,这可能与靠近沟口土壤砂粒含量增加,加之干季植被根系持续吸水耗散有关。韩娇娇等<sup>[12]</sup>研究结果显示,微地形对旱季的土壤水分影响大于湿季,本研究中沟头干季水分含量最高,这可能与沟头特殊微地形(跌穴、沟壁陡峭)有关。切沟复杂地形会加大切沟区土壤分布空间异质性<sup>[24]</sup>,局部微地形会影响径流停留时间<sup>[12]</sup>,在干热河谷冲沟区,沟床上游地势相对较高,坡度较大,沟道径流迅速流向地势更

低的中、下游,不利于水分入渗和蓄存,因而,沟床上游干、湿季土壤含水量均显著低于其他分段。

表 3 极值日土壤水分监测值

| 深度/<br>cm | 沟头          |             |             | 上游          |             |             | 中游          |             |             | 下游         |             |             |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|
|           | 2016 年      | 2017 年      | 2018 年      | 2016 年      | 2017 年      | 2018 年      | 2016 年      | 2017 年      | 2018 年      | 2016 年     | 2017 年      | 2018 年      |
| 10        | 24.12/7.78  | 21.45/5.82  | 14.62/3.98  | 14.72/6.73  | 12.55/3.30  | 11.78/2.97  | 20.22/9.17  | 15.27/4.48  | 16.22/8.68  | 21.63/7.68 | 26.32/6.70  | 25.57/8.10  |
| 20        | 21.08/7.48  | 20.40/7.52  | 19.43/7.35  | 11.15/3.60  | 11.90/2.58  | 16.72/2.65  | 27.15/5.80  | 22.48/7.40  | 19.18/9.40  | 22.45/7.07 | 23.03/9.18  | 23.82/10.65 |
| 30        | 20.32/7.65  | 18.12/9.53  | 10.78/4.55  | 13.03/0.45  | 17.35/2.52  | 11.25/0.08  | 32.35/2.93  | 21.93/7.77  | 12.68/4.28  | 14.13/6.05 | 23.92/10.08 | 15.02/6.00  |
| 40        | 17.50/6.40  | 19.30/10.05 | 15.52/10.28 | 22.12/1.25  | 19.57/5.52  | 20.42/5.83  | 28.30/2.20  | 30.40/10.85 | 25.05/11.62 | 10.77/6.63 | 29.02/7.65  | 22.32/9.73  |
| 60        | 8.10/2.30   | 9.57/3.62   | 14.88/4.48  | 22.28/3.60  | 18.35/5.68  | 22.23/6.43  | 36.87/2.98  | 36.07/6.88  | 24.23/10.50 | 12.57/5.23 | 38.76/7.98  | 21.32/9.82  |
| 100       | 25.08/21.57 | 37.02/26.62 | 26.60/15.6  | 33.90/14.37 | 29.97/19.62 | 26.02/18.72 | 32.87/15.08 | 24.95/9.08  | 37.63/13.17 | 14.13/5.30 | 32.43/5.07  | 20.63/8.97  |

注:“/”左右两边分别表示各年的土壤水分最高日和最低日监测值,即最高日监测值/最低日监测值。

4.2 土壤水分随土层深度的变化

已有研究表明,土壤水分在垂直剖面上的变化趋势常见的有增长型<sup>[25]</sup>、降低型<sup>[26]</sup>和波动型<sup>[27]</sup>3 种类型,冲沟沟床不同分段的土壤水分均属于波动型,且在 30—60 cm 出现明显的水分亏缺,这与赵元蛟等<sup>[28]</sup>的研究结果相似。赵元蛟等<sup>[28]</sup>研究发现干热河谷区灌草植被分布下 0.5 m 土层处的根系生物量最大,而土壤含水量最低。在沟床中、下游分布着大量的扭黄茅、柱花草等灌草植被,其根系也多集中分布在 30—60 cm 土层,在植物生长耗水作用下,导致该土层深度出现明显的水分亏缺现象。变异系数大小反映水分在土壤中的稳定程度<sup>[29]</sup>。本研究发现,沟头、中游、下游整体变异系数均呈波动变化,与冯博等<sup>[4]</sup>在黄土高原坡面水分的研究一致,而本研究进一步发现沟床上游变异系数随土层加深呈先增加后减小的趋势,30 cm 土层变异系数最大,表明上游 30 cm 土层水分极不稳定,这可能与沟头新鲜崩积物的不断沉积于上游,且崩积物颗粒较粗,保水能力差,加之植被根系吸水的综合作用,使得沟床上游 30 cm 土层干季最小趋近于 0,而湿季降雨补给后最大可达 19.57%,干、湿季水分巨大差异导致了该土层变异系数较高。此外,本研究发现沟床下游 100 cm 土层为水分活跃层,而韩娇娇<sup>[12]</sup>元谋干热河谷坡面草地研究发现 100 cm 土层变异系数较小,为稳定层,推测是水分补给差异造成沟床与坡面水分波动情况差异。沟床下游以沉积砂土为主,透水性强,沟道径流能快速入渗达土壤深层,引起土壤水分迅速升高,而坡面 100 cm 土层水分多靠上、下土层缓慢补给,土壤水分长期稳定。

4.3 沟床植被恢复建议

土壤水分对于干旱半干旱区的植被生长和分布起决定性作用<sup>[30]</sup>,侵蚀沟床形态也会影响植被的生长<sup>[24]</sup>。因此,研究典型冲沟沟床土壤水分时空分布差异并提出有针对性的恢复方案,将对沟床植被恢复

具有重要意义。针对沟床不同分段应采取不同的植被恢复措施:在沟头部位,沟壁常发生崩塌导致植物种子不易着床,应植根系发达、茎秆粗壮、耐冲性强的植物,例如银合欢,并在植被周围播撒生长迅速、根系发达的草本植物,联合起到防冲、固土、拦沙作用;沟床上游由于浅层土壤水量低,且坡度大,应利用 60—100 cm 土层水量相对较高的特点,种植深根系、耐旱的乡土树种;沟床中、下游地势平坦开阔且含水量高,可考虑种植需水量高的灌木或草本。从土壤水分干湿季变化特征来看,湿季水分含量较高,考虑到植被生长节律和水分需求,每年 6 月、7 月开展植被营造工作最佳;干季水分持续走低且长期低于凋萎系数,建议在干季末期 3 月、4 月辅以灌溉措施,确保满足植被生长的水分需求。

5 结 论

(1) 沟床不同分段各土层(除 100 cm 土层外)含水量整体变化趋势一致,均表现为明显的干湿季特征;湿季(5—10 月)土壤水分相对较高(7.64%~28.91%),受降雨影响大,干季(11—次年 4 月)则长期处于较低水平(6.11%~11.97%)。

(2) 沟床土壤水分从沟头至下游沿程变化在干湿季有明显差异,湿季表现为先减小后增加,下游(17.36%)显著高于沟头(15.46%)和上游(12.19%);干季则是先减小后增加再减小,沟头(10.64%)显著高于上游(6.74%)和下游(9.10%)。不同土层深度上,浅层(10—20 cm)和深层(60—100 cm)土壤水分含量在干湿季均较高,水分最小值出现在 30—60 cm 土层,其中干季 30 cm 土层土壤水分亏缺严重。冲沟沟床上游 20—30 cm 为活跃层,而表层(10—20 cm)和深层(40—100 cm)为稳定层;沟头水分活跃层是 10 cm 土层,沟床中、下游的水分活跃层分别为 30 cm 和 100 cm 土层。

(3) 沟床土壤水分最高日期通常出现在 7 日内累

积降雨达 76.1 mm 以上的年最大降雨月当月,中、下游最高日期出现存在滞后性;最低日期通常出现在持续无降雨条件下,如干季末期,直至雨季初期出现首次有效降雨( $>2$  mm),中、下游最低日期会提前出现。

(4) 进行人工植被恢复时,应选择每年 6 月、7 月开展植被构建工作;沟床不同分段应配置不同植被类型,沟头易崩塌,应配置根系发达、茎干粗壮、耐冲性强植被;中、下游地势开阔、且含水量高可优先配置需水量大的灌木或草本,沟床上游土壤水分条件差,应配置深根耐旱的乡土树种,透过 30—60 cm 水分亏缺层。

#### 参考文献:

- [1] 肖德安,王世杰.土壤水研究进展与方向评述[J].生态环境学报,2009,18(3):1182-1188.
- [2] McColl K A, Alemohammad S H, Akbar R, et al. The global distribution and dynamics of surface soil moisture [J]. Nature Geoscience, 2017,10(2):100-104.
- [3] Xia J, Ning L, Wang Q, et al. Vulnerability of and risk to water resources in arid and semi-arid regions of West China under a scenario of climate change[J]. Climatic Change, 2017,144(3):549-563.
- [4] 冯博.黄土高原北部两种典型草地土壤水分时空分异及对降雨的响应[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [5] 李祥东.西北干旱区土壤水分时空变异特征及其影响因素研究[D].北京:中国科学院大学:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2019.
- [6] 邱野.北方坡耕地不同耕作模式产流产沙及土壤水分分布研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2019.
- [7] 刘艳.喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式下表层土壤水分的时空规律研究[D].南宁:广西大学,2016.
- [8] 张明忠,朱红业,张映翠,等.云南干热河谷旱坡地两种覆盖措施对土壤水分的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):37-40.
- [9] 吴汉,熊东红,张宝军,等.金沙江干热河谷冲沟发育区不同部位土壤水分的时空变化特征[J].西南农业学报,2018,31(2):384-392.
- [10] 韩姣姣,段旭,赵洋毅.金沙江干热河谷不同植被坡面土壤水分时空分布特征[J].干旱区地理,2019,42(1):121-129.
- [11] 谷丽萍,裴艳辉,郑科,等.整地方式对元谋干热河谷人工林土壤水分的影响[J].西部林业科学,2017,46(6):71-76.
- [12] 韩姣姣,段旭,赵洋毅,等.元谋干热河谷不同土地利用类型下土壤水分特征及其主控因子[J].干旱区资源与环境,2018,32(1):168-173.
- [13] 赵和琼,谷丽萍,郑科,等.不同集水保水措施对金沙江干热河谷区林地土壤储水量的影响[J].西部林业科学,2018,47(6):85-89,100.
- [14] 杨丹,熊东红,张宝军,等.沟床草被对干热河谷冲沟产沙特性影响的野外模拟试验[J].农业工程学报,2015,31(15):124-132.
- [15] 南岭,郭芬芬,王小丹,等.云南元谋干热河谷区典型植被恢复模式的水土保持效应[J].安徽农业科学,2011,39(9):5168-5171,5225.
- [16] 何毓蓉,黄成敏.云南省元谋干热河谷的土壤系统分类[J].山地研究,1995,13(2):73-78.
- [17] 羊秀娟.元谋干热河谷土壤类型与侵蚀沟形态关系[D].四川南充:西华师范大学,2019.
- [18] 吴世祥.元谋干热河谷干湿季侵蚀沟形态与植被关系研究[D].四川南充:西华师范大学,2020.
- [19] 王晨.元谋干热河谷不同发育阶段侵蚀沟与植被关系研究[D].四川南充:西华师范大学,2019.
- [20] 张宝军,熊东红,杨丹,等.跌水高度对元谋干热河谷冲沟沟头侵蚀产沙特征的影响初探[J].土壤学报,2017,54(1):48-59.
- [21] 贺玉晓.元谋干热河谷土壤水分胁迫对典型恢复草种的影响机制[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [22] 邱扬,傅伯杰,王军,等.土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J].生态学杂志,2007,26(1):100-107.
- [23] Joshua J. Melliger, Jeffrey D. Niemann. Effects of gullies on space-time patterns of soil moisture in a semiarid grassland[J]. Journal of Hydrology, 2010,389(3/4):289-300.
- [24] 陈明玉,邵明安,李同川,等.黄土高原典型切沟土壤水分时空分布特征及其影响因素[J].土壤学报,2021,58(2):381-390.
- [25] 杨宁,邹冬生,李建国.衡阳盆地紫色土丘陵坡地土壤水分变化动态研究[J].水土保持研究,2009,16(6):16-21.
- [26] 杨新民.黄土高原灌木林地水分环境特性研究[J].干旱区研究,2001,18(1):8-13.
- [27] 王云强,邵明安,刘志鹏.黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J].水科学进展,2012,23(3):310-316.
- [28] 赵元蛟,苏文华,张光飞,等.云南元谋干热河谷土壤水分季节动态[J].安徽农业科学,2013,41(8):3593-3594,3598.
- [29] 穆军,李占斌,李鹏,等.干热河谷干季土壤水分动态研究[J].长江科学院院报,2009,26(12):22-25.
- [30] 张宝军,熊东红,郭敏,等.干热河谷冲沟侵蚀劣地不同坡位草被生长和土壤水分关系研究[J].草业科学,2015,32(5):686-693.