

人工林对黄土高原小流域上下游不同坡面土壤水分的影响

黄艳丽^{1,2}, 李占斌^{1,3,4*}, 苏辉⁵, 柏兰峰⁴, 孙宝洋¹, 刘晨光¹

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2.河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000; 3.西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048; 4.中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 5.新乡学院生命科学技术学院, 新乡 453003)

摘要:为对比不同生态治理小流域的土壤水分,以人工刺槐小流域杨家沟及其相邻自然恢复小流域董庄沟为研究对象,2016年8月每4天在两流域的对照坡面、样点同时采样、分层测定0~120 cm剖面土壤含水量(SWC),通过经典统计学方法分析各流域不同区段、坡向、坡位、土层的SWC变化,并采用土壤水分流域变差系数指标进行流域对比。结果表明:1)董庄沟SWC上游>下游,东坡>西坡,坡脚>坡腰>坡肩,沿剖面向下先短暂降低(0~20 cm)又持续增大(20~120 cm),不同区段、坡向间差异显著($P<0.05$);2)在林木耗水及蒸发调节影响下,杨家沟SWC下降($P<0.05$)、土壤水分格局发生变化,下游与东坡土壤较湿润,SWC坡脚显著高于坡腰与坡肩($P<0.05$)、剖面垂向分布先持续下降(0~100 cm)后转而上升(100~120 cm);3)SWC空间变异性董庄沟(29.19%)>杨家沟(23.51%),时间变异性杨家沟(10.99%)>董庄沟(8.76%);4)上游、东坡、坡腰与60~120 cm土层是杨家沟土壤水分亏缺的主要区域与层次。研究结果可以作為小流域生态建设植被配置与布局的依据。

关键词:流域; 植被; 土壤含水量; 生态治理

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.15.014

中图分类号: S157.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-15-0108-09

黄艳丽, 李占斌, 苏辉, 柏兰峰, 孙宝洋, 刘晨光. 人工林对黄土高原小流域上下游不同坡面土壤水分的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 108-116. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.15.014 http://www.tcsae.org
Huang Yanli, Li Zhanbin, Su Hui, Bai Lanfeng, Sun Baoyang, Liu Chenguang. Effect of man-made forest on soil moisture of different slopes in upper and lower reaches of small watershed of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(15): 108-116. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.15.014 http://www.tcsae.org

0 引言

土壤水分通常是指非饱和带中的水分^[1],是土壤质量的重要标志,更是黄土高原植物生命活动的直接水源^[2]。土壤水的存贮、补给、消耗、更新和平衡,对农牧业生产与生态环境都有重要意义,对于旱和半干旱地区的水资源平衡影响巨大^[3]。作为退化生态系统结构与功能的关键因子^[4],土壤水分对黄土高原生态恢复与重建影响巨大。

1999年,随着“山川秀美”工程的实施,退耕还林(草)在改善黄土高原生态环境、减少水土流失^[5]的同时,引起土壤水分严重亏缺^[6-7]并形成干层^[8-9]。当前,黄土高原在立地^[10]、坡面^[11]、小流域^[12]、区域^[13-15]尺度上均开展了土壤水分研究。立地层面土壤水分受土地利用、地形地貌影响^[16-17],但土地利用对深层土壤含水量(Soil water content, SWC)影响更显著^[18-19]。坡面土壤水分分布受地形^[20]与土地利用^[21]的综合影响,从坡顶到坡下先减小后增大^[22],阴坡>山脊>阳坡,40~200 cm土层垂向分布先减小后增大;变异程度坡上>坡中>坡下,阳坡>阴坡,

垂向变化与SWC明显正相关^[23]。小流域土壤水分受坡向、坡位、土地利用类型影响显著^[24],但各因素影响具有时空变异性^[11,25]。贾小旭等^[26]认为黄土高原土壤蓄水量从南向北递减,随深度增加SWC空间变异性增强、时间变异性减小,干燥度、黏粒、归一化植被指数和坡度是土壤水分的重要影响因素。王亚飞等^[27]指出植被恢复方式是土壤水分变化的主要影响因素,生长年限的影响相对较弱,多种植被恢复方式的土壤储水量大小顺序为弃耕地>荒草地>杏树地>苜蓿地。土壤水分研究范畴与深度的拓展,增强了对黄土高原土壤水分分布、变化、影响因素及变化环境下动态响应的科学认识,但已有研究主要集中于不同植被^[28]、立地、小流域与区域土壤水分状态^[29]、储量^[30]的监测、模拟及其分布格局、变化过程的探索,缺乏对不同生态治理方式影响下流域尺度特别是小流域尺度土壤水分的系统对比研究。而不同生态治理小流域土壤水分的静态分布与动态过程的对比研究既是黄土高原以小流域为基本单元的生态建设规划、布局的基础^[31],又是科学认识土壤水文变化的关键,而自然恢复与人工林治理分别作为产生土壤水分正负效应的2种典型治理方式尤其缺乏小流域尺度上的对比分析。因此,本研究以甘肃省庆阳市人工刺槐小流域杨家沟及其相邻自然恢复小流域董庄沟为研究对象,在小流域尺度上以固定时间步长对照监测两流域不同区段、坡向、坡位、深度的土壤水分,对比研究两者的空间分异与时间

收稿日期: 2018-01-12 修订日期: 2018-06-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330858)

作者简介: 黄艳丽, 博士生, 主要从事生态水文研究。E-mail: hyl@hpu.edu.cn

*通信作者: 李占斌, 研究员, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。

E-mail: zhanbinli@126.com

变化, 并分析各因素对流域土壤水分空间与时间变化的作用, 为小流域生态建设规划、布局与土壤水资源调控、预测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杨家沟、董庄沟是甘肃省庆阳市南小河流域 (107°30'~107°37'E, 35°41'~35°44'N) 的 2 条分支流域, 处蒲河下游、董志原西侧, 属黄土高原沟壑区典型 (图 1), 是黄河水利委员会 20 世纪设立的水土综合治理试验流域。多年平均气温 9.3℃, 最高气温 39.6℃, 最低气温 -22.6℃, 最大日温差 23.7℃, 年温差 62.2℃, 无霜期 155 d。多年平均降雨量 556.5 mm, 最大降水量 805.2 mm, 最小降水量 319.8 mm。两流域面积分别为 0.87、1.15 km², 沟长 1500、1600 m, 沟道比降 10.67%、8.93%, 沟道走向由北向南, 谷坡一般是 40~60° 的陡坡和大于 60° 的悬崖、立壁; 沟床一般是黄土或黑垆土; 塬面、山坡为黄土, 干容重 1.4g/cm³, 为粉砂壤土。作为两条相邻支沟, 杨家沟与董庄沟土地利用、地形地貌、土壤条件极为相似, 土壤侵蚀也同样严重。20 世纪 50 年代杨家沟开始通过人工栽植刺槐进行生态治理, 而董庄沟一直作为杨家沟的对比流域实施封育、自然恢复, 历经 60a 治理, 两流域分别发育形成了稳定的人工林草 (刺槐、山杏、沙棘、马牙草、冰草、艾蒿) 与天然荒草地植被群落 (马牙草、冰草、艾蒿), 常被用作生态效用研究的对比小流域。

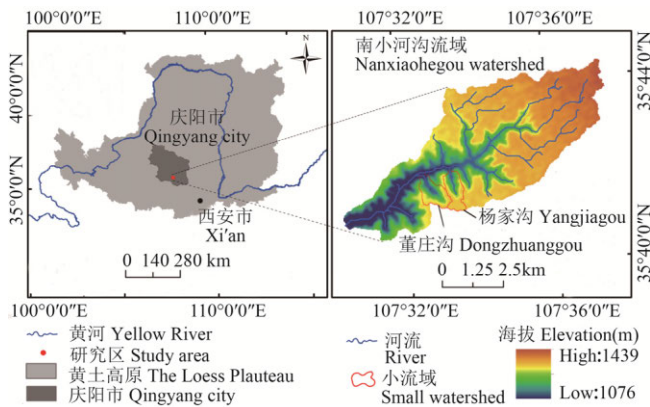


图 1 研究流域位置图

Figure.1 Location map of study area

1.2 试验方法

1.2.1 样点选择原则与方法

在杨家沟的上游 (沿流域走向距沟头 200~300 m)、下游 (距沟口 200~300 m) 分别选择一组半阴坡 (东坡, 45~135°) 与半阳坡 (西坡, 225~315°) 作为典型坡面 (4 条), 坡面各自然条件保持一致: 海拔 1150~1250 m、坡度 35~40°、坡长 25~30 m 间, 植被包括 50 龄刺槐 (60%~75%)、灌丛 (30%~50%) 与草被 (80%~95%)。为保证两流域 SWC 的可比性, 根据杨家沟各典型坡面的区位、坡向、坡度、坡长、海拔等特点在董庄沟一一选择、确定对照坡面 (4 条), 坡面天然草被盖度在 70%~80% 间。然后在两流域各典型坡面的中央条带上顺坡向下每

隔 8~10 m 依次确定坡肩、坡腰、坡脚的采样点。杨家沟各样点都与刺槐与灌木植株保持 3 m 以上距离以减小冠层截留对土壤水分的影响。

1.2.2 采样方法

为对比研究两流域土壤水分, 选择林木蒸腾耗水需求最旺盛的 8 月份汛期作为采样时期。在杨家沟与董庄沟的对照坡面的对照坡位、每 4 d 同时采土样一次, 从 2016 年 8 月 2 日至 8 月 30 日共采样 8 次。用 4 cm 土钻在 0~120 cm 土深内分 9 层取样 (0~60 cm 土深每 10 cm、60~120 cm 土深每 20 cm 作为一层), 每层取 3 个重复样品。每次取样后尽量恢复样点原貌并做标记, 下次取样应错开之前历次取样点。

1.2.3 样品测试方法

采样后立即测试土壤样品湿质量, 带回实验室、放入烘箱中持续 105℃ 高温烘烤 12h 至恒质量, 测干质量并计算土壤样品的质量含水量, 取 3 个重复样品平均值作为测试值。

1.3 研究方法

1.3.1 数据处理与分析

采用 Excel2010 进行数据整理与统计。通过 SPSS18.0 的单因素方差分析与独立样本 *T* 检验进行土壤含水量的差异性检验, 选择最小显著性检验方法 (LSD 法) 进行多重比较, 借助球形检验与多变量方差模型分析小流域各空间因素对 SWC 空间与时间变化的影响。使用 Origin9.0 制图。

1.3.2 相关指标与计算公式

1) 剖面含水率

$$\theta_{in} = \frac{\sum_{j=1}^m \theta_{inj} h_j}{H} \quad (1)$$

式中, θ_{in} 是样点 *i* 第 *n* 次采样的剖面含水量, %; *m* 是土壤采样划分的层次; θ_{inj} 是样点 *i* 第 *n* 次采样第 *j* 层样品的 SWC, h_j 是土壤采样第 *j* 层的土层深度, cm; *H* 是土壤采样总深度, cm。

2) 变异系数

$$CV = SD / MN \times 100\% \quad (2)$$

式中, *CV* 是 SWC 的变异系数, %; *SD* 是 SWC 的标准偏差; *MN* 是 SWC 平均值, %。

3) 土壤水分流域变差系数

为了定量分析杨家沟与董庄沟对照样点间的土壤水分差, 构造了土壤水分流域变差系数指标。土壤水分流域变差系数是两流域各区位、坡向、坡位、土层的 SWC 之差与其平均值的相对百分数, 既能定量反映两对照土壤样品的土壤水分差异, 通过其平均值标准化又能适当规避土壤湿度高低对土壤水分变化的影响。为保持指标一致性, 始终以董庄沟 SWC 作为参照。计算公式如下:

$$DRSM = (\theta_Y - \theta_D) / [(\theta_D + \theta_Y) / 2] \quad (3)$$

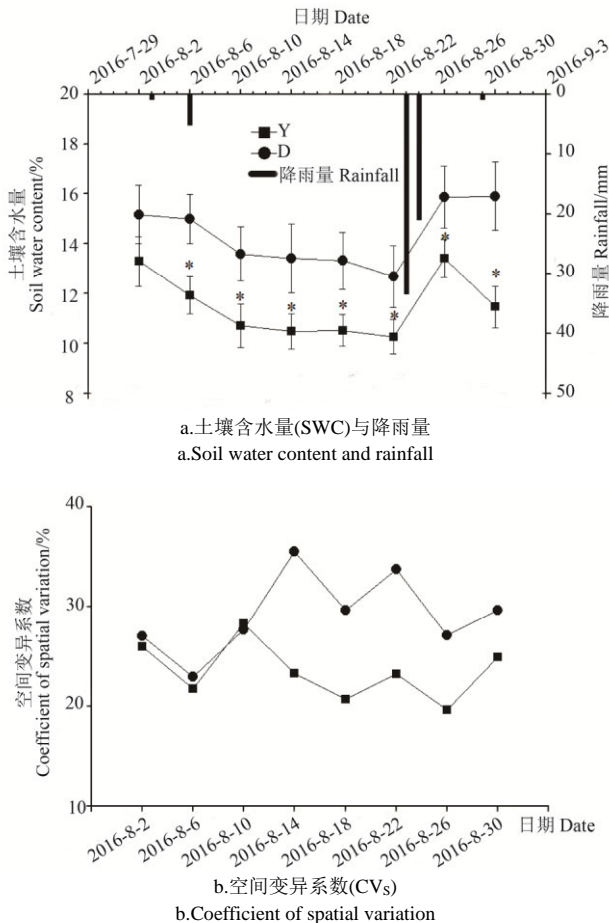
其中, *DRSM* 是杨家沟 (Y) 相对于董庄沟 (D) 的土壤水分流域变差系数, θ_Y 、 θ_D 分别是杨家沟与董庄沟某一土地类型的 SWC。

2 结果与分析

2.1 杨家沟土壤水分特征

杨家沟 2016 年 8 月各样次剖面 SWC 依次为 13.29%、

11.93%、10.71%、10.49%、10.52%、10.26%、13.41%与11.46% (图 2a)。随气候变化, 整个监测期可以分为 4 个阶段: 第一阶段 (8 月 2—10 日), 前期降雨影响下相对较高 SWC 的快速下降; 第二阶段 (8 月 10—22 日), 持续干旱影响下相对较低 SWC 的震荡稳定; 第三阶段 (8 月 22—26 日), 8 月 23、24 日累计超过 60 mm 降雨影响下土壤水分快速补充; 第四阶段 (8 月 26—30 日), 相对湿润状态下 SWC 快速下降。



注: SWC 是土壤含水量; CV_s 是土壤含水量空间变异系数; Y 是杨家沟; D 是董庄沟; *表示在 0.05 水平差异显著; 下同。

Note: SWC is soil water content; CV_s is coefficient of spatial variation of soil water content; Y is the catchment of Yangjiagou; D is the catchment of Dongzhuanggou; * indicates significance at 0.05 probability level; same as below.

图 2 土壤水分及其空间变异系数的时间变化

Fig.2 Mean value and coefficient of spatial variation(CV_s) of SWC in Y and D

杨家沟 SWC 空间变异性中等; 空间变异程度上游 > 下游, 东坡 < 西坡, 各坡位变异程度基本相当, 坡腰稍高于坡肩与坡脚; 剖面内, 变异系数在 25.15%~30.62% 之间上下浮动, 50~60 cm 土层最大。时间变异系数上游 < 下游, 东坡 < 西坡, 坡肩 < 坡脚 < 坡腰, 除东坡与坡肩属弱变异外均为中等变异, 坡腰与西坡 SWC 时间稳定性最差; 各土层时间变异系数随土深增加不断下降 (表 1)。

杨家沟剖面 SWC 除 8 月 22、26 日上游稍高于下游外, 其余下游 > 上游, 上、下游间差异不显著。变化过程中, 第一、四阶段 SWC 下游远高于上游; 第二阶段, 两者相对平衡; 第三阶段, 上游 > 下游。总体上, 入渗雨水在土壤中的再分配会扩大上游与下游 SWC 差距, 而干旱与降雨补充都会减小差距。除 8 月 26 日外剖面 SWC 东坡 > 西坡, 降雨补给后 (8 月 2、26 日) 两坡向 SWC 最接近, 持续干旱、蒸发影响下 (8 月 10、22 日) 差距最大。不同坡位 SWC 相比, 坡脚 > 坡腰 > 坡肩, 分别是流域均值的 1.25、0.91 与 0.84 倍, 除 8 月 30 日外其余各样次坡下显著高于其他坡位, 坡面土壤水分分布不均。剖面内, SWC 由土表向下至土深 100 cm 不断下降, 100~120 cm 土层转而上升 (表 1)。

2.2 董庄沟沟土壤水分特征

董庄沟各样次剖面 SWC 依次为 15.18%、14.99%、13.59%、13.42%、13.32%、12.67%、15.86% 与 15.90% (图 2a); 4 个阶段总体上经历了下降 (8 月 2-22 日) 与上升 (8 月 22-30 日) 2 个过程, 但 2 个过程中速度变化一致, 都是先疾 (降、升) 后缓 (降、升)。

SWC 上游 > 下游, 除降雨产流后的 8 月 26、30 日各样次上、下游间差异显著。不同坡向 SWC 相比, 东坡 > 西坡, 除 8 月 10、26 日外各样次两坡向差异显著 ($P < 0.05$)。各坡位 SWC 相比坡脚 > 坡腰 > 坡肩, 分别是流域均值的 1.18、1.01、0.81 倍, 但差异不显著 ($P < 0.05$)。SWC 沿剖面向下先短暂下降 (0~20 cm) 后不断上升 (20~120 cm) (表 2)。

SWC 空间变异系数除东坡 < 20% 外, 其余各坡面均在 20%~40% 间变化, 上游 < 下游, 东坡 < 西坡, 坡肩 < 坡脚 < 坡腰, 沿剖面向下先增大 (0~60 cm) 再减小 (60~120 cm)。下游、坡肩、40 cm 以下土层 SWC 时间变异系数大于 10%, 属中等变异, 而流域上游、东 (西) 坡、坡腰 (脚) 与 40 cm 以上土层均属弱变异, 土壤水分空间格局较稳定。

表 1 杨家沟土壤含水量的平均值与变异系数

统计特征 Statistical feature	上游 Upper reaches	下游 Lower reaches	东坡 Eastern slope	西坡 Western slope	坡肩 Shoulder-slope	坡腰 Waist-slope	坡脚 Toe-slope	土层 Soil layer/cm									
								0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~80	80~100	100~120	
均值	11.10	11.91	11.89	11.12	9.61	10.47	14.44	14.54	13.87	12.79	11.65	11.10	10.93	10.39	10.32	10.89	
空间变异系数	27.47	19.50	21.02	27.02	13.37	14.33	12.80	27.33	25.48	27.15	29.98	29.94	30.62	27.89	25.15	27.33	
时间变异系数	11.57	12.44	8.83	14.29	9.75	14.28	10.76	30.51	28.93	21.63	13.68	12.00	10.67	10.37	7.10	6.78	

2.3 土壤水分的对比分析

杨家沟剖面 SWC 小于董庄沟, 相当于后者的

72.04%~87.56%, 除 8 月 2 日外两流域均差异显著 ($P < 0.05$, 图 2a)。杨家沟 8 月 2 日 SWC 相当于董庄沟的

87.56%，与之最接近；8月3、6日依次0.8、5.1 mm的降雨未能改变两流域SWC下降的趋势，8月6日SWC分别下降1.36%与0.19%，前者减少量是后者的7.16倍，下降到后者的79.58%，两者差距进一步扩大；第二阶段杨家沟SWC在董庄沟的78.15~80.94%间浮动。第三阶段降雨使杨家沟、董庄沟SWC较前次分别增加了3.15%与3.18%，前者迅速提高到后者的84.58%；但在后续降雨再分配与29日0.8 mm降雨的影响下，前者8月30日SWC较前次下降了1.96%，而后者不降反有微量上升，这使前者进一步下降到后者的72.04%，差距达到最大。

除8月10日外，SWC空间变异系数杨家沟<董庄沟；两者变化趋势基本一致，但干旱影响下董庄沟空间变异性增大趋势明显（图2b）。

两流域SWC时间变异系数分别为10.99%与8.76%，杨家沟土壤水分空间分布格局的时间稳定性稍弱于董庄沟。

在地形等微域分异影响下，流域不同土地类型的SWC差异显著^[32]；在植被作用与微域因素的交互影响下人工林与自然恢复小流域的SWC差距在不同区段、坡向、坡位与土层上应该有不同表现。

表 2 董庄沟土壤含水量的平均值与变异系数

Table 2 Mean value and coefficient of variation(CV) of SWC in D

%

统计特征 Statistical feature	上游 Upper reaches	下游 Lower reaches	东坡 Eastern slope	西坡 Western slope	坡肩 Shoulder- slope	坡腰 Waist- slope	坡脚 Toe- Slope	土层 Soil layer/cm							
								0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~80	
均值	15.60	13.13	15.88	12.86	11.80	14.34	16.96	12.03	11.63	12.02	13.01	13.74	14.48	15.21	
空间变异系数	25.66	32.10	16.91	39.23	20.35	29.17	27.13	21.27	27.63	35.63	36.02	36.46	36.97	34.02	
时间变异系数	7.48	11.55	9.55	9.46	13.72	7.59	7.56	43.85	30.86	15.11	11.76	9.53	7.28	4.65	

2.3.1 各区段土壤水分对比

杨家沟与董庄沟不同区段SWC相比，上游差异显著，下游差异不显著（ $P>0.05$ ）。上游土壤水分流域变差系数在23.02%~44.75%间变化，8月26日最小，8月10日最大，均值33.98%；下游在-7.79%~26.60%之间，均值仅有9.80%，是上游的28.84%，8月2日杨家沟下游SWC高于董庄沟，8月30日两者下游SWC相差最多（表3）。由不同区段SWC流域变差系数的时间变化可知，杨家沟下游SWC部分时间会接近甚至超过董庄沟，相较上游，下游土壤水分亏缺不明显。SWC的空间变异性相比，上游与下游均是杨家沟<董庄沟，但下游差异明显；时间变异性均是上游较弱，但各区段前者高于后者。

董庄沟剖面SWC上游>下游，主要表现在20 cm以下土层，且上游坡面坡脚相比坡腰与坡肩SWC与下游坡面同坡位的差距更大。这是由于天然草被消耗土壤水分相对较少，使流域深层SWC处于较高水平，汛期暴雨影响下流域较快产流，沟道径流常在上游低洼处形成短期滞水，后期不断回馈坡面特别是坡脚深层土壤水分而保持上游土壤水分的较高水平，而下游相对开阔的沟道环境不仅增加了土壤水分的蒸散发消耗，也加快了沟道水的排泄，造成董庄沟SWC上游>下游。而杨家沟由于林木的高耗水作用使土壤水分经常处于亏缺状态，暴雨产流几率大大减少，下游的土壤浅层（0~40 cm）含水量稍高于上游，且浅层SWC的下游优势在降雨补给后的干旱初期尤其明显，可能在于下游相对上游良好的植被条件产生的更强的蒸发调节作用更多地减少了浅层土壤水分的蒸发消耗。

2.3.2 各坡向土壤水分对比

同一坡向SWC杨家沟<董庄沟，除8月10日外两流域东坡SWC差异显著，而西坡各样次差异均不显著（ $P<0.05$ ）。东坡土壤水分流域变差系数平均值28.62%，西坡仅有14.83%（表3），这种东、西坡向间土壤水分流域

变差系数的高低悬殊的主要原因：1）人工林对不同坡向土壤蒸发的调节能力不同，2）土壤水分差异诱发的阴阳坡生境梯度上人工林群落密度、组成及根系呈现坡向性分布差异。由于林木过度耗水杨家沟SWC低于董庄沟，但林木丰富的冠层、枯落物等明显削弱了土面蒸发，尤其是削弱了辐射时间相对更长的半阳坡（西坡）的土面蒸发，即植被对半阳坡的土壤蒸发调节量相对更大，这种差异性蒸发调节使原由植被耗水差异造成的流域间土壤水分差在东、西坡向间获得了不同程度的削弱，一定程度上导致两流域东坡土壤水分差异显著而西坡不显著（ $P<0.05$ ）。同时，阳坡植物较强的抗逆性引起植被密度、组成等一系列自适应调整，降低了土壤水分消耗，这种变化的诱因是土壤水分^[33]，也就是说与东坡相比，杨家沟西坡更加匮乏的土壤水分诱发的植被抗逆反应降低了流域西坡的土壤水分消耗，也在一定程度上削弱了与董庄沟西坡的SWC差。两流域SWC空间变异系数相比，东坡前者>后者，西坡相反，后者不同坡向SWC空间变异性差距较大；时间变异系数杨家沟西坡最高，杨家沟东坡与董庄沟东、西坡相近，均属于弱变异。

2.3.3 各坡位土壤水分对比

各坡位SWC杨家沟<董庄沟，坡脚、坡腰、坡肩SWC流域变差系数平均值分别为16.22%、35.23%与19.09%，坡腰明显大于坡肩与坡脚。由各坡位SWC流域变差系数的时间变化来看，8月2日坡脚、坡腰最小，8月26日坡肩最小，降雨入渗能在一定程度上减弱人工林坡面土壤水分亏缺（表3）。

对比两流域各坡位的空间变异系数，除8月10日坡腰、坡肩杨家沟>董庄沟外，前者其余各样次各坡位空间变异性均小于后者同一样次的对照坡位。前者空间变异性坡腰>坡肩>坡脚，后者却是坡腰>坡脚>坡肩，与胡伟等^[23]结论不同，原因是文献^[23]研究40 m×280 m退耕裸地40~200 cm土层的土壤水分分布，研究坡面

的特征、利用方式与剖面层次均不相同。作为林(草)坡面水分运动中转站的坡腰水分运动复杂、多变,是其SWC空间变异性各坡位最大的原因。由于坡面雨水的顺坡向下汇聚,坡肩土壤水分获得降雨入渗补给的时间与数量均小于坡腰与坡脚,尤其小于坡脚,因此坡肩SWC大多低于坡腰与坡脚,这种坡面SWC的不均衡分布格局在土壤水分亏缺的杨家沟尤其明显。坡肩SWC显著较低($P<0.05$),这造成杨家沟坡肩林木与草被呈斑块分布、个体差异巨大,植被的空间变异引起土壤蒸散发的空间变异,并最终引起SWC空间变异性增大。而坡脚汇聚坡面雨水由此获得更长时间与更多数量的降雨补给,相对

较高的SWC较大程度地保障了人工林的耗水需求,一般是坡面上人工林生长最旺盛、植被分布最均匀的坡位,因此其土壤水分空间分布变异性弱于坡腰与坡肩,变异系数最低。而董庄沟坡肩与其坡腰、坡脚相比较低的SWC并不会局限耗水需求相对较低的天然草被地生长,由此造成的SWC空间变异微乎其微;但坡脚土壤水分常与频发的沟道径流互馈。因此,董庄沟土壤水分空间变异系数坡脚>坡肩。

两流域不同的植被与土壤水文特征也决定了两者各坡位SWC的时间变化,杨家沟坡腰时间稳定性最差,董庄沟坡脚时间稳定性较差。

表3 杨家沟和董庄沟的土壤水分流域变差系数的时间变化
Table 3 Time variation of difference ratio of SWC (DRSM) between Y and D %

项目 Item		日期 Date								均值 Mean value
		2016-8-2	2016-8-6	2016-8-10	2016-8-14	2016-8-18	2016-8-22	2016-8-26	2016-8-30	
区段	上游	33.59	34.02	44.75	34.43	33.72	29.66	23.02	38.68	33.98
	下游	-7.79	10.45	2.48	13.38	12.21	11.36	9.74	26.60	9.80
坡向	东坡	23.52	25.14	21.22	32.75	28.37	28.03	25.95	43.98	28.62
	西坡	1.51	20.09	26.56	14.76	18.00	12.41	6.71	18.58	14.83
坡位	坡脚	1.77	14.79	14.64	20.44	16.30	15.72	16.34	29.72	16.22
	坡腰	21.89	31.51	40.63	38.35	37.36	35.28	21.95	33.28	32.53
	坡肩	20.44	24.17	18.00	14.79	17.58	11.80	10.65	35.27	19.09
土层	0~10	-14.86	-6.41	-7.96	-12.12	-15.48	-48.00	8.28	-10.67	-13.40
	10~20	-5.84	-2.20	-3.17	-8.50	-9.60	-43.61	0.80	-14.85	-10.87
	20~30	2.44	9.56	1.66	2.67	-1.40	-28.08	-4.34	-17.41	-4.36
	30~40	7.08	17.94	11.46	8.15	6.43	-6.48	4.41	-12.82	4.52
	40~50	12.06	19.28	14.87	13.05	9.96	5.49	12.46	-11.18	9.50
	50~60	14.22	22.47	12.04	18.84	11.93	12.07	16.60	4.49	14.08
	60~80	21.08	20.22	15.13	20.49	21.03	15.83	26.33	14.38	19.31
	80~100	22.80	24.85	22.88	16.55	22.48	16.63	30.33	20.96	22.19
100~120	19.27	21.75	19.57	19.16	22.26	15.25	26.82	22.29	20.80	

2.3.4 各土层土壤水分对比

杨家沟与董庄沟各土层SWC相比,表层(0~10 cm)前者显著高于后者,深层(60~120 cm)后者显著高于前者($P<0.05$),这是沿剖面向下前者SWC呈下降趋势、后者呈上升趋势的必然结果(图3),与植被措施影响下土壤浅层较深层湿润^[15]、人工林过度消耗深层土壤水分的研究结论一致。

根据土壤水分流域变差系数的土层变化(表3),除董庄沟超渗产流的8月26日,20cm以上土层DRSM均是负值,即20 cm土层内SWC杨家沟>董庄沟;且随干旱愈烈,DRSM呈负值的土层愈深,绝对值愈大,8月22日40 cm以上土层DRSM<0,0~10 cm与10~20 cm土层甚至达到-48.00%与-43.60%,杨家沟40 cm以上土层不存在土壤水分亏缺。

8月26日由于流域产流董庄沟土壤浅层大多处于滞水状态,造成0~20 cm土层DRSM>0,即浅层SWC董庄沟微高于杨家沟。8月30日在土深50cm范围内DRSM<0,即经过降雨入渗补充后0~50 cm土层的SWC杨家沟>董庄沟,说明50 cm土深内杨家沟的持水能

力强于董庄沟。监测期内50~120 cm土层内DRSM>0,深层SWC杨家沟始终小于董庄沟;80~100 cm土层DRSM平均值最高,是监测范围内杨家沟缺水最严重的土层。

SWC空间变异性相比,除表层(0~10 cm)外杨家沟<董庄沟,但两流域均是50~60 cm土层最强。同样降雨条件下(8月23、24日)董庄沟更快产流,8月26日两流域表层(0~10 cm)SWC空间变异性均最小,董庄沟(13.32%)<杨家沟(17.52%)。

杨家沟与董庄沟各土层SWC时间变异系数的垂向变化趋势一致,随土深增加SWC空间分布格局时间稳定性不断增强,这与贾晓旭等^[26, 34]土壤水分时空变异性随土层深度下降的结论一致。0~20 cm土层后者>前者,20~120 cm土层前者>后者,这是由于浅层土壤水分主要受气候、地形与植被影响,在相同的气候与地形条件下杨家沟的林木冠层与枯落物通过截留降雨、抑制蒸发有效减弱了浅层SWC的时间变异性;而刺槐人工林相较荒草地扎根深、耗水多,提高了剖面深层SWC空间分布的时间变异性。

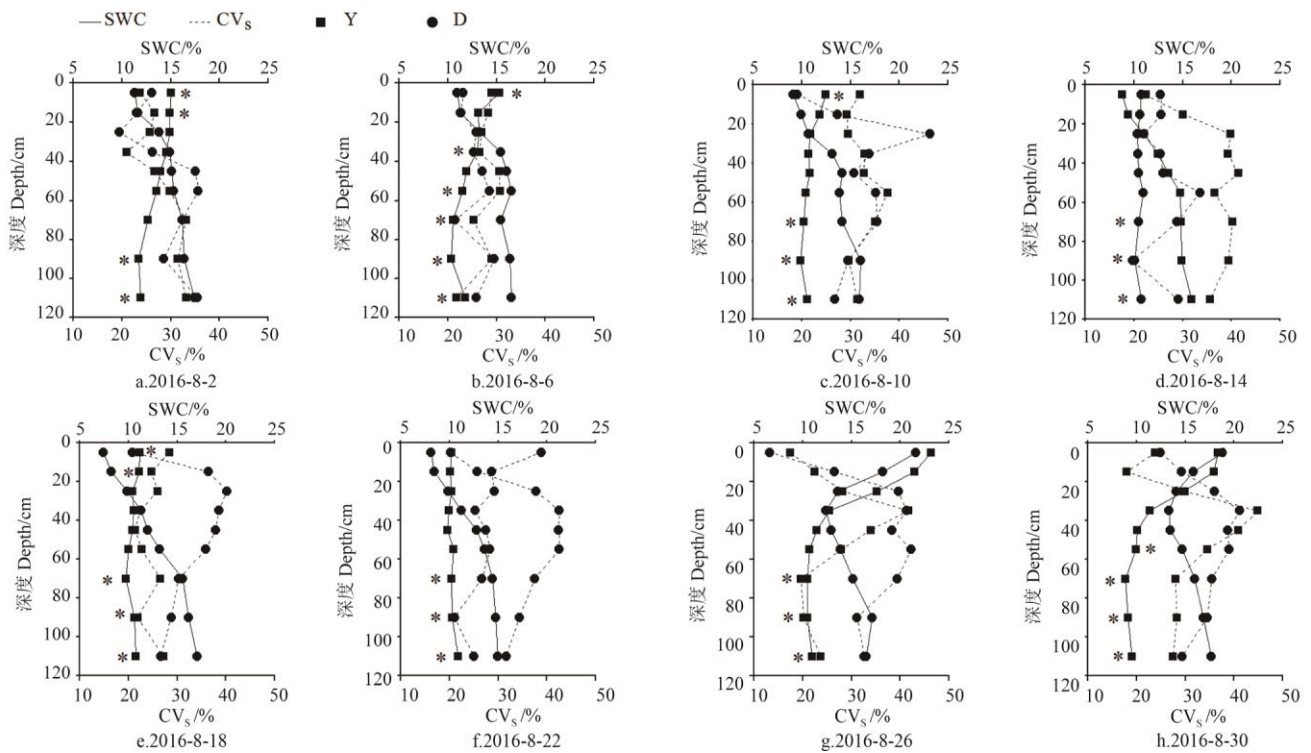


图 3 两个小流域不同土层的土壤含水量随时间变化

Fig.3 Variations of SWC of D and Y with time in different soil layers

3 讨论

3.1 人工林小流域土壤水分亏缺的空间异质性

黄土高原林草建设过度消耗土壤水分、造成土壤干化是普遍的共识，但如同小流域土壤水分的空间异质性，人工林小流域的土壤水分亏缺与干化是否存在空间异质性？杨家沟与董庄沟 SWC 对比研究中，下游、西坡、坡脚与坡肩、0~60 cm 土层的土壤水分流域变差系数相对较小，而上游、东坡、坡腰、60~120 cm 土层相对较大；以土壤水分可持续利用的董庄沟为参照^[28]，杨家沟下游、西坡、坡脚与坡肩、0~60 cm 土层 SWC 亏缺相对较小，而上游、东坡、坡腰与 60~120 cm 土层是造成流域土壤水分亏缺的主要区域或层次。这种流域土壤水分相对亏缺程度的空间异质性是人工林影响下小流域土壤水分空间再分配而形成的土壤水分新格局，可以作为生态建设中植被选择与空间配置的直接依据。可见，不同植被与地形因素组合产生不同的土壤水分条件，以解决水土矛盾为目标的黄土高原小流域生态治理必须适地（水）适树（草）、在遵循土壤水分分布的地带性特征的同时研究并遵循非地带性特征，尤其要研究并遵循林草种类与土地类型交互影响下所形成的流域土壤水分分布特征。

3.2 主要因素对小流域土壤水分时空变化的影响

在分析各空间因素对 SWC 时空变化的影响效用前，先对 8 次 SWC 监测数据的相关性进行球形检验，检验结果 $P < 0.05$ ，说明 8 次数据具有相关性，测量数据不满足球形分布假设，不能进行单因素方差分析，因此对 SWC 数据进行多变量方差分析。主体内效用分析结果表明杨

家沟 SWC 的各样次差异具有统计学差异，不同坡向、坡位 SWC 的时间变化趋势是一致的，但不同区段、土层 SWC 的时间变化趋势不同；主体间效用分析结果则表明坡位、土层是影响杨家沟 SWC 分布的重要空间因素，而坡向^[35]、区段对 SWC 分布的影响不显著 ($P < 0.05$)。董庄沟各样次 SWC 同样具有统计学差异，但不同坡向、区段、土层 SWC 的时间变化趋势不同、这 3 个空间层面的 SWC 分布格局随时间而变化，仅不同坡位 SWC 的时间变化趋势是相同的，因此，流域总体 SWC 空间分布的时间变化趋势性不强；区段、坡向、坡位、土层 4 个空间因素对流域 SWC 分布影响均显著 ($P < 0.05$)。

综上，人工林的水文调节功能弱化了地形、地貌等环境分异引起的 SWC 的空间变异性；而 8 月汛期林木旺盛的蒸腾耗水需求与频繁的降雨补给使杨家沟土壤处于暴干暴湿的循环交替中，提高了 SWC 的时间变异性。

4 结论

通过对人工刺槐小流域杨家沟与自然恢复小流域董庄沟 2016 年 8 月不同区段、坡向、坡位、土层土壤水分的变化及其对比分析，结论如下：1) 董庄沟 SWC 上游 > 下游，东坡 > 西坡，坡脚 > 坡腰 > 坡肩，沿剖面向下先短暂降低 (0~20 cm) 又持续增大 (20~120 cm)，不同区段、坡向间差异显著 ($P < 0.05$)；2) 在林木过度耗水及其冠层、枯落物蒸发调节的影响下，杨家沟与董庄沟相比 SWC 整体下降 ($P < 0.05$)、土壤水分格局发生变化，下游与东坡土壤较湿润，SWC 坡脚显著高于坡腰与坡肩 ($P < 0.05$)、剖面垂向分布先持续下降 (0~100 cm) 后转而上升 (100~120 cm)；3) 区段、坡向、坡位与土层对董

庄沟 SWC 空间变化的影响均显著, 仅坡位、土层对杨家沟 SWC 空间变化影响显著, SWC 空间变异性董庄沟 (29.19%) > 杨家沟 (23.51%); 杨家沟不同坡向、坡位的 SWC 时间变化趋势是一致的, 董庄沟仅不同坡位的 SWC 时间变化趋势呈一致性, SWC 时间变异性杨家沟 (10.99%) > 董庄沟 (8.76%); 4) 杨家沟下游、西坡、坡脚与坡肩、0~60 cm 土层 SWC 亏缺相对较小, 而上游、东坡、坡腰与 60~120 cm 土层是造成流域土壤水分亏缺的主要区域或层次, 人工林影响下 SWC 的相对丰缺格局可以作为小流域生态建设植被配置与布局的直接依据。

以土壤水分流域变差系数定量评价人工林相对自然恢复小流域的土壤水分亏缺程度, 对认识黄土高原小流域生态水文变化及指导生态治理的效果评价、规划布局均具有重要意义。然而, 本研究集中对比了杨家沟与董庄沟 8 月份上(下)游、东(西)坡谷坡坡面 120 cm 剖面内的 SWC, 研究的时间与空间范围有限, 导致研究结果的局限性。因此, 进一步提高土壤水分监测的时空范围, 系统对比不同生态治理小流域土壤水分的时空动态变化是今后的研究重点。

[参 考 文 献]

- [1] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture - climate interactions in a changing climate: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3-4):125 - 161.
- [2] Yu Xiaona, Huang Yongmei, Li Engui, et al. Effects of rainfall and vegetation to soil water input and output processes in the Mu Us Sandy Land, northwest China[J]. *Catena*, 2018, 161: 96-103.
- [3] 游松财, 邸苏闯. 黄土高原地区 1961—2000 年间土壤水分变化模拟与分析[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(7): 1206-1217.
You Songcai, Di Suchuan. Simulation and analysis on soil moisture changes from 1961 to 2000 in the Loess Plateau region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(7): 1206-1217. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特山区坡面土壤水分变异特征及其与环境因子的关系[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 87-93.
Zhang Jiguang, Chen Hongsong, Su yirong, et al. Variability of soil moisture and its relationship with environmental factors on Karst hillslope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(9): 87-93. (in Chinese with English abstract)
- [5] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 黄土高原水土保持建设的环境效应[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(1): 29-32.
Huang Yilong, Fu Bojie, Chen Liding. Effect of Soil and Water Conservation on Environment in Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(1): 29-32. (in Chinese with English abstract)
- [6] 索立柱, 黄明斌, 段良霞, 等. 黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素[J]. *生态学报*, 2017, 37(6): 2045-2053.
- [7] Liu Yu, Miao Haitao, Huang Ze, et al. Soil water depletion patterns of artificial forest species and ages on the Loess Plateau (China)[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 417:137-143.
- [8] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14-22.
Shao Ming'an, Jia Xiaoxu, Wang Yunqiang, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 14-22. (in Chinese with English abstract)
- [9] Wang Li, Wei Sanping, Shao Hongbo, et al. Simulated water balance of forest and farmland in the hill and gully region of the Loess Plateau in China[J]. *Plant Biosystems*, 2012, 146 (supp.1): 226-243.
- [10] Jian Shengqi, Zhao Chuanyan, Fang Shumin, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 206: 85-96.
- [11] Mei Xuemei, Zhu Qingke, Ma Lan, et al. The spatial variability of soil water storage and its controlling factors during dry and wet periods on loess hillslopes[J]. *Catena*, 2018, 162: 333-344.
- [12] Shen Mingshuang, Zhu Qingke, Wang Yu, et al. Dynamic changing trend of soil moisture in different micro-topography in loess region of northern Shaanxi Province of northwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 17(3): 11-16.
- [13] Jiao Qiao, Li Rui, Wang Fei, et al. Impacts of re-vegetation on surface soil moisture over the Chinese Loess Plateau based on remote sensing datasets[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2):156-171.
- [14] Zhao Chunlei, Shao Ming'an, Jia Xiaoxu, et al. Estimation of spatial variability of soil water storage along the south-north transect on China's Loess Plateau using the state-space approach[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(4): 1009-1020.
- [15] Zhang Xiao, Zhao Wenwu, Liu Yuanxin et al. Spatial variations and impact factors of soil water content in typical natural and artificial grasslands: A case study in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(1):157-171.
- [16] Wang Li, Wei Sanping, Horton R, et al. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2011, 87(1): 90-100.
- [17] 尹秋龙, 焦菊英, 寇萌. 极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(3): 459-469.

- Yin Qiulong, Jiao Juying, Kou Meng. Types after extremely heavy rainfall on the hilly-gullied Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(3): 459-469. (in Chinese with English abstract).
- [18] Wang Yunqiang, Shao Ming' an, Liu Zhipeng. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau[J]. Geoderma, 2013, 193: 300-310.
- [19] 俱战省, 郑粉莉, 刘文兆. 黄土高原南部小流域土壤水分时程变化的分层特征及其驱动机制[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5):28-33.
- Ju Zhansheng, Zheng Fenli, Liu Wenzhao. Layered characteristics and driving mechanisms of temporal soil moisture variation in a small watershed of the southern Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(5): 28-33. (in Chinese with English abstract)
- [20] Zhao Weijun, Zhang Yan, Zhu Qingke, et al. Effects of microtopography on spatial point pattern of forest stands on the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(3): 370-380.
- [21] Yang Lei, Wei Wei, Chen Liding, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 475(6): 111-122.
- [22] 潘成忠, 上官周平. 黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 5-9.
- Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Spatial variability of soil moisture on steep slope land in loess hill region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(6): 5-9. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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.
- Hu Wei, Shao Ming' an, Wang Quanjiu. Study on spatial variability of soil moisture on the recultivated slope-land on the Loess Plateau [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 74-81. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵传燕, 冯兆东, 南忠仁. 黄土高原西部土壤水分时空变化模拟研究——以安家坡流域为例[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 785-794.
- Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, Nan Zhongren. GIS-assisted modeling spatial and temporal variations of soil water content in Anjiapo Catchment of the Western Loess Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(5): 785-794. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王俊, 刘文兆, 胡梦珺. 黄土丘陵区小流域土壤水分时空变异[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1241-1247.
- Wang Jun, Liu Wenzhao, Hu Mengjun. Spatio temporal variation of soil moisture in a small watershed of loess hilly region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1241-1247. (in Chinese with English abstract)
- [26] 贾小旭, 邵明安, 张晨成, 等. 黄土高原南北样带不同土层土壤水分变异与模拟 [J]. 水科学进展, 2016, 27(4):520-528.
- Jia Xiaoxu, Shao Mingan, Zhang Chencheng, et al. Variation and simulation of soil water content within different soil depths along the south-north transect of the Loess Plateau [J]. Advances in Water science, 2016, 27(4): 520-528. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王亚飞, 樊军, 贾沐霖. 黄土高原水蚀风蚀交错区植被恢复中土壤水分变化[J]. 草地学报, 2016, 24(2): 344-350.
- Wang Yafei, Fan Jun, Jia Mulin. Variation of soil water content during vegetation restoration in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau[J]. ACTA Agrestia Sinica, 2016, 24(2): 344-350. (in Chinese with English abstract)
- [28] Liu Bingxia, Shao Ming' an. Response of soil water dynamics to precipitation years under different vegetation types on the northern Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(1): 47-59.
- [29] 韩晓阳, 刘文兆, 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2):430-438.
- Han Xiaoyang, Liu Wenzhao, Cheng Liping. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 430-438. (in Chinese with English abstract)
- [30] Zhang Yongwang, Deng Lei, Yan Weiming, et al. Interaction of soil water storage dynamics and long-term natural vegetation succession on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2016, 137: 52-60.
- [31] Tasumi M, Kimura R. Estimation of volumetric soil water content over the Liudaogou river basin of the Loess Plateau using the SWEST method with spatial and temporal variability[J]. Agricultural Water Management, 2013, 118 (2): 22-28.
- [32] 穆兴民. 黄土高原土壤水分与水土保持措施相互作用[J]. 农业工程学报, 2000, 16(2):41-45.
- Mu Xingmin. Interaction of soil and water conservation measures with soil water in the Loess Plateau in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(2): 41-45. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘旻霞. 高寒草甸坡向梯度上植物群落组成及其氮磷化学计量学特征的研究[D]. 兰州:兰州大学, 2013.
- Liu Minxia. Plant Community Composition and Nitrogen-phosphorus Stoichiometry along a Slope Aspect Gradients in a Alpine Meadow[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [34] Jia Xiaoxu, Shao Ming'an, Wei Xiaorong, et al. Hillslope scale temporal stability of soil water storage in diverse soil layers[J]. Journal of Hydrology, 2013, 498(18): 254-264.
- [35] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空变异与环境关系的数量分析 [J]. 生态学报, 2000, 20(5):741-747.
- Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, et al. Quantitative analysis of relationships between spatial and temporal variation of soil moisture content and environmental factors at a gully catchment of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 741-747. (in Chinese with English abstract)

Effect of man-made forest on soil moisture of different slopes in upper and lower reaches of small watershed of Loess Plateau

Huang Yanli^{1, 2}, Li Zhanbin^{1, 3, 4*}, Su Hui⁵, Bai Lanfeng⁴, Sun Baoyang¹, Liu Chenguang¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. College of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

3. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

5. School of Life Science and Technology, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Soil moisture is a key limiting factor of agricultural production and ecological restoration on the Loess Plateau. The comparative study on the soil moisture under the influence of different ecological managements at a small watershed scale as the basic unit of ecological restoration is of great significance to evaluate ecological effects and predict soil water accurately. Most importantly, it is essential for ecological planning and layout. In order to compare the soil water content (SWC) in the artificial forest watershed and natural restoration watershed and determine the relative deficit situation of the former, soil samples within the 120 cm profile in the 2 basins named Yangjiagou (Y) and Dongzhuanggou (D) were simultaneously taken to measure SWC of 9 layers every 4 days in August 2016. Both Y and D were inside the Nanxiaohegou watershed located in the Loess Gully Area of eastern Gansu Province and the former is of *Robinia pseudopodia* plantation, whereas the latter was of natural restoration. Of the 2 basins, the basic conditions such as zone, slope aspect and slope position of sampling slopes and sampling points were well contrasted. The SWC of different zones, slope aspects, slope positions and soil layers in each basin was analyzed by classical statistical methods. And a new indicator, difference ratio of soil moisture (DRSM) between the 2 different basins was used to quantitatively compare the SWC in Y and D. The results showed that: 1) In D, the SWC in the upper reaches was higher than that in the lower reaches, the SWC in the eastern slope was larger than that in the western slope, its ranking in the different slope positions from highest to lowest was toe-slope (16.96%) > waist-slope (14.34%) > shoulder-slope (11.80%), and there was significant difference between the different zones and slope aspects ($P < 0.05$). The SWC continued to increase in the 20-120 cm soil layer after a brief decrease in the 0-20 cm soil layer down the profile. 2) In Y, as the plantation consumed soil water and regulated evaporation, the SWC decreased significantly and its distribution pattern was changed compared with that in D. Specifically, the soils in the lower reaches and eastern slope were more humid than that in the upper reaches and western slope, the SWC of the toe-slope was significantly higher than that of the waist-slope and shoulder-slope ($P < 0.05$), and down the soil profile, it decreased continuously first in the 0-100 cm layer and then increased in the 100-120 cm layer. 3) The spatial variability followed the order of D (29.19%) > Y (23.51%), while the order of time variability was Y (10.99%) > D (8.76%). 4) The upper reaches, eastern slope, waist-slope and 60-120 cm soil layers were the main areas or layers with soil water deficit in Y, and the DRSM between Y and D was bigger. All the above results revealed spatial heterogeneity in soil desiccation caused by the Grain for Green at the small watershed scale and are expected to serve as the basis for the allocation and layout of vegetation in the ecological construction on the Loess Plateau.

Keywords: watershed; vegetation; soil water content; ecological management