

陕北黄土区浅沟土壤水分空间分布特征

艾宁^{1,2,3}, 宗巧鱼¹, 刘广全², 强大宏¹, 刘长海^{1,3}

(1.延安大学生命科学学院, 陕西 延安 716000; 2.中国水利水电科学研究院, 北京 100085; 3.陕西省红枣重点实验室(延安大学), 陕西 延安 716000)

摘要: 以陕北黄土区吴起县合沟流域浅沟土壤水分作为研究对象, 通过对研究区不同深度、不同坡向、不同坡位的浅沟土壤水分空间分布特征进行研究。结果表明: (1) 根据浅沟与原状坡油松生长量关系, 将浅沟划分为深浅沟($40\text{ cm} \leq \text{浅沟深度}$)和浅浅沟($20\text{ cm} \leq \text{浅沟深度} < 40\text{ cm}$); (2) 研究区浅沟土壤水分高于原状坡; 浅沟土壤水分在 0—60 cm 土层聚集, 原状坡则在 0—40 cm 土层聚集; (3) 浅沟不同土层土壤水分变异程度不同, 阳坡土壤水分变异性较阴坡小; 20—60 cm 土层中, 浅沟土壤水分变异系数较大, 土壤水分较活跃, 其他土层变异系数较小, 土壤水分较稳定; (4) 不同坡位、不同坡向和不同深度的浅沟土壤水分存在显著差异; 在浅浅沟中, 土壤水分表现为下坡位 > 上坡位 > 中坡位; 深浅沟则为上坡位 > 下坡位 > 中坡位; 在浅沟内, 阴坡在中、下坡位土壤水分显著高于阳坡, 阳坡上坡位土壤水分则高于阴坡; 原状坡阴坡土壤水分显著高于阳坡。

关键词: 陕北黄土区; 浅沟; 土壤水分; 坡向; 坡位

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0085-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.013

Spatial Distribution Characteristics of Soil Moisture in Ephemeral Gully in Loess Region of Northern Shaanxi

AI Ning^{1,2,3}, ZONG Qiaoyu¹, LIU Guangquan², QIANG Dahong¹, LIU Changhai^{1,3}

(1.College of Life Science, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000; 2.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100085; 3. Shaanxi Key Laboratory of Chinese Jujube (Yan'an University), Yan'an, Shaanxi 716000)

Abstract: The soil moisture of ephemeral gully in Hegou watershed at Wuqi county in Loess Area of Northern Shaanxi was taking as the research object. The spatial distribution characteristics of soil moisture in different ephemeral gullies with different depths, different slope aspects and different slope positions were studied. The results showed that: (1) According to the relationship between ephemeral gully and the growth of *Pinus tabulaeformis* Carr. on the original slope, the ephemeral gully was divided into deep ephemeral gully ($40\text{ cm} \leq \text{depth}$) and shallow ephemeral gully ($20\text{ cm} \leq \text{depth} < 40\text{ cm}$). (2) The soil moisture of the ephemeral gully was higher than that of the original slope; the soil moisture of the ephemeral gully was concentrated in the 0—60 cm soil layer, while that of the original slope was concentrated in the 0—40 cm soil layer. (3) The soil moisture variation degree was different in the different soil layers in ephemeral gully. The soil moisture variability of sunny slope was smaller than that of shady slope. In 20—60 cm soil layer, the soil moisture variability coefficient was larger, soil moisture was more active, and the soil moistures in other soil layers were less variable and more stable. (4) There were significant differences in soil moisture among ephemeral gullies with different slope positions, different slope aspects and different depths. In shallow ephemeral gully, soil moisture followed the order of lower slope > upper slope > middle slope, while in deep ephemeral gully, the order was upper slope > lower slope > mid slope. In ephemeral gully, soil moistures in the middle and lower position of the shady slope were significantly higher than that of sunny slope, and the soil moisture on the upper position of sunny slope was higher than that of shady slope. The soil moisture of the original shady slope was significantly higher than that of sunny slope.

Keywords: loess area of northern Shaanxi; ephemeral gully; soil moisture; slope aspect; slope position

收稿日期: 2019-04-02

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501602, 2016YFC0501705); 陕西省教育厅省级重点实验室科研计划项目(17JS137); 延安大学博士科研启动项目(YDBK2016-12)

第一作者: 艾宁(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事水土保持与林业生态工程。E-mail: aining_office@126.com

通信作者: 刘广全(1964—), 男, 研究员, 主要从事流域水土资源和生态系统管理技术研究。E-mail: ggliu@iwhr.com

土壤水分是陕北黄土区植被生长与恢复的主要限制性因子之一^[1-3],其空间分布特征对该区域进行退耕还林(草)等林业生态工程建设中的植被配置和林分结构优化具有极其重要的意义^[4-6]。影响土壤水分的因素较多,其中降水是陕北黄土区土壤水分的主要来源^[7-8],地形又会对降水进行二次分配^[9-10],特别是黄土坡面广泛分布的微地形对降雨进行再分配,从而对坡面土壤水分产生显著影响^[11-13],导致土壤水分和植被生长与分布存在差异。目前,关于微地形与土壤水分空间分布关系的研究较多,有研究^[13-15]表明,黄土坡面微地形中,土壤水分大小基本表现为切沟土壤含水量最高,浅沟居中,均高于原状坡面。其中,浅沟是黄土坡面广泛存在的微地形之一,其分布面积可达沟间地的 35%^[16],是由径流冲刷和人类活动共同塑造而形成的介于细沟与切沟之间的特殊地貌类型^[17-18]。国内外学者^[18-22]关于浅沟的研究主要集中在浅沟侵蚀、浅沟形态特征以及浅沟表层土壤容重空间分布特征等方面,仅对浅沟土壤水分空间分布特征,特别是不同浅沟深度下的土壤水分空间分布特征的研究鲜有报道,然而浅沟土壤含水量对浅沟侵蚀、浅沟形态特征等方面具有显著影响。因此,本文以陕北黄土区浅沟土壤水分空间分布特征为研究对象,通过分析不同深度、不同坡向、不同坡位的浅沟土壤水分空间分布特征,旨在为陕北黄土区浅沟侵蚀、浅沟形态特征以及植被恢复重建过程中植被配置提供科学依据与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西吴起县吴起镇合沟流域(东经 108°14',北纬 36°56'),属于黄土高原丘陵沟壑区,流域面积 4.35 km²,海拔高度 1 233~1 809 m;多年平均气温 7.8 °C,无霜期 120~155 d,年均降水量 478.3 mm,气候干旱。降雨主要集中在 7—9 月,降水年际月际变化大、分配不均匀,为暖温带大陆性干旱季风气候,平均年地面蒸发量为 400~450 mm,属于典型干旱半干旱地区。合沟流域土壤类型为黄绵土,质地为轻壤。经过近年的植被建设与恢复,形成了以星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)、赖草(*Leymus secalinus*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、芨蒿(*Artemisia leucophylla*)、大针茅(*Stipa grandis*)、篷子菜(*Galium verum*)等草本植物群落为优势种,搭配有油松(*Pinus tabulaiformis*)为主的乔草混交林,零星分布着一些小灌木和落叶乔木幼苗。

1.2 研究方法

1.2.1 采样点布设 课题组于 2016 年 12 月对合沟流域所有新造油松林进行成活率和顶端生长量的调查与统计,又于 2017 年 11 月和 2018 年 11 月随机选

取不同深度的浅沟与相邻原状坡分布的油松顶端生长量进行抽样调查与统计,进行重复试验与数据校验,共采集 3 组(浅浅沟、原状坡、深浅沟)696 个油松顶端生长量样本进行数据分析。

1.2.2 浅沟深度测量 以浅沟相邻的原状坡分水线为起点和终点,拉线,相交于浅沟沟底向上拉线处,交点距离浅沟沟底的距离即为浅沟深度,见图 1。

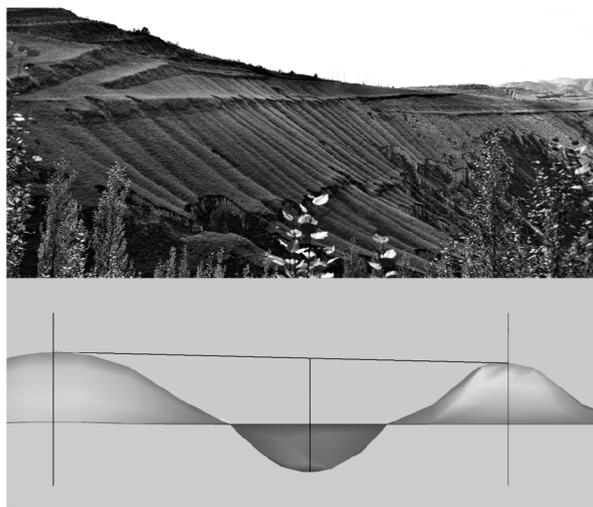


图 1 浅沟分布及其浅沟深度测量示意

1.2.3 油松生长量测量 对研究区浅沟造林的油松顶端生长长度采用钢尺进行测量,记录其生长长度和对应的浅沟深度。

1.2.4 浅沟土壤水分取样及测定 课题组分别于 2017 年、2018 年雨季(7—9 月),每月中旬对研究区不同坡向(阴坡、阳坡)、不同坡位(上、中、下)和不同深度的浅沟(深浅沟 ≥ 40 cm、浅浅沟 < 40 cm),采用土钻—烘干法测定其土壤水分,有降雨产生,土壤水分测定推后 7 天。根据不同浅沟深度,每种浅沟深度在同一坡向分别选取 3 条浅沟进行取样。土钻深度为 1 m,取样分 5 层,即 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm,每层 3 个重复,进行取样分析。

1.3 数据处理方法

采用单因素方差分析法进行数据处理与分析;本文根据黄土区土壤水分变异性划分标准^[8,15],通过标准差(s)和变异系数(c_v)这 2 个指标划分为 4 层,即速变层($c_v > 0.3$ 和标准差 $s > 4$)、活跃层($c_v = 0.2 \sim 0.3$ 和标准差 $s = 3 \sim 4$)、次活跃层($c_v = 0.1 \sim 0.2$ 和标准差 $s = 2 \sim 3$)和相对稳定层($c_v < 0.1$ 和标准差 $s < 2$),当标准差和变异系数不能同时满足分类标准时,以变异系数的大小为主进行分类,标准差以及变异系数的计算公式为:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

$$c_v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (2)$$

式中: \bar{x} 为观测数据平均土壤含水量(%); x_i 为第*i*个观测数据值; s 为数据标准差; c_v 表示变异系数。

本文所有的统计分析和作图均在 SPSS 18.0、Sufer 11.0、Origin 15 和 Excel 等软件中完成。

2 结果与分析

2.1 浅沟“深—浅”划分

通过对浅沟及其相邻原状坡的油松生长量及对应浅沟深度进行全面的统计与测量,做散点图(图2)。由图2可知,当浅沟深度 ≥ 40 cm时,原状坡油松生长量大于浅沟油松生长量;当 $20 \text{ cm} \leq \text{浅沟深度} < 40 \text{ cm}$ 时,原状坡油松生长量小于浅沟油松生长量。因此,根据不同深度浅沟油松生长量与原状坡油松生长量变化关系,将研究区浅沟分为深浅沟(浅沟深度 ≥ 40 cm)和浅浅沟($20 \text{ cm} \leq \text{浅沟深度} < 40 \text{ cm}$)。

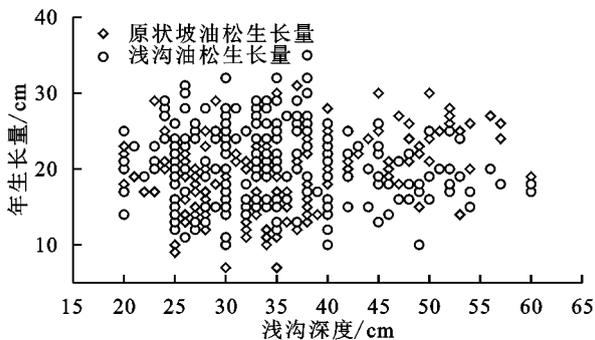


图2 油松生长量的变化特征

2.2 浅沟土壤水分空间分布特征及变异性分析

2.2.1 浅沟土壤水分空间分布特征分析 由图3可知,研究区浅沟土壤含水量较大,无论在阴坡或者阳坡,原状坡不同土层土壤水分分布均小于浅沟;阴坡土壤水分等值线图拐点较多,说明研究区阴坡的不同土层在不同坡位上土壤水分差异较大;浅沟土壤水分基本在0—60 cm土层聚集,原状坡土壤水分则在0—40 cm土层聚集;在0—80 cm土层中,随着土层深度的增加,土壤水分呈降低趋势,但在80—100 cm土层,不同坡位、不同坡向的土壤水分均表现出不同程度的回升。在阳坡浅浅沟中,土壤水分等值线图拐点较多且密集,说明不同土层中坡位土壤水分与上坡位、下坡位差异较大;0—20 cm土层中,土壤水分表现为上坡位 $>$ 中坡位 $>$ 下坡位,且其他土层则均为下坡位 $>$ 上坡位 $>$ 中坡位。在阳坡原状坡中,0—60 cm土层中均表现为上坡位 $>$ 中坡位 $>$ 下坡位;60—100 cm土层中,则表现为下坡位 $>$ 中坡位 $>$ 下坡位。在阳坡深浅沟中,0—100 cm土层中均表现为上坡位 $>$ 中坡位 $>$ 下坡位。在阴坡浅浅沟中,土壤水分等值线变化较大,不同土层的不同坡位土壤水分差异较大;0—20 cm与40—60 cm土层中,表现为下坡位 $>$ 中坡位 $>$ 上坡位;20—40 cm土层中,表现为下坡位 $>$ 上坡

位 $>$ 中坡位;60—100 cm土层中表现为上坡位 $>$ 下坡位 $>$ 中坡位。在阴坡原状坡,0—20 cm土层中表现为上坡位 $>$ 下坡位 $>$ 中坡位;20—40 cm土层中表现为下坡位 $>$ 上坡位 $>$ 中坡位;在40—100 cm土层中表现为中坡位 $>$ 下坡位 $>$ 上坡位。在阴坡深浅沟,0—60 cm土层中表现为上坡位 $>$ 下坡位 $>$ 中坡位;在60—100 cm土层中表现为下坡位 $>$ 中坡位 $>$ 下坡位。

2.2.2 浅沟土壤水分变异特征分析 浅沟不同土层土壤水分变异程度各不相同(图4)。0—20 cm土层中,浅沟土壤水分整体变异系数相对较小,较稳定,仅有阳坡浅浅沟与原状坡,阴坡原状坡为次活跃层,其他均为相对稳定层;20—40 cm土层中,浅沟土壤水分变异系数较大,其中阳坡与阴坡的浅浅沟均为速变层,阳坡与阴坡的深浅沟均为活跃层,阳坡与阴坡的原状坡则分别为相对稳定层与次活跃层;40—60 cm土层中,浅沟土壤水分变异系数较大,阴坡浅浅沟土壤水分为速变层,阳坡深浅沟为活跃层,阳坡浅浅沟与阴坡深浅沟为次活跃层,阳坡原状坡与阴坡原状坡为相对稳定层;60—80 cm土层中,浅沟土壤水分变异适中,没有速变层,其中阳坡与阴坡的深浅沟均表现为活跃层,阳坡浅浅沟与阴坡原状坡为次活跃层,阳坡原状坡与阴坡浅浅沟表现为相对稳定层;80—100 cm土层中,浅沟土壤水分变异系数相对较小,活跃性不高,其中阳坡浅浅沟与阴坡深浅沟为相对稳定层,其他浅沟分布为次活跃层。同时,由图4可知,在0—100 cm土层中,研究区不同浅沟分布中,阳坡土壤水分变异性较阴坡小。

2.3 浅沟土壤水分方差分析

2.3.1 坡位对浅沟土壤水分的影响方差分析 坡位对浅沟土壤水分分布有显著影响,不同坡位浅沟土壤水分存在显著差异(图5)。在浅浅沟中,下坡位的土壤水分最大,且与上坡位、中坡位存在显著差异,中坡位浅沟土壤水分最小。在原状坡中,阳坡原状坡不同坡位土壤水分存在差异性,但差异不显著;阴坡原状坡的下坡位土壤水分最大,且与上坡位与中坡位存在显著差异。在深浅沟中,上坡位土壤水分最大,中坡位最小,且与其他坡位存在显著差异。

2.3.2 坡向对浅沟土壤水分的影响方差分析 坡向对浅沟土壤水分分布有显著影响,不同坡向浅沟土壤水分存在差异(图4)。由图4可知,无论上、中、下坡位中,阴坡原状坡土壤水分显著高于阳坡,但不同深度的浅沟土壤水分差异较大。在浅浅沟中,阴坡中、下坡位土壤水分显著高于阳坡,阳坡上坡位土壤水分则高于阴坡;在深浅沟中,阴坡中、下坡位土壤水分显著高于阳坡,阳坡上坡位土壤水分则高于阴坡。

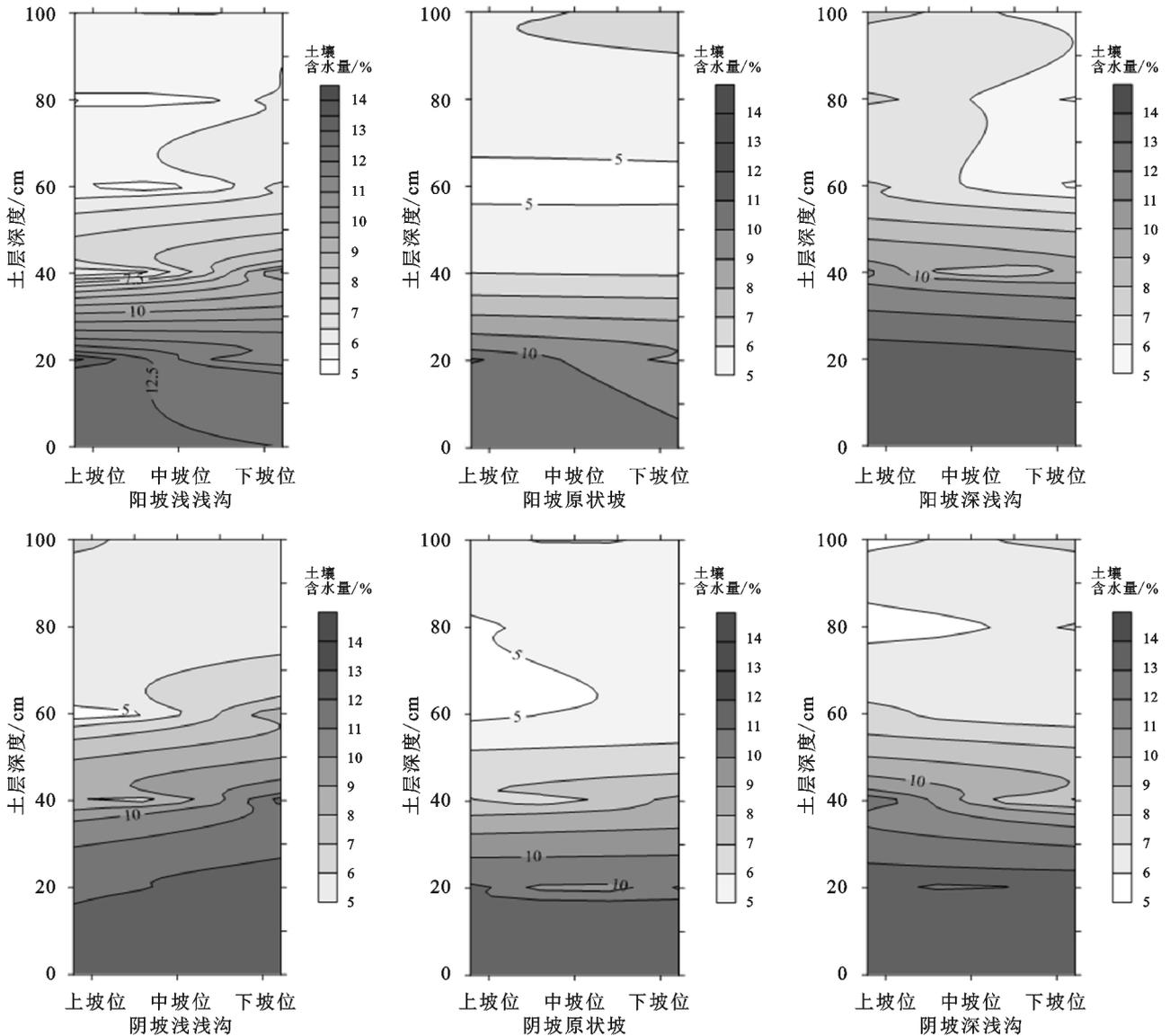


图 3 浅沟土壤水分等值线

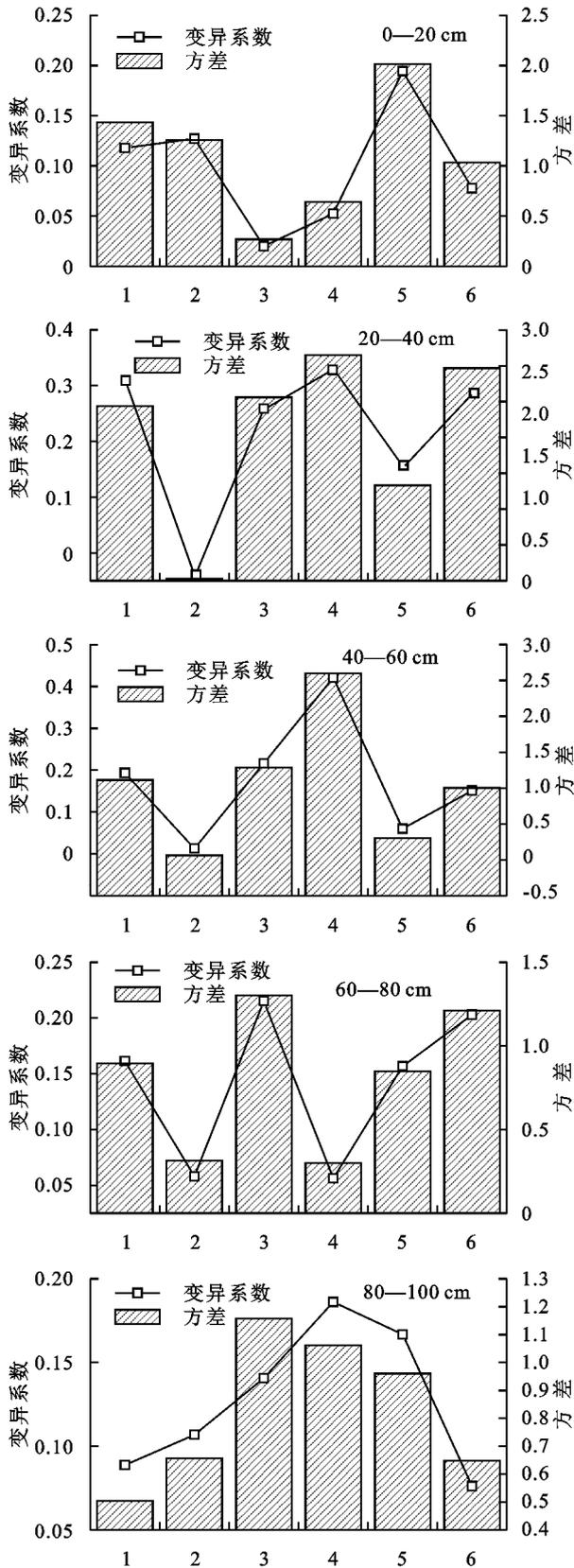
3 讨论

浅沟是黄土坡面广泛存在的微地形之一,是由径流冲刷和人类活动共同塑造而形成的介于细沟与切沟之间的特殊地貌类型^[17-18],有研究^[16]表明,浅沟在黄土区的分布面积可达沟间地的 35%左右。朱显谟^[17]在黄土区土壤侵蚀的分类系统中,认为浅沟的深度不大于 1 m,而细沟的深度不超过 0.2 m。本文通过对研究区浅沟深度与浅沟内分布的油松年生长量进行调查测量,发现该区域浅沟深度基本分布在 0.2~0.6 m,且在调查过程中,得出不同浅沟深度中油松的年生长量存在一定的差异性,然而以往的研究主要针对浅沟侵蚀发育,并没有对浅沟深度与浅沟内植物生长关系进行相关研究,也没有依据浅沟深度对浅沟进行进一步的细分。本文通过对浅沟深度与油松生长量关系的进一步分析,发现浅沟深度在 40 cm 处是浅沟内油松生长量的转折点,即当浅沟深度 ≥ 40 cm 时,原状坡油松年生长量大于浅沟油松年生长量;当 $20 \text{ cm} \leq$ 浅

沟深度 < 40 cm 时,原状坡油松年生长量小于浅沟油松年生长量。因此,本研究以浅沟深度为 40 cm 为分界点,将浅沟分为深深沟与浅浅沟。

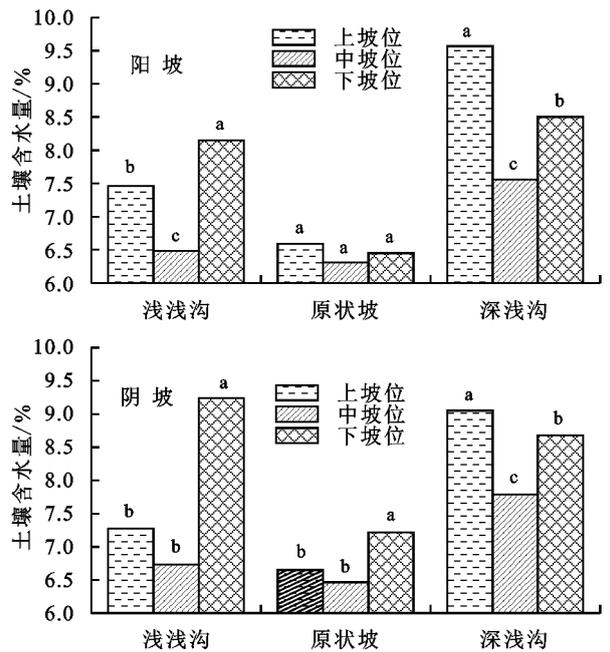
在黄土坡面,由于人为和自然因素的影响,不同地形地貌土壤水分分布均存在一定的差异性。有研究^[13-15]表明,在黄土区广泛存在的微地形中,浅沟土壤水分高于原状坡,与本研究结论相同。本文通过对浅沟土壤水分进一步的研究发现,浅沟土壤水分基本在 0—60 cm 土层聚集,原状坡土壤水分则在 0—40 cm 土层聚集;浅沟土壤水分整体变异系数相对较小,且浅沟阳坡土壤水分变异性较阴坡小;这与路保昌等^[14]通过对干旱阳坡半阳坡微地形土壤水分分布研究得出的结论相似。同时,本研究发现,在浅浅沟中下坡位土壤水分最大,深深沟中上坡位土壤水分最大;阴坡中、下坡位土壤水分显著高于阳坡,阳坡上坡位土壤水分则高于阴坡,这与大部分学者^[23-24]通过对原状坡土壤水分研究得出的阴坡土壤水分高于阳坡,

下坡位土壤水分高于上、中坡位的结论有所差异,说明了不同浅沟深度确实对土壤水分分布有一定的影响,今后对不同深度的浅沟进行研究具有一定必要性和研究价值。



注:图中1~6分别表示阳坡的浅浅沟、原状坡、深浅沟和阴坡的浅浅沟、原状坡、深浅沟。

图4 浅沟不同土层土壤水分变异系数



注:图中不同小写字母表示浅沟不同坡位土壤水分在 $P < 0.05$ 下差异显著。

图5 浅沟土壤含水量方差分析

4 结论

(1)根据 不同深度浅沟油松生长量与原状坡油松生长量关系,将研究区浅沟分为深浅沟(浅沟深度 ≥ 40 cm)和浅浅沟(浅沟深度 < 40 cm),且深浅沟油松生长量小于原状坡,浅浅沟油松生长量则高于原状坡。

(2)研究区浅沟不同土层土壤水分均高于原状坡;浅沟土壤水分基本在 0—60 cm 土层聚集,原状坡土壤水分则在 0—40 cm 土层聚集;在 0—80 cm 土层中,随着土层深度的增加,研究区土壤水分呈降低趋势,但在 80—100 cm 土层,不同坡位、不同坡向的土壤水分均表现出不同程度的回升。

(3)浅沟不同土层土壤水分变异程度各不相同,阳坡土壤水分变异性较阴坡小。其中,0—20 cm 与 80—100 cm 土层,浅沟土壤水分整体变异系数相对较小,较稳定;20—60 cm 土层中,浅沟土壤水分变异系数较大,土壤水分较活跃;60—80 cm 土层中,浅沟土壤水分变异适中。

(4)坡向、坡位对土壤水分空间分布有显著影响,不同坡位、坡向浅沟土壤水分存在显著差异。浅浅沟中,下坡位 $>$ 上坡位 $>$ 中坡位;深浅沟中,上坡位 $>$ 下坡位 $>$ 中坡位;原状坡阳坡不同坡位土壤水分不存在显著差异,阴坡则存在显著差异。在浅沟中,均表现为阴坡中、下坡位土壤水分显著高于阳坡,阳坡上坡位土壤水分则高于阴坡;原状坡土壤水分阴坡显著高于阳坡。

参考文献:

- [1] Fu B J, Wang J, Chen L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2003, 54: 197-213.
- [2] 张雷明,上官周平.黄土高原土壤水分与植被生产力的关系[J].干旱区研究, 2002, 19(4): 59-63.
- [3] Fang X M, Zhao W W, Wang L X, et al. Variations of deep soil moisture under different vegetation types and influencing factors in a watershed of the Loess Plateau, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(8): 3309-3323.
- [4] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J].生态学报, 2002, 23(8): 1640-1647.
- [5] 王志强,刘宝元,张岩.不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响[J].地理学报, 2008, 63(7): 703-713.
- [6] Ren Z P, Li Z B, Liu X L, et al. Comparing watershed afforestation and natural revegetation impacts on soil moisture in the semiarid Loess Plateau of China [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): e2972.
- [7] 李洪建,王孟本.晋西北人工林土壤水分特点与降水关系研究[J].水土保持学报, 1998, 4(4): 60-65.
- [8] 李裕元,邵明安.降雨条件下坡地水分转化特征实验研究[J].水利学报, 2004, 35(4): 48-53.
- [9] 黄金柏,卢龙彬,付强,等.黄土高原北部水蚀风蚀交错带沟壑地形的降雨反应特性[J].水土保持学报, 2013, 27(4): 142-147.
- [10] 张杰,李栋梁,王文.夏季风期间青藏高原地形对降水的影响[J].地理科学, 2008, 28(2): 235-240.
- [11] Bo Y J, Zhu Q K, Zhao W J. Characteristics of soil moisture in relation to microtopography in the Loess region of Northern Shaanxi, China [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2014, 35(4): 741-749.
- [12] 赵维军,马欢,朱清科,等.陕北黄土区微地形土壤水分对降水特征的响应[J].农业机械学报, 2014, 45(5): 118-124.
- [13] 申明爽,朱清科,王瑜,等.陕北黄土区不同微地形土壤水分变化趋势分析[J].北京林业大学学报, 2018, 40(3): 84-92.
- [14] 路保昌,薛智德,朱清科,等.干旱阳坡半阳坡微地形土壤水分分布研究[J].水土保持通报, 2009, 29(1): 62-65.
- [15] 邝高明,朱清科,刘中奇,等.黄土丘陵沟壑区微地形对土壤水分及生物量的影响[J].水土保持研究, 2012, 19(3): 74-77.
- [16] 中国科学院西北水土保持研究所.黄土高原杏子河流域自然资源与水土保持[M].西安:陕西科学技术出版社, 1986: 41-49.
- [17] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类系统[J].土壤学报, 1956, 4(2): 99-115.
- [18] 张科利,唐克丽,王斌科.黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J].水土保持学报, 1991, 5(2): 8-13.
- [19] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.冲刷条件下黄土丘陵区浅沟侵蚀形态及产流产沙特征[J].农业工程学报, 2016, 32(20): 161-170.
- [20] 徐锡蒙,郑粉莉,武敏.雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究[J].农业工程学报, 2017, 33(11): 124-132.
- [21] 胡刚,伍永秋,刘宝元,等.东北漫岗黑土区浅沟侵蚀发育特征[J].地理科学, 2009, 29(4): 545-549.
- [22] 耿韧,张光辉,李振炜,等.黄土丘陵区浅沟表层土壤容重的空间变异特征[J].水土保持学报, 2014, 28(4): 257-262.
- [23] 黄艳丽,李占斌,苏辉,等.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.
- [24] 孔凌霄,毕华兴,周巧稚,等.晋西黄土区不同立地刺槐林土壤水分动态特征[J].水土保持学报, 2018, 32(5): 166-172.