

黄土高原沟壑区不同植被对土壤水分分布特征影响

吕渡¹, 杨亚辉^{2,3}, 赵文慧¹, 木热提江·阿不拉¹, 蔺鹏飞^{2,3}, 张晓萍¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.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; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为探讨黄土高原不同植被类型下土壤水分分布特征,揭示其生态水文效应,以长武县王东沟小流域定位监测小区为研究对象,于 2013 年 5 月—2014 年 4 月使用中子仪法对坡面 4 种植被覆盖类型(草地、沙棘、油松、沙棘油松混交林)下 0—500 cm 深剖面上土壤水分进行了完整水文年的实际观测。结果表明:(1) 草地平均土壤含水量显著高于沙棘、油松、沙棘油松混交林地($p < 0.05$)。草地小区平均土壤水分含量随深度呈增加趋势,而沙棘、油松和沙棘油松混交林地表现为增加—减少—增加的倒“S”型;(2) 500 cm 剖面上,草地和油松林地土壤水分变异系数小于沙棘和油松沙棘混交林地。4 种植被覆盖类型下土壤水分都表现出春、冬积累和恢复,夏、秋消耗的季节性规律;(3) 降雨量对 0—200 cm 的土壤水分贮量具有明显影响,200—500 cm 土壤贮水量较为稳定,植被类型的不同增加了土壤储水量的差异。可见,草地土壤水分含量相对较高,变异性小;其他乔灌木植被类型土壤含水量相对较低,变异性大。降雨量的输入和温度的变更使土壤含水量的变化无论在剖面上还是随着时间进展具有一致性,而植被类型的影响则是在这种一致性基础上增大土壤含水量对降雨和温度的响应。

关键词:林学; 土壤水分; 降雨; 植被类型

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0060-05

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20180111.001

Impacts of Vegetation Types on Soil Water Distributions in Loess Hilly Region

LÜ Du¹, YANG Yahui^{2,3}, ZHAO Wenhui¹, Muretijiang · Abula¹, LIN Pengfei^{2,3}, ZHANG Xiaoping¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to understand the effects of vegetation on soil water content and investigate the eco-hydrological processes, four vegetation types (grassland, *Hippophae rhamnoides* L., *Pinus tabulaeformis* Carr., mixed forest of *Hippophae rhamnoides* L. and *Pinus tabulaeformis* Carr.) in four runoff plots were investigated in Wangdong Watershed, Changwu County, Shaanxi Province. Neutron moisture meter was used to estimate the soil water content along 0—500 cm soil profile in a hydrological year from May 2013 to April 2014. The results showed that: (1) the average soil water content under the natural grass was significantly higher than that in the other three vegetation types, while it did not show significant difference among the vegetation types with *Hippophae rhamnoides* L., *Pinus tabulaeformis* Carr. and mixed forest of *Hippophae rhamnoides* L. and *Pinus tabulaeformis* Carr.; the average soil water content under the natural grass showed the increasing trend in the soil profile, while under the other three vegetation types it showed out the reversed S-shape; (2) in general, the soil water contents in the 0—500 cm soil profile under the natural grass and *Pinus tabulaeformis* Carr. were more stable with smaller variation coefficients than that under the *Hippophae rhamnoides* L. and the mixed forest; for all the four vegetation types, the average soil water contents in spring and winter were significantly different with those in summer and autumn; soil water showed the accumulative effect in spring and winter and the depleting effect in summer and autumn; (3) rainfall had a significantly effect on soil water content in 0—200 cm soil profile, however, this effect tended to disappear in the 200—500 cm soil depth; it is various that vegetation types enhanced the discrepancy of soil water storage. The conclusions are as follows. Soil water content under the natural grassland was higher and less variable,

收稿日期:2017-06-06

修回日期:2017-09-10

资助项目:国家自然科学基金(41230852, 41440012, 41101265)

第一作者:吕渡(1992—),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为植被恢复水分效应分析。E-mail:lvdu1992@sina.com

通信作者:张晓萍(1971—),女,河南焦作人,博士,研究员,主要从事区域水土流失规律和水土保持等研究。E-mail:zhangxp@ms.iswc.ac.cn

while under shrub and arbor trees it was lower and more variable. The change of soil water content showed the coincident trend under precipitation input and temperature alteration along the soil profile and over the time, the effect of vegetation types signified the obvious response of soil water content to precipitation and temperature on the basis of consistency.

Keywords: forestry; soil water content; precipitation; vegetation types

土壤水分是黄土高原植物生长发育和生态环境重建的主要限制因子^[1],在土壤—植被—大气传输体的水—热—溶质耦合及运移中具有十分重要的位置,与土壤侵蚀水蚀营力的变化有密切关系^[2-3]。坡面是黄土高原丘陵沟壑地貌的基本地形单元,植被是控制坡面侵蚀过程的关键因素,而土壤水分则成为植被进行调节和遏制坡面侵蚀发育的重要因子^[4]。影响土壤水分分布的主要因子有地形^[5]、降雨^[6]、植被^[7]等。在半干旱黄土高原区,沟壑纵横,土层深厚(平均厚度超过50 m),地下水埋藏深,人工植被广泛分布等因素,使得黄土高原土壤水分的空间分布和影响因素存在自身特点^[8]。很多学者分别从多种尺度对黄土高原水分空间分布规律进行了深入研究。其中在区域尺度,余新晓等^[9]将林地土壤水分垂直变化分为3个层次:土壤水分弱利用层、土壤水分利用层、土壤水分调节层;胡良军等^[10]探讨了黄土高原土壤水分在局部的微域分布规律及其与林草布局的关系;张建兵等^[11]在新疆奇台满营湖绿洲—荒漠过渡带研究不同植被覆盖下土壤含水量的变化发现:植被覆盖度越高,表层土壤(0—20 cm)的含水量越高;植被覆盖对0—40 cm土层剖面土壤含水量的影响比较明显,随着土层深度的增加,其对土壤含水量影响逐渐减小。在流域尺度,胡伟等^[12]在神木六道沟流域的研究认为:各层土壤含水量之间表现为中等变异,变异系数随着土层深度的增加没有明显规律;王俊等^[13]在甘

肃中连川流域上游的研究得到坡向对土壤水分变异的影响最大,其次是土地利用类型,坡位的影响最小,土地利用类型只对上层土壤水分状况具有显著影响。李俊等^[14]在黄土高原对不同植被类型的土壤水分研究中发现,人工林相比草地和次生林对土壤水分有较强的调节作用。而姚雪玲等^[8]在羊圈沟的研究发现,坡面尺度上,土壤含水量的空间异质性主要表现在不同植被类型间,而不是坡位之间。综合前人的研究结果,在小区尺度上,多植被覆盖条件下土壤水分的对比研究还有待加强案例研究,利于揭示不同植被覆盖类型的生态水文效应机理,深刻理解不同植被恢复条件下的生态水文过程。

本文利用王东沟流域不同植被覆盖条件下的径流小区,测定土壤含水量在土壤剖面上的分布,分析不同植被类型下土壤含水量的变化特征,为区域生态建设提供科技支持。

1 研究区概况

王东沟流域(北纬 $35^{\circ}14'$,东经 $107^{\circ}41'$)隶属于黄土高原中南部的陕西省长武县洪家镇王东村,海拔940~1 220 m。属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水584 mm,年均气温 9.1°C ,2004—2008年月均温度见表1,无霜期171 d,地下水埋深50~80 m^[15]。塬面地带性土壤为黑垆土,流域侵蚀沟内是发育于黄土母质上的黄绵土。

表1 试验小区2004—2008年月平均温度

月份	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
温度/ $^{\circ}\text{C}$	17.0	20.5	21.8	20.2	15.1	9.3	3.3	-2.6	-5.1	-0.7	6.0	12.5

于2004年,在流域西南坡向、海拔1 150 m的自然坡面上修建9个试验小区。本文选取其中草地、沙棘、油松、油松沙棘混交林等黄土高原造林模式中具有代表性的4个小区作为研究对象。沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)均为黄土高原常见退耕还林树种^[16-17]。小区垂直投影面积 100 m^2 ($20\text{ m}\times 5\text{ m}$),坡度 35° 。各小区地表均有禾本科植被生长,草种类型有:白羊草[*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng]、野古草(*Arundinella anomala* Steud.)、异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)、翻白草(*Potentilla discolor* Bge.)、艾蒿(*Artemisia vulgaris*)、赖草[*Leymus secalinus* (Georgi)

Tzvel.]等。各径流小区的基本资料统计见表2。

表2 试验小区基本资料

覆被类型	坡度/ $^{\circ}$	株行距/ $\text{m}\times\text{m}$	平均株高/cm	郁闭度/%	盖度/%
草地	35	—	44.6	—	70
沙棘	35	1×1	191.8	—	74
油松	35	1×1	244.7	62.5	65
油松×沙棘	35	1×1	317	82	40

2 研究方法

2.1 土壤水分

本试验采用了CNC503DR型中子仪。确定中子仪标准计数。同时在中子管30—60 cm范围内用土

钻取相同深度土样进行烘干估算土壤容积含水量,率定中子仪法观测结果,获取各层土壤含水量。本研究使用的智能中子水分仪的标准计数有两种,分别为 816,1 129。对应的标定方程分别为:

$$y = 88.74x - 1.184 \quad (816 \text{ 计数}) \quad (1)$$

$$y = 57.136x - 6.003 \quad (1129 \text{ 计数}) \quad (2)$$

式中: y 为土壤体积含水量(%); x 为中子仪计数和标准计数之比。

测定深度均为 5 m,剖面上共有 30 个实测层次。1 m 内按 10 cm 层次量测,1—5 m 按 20 cm 层次量测。测定时间为 2013 年 5 月—2014 年 4 月一个完整水文年。11—12 月、1—4 月每月测定一次,5—6 月按半月时间测定,7—10 月每 10 d 一次,有降雨过程加密。处理数据过程中,按每月进行平均,剔除数据异常,共获得 10 个月实际观测数据。

每个小区中设有 3 根中子管,每根中子管代表一个测点。土壤体积含水量在测点 i 、深度 k 和时间 j 的值表示为 $\theta^{i,j,k}$ 。土壤体积含水量在深度 k 时的平均值 $\bar{\theta}_k$ 和在测点 i 时的平均值 $\bar{\theta}_i$,分别代表了垂直方向和水平方向上某一小区的平均土壤含水量,其计算式如下:

$$\bar{\theta}_k = \frac{1}{N_i \cdot N_j} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \theta_{ijk} \quad (3)$$

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{N_k \cdot N_j} \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_j} \theta_{ijk} \quad (4)$$

式中: N_i 为每小区中的测点数目; N_j 为土壤水分观测次数; N_k 为土壤水分观测深度数量。

2.2 土壤贮水量

普遍采用的土壤贮水量计算方法如下式所示:

$$S_k = 10 \cdot h \cdot \theta_k \quad (5)$$

式中: S_k 为 k 层土壤贮水量(mm); h 为土层间隔(cm); θ_k 为 k 层土壤含水量(%). 范围内的土壤贮水量由各层土壤贮水量累加得到。

数据使用 SPSS 18.0 进行显著性检验,利用 Excel 2013 进行图形绘制。

3 结果与分析

3.1 不同植被覆盖下土壤含水量的剖面分布及变异性

研究时段内对不同植被覆盖下的土壤剖面含水量进行平均,见图 1。可以看出,不同植被覆盖下都表现出,0—10 cm 表层含水量最低,均在 9%~10%,较前人在长武的研究结果偏小^[18],可能由于土壤的蒸腾较强烈,加上土壤表层含水量变异性较大,而一年的观测期还不能完全消除其他因素对表层含水量的影响,还可能与观测仪器的误差有关。10—20 cm 土壤含水量迅速升高,20—500 cm 土层呈现波动增加的变化特征。

不同植被类型间,0—20 cm 土壤水分差异不大,在 20—500 cm 土层上,草地土壤水分含量明显高于其他植

被类型,且整体上随深度的增加呈增加趋势,见图 1。据我们对小区地表植被的调查发现,4 种植被类型条件下,草地小区枯枝落叶层最厚,达 2~3 cm。枯枝落叶的存在可以有效减弱土壤水分的蒸发^[19],同时草地根系分布较乔灌林地浅,深层土壤水分易于保持。

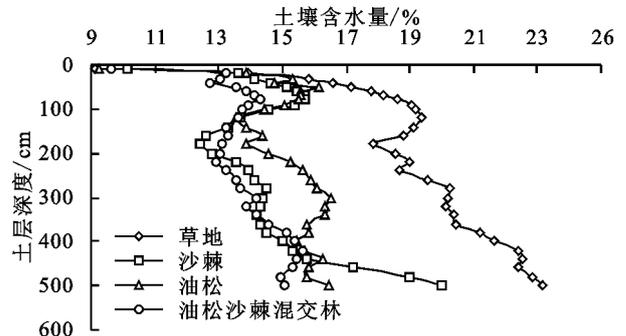


图 1 不同植被覆盖下 2013 年 5 月—2014 年 4 月土壤含水量剖面上的变化特征

油松、沙棘和油松沙棘混交林地整体上土壤水分差异不大,均呈倒“S”型,但在 150—400 cm 土层上,油松林地明显大于沙棘和油松沙棘混交林地。我们调查发现,沙棘林植被覆盖度最大,达到 74%,同时扎根深及 3~8 m^[20],蒸腾作用剧烈,从而增加了对深层水的利用和消耗。

土壤含水量的变异系数越大说明土壤含水量变化越剧烈,反之则说明土壤含水量越稳定^[21]。其变异性与土壤理化性质密切相关^[4]。通常认为:变异系数 < 0.1,为弱变异;介于 0.1~1,为中等变异;大于 1 时,为强变异^[22]。

观测期内不同植被类型剖面上土壤含水量变异性见图 2。4 种不同植被覆盖剖面上土壤含水量均属中—弱变异,均表现出随着土层深度加大,变异系数逐渐减小的特征。地表 0—100 cm 土层内土壤含水量变异性最大,100 cm 以后土壤水分变异系数趋于稳定。剖面上土壤水分的变异性,由于降雨性质(量、强度、历时)完全相同,因而草、沙棘、油松等不同植被类型的地表特征、根系分布及耗水特性是主要原因^[23]。从整体上看,草地和油松林地剖面上土壤水分相对稳定,变异性小,而沙棘和沙棘油松混交林剖面上土壤水分变异性大。草地根系较浅,油松为常绿乔木,剖面对土壤水分的吸持作用较为稳定。而沙棘具有生长茂盛,植被覆盖度大,扎根很深,落叶性等生物学特性,对土壤水分的影响较大^[24]。

3.2 不同植被覆盖土壤水分的季节变化规律

观测期内不同植被类型土壤含水量的月均分布见图 3。受降雨、植被耗水特征差异等因素影响,不同植被类型下月均土壤含水量均表现出波动中上升趋势。2013 年 7 月各植被类型下土壤含水量有较大增加,可以看出,与该月有 170 mm 降雨量输入有关。

随着8月、9月份降雨量减少,土壤水分含量迅速降低。而在2013年11月—2014年2月,各样地的水分变化特征较为一致,都呈现上升趋势。可能是由于积雪升华造成的损失,导致积雪季节的总雪水当量大于实测值^[25],所以虽没有降雨量的补给,但是研究区有少量降雪补充,加上此阶段为一年中温度最低时期(表1),枝叶凋落,根系吸水微弱,生物活动降低,因此土壤水分反而有所积累。春季3月、4月份随着温度升高,植被开始新一轮生长发育,土壤水分复而减少降低。图1可以看出,不同植被类型的月均土壤含水量与降水量补给、温度变化和植被生长有密切关系,且月尺度土壤含水量滞后性不明显。

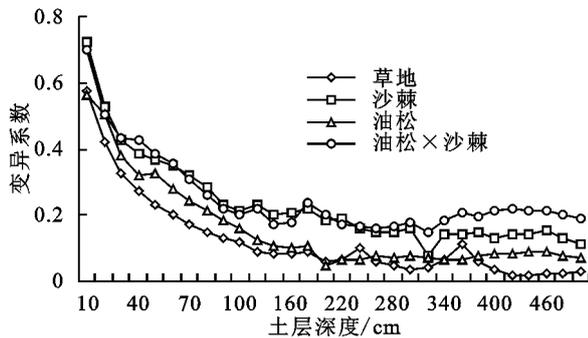


图2 2013年5月—2014年4月不同植被类型下剖面土壤含水量变异系数

图3还可以看出,土壤剖面平均含水量与植被种类关系密切。草地小区平均土壤含水量在16.72%~20.86%变动,平均值为19.14%,其含水量显著高于沙棘林地($p < 0.05$),极显著高于油松林地、油松沙棘混交林地($p < 0.01$)。而沙棘、油松、沙棘油松混交林地3种植被类型下的土壤含水量差异不显著。但在整体趋势上从2013年5月份—翌年2月份的观测阶段出现土壤含水量:草地>油松>沙棘>油松沙棘混交林。不同类型的植被根系垂直分布不同,这就导致其所能消耗吸收的土壤水深度不同,相对于林地和灌木林地而言,草地的浅根系特征是造成深层土壤含水量、平均含水量高于其他植被类型的主要原因。而不同植被对降雨截留量的不同也是造成土壤水分差异的原因。一般情况下由于其较大的冠层,林地截留量大于草地,本研究中油松沙棘混交林的郁闭度较大,可能是其土壤剖面平均含水量最低的原因。

受降雨、植物蒸腾和地面蒸散的影响,土壤含水量的季节性变化可以分为积累期、消退期、恢复期、稳定期和消耗期^[9]。按春(3—5月)、夏(6—8月)、秋(9—11月)、冬(12月—翌年2月)4个季节,对不同植被类型下的土壤含水量进行时段平均,分析4种植被类型下平均土壤含水量随季节的变化特征,见图4。图4表明,不同植被覆盖类型下的土壤含水量,均表现出春季高,夏季骤降,秋季稍有恢复,冬季恢复至春季或甚至超过春季

水平的趋势。表明,春冬季为土壤含水量恢复期,而夏秋季为土壤含水量消耗期。这与植物的生物节律变化有极大关系。夏、秋季温度较高,地面蒸散和植物蒸腾强烈,虽然这一阶段为全年主要降雨补给期(210.4 mm),但土壤水分含量最低,说明土壤水分的消耗大于补给。而春、冬季由于温度较低,植被基本停止生长,根系吸水微弱,几乎无地面蒸散,加上雨雪的补充等,土壤水分含量较高,说明补给大于消耗,土壤水分得以恢复。

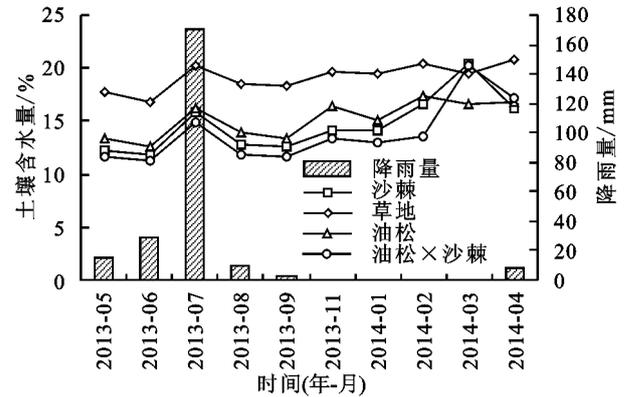


图3 不同月份土壤平均含水量的变化

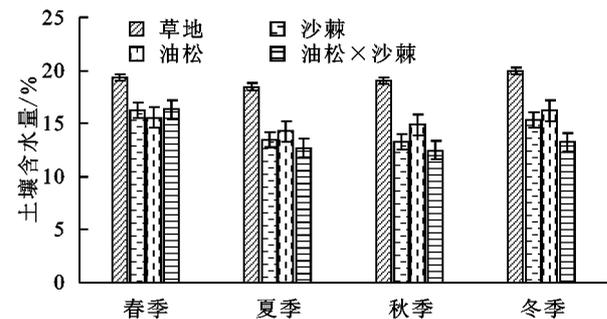


图4 不同植被覆盖下平均土壤含水量的季节性变化特征

3.3 降雨对土壤贮水量影响的日尺度分析

降雨作为黄土丘陵区土壤水分的唯一来源,是土壤水分变化的决定性因素。研究证实,不同层次土壤水分状况对降雨的响应是复杂的^[26],李洪建等^[27]使用标准差和变异系数对黄土高原土壤水分剖面进行层次划分:认为200 cm以上为活跃层,200—250 cm为过渡层,250 cm以下为稳定层。本文以200 cm为界限,分析了2013年6月1日—9月8日共100 d内土壤贮水量与降雨量关系的日序列变化见图5。在0—200 cm剖面上,土壤水分贮量与降雨量具有很强的一致性,同时土壤储水量变化相对降水具有滞后性特征^[28],但受植被截留、蒸发蒸腾、产流等作用影响,土壤储水量的变化幅度小于降雨量。而200—500 cm剖面上,土壤水分贮量在日尺度上的变化表现得平稳,与降雨量关系不明显。可见,降雨的作用对深层土壤水分含量影响作用较小。

图5还可以看出,0—500 cm剖面上4种不同植被覆盖类型土壤贮水量变化趋势基本一致。草地贮水量最大,油松林地次之,沙棘林地和油松沙棘混交

林地基本相同,说明降雨量是影响土壤贮水量时间上变化的主要因素,植被覆盖的影响次之。

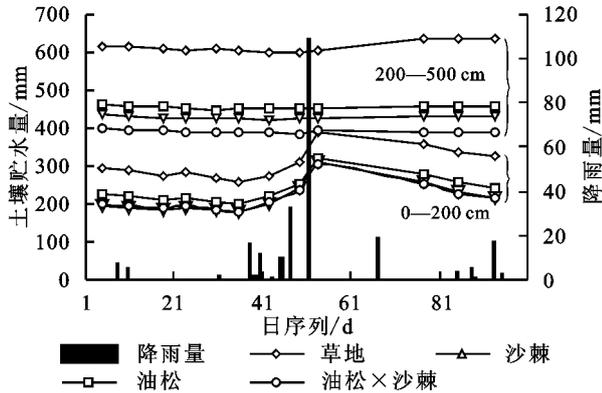


图 5 2013 年 6—9 月土壤贮水量日动态变化

4 结论

(1) 随着土层深度的增加,草地小区土壤水分呈增加趋势,沙棘、油松和沙棘油松混交林地呈倒“S”型。随深度增加,土壤水分变异系数均为减小态势,其稳定程度增加。沙棘林的存在加大了剖面上土壤水分的变异性。

(2) 0—500 cm 剖面范围内,草地小区土壤含水量在观测期内均为最高。4 个小区均表现出春冬土壤含水量较高,夏秋含水量较低的现象,表现出积累/恢复和消耗不同的两个过程。

(3) 地表至 200 cm 剖面内土壤水分贮量受降雨量影响较大,200—500 cm 剖面土壤水分贮量较为稳定。而不同植被的蒸发蒸腾作用加大了其差异性。

参考文献:

[1] 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.
 [2] 王云强,张兴昌,从伟,等.黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究[J].农业工程学报,2006,22(12):65-71.
 [3] 雷志栋,胡和平,杨诗秀.土壤水研究进展与评述[J].水科学进展,1999,10(3):311-317.
 [4] 贾玉华.坡面土壤水分时空变异的试验研究[D].北京:中国科学院大学,2013.
 [5] 刘鑫,毕华兴,李笑吟,等.晋西黄土区基于地形因子的土壤水分分异规律研究[J].土壤学报,2007,44(3):411-417.
 [6] 徐学选,刘文兆,王伟.黄土丘陵区小流域尺度生态建设的水文响应研究[J].中国生态农业学报,2005,13(2):155-157.
 [7] Wang Z, Liu B, Zhang Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009,19(6):707-718.
 [8] 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.

[9] 余新晓,张建军.黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J].林业科学,1996,32(4):289-297.
 [10] 胡良军,邵明安,杨文治.黄土高原土壤水分的空间分异及其与林草布局的关系[J].草业学报,2004,13(6):14-20.
 [11] 张建兵,熊黑钢,李宝富,等.绿洲—荒漠过渡带不同植被覆盖度下土壤水分的变化规律研究[J].干旱区资源与环境,2009,23(12):161-166.
 [12] 胡伟,邵明安,王全九.黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J].农业工程学报,2005,21(8):11-16.
 [13] 王俊,刘文兆,胡梦瑒.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.
 [14] 李俊,毕华兴,李孝广,等.晋西黄土残塬沟壑区不同植被类型土壤水分动态研究[J].水土保持研究,2006,13(6):65-68.
 [15] 张晶晶.王东沟小流域不同坡面条件下土壤水分和径流动态特征[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.
 [16] 杨建伟,梁宗锁,韩蕊莲.黄土高原常用造林树种水分利用特征[J].生态学报,2006,26(2):558-565.
 [17] 及金楠,张志强,郭军庭,等.黄土高原刺槐和侧柏根系固坡的有限元数值模拟[J].农业工程学报,2014,30(19):146-154.
 [18] 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.
 [19] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等.森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J].水土保持学报,1998,4(2):23-28.
 [20] 从心海,梁一民,李代琼.黄土高原半干旱区沙棘根系特性与土壤水分动态研究[J].水土保持通报,1990,10(6):98-103.
 [21] 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.
 [22] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
 [23] 杨亚辉,赵文慧,木热提江,阿不拉,等.不同植被对土壤理化性质影响分析:以王东沟小流域为例[J].水土保持通报,2016,36(1):249-252.
 [24] 陈海滨,孙长忠,安锋,等.黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(I):土壤水分的垂直变化和季节变化特征[J].西北林学院学报,2003,18(4):13-16.
 [25] 杨大庆.地面积雪测量与干量器量测降雪量一致性试验研究[J].水科学进展,1992,3(2):136-141.
 [26] 李海防,史梅容,王金叶,等.广西猫儿山毛竹林不同层次土壤含水量的降雨响应[J].水土保持研究,2016,23(5):120-123.
 [27] 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.
 [28] 张洛丹.不同植被类型对陡坡地土壤水分循环的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.