

黄土区退耕草地凋落物—土壤界面水分过程特征研究

王冬^{1,2}, 杨政^{1,2}, 郝红敏^{1,2}, 武高林^{1,2}, 朱元骏^{1,2}, 史志华^{1,2}

(1. 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 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要:为研究不同退耕年限草地地下垫面凋落物对土壤蒸发过程和表层土壤保水特征的影响,通过室内模拟试验,以黄土高原地区不同退耕年限草地凋落物质量为因子,依据野外退耕还草 5 a, 15 a, 30 a 的草地凋落物覆盖特征,设 3 个凋落物处理水平,以裸地为对照,比较分析了不同草地枯落物特征对地表土壤界面的水分过程影响效应。研究表明:具有凋落物处理能够有效地延缓径流的产生,并能显著增加表层土壤持水量;凋落物持水量与凋落物质量呈显著线性正相关;在降雨后 24 h 内,凋落物层抑制土壤蒸发作用比较明显;随着凋落物含量的增加,72 h 后表层土壤含水量显著提高。在黄土高原干旱半干旱地区,耕地退耕后凋落物的增加显著改善了地表土壤的持水能力,提高了表层土壤水分含量。

关键词:黄土高原; 退耕还草; 凋落物; 蒸发; 保水效应

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)01-0080-05

Hydrological Processes of Litter-Soil Interfacial Systems in Restoration Grasslands of the Loess Plateau, China

WANG Dong^{1,2}, YANG Zheng^{1,2}, HAO Hongmin^{1,2}, WU Gaolin^{1,2}, ZHU Yuanjun^{1,2}, SHI Zhihua^{1,2}

(1. 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;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Simulating rainfall experiments were conducted to study the effects of litter layer on moisture evaporation and water storage capacity of the litter-soil interfacial systems. In this experiment, four treatments were designed, litter layers of grassland naturally restored for 5, 15, and 30 years were mulched on the surface soil and bare surface soil was taken as contrast. The results showed that the litter layer treatments not only delayed the runoff emergence, but also increased the water-hold quantity significantly. The relationship between the litter mass and litter storage water can be described by the linear function. The results indicated that the litter layers can efficiently inhibit soil moisture evaporation, especially at the high level of litter-soil interfacial systems water content during the successive evaporation of 24 hours. After the 72 hours, the soil water content of the surface soil increased significantly with the increase of restoration years, while the proportion of cumulative evaporation of the rain-hold quality decreased. In the semi-arid loess plateau region, the litter layer of the restoration grassland could improve the water holding capacity of the surface soil and increase the soil water content.

Keywords: Loess Plateau; conversion of cropland to natural grassland; litter; evaporation; water holding capacity

近年来,随着“退耕还林(草)”和“天然林保护”等重大生态工程在黄土高原的实施,水土流失得到有效控制,该区植被恢复对全球生态环境产生了正效应。

黄土高原地区是实施退耕最早的地区,植被恢复对土壤理化性质产生影响,其核心是生物量的蓄积、覆盖和转化促进的土壤水分和养分的改善^[1]。凋落物数

收稿日期: 2014-05-28

修回日期: 2014-09-02

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(41371282, 41371242); 中国科学院百人计划支持项目; 陕西省科技计划项目(2014KJXX-15)

第一作者: 王冬(1988—), 男, 陕西渭南人, 博士研究生, 研究方向为草地生态水文过程。E-mail: wangdong8811@gmail.com

作者简介: 武高林(1981—), 男, 山西文水人, 副研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事草地恢复与生态过程方面的研究。E-mail: gaolinwu@gmail.com

量动态、化学性质和水分特征反映着不同生态系统间的差别和动态特征。凋落物的水分特征直接关系到植被恢复生态系统水文过程及水文生态功能,对其研究有助于深入了解凋落物增加土壤团聚体,改善土壤结构,降低雨滴对地面的击溅程度、延缓地表径流,增加土壤入渗、抑制土壤蒸发等水文生态效应^[2]。凋落物的厚度和盖度是控制不同植被格局水文特征的主要因子,在一定的时期内,凋落物的厚度和累积量随着退耕年限的增加而增加^[3]。

蒸发蒸腾作为区域水量平衡和能量平衡的主要成分,不仅在水循环和能量循环过程中具有极其重要的作用,而且也是生态过程与水文过程的重要纽带^[4]。土壤蒸发是主要的水分耗散过程之一,其量值受到生态系统结构影响下的微气象条件、土壤含水量和凋落物厚度的影响。王鹏程等^[5]通过凋落物浸水试验研究凋落物最大持水量评价凋落物的水文效应。Sato 等^[6]研究发现,凋落物的最大持水量与降雨强度及凋落物组成具有相关关系。Li 等^[7]对针叶及阔叶凋落物在不同雨强及不同质量下的凋落物持水量进行研究发现,凋落物存在最大与最小储水量,其差值对降雨后的蒸发有显著影响。已有关于凋落物的水文效应研究主要集中在森林凋落物持水能力,而对草地凋落物抑制蒸发的研究较少,尤其是对半干旱区黄土高原不同退耕年限草地凋落物的研究尚未见报道。

本文的目的是在黄土高原沟壑区,以空间序列代时间变化序列,通过室内模拟降雨试验,研究不同质量凋落物减缓径流及抑制土壤蒸发的作用。比较相同时段内累计蒸发量和累计蒸发量占总持水量的比例,确定年限凋落物覆盖的保水效果;研究凋落物覆盖下表层土壤蒸发动态过程;对不同凋落物覆盖条件下土壤蒸发过程进行比较分析。在干旱、半干旱地区,水分是植被恢复与重建的主要限制因子,本文以

期从凋落物水分保持效应的角度来研究植被恢复对土壤水分的影响,从而为黄土高原地区植被恢复与生态重建提供科学依据。

1 研究区概况

样地选择在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站的王东沟小流域,该流域是黄土高原沟壑区的典型代表,塬面和沟壑各占 35%和 65%。位于陕西省长武县洪家乡王东沟村,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均温度 9.2℃,年平均降水量 582.3 mm,其中约 55%集中在 7—9 月,无霜期 171 d。该区土壤属黑垆土,母质是中壤质马兰黄土,全剖面土质均匀疏松,通透性好,全剖面土质均匀疏松,稳定入渗率为 1.35 mm/min。田间持水量为 21%~23.8%,萎蔫湿度为 9%~12%。该区自然植被多为人工林草植被,林地物种主要有刺槐(*Robinia pseud-oacacia*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、草地物种主要有冰草(*Agropyron cristatum*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等。但 20 世纪 80 年代以来,部分刺槐林地遭到人为砍伐破坏而逐渐变为荒草地(稀疏刺槐林地),主要物种包括冰草(*Agropyron cristatum*)、铁杆蒿(*Artemisia sacro-rum*)、异燕麦(*Helictotrichon schellianum*)、纤毛鹅冠草(*Roegneria ciliaris*)、蛇莓(*Duchesnea indica*)、野菊花(*Flos chrysanthemi*)等^[8]。

2 材料方法

2.1 试验设计

从王东沟小流域沟坡选取退耕 5 a,15 a,30 a 的草地和对照农田作为研究对象,测量凋落物厚度;用环刀取表层 0—5 cm 容重,室内用烘箱在 105℃下,烘至恒重;按照 15 cm×20 cm 取土体以上枯落物及半分解层样,并取 0—5 cm 表土室内风干。样地概况见表 1。

表 1 样地及凋落物特征

样地	海拔/ m	容重/ (g·cm ⁻³)	主要 物种	厚度/ mm	枯落物/ (g/0.03m ²)	半分解层/ (g/0.03m ³)	凋落物总重/ (g/0.03m ³)
农田	1219	1.11±0.02	小麦	—	—	—	—
退耕 5 a 草地	1124	1.09±0.03	冰草、铁杆蒿	8±2	9.76±1.62	62.90±7.30	72.66±6.05
退耕 15 a 草地	1120	1.10±0.01	冰草、异燕麦	13±1	18.9±2.78	112.12±15.46	131.01±17.82
退耕 30 a 草地	1116	1.07±0.04	冰草	13±3	21.29±3.53	219.50±33.10	240.79±36.48

在室内,按照室外容重填充土槽。选取铝盘作土槽装土样及凋落物样。参照 Sato 等^[6]和 Li 等^[7]的方法,采用大小为 20 cm×15 cm×7 cm(长×宽×高)的铝盘,铝盘底部按照 2 cm×2 cm 间隔布置 0.2

cm 直径孔隙,在其上部垫层纱布。根据测定值表层容重无显著差异,室内按照 1.1 g/cm³ 的容重填充 5 cm 土壤,将野外取好的半分解层及枯落物均匀平铺。然后在 5 cm 处钻孔保证径流,示意图见图 1。

2.2 试验过程

按照陈杰等对长武 1957—2006 年日降水量资料分析得出,该区侵蚀性降雨以降雨量小于 30 mm 较多,同时以短历时 30 min 内降雨为主^[9]。在模拟降雨过程,选取降雨强度为 60 mm/h 的雨强,降雨 30 min。唐克丽等^[10]提出黄土高原地区的退耕坡度为 25°,以此确定降雨过程中土槽放置坡度为 25°。

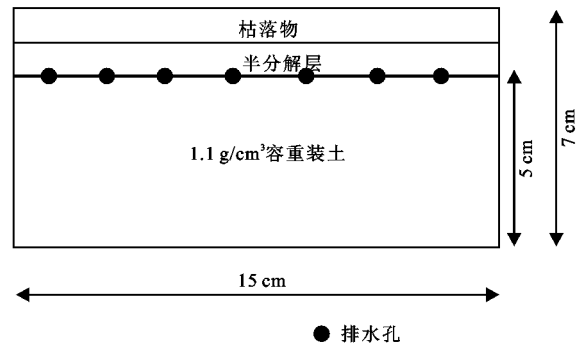


图 1 蒸发器横剖面示意图

依据野外退耕 5 a,15 a,30 a 的草地凋落物覆盖特征,设 3 个凋落物处理水平,以裸地为对照,重复 3 个,共 12 个土槽,其中对照只填土,无凋落物及半分解层。

降雨前期称取土槽总重为 W_1 (g),降雨过程中记录产流时间为 t 。在降雨结束后 t 时刻分别称取土槽质量,记为 $W_i, i = 0, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 24, 36, 48, 72$ h,其中 W_0 表示降雨结束后称重。

土体及地上凋落物总降雨持水量为 W , t 时刻持水量为 W_t 。二者计算公式如下:

$$W_t = W_i - W_1 \tag{1}$$

降雨结束后不同时间累积蒸发量记为 E_t 。 t 时刻累积蒸发量占总凋落物降雨持水量 W 的百分比记为 A_t 。

$$E_t = W_0 - W_t \tag{2}$$

$$A_t = E_t / W_0 \times 100 \tag{3}$$

朱元俊等^[11]通过试验发现,土壤水分累积蒸发率随时间呈指数降低趋势,本文选取指数模型预测 t 时刻土体保水量:

$$f(t) = W_t = ae^{(-bt)} \tag{4}$$

t 时刻土体累积蒸发速率由下式计算得出:

$$\delta W_t / \delta t = (W_t - W_0) / t \tag{5}$$

72 h 后,去除凋落物,在 105℃ 温度下烘至恒重,计算试验末期土壤含水量。

2.3 数据处理

本论文所有的数据处理使用 SPSS 12.0 进行分析。单因素方差分析使用 Tukey's HSD 检验,比较不同处理间降雨持水量、累积蒸发量、单位时间蒸发量比重的差异。使用 Sigmaplot 10.0 画图。

3 结果与分析

3.1 产流时间及持水量

不同草地凋落物层在模拟降雨条件下的产流时间不同,最早产流的是对照蒸发器,2'35"开始产流,接下来为退耕 5 a 草地蒸发器产流,退耕 30 a 蒸发器在降雨 30'后无明显产流(表 2)。降雨产流时间主要取决于降雨强度、降雨历时、坡度及地表覆盖等的相互作用^[12]。凋落物由于具有较多的微孔隙,微孔隙具有较强固持水分的能力,从而凋落物层能延缓径流,推迟径流时间,且随着凋落物质量的提高,延缓径流效果越明显。

对比降雨前后蒸发器质量,发现不同处理间持水量存在显著差异($F_{3,8} = 41.52, P < 0.001$),有无凋落物覆盖存在显著差异,对照蒸发器持水量仅为 348.33 g,此时土壤含水量为 23.2%,为土壤田间持水量。随着退耕年限的增加,凋落物量及持水量增加,退耕 30 a 草地持水量最大为 741.00 g。试验设计中土槽底部有小孔,试验中土体部分含水量近似为田间持水量。与对照相比,具有凋落物处理持水量增加 67%~113%。

表 2 不同样地模拟降雨产流时间及降雨持水量

处理	产流时间	持水量均值	草地与对照持水量比	重复次数
农田	2'35"—3'12"	348.33±28.69c	1.00	3
退耕 5 a 草地	6'30"—10'06"	582.67±28.06b	1.67	3
退耕 15 a 草地	16'38"—25'32"	640.67±19.65ab	1.84	3
退耕 30 a 草地	—	741.00±26.02a	2.13	3

图 2 为凋落物与凋落物部分持水量的回归曲线,可以看出,凋落物持水量与凋落物质量呈显著正相关关系。已有研究表明植物凋落物质量、稻草覆盖、砂石覆盖等可以降低地表径流,减少土壤流失量,增加入渗,与本研究结果相似^[13-14]。随着凋落物质量显著提高,凋落物层能够通过储水蓄水作用来延缓产流时间而延长降雨入渗时间。在黄土高原高原沟壑区耕地退耕还草后,凋落物增加能显著提高地表含水量。

3.2 凋落物持水能力

图 3 为各处理持水量随降雨后时间变化。试验表明,不同处理降雨后 72 h 内,持水量符合指数分布。24 h,对照蒸发器持水量减少约 168 g 水分,占总持水量的 48.41%,而 R_5, R_{15}, R_{30} 分别减少 111, 133, 133 g。蒸发器持水量第一天减少对照比具有凋落物覆盖多 30%左右。刘广全等^[15]研究凋落物在生态系统水分循环中的功能,发现覆盖可以有效抑制土壤蒸发,地面蒸发量及蒸发率无凋落物覆盖大于有凋

落物覆盖,覆盖处理比对照少 10%~40.4% 的蒸发量,与本研究结果在蒸发前期相似。覆盖可使地面层显热通量增大,潜热通量和土壤热通量均明显减小,而使土壤蒸发受限。在 24 h 内,累积蒸发量随着退耕年限及凋落物含量的增加,累积蒸发量呈现递减趋势,在 72 h 内,累积蒸发量随着凋落物的增加呈现增加的趋势,累积蒸发 72 h,对照持水量减少约 268 g, R_5 , R_{15} , R_{30} 分别减少 293, 292, 297 g, 有覆盖处理 72 h 累积减少量反而比对照多。主要由于凋落物含量的增加持水能力增加,供给蒸发的能力增加;土壤蒸发速率决定于大气的蒸发能力与土壤潜在的蒸发能力,土壤潜在蒸发能力决定于土壤中含水量大小及其分布,凋落物层增加了界面水分含量。

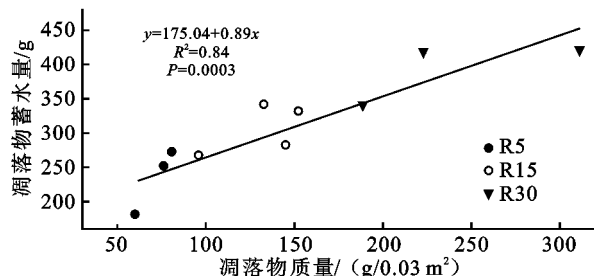


图 2 凋落物质量与凋落物蓄水量回归曲线

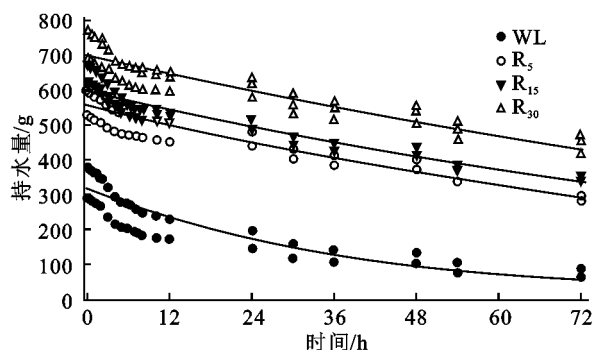


图 3 不同处理保水量变化

从图 4 中可以看出,72 h 土壤水分累积蒸发率随时间呈指数降低趋势。不同处理的土壤水分蒸发率在 0~12 h 维持较高水平(>6 mm/h),此后急速降低。在 12 h 后,不同处理的土壤水分蒸发率均降低到 5 mm/h 以下。对比不同凋落物含量的土壤,可以看出试验期间土壤水分蒸发率差别不大,出现这一现象的原因可能在于:在蒸发的初始阶段,由于土壤含水率均很高,凋落物对土壤水分蒸发的抑制作用未表现出来;当蒸发到一定阶段后,对照土壤含水量较低从而可供蒸发能力下降,蒸发速率降低;而有凋落物处理凋落物对土壤水分蒸发的抑制作用表现出来,因而凋落物处理具有较高含水量而没有显著高于对照的蒸发速率。原翠萍等^[16]研究砾石覆盖能明显改变土壤蒸发过程,覆盖条件下的土壤蒸发与裸土相比不仅降低而且更加平稳。本研究表明不同处理间蒸发

过程都较平稳,可能与本研究的时间尺度有关,本研究时间较短,未能表现出凋落物处理与对照的差异。

3.3 抑制土壤蒸发作用

72 h 后,对照处理累积蒸发量占到降雨持水量的 79.6%,而具有凋落物覆盖的蒸发量仅占降雨持水量的 40.1%~49.9%(图 5),对照与具有凋落物覆盖处理间存在显著差异($F_{3,8} = 74.07, P < 0.0001$)。在 72 h 后,不同凋落物间也存在显著差异,累积蒸发量占降雨总持水量随着凋落物的增加而逐渐减少,退耕 5 a 凋落物覆盖处理蒸发量占降雨持水量的 49.9%,而退耕 30 a 草地上凋落物覆盖处理仅占 40.1%。累积蒸发量占总持水量的比例随着退耕年限的增加而降低,退耕年限的增加即凋落物的增加有助于降低蒸发比例。随着蒸发时间的增加,凋落物质量多少延缓蒸发的效应显现出来,凋落物覆盖的退耕草地可以降低蒸发比例。

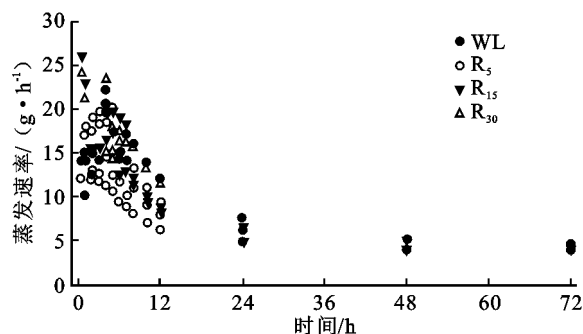
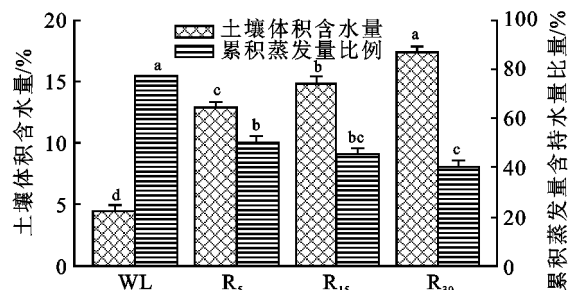


图 4 累计蒸发速率随时间变化

图 5 显示 72 h 后 4 个处理土壤含水量也存在显著差异($F_{3,8} = 199.39, P < 0.0001$),随着凋落物质量的增加表层土体含水量显著提高。这主要由于,凋落物自身含水较多,蒸发过程中先蒸发了自身含水,延缓了土壤水分的蒸发。凋落物能保持土体高含水量,其作为土壤与大气间的隔离层,在涵养水源和保持水土过程中起到正作用,延缓了蒸发并降低了蒸发速率^[17-18]。在半干旱区由于气候干燥,降雨后,地表蒸发强烈,土壤含水量下降很快,难以满足作物生长的需要,凋落物层可以使表土层保持较高含水量,在后期开展植被重建,可以覆盖凋落物来提高成活率。



注:不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平具有显著差异。

图 5 累计蒸发量占降雨持水量比例及土壤含水量

4 结论

凋落物对土壤水分蒸发的影响主要表现在以下方面:(1)凋落物延缓了径流,增加了表层土体持水量;(2)凋落物层自身吸收的水分,先蒸发了凋落物层的水分,导致参与蒸发的土体水分在时间尺度上有所延缓;(3)凋落物层作为地表覆盖,避免了土体与大气的直接接触、阳光的直接照射及大风运动的接触,降低了土层水分的扩散蒸发速率,最终促进凋落物下层土壤的持水性和含水量的改善,涵养了水源。在本试验条件下,凋落物层在一定程度上能延缓径流的产生,显著延缓地表蒸发和增加表层土体持水量。不同退耕年限草地通过增加凋落物质量和厚度改变了地表水文交换过程,通过增加凋落物层抑制土壤蒸发、增加地表土壤含水量,进而改善植被—土壤界面水文过程。

参考文献:

- [1] 师阳阳,陈云明,张光辉,等.不同退耕年限撂荒地植物多样性及生物量分析[J].水土保持研究,2012,19(6):36-40,44.
- [2] Mulumba L N, Lal R. Mulching effects on selected soil physical properties[J]. Soil and Tillage Research,2008,98(1):106-111.
- [3] Mayorá G, Bautista S, Bellot J. Factors and interactions controlling infiltration, runoff, and soil loss at the microscale in a patchy Mediterranean semiarid landscape [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2009,34(12):1702-11.
- [4] 王浩,杨贵羽,贾仰文,等.以黄河流域土壤水资源为例说明以“ET管理”为核心的现代水资源管理的必要性和可行性[J].中国科学E辑:技术科学,2009,39(10):1691-1701.
- [5] 王鹏程,肖文发,张守攻,等.三峡库区森林植被林地枯落物现存量及其持水能力[J].中国水土保持科学,2008,6(4):41-47.
- [6] Sato Y, Kumagai T O, Kume A, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers-the effects of rainfall conditions and leaf shapes[J]. Hydrological Processes,2004,18(16):3007-3018.
- [7] Li X, Niu J, Xie B. Study on hydrological functions of litter layers in north China[J]. PloS one,2013,8(7):e70328.
- [8] 陈洪松,邵明安,王克林.黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J].应用生态学报,2005,16(10):1853-1857.
- [9] 陈杰,刘文兆,王文龙,等.长武黄土高原沟壑区降水及侵蚀性降雨特征[J].中国水土保持科学,2009,7(1):27-31.
- [10] 唐克丽.土壤侵蚀环境演变与全球变化及防灾减灾的机制[J].土壤与环境,1999,8(2):81-86.
- [11] 朱元骏,邵明安.钙结石含量对土壤水分蒸发影响的模拟试验[J].农业工程学报,2010,26(2):77-81.
- [12] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. Journal of Hydrology,2012,454/455:123-130.
- [13] Huang Z G, Ouyang Z Y, Li F R, et al. Response of runoff and soil loss to reforestation and rainfall type in red soil region of southern China[J]. Journal of Environmental Sciences,2010,22(11):1765-1773.
- [14] Boer M, Puigdef Bregas J. Effects of spatially structured vegetation patterns on hillslope erosion in a semi-arid Mediterranean environment: a simulation study [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2005,30(2):149-167.
- [15] 刘广全,王浩,秦大庸,等.黄河流域秦岭主要林分凋落物的水文生态功能[J].自然资源学报,2002,17(1):55-62.
- [16] 原翠萍,张心平,雷廷武,等.砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响[J].农业工程学报,2008,24(7):25-28.
- [17] 李学斌,马琳,杨新国,等.荒漠草原典型植物群落枯落物生态水文功能[J].生态环境学报,2011,20(5):834-838.
- [18] 赵晓春,刘建军,任军辉,等.贺兰山4种典型森林类型凋落物持水性能研究[J].水土保持研究,2011,18(2):107-111.