

黄土高原地区林地枯枝落叶层水土保持效应研究进展

许小明¹, 易海杰², 何亮¹, 吕渡², 贺洁¹,
邹亚东¹, 王浩嘉¹, 薛帆¹, 田起隆², 王妙倩¹, 张晓萍^{1,2}

(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,
陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 枯枝落叶层是林地垂直结构中参与水文循环过程的重要作用层,在涵养水源和保持水土中发挥着重要作用。黄土高原经过 20 年植被快速恢复,枯落物覆盖使近地表植被特征和生态过程变化明显,这必将影响地表土壤水分入渗、产汇流等水文和土壤侵蚀过程。为全面掌握黄土高原地区林地枯枝落叶层的水土保持效应研究动态,系统回顾了林地枯枝落叶层在凋落动态、蓄积量变化、截留降雨、阻延地表径流、提高土壤抗蚀抗冲能力和增加土壤入渗等方面的研究历史。分析了目前林地枯枝落叶层研究中存在的若干问题,提出未来黄土高原地区应加强野外坡面枯落物原位长期监测和降雨试验研究,开展多地貌、多尺度研究,关注天然林和人工林枯枝落叶层水土保持功能的对比研究,以及水文物理过程模型建立和参数确定,并重视林地枯枝落叶层的保护和监管。

关键词: 林地; 枯枝落叶层; 水土保持效应; 黄土高原

中图分类号: S714

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)04-0415-07

Research Advances on Water and Soil Conservation Effects of Forest Litter Layer on the Loess Plateau

XU Xiaoming¹, YI Haijie², HE Liang¹, LÜ Du², HE Jie¹, ZOU Yadong¹,
WANG Haojia¹, XUE Fan¹, TIAN Qilong², WANG Miaojian¹, ZHANG Xiaoping^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,
Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,
China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Litter is an important layer involved in the hydrological cycle process in the vertical structure of forestlands, and plays an indispensable role in water retention and soil conservation. After 20 years of rapid vegetation restoration on the Chinese Loess Plateau, litter coverage in forestlands has caused significant changes in vegetation characteristics and ecological processes on the near surface, which will certainly affect the hydrological and soil erosion processes such as soil infiltration, surface runoff and confluence. In order to comprehensively grasp the dynamics of soil and water conservation effects of litter layer in forestlands on the Loess Plateau, we systematically reviewed the research progress of litter layer in forestlands in terms of the litter dynamics, accumulation changes, rainfall interception, surface runoff interception, soil erosion resistance and soil infiltration. Some existing problems in the current studies on litter layer in forestlands on the Loess Plateau were analyzed objectively. In the future, the long-term in-situ monitoring and rainfall experiments on field slopes should be strengthened, and multi-landform as well as multi-scale dynamic studies should be carried out. In addition, we are supposed to pay attention to the comparative studies on the eco-hydrological functions of litter layer in natural forests and artificial forests, and establish hydro-physical process models and determine the relevant key parameters, as well as enhance the protection and supervision of litter layer in forestlands.

收稿日期: 2021-06-18

修回日期: 2021-07-08

资助项目: 国家自然科学基金(41877083, 41440012, 41230852)

第一作者: 许小明(1990—), 男, 山西广灵人, 博士研究生, 研究方向为植被恢复的水土保持效益评价。E-mail: 1559668557@qq.com

通信作者: 张晓萍(1971—), 女, 河南温县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事植被恢复的水土保持效益评价研究。E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn

土高原地区落叶阔叶林和灌木林地,如山杨、栎树、刺槐、桦树(*Betula platyphylla*)和沙棘等枯枝落叶以9月和10月最为集中,该阶段凋落量约占全年凋落总量的75%以上^[19]。而针叶林如油松,其凋落过程主要发生在10月一次年4月,呈现明显的节律性^[53]。凋落物主要成分均为落叶,约占总凋落量的60%~90%^[43],又以半分解层为主^[54-55]。

森林枯枝落叶层蓄积量随凋落量和分解量的变化而一直处于动态变化中。以乔木群落为例,吴钦孝等^[54]认为陕北丘陵沟壑区人工山杨林和油松林枯落物分别以1月份和4月份蓄积最大,而10月和7—8月蓄积量分别达到全年最低值。在中龄林的林分结构下,山杨林和油松林枯落物蓄积量均无明显增减。

表1 黄土高原地区林地枯枝落叶层主要研究成果

地貌类型	调查地点	植被类型	测定指标	研究方法	参考文献
丘陵沟壑区	陕西安塞站及纸坊沟流域	刺槐、油松、沙棘和狼牙刺	凋落动态和持水性质	野外样地调查、定位监测和浸泡法	[22]
	陕西宜君县—内蒙古鄂尔多斯	刺槐、杨树、柠条和黄蔷薇	凋落物蓄积量空间变化	野外样地调查	[39]
	陕西安塞站	沙棘	蓄积量和持水特征	浸泡法	[40]
土石山区	六盘山香水河小流域 黄龙山铁龙湾林场 子午岭连家砭林场 秦岭山地	桦树、辽东栎和华北落叶松 山杨、油松和沙棘	凋落物持水特征和截持降雨过程	野外定位监测、人工模拟降雨试验和浸泡法	[10],[18],[20],[21],[40],[41]
			凋落和分解速率、蓄积量、截留降雨、拦蓄效应、击溅侵蚀、提高土壤抗冲性和增加土壤入渗等		野外定位监测、溅蚀板法、水槽法、
		柴松、油松、山杨、辽东栎、桦树、沙棘、白刺花、虎榛子和胡枝子	凋落物厚度、蓄积量、分解状况、持水特征和拦蓄效应	人工模拟降雨试验	[47],[48]
		锐齿栎、油松和华山松	凋落速率和蓄积量、地表蒸发量、持水特征和养分含量	野外定位监测、浸泡法和化学分析	[29]
		山西吉县蔡家川流域	刺槐、油松、沙棘和虎榛子	截持降雨能力	野外定位监测
高塬沟壑区	山西吉县红旗林场	油松、刺槐和山杨	凋落物糙率系数n值	试验槽法	[50]
	山西吉县蔡家川流域	刺槐、油松和刺槐×油松混交林	蓄积量和持水特征	野外样地调查和浸泡法	[51]
	甘肃泾川县官山林场	刺槐	蓄积量和持水特征	野外样地调查和浸泡法	[52]

1.2 枯枝落叶层截留降雨能力

森林垂直结构分层中,除林冠层以外,枯枝落叶层具有截留林内降水,减少林地净雨量,延缓地表产汇流过程,补充土壤水分的作用^[25,44],其截留机理一直被关注^[56]。依据枯落物的截留速率,将其划分为截留阶段、渗透阶段和饱和阶段^[18,20,57]。截留量大小不仅与不同植被类型枯落物蓄积量存在直接关系,还与其自身特性(分解速率和持水能力)有关^[58]。随林地郁闭度增加,枯落物厚度和蓄积量一般越大,截留降水能力越强。当枯落物厚度超过标准厚度(0.8~1.2 cm),在场次降雨过程中,枯落物厚度的差异不会造成其截留降水量的显著差异^[57]。持水能力越大的枯落物层,分解速率越高,截留能力越强^[59]。

此外,枯落物干湿程度、降雨特征(降雨量、降水时长和雨强等)和植被类型等均会影响其截留量^[18]。马雪华^[59]研究认为,在降水初期,枯落物较为干燥,

蓄积量受植被类型、密度、林龄、地形因子、气候(温度和降水)和人为活动等因子的影响。黄土高原地区枯落物蓄积量表现为乔木群落>灌木群落>草本群落^[39];针叶林枯落物蓄积量>落叶阔叶林^[48]。六盘山地区华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)枯落物厚度和蓄积量随密度增大存在一定上限,密度在1600株/hm²时厚度和蓄积量最大^[55]。不同坡向、坡度、坡位等地形因子的对比分析表明阴坡枯落物蓄积量较阳坡枯落物蓄积量明显增加,陡坡不利于枯落物蓄存,枯落物蓄积量表现出下坡位>中坡位>上坡位。黄土高原从南到北,随降水量的递减,枯落物蓄积量表征为减少的趋势。人为放牧、火灾和采伐林木等也会减少枯落物的蓄积量。

其截留量随降水量增大而增大,而截留率表征为相反的变化特征;截留量存在最大阈值,不会随降水过程的持续继续增加^[18,49]。黄土高原典型土石山区——六盘山主要森林类型枯枝落叶层对大气降水截留的研究结果^[18]表明,针叶林林内年截留量和截留率明显高于阔叶林,截留量总体与枯落物蓄积量呈正比例关系。此外,枯落物截留降雨能力具有明显的季节和月尺度变化。以油松林为例,季节尺度上,截留量表现出夏季>秋季>春季>冬季;月尺度上,6—9月截留量超过全年总截留量的50%^[18]。

1.3 枯枝落叶层延缓地表径流能力

地表径流流速及流量是土壤侵蚀的主要动力,枯落物覆盖能够直接增大近地表粗糙度,致使地表径流阻力系数增加,径流流动时间延缓,坡面径流流速降低,有利于增加林地土壤入渗,减小径流冲刷土壤,抑制洪峰形成或推迟洪峰过程、削减洪峰流量^[16,18,41,50,58]。枯落物

层在很大程度上就是黄土高原国土整治 28 字方略“全部降水就地入渗拦蓄”中“拦蓄”作用的具体物质和功能化结构的重要部分^[60]。

研究表明子午岭地区不同植被类型枯落物拦蓄量的大小表征为森林>灌丛^[47]。黄土高原 25°坡面覆盖 1 cm 厚度的枯枝落叶,其径流速度为裸坡的 1/10~1/15^[61]。坡长(60 m)相同时,天然次生林、人工林和裸露荒坡的汇流时间分别为 30~40 min,10~20 min 和 5.9 min,林地汇流时间明显长于裸露荒坡,枯枝落叶层对径流的阻延作用非常显著^[62]。坡度和径流深(或降雨强度)与枯枝落叶层阻延地表径流速度呈反比,枯枝落叶层厚度则与其呈正比^[18,41,57]。不同植被类型对比发现,宁南六盘山区华北落叶松枯枝落叶层有效拦蓄深(1.63 mm)为辽东栎(*Quercus wutaishanic* Mary.)×少脉椴(*Tilia paucicostata* Maxim.)混交林(0.56 mm)的 2.9 倍,这主要源于华北落叶松枯落物蓄积量较大^[63],这已被在子午岭地区的研究结果^[48]所证明。

1.4 枯枝落叶层持水能力

栽植密度、枯落物类型、蓄积量、组分、分解程度的不同,会造成截持降水能力的差异^[64]。目前,多数研究采用风干枯落物浸泡法来实测枯落物的最大持水量、最大持水率和持水过程^[20-21]。研究结果表明枯落物在浸水前期(2 h 以内),吸水速度快,尤其在 0.5 h 以内;随浸泡时间延长吸水能力逐渐下降,24 h 基本达到饱和;枯落物持水量与浸泡时间表征为对数函数关系^[65]。人工降雨法实测的枯落物持水量也经历了从快速增加到缓慢增加直至趋于稳定的过程^[57]。

不同栽植密度的华北落叶松人工林枯落物最大持水率总体随栽植密度增大而增大,但存在一定的上限,密度在 1 600 株/hm² 持水率达到最大值^[55]。黄土高原地区主要林分类型枯枝落叶层吸水量呈现出华北落叶松>青杨(*Populus cathayana* Rehd.)>油松>樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.),这主要与不同林分叶片生物学特性和结构有关^[18]。枯落物持水量多少受蓄积量影响,据研究,宁南山区主要乔木和灌木群落枯枝落叶层最大持水率介于 177%~387%,乔木群落枯落物蓄积量和最大持水量均大于灌木群落^[21]。相同林龄条件下,针叶林由于分解速率慢,蓄积量大,其最大持水量>针阔混交林>阔叶林。从枯枝落叶层各组分来看,半分解层蓄积量、最大持水量和最大持水率均高于未分解层^[18]。

1.5 枯枝落叶层抗蚀抗冲能力

林地枯枝落叶层覆盖地表对减轻或消减土壤侵蚀具有决定作用。黄土高原地区林地土壤溅蚀量通

常发生在 7—8 月,约占全年总溅蚀量的 60% 以上。在土壤类型和坡度相同情景下,枯枝落叶层厚度、最大 30 min 雨强和林内降雨量是影响林内土壤溅蚀量的主要影响因素^[66]。吴钦孝等^[18]研究结果表明,随油松林和山杨林枯落物厚度增加,林地表土溅蚀量迅速减少,当枯落物厚度达到 2 cm 以上,溅蚀量基本趋近于 0。和山杨林相比,油松林随枯落物厚度的增加溅蚀量减少较慢,可能由于油松松针较山杨树叶地表覆盖度低、分解速率慢和叶片形态小等因素导致。林地枯枝落叶层有利于削减坡面径流流速和动能,提高土壤抗冲能力,研究发现林地枯落物随厚度增加抗冲能力明显增强,当枯枝落叶层厚度达到 2 cm 厚度时,即使在暴雨条件下,坡面土壤侵蚀总体得到控制^[44,46]。汪有科等^[45]研究表明黄土高原地区主要植被类型枯枝落叶层抗冲能力表征为油松>山杨>沙棘>刺槐。在覆盖 1 cm 厚度枯落物的油松、山杨、沙棘和刺槐林地上,冲刷 1 g 土壤所需消耗的能量比坡耕地分别增大 27.3,24.0,6.5,3.5 倍。

1.6 枯枝落叶层增加土壤入渗能力

枯枝落叶层能够有效增加土壤入渗,减少地表径流,发挥森林涵养水源的重要作用^[67-68]。其一,枯枝落叶层覆盖地表,减轻了降雨溅蚀力,保护表土结构和土壤孔隙,阻滞径流^[69],利于降雨入渗,增加土壤含水量;其二,枯枝落叶层参与土壤团粒结构形成,改善了表土结构和土壤物理性状,尤其是对 0—10 cm 土层的改善作用最为明显,提高了土壤表层的腐殖质层厚度^[44,64]。

林地表层土壤疏松,有机质含量高,土壤容重小,根系发育,总孔隙度和毛管孔隙度增加,透水性好,促进降雨就地迅速入渗,滞后雨季降水汇流过程,是改变黄土高原地区以超渗产流为主要侵蚀动力土壤侵蚀模式的关键地表结构组成^[18,53]。郭忠升等^[69]对宁南六盘山区主要林分土壤入渗特征的研究表明,林区样地土壤稳渗速率主要介于 7.14~22.32 mm/min,不同土地利用类型土壤平均稳渗速率表征为天然林>人工林>灌木林>草地>农地,其中未采伐林地>采伐林地,与刘向东等^[10]在六盘山区森林表层土壤的入渗规律基本一致。陈云明等^[40]对黄土丘陵沟壑区人工沙棘林地和荒坡土壤入渗能力的对比研究表明,人工沙棘林地在整个测定时段内土壤入渗速率均高于荒坡,尤其以入渗前期差异最大。

2 研究中存在的问题

目前,围绕黄土高原主要地貌类型区林地枯枝落叶层的生态水文功能开展的系列研究,对于深刻理解林地枯落物这一特殊层次在拦蓄地表径流,增加土壤入渗,

发挥水土保持作用等方面具有重要的理论和实践指导意义,有利于重视和保护枯落物层,提高林地经营管理水平,促进当地生态环境保护和高质量发展。

通过梳理文献,发现以往枯落物的研究过程中,仍然存在一些尚需研究的问题。例如,一些研究在估算森林恢复过程中的水土保持效益时,更多地关注和考虑了林冠层盖度,对森林垂直结构分层中非常重要的近地表枯枝落叶层重视程度不够。部分土壤侵蚀预报模型缺乏从林地枯枝落叶层盖度、厚度及其生态水文功能的角度来评估其水土保持功能。目前,黄土高原地区不同气候植被带枯枝落叶层水土保持功能的对比研究有所不足。枯枝落叶凋落速率观测方面,对植被快速恢复和生态环境持续改善的丘陵沟壑区和高塬沟壑区长期定位连续观测明显不够。枯落物持水能力方面,主要基于充分供水条件下即采用室内浸泡法来研究其最大持水量、吸水速率和模拟持水过程,计算出的结果和野外大雨量级(20~30 mm/24 h)降雨条件下枯落物的最大持水能力基本一致^[58]。缺乏对不同气候带典型树种在年内自然场次降雨事件和人工降雨变雨强情景下,野外坡面原位枯枝落叶层持水能力的对比分析。同时,对不同演替阶段主要树种枯枝落叶层保水保土效益的对比研究不足,缺乏植被演替过程上的分析。天然林和人工林枯枝落叶层生态水文功能的对比研究需要进一步加强,以明晰天然林和人工林枯落物水土保持功能的差异。另外,有关枯枝落叶层水文功能建立的大多为经验统计模型,物理过程模型存在空白^[70]。

3 进一步研究的科学问题

黄土高原地区近20 a来,随着植被迅速恢复和生态环境持续改善,河川径流和输沙量锐减^[7,71]。裸露荒坡林草植被建设,尤其是乔灌林地枯枝落叶这一明显而又关键的层次对减轻坡面土壤侵蚀,增加降雨就地入渗具有十分重要的意义^[6,18,57]。枯枝落叶层水文过程是森林水文过程中不可忽视的一环,理解林地坡面土壤入渗—产汇流过程,明确枯枝落叶层在林地恢复中的水土保持意义对提高林地质量,促进黄土高原生态保护高质量发展具有重大意义。基于目前枯枝落叶层生态水文功能研究中存在的一些问题,未来可以考虑从以下几个角度,瞄准科学问题开展进一步的研究。

3.1 开展长时间、多气候梯度、多地貌和多尺度研究

黄土高原从东南到西北跨越温带落叶阔叶林带、森林草原带、典型草原带和荒漠草原带4个陆地自然带,调查不同气候植被带主要植被类型枯落物厚度、盖度和蓄积量长时间序列动态变化特征,未来着眼于

不同地貌类型区、不同气候梯度带枯落物生态水文功能的对比研究,开展微地貌、多尺度(坡面尺度—小流域尺度—大流域尺度—区域尺度)的枯落物水文过程研究。土石山区作为重要的河源区,开展秦岭、子午岭、吕梁山和太行山等水源涵养区枯枝落叶层保持水土的研究工作有助于深刻理解林地枯落物在山区薄层土壤分布带的生态水文意义。

3.2 增强野外坡面长期观测和原位降雨试验研究

在黄土高原典型地貌类型区,依据气候植被带从南到北的梯度变化,分别选取区域有代表性的乔灌木林分坡面样地,定位观测枯枝落叶在年、季和月尺度上的凋落动态和蓄积量的时空变化特征并予以对比分析。考虑到枯枝落叶层在野外的自然结构状态不被破坏,基于此,分别开展自然场次降雨事件和人工模拟变雨强情景下不同林分枯落物类型、不同厚度枯落物在截留降雨、拦蓄地表径流和抗冲抗蚀能力的对比研究,以揭示和理解林地枯落物在保持水土中的特殊意义。加强枯枝落叶层在极端降雨条件下减少坡面地表径流的贡献率分析,有助于理解枯枝落叶层在森林水文过程中的重要作用。

3.3 加强天然林和人工林枯枝落叶层的对比研究

黄土高原地区天然林基本上为天然次生林,主要分布在子午岭、秦岭、黄龙山和六盘山等土石山区,而人工林主要指在历史时期为减少水土流失通过人工措施形成的森林。自1999年国家退耕还林政策实施以来新增加的林地以人工林为主,其中丘陵沟壑区和高塬沟壑区分布最多。在相似气候条件和地形因子条件下,开展天然次生林和人工林相同林分类型随林龄、林分密度变化下枯枝落叶层蓄积量、厚度、盖度特征及其生态水文功能的对比研究,对于厘清天然次生林和人工林枯落物在水土保持效益中的差异,指导人工林营林规划方案设计和造林地管理具有突出的实际指导意义。

3.4 物理模型建立和参数确定

枯枝落叶层作为近地表特殊的水土保持作用层,在林地水土保持效益中,发挥主导作用。枯枝落叶层作为联结土壤—植被—大气连续体中非常重要的薄层介质,尤其是枯枝落叶—腐殖质层这一复合层次在减轻土壤侵蚀、改善土壤质量和增加土壤入渗方面的综合效益日益受到更多的关注。开展黄土高原不同地貌类型区典型植被类型枯枝落叶层水文动态特征,建立具有物理意义的林地枯枝落叶层水土保持评价模型,对影响模型评估结果的主要参数,如枯落物种类、厚度、盖度、堆积状态、分解状态和叶片特征等进行确定和修正。

参考文献:

- [1] 唐克丽,张仲子,孔晓玲,等.黄土高原水土流失与土壤退化研究初报[J].环境科学,1984,55(6):5-10.
- [2] 刘晓燕.黄河近年水沙锐减成因[M].北京:科学出版社,2016.
- [3] 刘宝元,唐克丽,焦菊英,等.黄河水沙时空图谱[M].2版.北京:科学出版社,2019.
- [4] 王光谦,钟德钰,吴保生.黄河泥沙未来变化趋势[J].中国水利,2020(1):9-12.
- [5] 胡春宏,张晓明,赵阳.黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J].水科学进展,2020,31(5):725-733.
- [6] 朱显谟.黄土地区植被因素对于水土流失的影响[J].土壤学报,1960,8(2):110-121.
- [7] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [8] 穆兴民,赵广举,高鹏,等.黄土高原水沙变化新格局[M].北京:科学出版社,2019.
- [9] 余新晓.森林植被减弱降雨侵蚀能量的数理分析[J].水土保持学报,1988(2):24-30.
- [10] 刘向东,吴钦孝,苏宁虎.六盘山林区森林树冠截留、枯枝落叶层和土壤水文性质的研究[J].林业科学,1989,25(3):220-227.
- [11] 余冬立,刘营营,邵明安,等.黄土坡面不同植被冠层降雨截留模型模拟效果及适用性评价[J].农业工程学报,2012,28(16):115-120.
- [12] 吴钦孝,李勇.黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究:Ⅱ.草本植物根系提高表层土壤抗冲刷力的试验分析[J].水土保持学报,1990,4(1):11-16.
- [13] 刘国彬.黄土高原草地植被恢复与土壤抗冲性形成过程:Ⅱ.植被恢复不同阶段土壤抗冲性特征[J].水土保持研究,1997,4(5):111-121.
- [14] 李强.黄土丘陵区植物根系强化土壤抗冲性机理及固土效应[D].陕西杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2014.
- [15] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等.不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系[J].生态学报,2018,38(11):3979-3987.
- [16] 中野秀章.森林水文学[M].李云森,译.北京:中国林业出版社,1983.
- [17] 杨吉华,张永涛,李红云,等.不同林分枯落物的持水性能及对表层土壤理化性状的影响[J].水土保持学报,2003,17(2):141-144.
- [18] 吴钦孝,陈云民,刘向东,等.森林保持水土机理及功能调控技术[M].北京:科学出版社,2005.
- [19] 赵鸿雁,吴钦孝,刘向东.山杨枯枝落叶的水文水保作用研究[J].林业科学,1994,30(2):176-180.
- [20] 莫菲,于澎涛,王彦辉,等.六盘山华北落叶松林和红桦林枯落物持水特征及其截持降雨过程[J].生态学报,2009,29(6):2868-2876.
- [21] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等.六盘山主要森林类型枯落物的水文功能[J].北京林业大学学报,2009,31(1):91-99.
- [22] 王忠禹,刘国彬,王兵,等.黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性[J].生态学报,2019,39(7):2416-2425.
- [23] Sun J, Yu X, Wang H, et al. Effects of forest structure on hydrological processes in China[J]. Journal of Hydrology, 2018,561:187-199.
- [24] Helvey J D, Patric J H. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States[J]. Water Resources Research, 1965,1(2):193-206.
- [25] Putuhena W M, Cordery I. Estimation of interception capacity of the forest floor[J]. Journal of Hydrology, 1996,180:283-299.
- [26] Beschta R L. Forest hydrology in the Pacific Northwest: additional research needs [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998,34(4):729-741.
- [27] Onda Y, Yamamoto T. The mechanism for the infiltration lowering on soils with litter coverage[J]. Journal of the Japanese Forestry Society, 1998,80(4):302-310.
- [28] Gunadi B, Verhoef H A, Bedaux J J M. Seasonal dynamics of decomposition of coniferous leaf litter in a forest plantation(*Pinus merkusii*) in Central Java, Indonesia[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998,30(7):845-852.
- [29] 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.
- [30] Liu C J, Ilvesniemi H, Berg B, et al. Aboveground litterfall in Eurasian forests[J]. Journal of Forestry Research, 2003,14(1):27-34.
- [31] Sato Y, Kumagai T, 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.
- [32] Sharafatmandrad M, Mesdaghi M, Bahremand A, et al. The role of litter in rainfall interception and maintenance of superficial soil water content in an arid rangeland in Khahr National Park in south-eastern Iran [J]. Arid Soil Research & Rehabilitation, 2010,24(3):213-222.
- [33] Li X, Niu J Z, Xie B Y. Study on hydrological functions of litter layers in North China [J]. Plos One, 2013,8(7):e70328.
- [34] Mie G, Koichiro K. Effect of the litter layer on runoff and evapotranspiration using the paired watershed method[J]. Journal of Forest Research, 2016,21(6):306-313.
- [35] Du J, Niu J, Gao Z, et al. Effects of rainfall intensity and slope on interception and precipitation partitioning by forest litter layer[J]. Catena, 2019,172:711-718.

- [36] Xia L, Song X, Fu N, et al. Effects of forest litter cover on hydrological response of hillslopes in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2019,181:104076.
- [37] Wang L, Zhang G, Zhu P, et al. Comparison of the effects of litter covering and incorporation on infiltration and soil erosion under simulated rainfall [J]. *Hydrological Processes*, 2020,34:2911-2912.
- [38] Liu J X, Li P P, Liu G B, et al. Quantifying the effects of plant litter in the topsoil on the soil detachment process by overland flow in typical grasslands of the Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2020,34(9):2076-2087.
- [39] 栾莉莉,张光辉,孙龙,等.黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J].*中国水土保持科学*,2015,13(6):48-53.
- [40] 陈云明,陈永勤.人工沙棘林水文水土保持作用机理研究[J].*西北植物学报*,2003,23(8):1357-1361.
- [41] 高迪,郭建斌,王彦辉,等.宁夏六盘山不同林龄华北落叶松人工林枯落物水文效应[J].*林业科学研究*,2019,32(4):26-32.
- [42] 赵鸿雁,刘向东,吴钦孝.枯枝落叶层阻延径流速度研究[J].*中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊:森林水文生态与水土保持林效益研究专集*,1991(2):64-70.
- [43] 张冀,汪有科,吴钦孝.黄土高原几种主要森林类型的凋落及其过程比较研究[J].*水土保持学报*,2001,15(5):91-94.
- [44] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究[J].*林业科学*,2003,39(1):168-172.
- [45] 汪有科,吴钦孝,赵鸿雁,等.林地枯落物抗冲试验研究[J].*中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊:森林水文生态与水土保持林效益研究专集*,1991(2):57-63.
- [46] 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].*土壤侵蚀与水土保持学报*,1998,4(2):3-5.
- [47] 程积民,李香兰.子午岭植被类型特征与枯枝落叶层保水作用的研究[J].*武汉植物学研究*,1992,10(1):55-64.
- [48] 胡秀娟,程积民,万惠娥.子午岭林区辽东栎、油松、柴松群落特征及其枯枝落叶层水文效应研究[J].*水土保持通报*,2010,30(4):46-50.
- [49] 魏天兴,余新晓,朱金兆.山西西南部黄土区林地枯落物截持降水的研究[J].*北京林业大学学报*,1998,20(6):1-6.
- [50] 张洪江,北原曜,远藤泰造.几种林木枯落物对糙率系数 n 值的影响[J].*水土保持学报*,1994,8(4):4-10.
- [51] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区3种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J].*水土保持学报*,2018,32(2):357-363,371.
- [52] 景贵阳.陇东黄土高原人工刺槐林枯落物层和土壤层生态水文功能研究[D].兰州:甘肃农业大学,2017.
- [53] 朱金兆,刘建军,朱清科,等.森林凋落物层水文生态功能研究[J].*北京林业大学学报*,2002,24(5/6):30-34.
- [54] 吴钦孝,刘向东,赵鸿雁.油松、山杨林枯枝落叶层蓄积动态的研究[J].*中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊:森林水文生态与水土保持林效益研究专集*,1991(2):51-56.
- [55] 刘宇,郭建斌,王彦辉,等.宁夏六盘山不同密度华北落叶松人工林枯落物水文效应[J].*北京林业大学学报*,2016,38(8):36-44.
- [56] Kosugi K, Mori K, Yasuda H. An inverse modeling approach for the characterization of unsaturated water flow in an organic forest floor[J]. *Journal of Hydrology*, 2001,246:96-108.
- [57] 余新晓,史宇,王贺年.森林生态系统水文过程与功能[M].北京:科学出版社,2013.
- [58] Richard Lee.森林水文学[M].张建列,译.哈尔滨:东北林业大学出版社,1984.
- [59] 马雪华.森林水文学[M].北京:中国林业出版社,1993.
- [60] 朱显谟.黄土高原的形成与整治对策[J].*水土保持通报*,1991,11(1):1-8,11.
- [61] 吴钦孝,赵鸿雁.黄土高原森林水文生态效应和林草适宜覆盖指标[J].*水土保持通报*,2000,20(5):32-34.
- [62] 吴长文,王礼先.林地坡面的水动力学特性及其阻延地表径流的研究[J].*水土保持学报*,1995,9(2):32-38.
- [63] 张雷燕,刘常富,王彦辉,等.宁夏六盘山南侧森林枯落物及土壤的水文生态功能研究[J].*林业科学研究*,2007,20(1):15-20.
- [64] 臧廷亮,张金池.森林枯落物的蓄水保土功能[J].*南京林业大学学报:自然科学版*,1999,22(2):81-84.
- [65] 杜捷.北京山区森林枯落物层水文过程模拟研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [66] 韩冰,吴钦孝,刘向东,等.山杨林地枯落物层对溅蚀的影响[J].*植物资源与环境*,1994,3(4):5-9.
- [67] 杨澄,党坤良,刘建军.麻栎人工林水源涵养效能研究[J].*西北林学院学报*,1997,12(2):15-19.
- [68] Liu J B, Gao G Y, Wang S, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018,28(1):59-78.
- [69] 郭忠升,吴钦孝,任锁堂.森林植被对土壤入渗速率的影响[J].*陕西林业科技*,1996(3):27-31.
- [70] 赵艳云,程积民,万惠娥,等.林地枯落物层水文特征研究进展[J].*中国水土保持科学*,2007,5(2):130-134.
- [71] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].*水利水电技术*,2020,51(1):1-11.