

# 晋西黄土区典型林分枯落物层水文生态特性研究

马晓至<sup>1</sup>, 毕华兴<sup>1,2,3,4,5,6</sup>, 王珊珊<sup>1</sup>, 崔艳红<sup>1</sup>, 赵丹阳<sup>1</sup>, 云慧雅<sup>1</sup>, 侯贵荣<sup>1</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,

北京 100083;3.水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学),北京 100083;

4.北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学),北京 100083;5.林业生态工程教育部工程研究中心

(北京林业大学),北京 100083;6.北京林果业生态环境功能提升协同创新中心,北京 102206)

**摘要:** 选择山杨栎类次生林(以下简称次生林)、刺槐林、侧柏林、油松林为研究对象,通过样地调查,结合室内浸泡方法,对比分析枯落物(未分解层、半分解层)的水文特征指标,研究典型林分枯落物层水文生态特性。结果表明:(1)枯落物厚度为3.93~4.95 cm,刺槐林最大,油松林最小;蓄积量为次生林最大(19.28 t/hm<sup>2</sup>),侧柏林(18.03 t/hm<sup>2</sup>)和刺槐林(17.57 t/hm<sup>2</sup>)次之,油松林最小(14.73 t/hm<sup>2</sup>),未分解层蓄积量小于半分解层。(2)枯落物最大持水量(率)为30.92~61.31 t/hm<sup>2</sup>(197%~320%),次生林最大,依次为刺槐林、侧柏林,最小为油松林。(3)枯落物有效拦蓄存在显著差异( $P>0.05$ ),表现为次生林(31.29 t/hm<sup>2</sup>)>刺槐(22.20 t/hm<sup>2</sup>)>侧柏(18.19 t/hm<sup>2</sup>)>油松(13.94 t/hm<sup>2</sup>),有效拦蓄率为107%~173%。(4)在浸水2 h内,枯落物持水量和吸水速率变化以次生林与刺槐林最为迅速,半分解层较未分解层变化迅速;持水过程中,两者与时间分别呈对数函数( $R^2>0.89$ )和幂函数关系( $R^2>0.99$ )。在4种林地中,次生林林下枯落物水文生态潜力最优,油松纯林最差,表现为次生林>刺槐>侧柏>油松。刺槐是除次生林外的3种人工林中最优林种。建议研究区内合理优化恢复树种配置,以提高水文生态功能。

**关键词:** 典型林分; 枯落物; 最大持水量; 有效拦蓄量; 水文生态

中图分类号:S715.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)06-0077-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.012

## Hydrological and Ecological Characteristics of Typical Stand Litter Layer in the Loess Region of Western Shanxi Province

MA Xiaozhi<sup>1</sup>, BI Huaxing<sup>1,2,3,4,5,6</sup>, WANG Shanshan<sup>1</sup>, CUI Yanhong<sup>1</sup>,

ZHAO Danyang<sup>1</sup>, YUN Huiya<sup>1</sup>, HOU Guirong<sup>1</sup>

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Ji County Station,

Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing 100083; 3.Key Laboratory of Soil and Water

Conservation, Forestry Administration (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 4.Beijing Engineering

Research Center of Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083; 5.Engineering

Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education (Beijing Forestry University), Beijing 100083;

6.Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing 102206)

**Abstract:** In this paper, the secondary forests of *Populus* and *Quercus* (hereinafter referred to as secondary forests), *Robinia pseudoacacia* forest, *Platycladus orientalis* forest, and *Pinus tabulaeformis* forest were selected as the research objects. Through sample survey and indoor immersion method, to compare and analyze the hydrological characteristics of litter (undecomposed layer, semi-decomposed layer), and study the hydrological and ecological characteristics of litter layer in typical forest stands. The results showed that: (1) The thickness of litter is 3.93 to 4.95 cm. The largest was *R. pseudoacacia* forest, and the smallest was *P. tabulaeformis* forest. The largest volume was secondary forest (19.28 t/hm<sup>2</sup>), followed by *P. orientalis* forest (18.03 t/hm<sup>2</sup>) and *R. pseudoacacia* forest (17.57 t/hm<sup>2</sup>), the smallest was *P. tabulaeformis* forest (14.73 t/hm<sup>2</sup>). The accumulation of undecomposed layers was less than that of semi-decomposed layers. (2) The maximum water holding capacity

收稿日期:2020-04-10

资助项目:国家重点研发计划项目“黄土残塬沟壑区水土保持型景观优化与特色林产业技术及示范”(2016YFC0501704);国家自然科学基金面上项目“晋西黄土区水土保持林分结构与功能耦合机理研究”(31971725);科技创新服务能力建设—科研基地建设—林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011协同创新中心)项目(PXM2019\_014207\_000099)

第一作者:马晓至(1996—),女,硕士研究生,主要从事林业生态工程研究。E-mail:18811798891@163.com

通信作者:毕华兴(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail:bhx@bjfu.edu.cn

(rate) of litter was 30.92 to 61.31 t/hm<sup>2</sup> (197% to 320%), the secondary forest was the largest, followed by *R. pseudoacacia* forest, *P. orientalis* forest, and the smallest was *P. tabulaeformis* forest. (3) There was a significant difference in effective storage of litters ( $P > 0.05$ ), which was represented by secondary forest (31.29 t/hm<sup>2</sup>) > *R. pseudoacacia* (22.20 t/hm<sup>2</sup>) > *P. orientalis* (18.19 t/hm<sup>2</sup>) > *P. tabulaeformis* (13.94 t/hm<sup>2</sup>). The effective storage rate was 107% to 173%. (4) Within 2 hours of immersion, the water holding capacity and water absorption rate of litter in secondary forest and black locust forest changed most rapidly. The semi-decomposed layer changed faster than the undecomposed layer. In the process of holding water, the two had logarithmic function ( $R^2 > 0.89$ ) and power function relationship ( $R^2 > 0.99$ ) with time. Among the four types of forest land, the hydrological potential of litter in secondary forests was the best, and that of pure *P. tabulaeformis* forest was the worst. The potential of hydrological characteristics was secondary forest > *R. pseudoacacia* > *P. orientalis* > *P. tabulaeformis*. *R. pseudoacacia* was the best forest species among the three plantations except secondary forest. It is recommended to reasonably optimize the restoration of tree species allocation in the study area to improve hydrological and ecological functions.

**Keywords:** typical stand; litter; maximum water holding capacity; effective storage capacity; hydrological ecology

森林生态系统垂直结构涵盖林冠层、枯落物层和土壤层<sup>[1-2]</sup>。枯落物作为植物群落水文效应的第二活动层,凋落过程是生态系统中物质循环和能量流动的重要环节<sup>[3]</sup>,在保持水土和涵养水源方面具有非常重要的意义<sup>[2]</sup>。枯落物层具有较好的持水能力及透水性,枯落物的分解也能为林木提供养分<sup>[4]</sup>。同时,枯落物覆盖能改善降雨垂直分配,机械保护森林土壤,避免雨滴直接击溅,吸收部分降雨,在一定程度上转化为地表径流,减少表层土壤流失<sup>[5-7]</sup>。枯落物的水文生态功能主要体现在对降雨的吸收作用上,这与蓄积量、分解状况、自然含水量、气候气象、人为活动等多种因子有关<sup>[8-10]</sup>。

基于现今较为完善的系统理论基础,研究枯落物持水保水、保护土壤等特性,众多学者<sup>[3,11]</sup>已有较成熟成果。林地林分结构、树木生长情况、枯落物采集时间等众多因素共同影响枯落物蓄积量,张雷燕等<sup>[12]</sup>研究得出,有效拦蓄量与蓄积量的大小关系密切;张祎等<sup>[13]</sup>认为,枯落物层一般最大可吸持相当于干重 2~4 倍的水量;刘宇等<sup>[14]</sup>研究得出,不同人工林恢复树种的枯落物持水性能有明显区别;枯落物的分解程度也会进一步影响枯落物持水特性。王云琦等<sup>[14]</sup>研究得出,枯落物对于一场降雨的拦蓄持水作用主要体现在前 2 h 内。晋西黄土区属于干旱半干旱地区,自然降水少,地表植被覆被稀少,水土流失较为严重<sup>[15]</sup>,枯落物对于降雨的拦蓄,能够涵养水源、保护土壤,改善水土流失情况<sup>[16-17]</sup>。20 世纪 90 年代起,黄土高原退耕还林工程有效推进,植被覆被逐渐恢复,栽种人工树种,如刺槐、油松等<sup>[11,18]</sup>。有关黄土区枯落物研究的基本理论体系已经较为完善,但晋西黄土区因其地形差异较大,不同地区所选取的恢复

树种不同,林分结构乔灌木比例组成不同,其所形成的群落结构存在差异<sup>[19]</sup>,群落内水热环境也不同,影响着林下枯落物的物质组成、蓄积量和分解程度,进而不同林分林下枯落物持水量、持水速率和持水性能均不同,导致典型林分枯落物的水文生态功能也存在较大区别,因地制宜的研究不同树种林下枯落物的水文响应,对于今后生态恢复和保护具有意义<sup>[19-20]</sup>。

充分研讨前人研究,众多学者集中于直接比较不同林地的枯落物水文研究,未考虑研究区不同林分类型所构成的地表群落结构影响,植被覆盖度的高低在极大程度上会影响地表枯落物的覆被情况,进而影响枯落物的生态水文功能。本文引入同一区间高植被覆盖度为基础限定,选取晋西黄土区的次生林、刺槐、油松、侧柏为代表的典型植被类型为研究对象,采集未(半)分解层枯落物,研究各层水文特征指标,比较典型林分枯落物各层的持水能力,探讨水文生态特性差异,进一步对比研讨黄土高原植被恢复适宜树种,为充分发挥水土保持功能、植被优化配置提供参考,为黄土沟壑区生态恢复和重建的树种选择提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于晋西黄土残塬沟壑区山西省临汾市吉县蔡家川流域(110°39'45"—110°47'45"E, 36°14'27"—36°18'23"N),位于黄河支流,地势西高东低,典型黄土残塬沟壑区,黄土母质,半旱生落叶阔叶林与森林草原地带<sup>[11]</sup>,流域面积 40 km<sup>2</sup>,海拔 900~1 592 m。具有典型黄土高原气候特征,暖温带大陆性气候,年均降水量 577 mm,年均温 10 ℃。流域内森林覆盖率 39%,流域上游主要为山杨(*Populus davidiana*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)等混生或伴生天然次生林,中下游主要为乔木

树种人工防护林,主要树种为刺槐(*Robinia pseud-acacia* Linn.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière.)等,灌木层主要由黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、丁香(*Syzygium aromaticum* (L.) Merr. Et Perry)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata* L.)等组成,草本层为以艾蒿(*Artemisia argyi* H. Lév. & Vaniot)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng)、萝藦(*Metaplexis japonica* (Thunb.) Makino.)等为主的旱生植物。

## 2 研究方法

基于对研究区内各树种林地生长及分布状况充

表1 样地林分基本概况

样地 编号	林分 类型	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	树高/ m	胸径/ cm	冠幅/ m	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	覆盖度 (NDVI)	乔灌组成	灌木 盖度
1	次生林	1050	36	阴坡	11.8	12.9	2.1	2400	0.75	山杨、辽东栎、杠柳、胡枝子等	0.79
2	油松	1180	29	阴坡	7.3	13.6	2.3	1200	0.70	油松、艾蒿、铁杆蒿等	0.58
3	侧柏	1180	24	半阳坡	7.9	13.5	1.6	1400	0.72	侧柏、丁香、胡枝子等	0.63
4	刺槐	1140	25	阳坡	9.3	11.9	1.3	1500	0.73	刺槐、黄刺玫、杠柳等	0.71

### 2.1 枯落物蓄积量和持水能力测定

在样地内,随机布设3个30 cm×30 cm小样方,经钢尺测量未分解层、半分解层厚度,不破坏现有结构,用档案袋带回,室内称质量作为风干前鲜重,调整烘箱温度为85℃,连续烘干至质量不变,此时为枯枝落叶干重。

通过室内浸泡24 h法<sup>[20]</sup>测定各层枯落物的水文生态持水能力,将烘干后的枯落物放置于尼龙网袋,浸泡在水中,分别在10 min,20 min,30 min,40 min,50 min,1 h,1.5 h,2 h,4 h,6 h,12 h,24 h时测定持水量,悬空尼龙袋不滴水后迅速称取重量,计算持水量和吸水速率。最大持水量为枯落物最终恒定不变的持水量数值。研究有效拦蓄量反映枯落物的实际拦蓄能力(系数0.85)。公式为:

$$M = G_0 / S \times 100$$

$$R_d = (G_d - G_0) / G_0 \times 100\%$$

$$R_{kmax} = (G_{24} - G_0) / G_0 \times 100\%$$

$$W_{kmax} = R_{kmax} \times M$$

$$R_s = 0.85(R_{kmax} - R_d) - R_d$$

$$W_s = R_s \times M$$

$$R_i = (G_i - G_0) / G_0 \times 100\%$$

$$W_i = R_i \times M$$

$$V_i = W_i / t$$

式中: $M$ 为典型林分枯落物蓄积量(t/hm<sup>2</sup>); $G_0$ 为该次取样干重(g); $S$ 为取样面积(cm<sup>2</sup>),即900 cm<sup>2</sup>;  $G_d$ 为取样自然状态含水量(g); $G_{24}$ 为取样连续浸水24 h的持

分调查,结合2019年7月流域的Landsat8卫星30 m全波段影像,采用EVNI软件进行辐射定标、裁剪、大气校正、去云处理等,应用归一化植被指数法,提取NDVI指数作为植被覆盖度反映值。在山西吉县蔡家川流域内,选取同一植被覆盖度(NDVI指数为0.70~0.75)的生境相近的次生林、刺槐、油松、侧柏4种林地布设标准样地,其中次生林主要树种为山杨和辽东栎。NDVI指数影像分辨率为30 m×30 m,选取代表性样地,实地样方面积与其相统一。调查海拔、坡度、坡向等立地特征,进行基本林分调查,每木检尺测定各样地内树高、胸径、冠幅、密度等林分基本指标,调查乔灌组成及灌木盖度等(表1)。

水量(g); $R_d$ 为取样自然含水率(%); $R_{kmax}$ 为取样最大持水率(%); $W_{kmax}$ 为单位面积内最大持水量(t/hm<sup>2</sup>); $R_s$ 为取样有效拦蓄率(%); $W_s$ 为单位面积内有效拦蓄量(t/hm<sup>2</sup>); $t$ 为取样持续浸水时间(h); $i$ 为某时刻; $G_i$ 、 $R_i$ 、 $W_i$ 、 $V_i$ 为某时刻取样持水量(g)、持水率(%)、单位面积内持水量(t/hm<sup>2</sup>)、吸水速率(t/(hm<sup>2</sup>·h))。

### 2.2 数据处理

下载Landsat8(30 m×30 m)影像,使用ENVI、ArcGIS校正,生成NDVI值,结合Excel、Origin 9.0、SPSS 20.0软件作数据分析,采取单因素方差分析(One-way ANOVA)、多重比较法(LSD)分析各项指标的显著性差异情况<sup>[11,20]</sup>,分析浸水24 h内动态变化和持水量(率)、吸水速率与时间关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 典型林分林下枯落物厚度与蓄积量

同一时间同一地区内,典型林分林下枯落物蓄积量存在明显差异,典型林分枯落物层基础特征见表2。枯落物各层蓄积量与厚度呈正相关,也存在特例,如次生林枯落物厚度略低于刺槐林,但蓄积量较高。刺槐林枯落物厚度最大(4.95 cm),油松林厚度最小(3.93 cm),次生林、侧柏林介于两者之间。4种林地中,次生林蓄积量最大,即白杨与辽东栎混交林(19.28 t/hm<sup>2</sup>),其次是侧柏(18.03 t/hm<sup>2</sup>)和刺槐纯林(17.57 t/hm<sup>2</sup>),油松纯林最小(14.73 t/hm<sup>2</sup>)。4种林地的未分解层蓄积量均小于半分解层,刺槐未分解层蓄积量占总蓄积量比例最大,为36.9%,次生林(36.79%)与油松林

(32.74%)次之,侧柏林最小(31.39%),半分解层蓄积量比例表现相反。由方差分析,油松林枯落物蓄积

量与其他林分差异性显著( $P < 0.05$ ),而次生林、刺槐、侧柏蓄积量差异不显著( $P < 0.05$ )。

表 2 典型林分枯落物层特征

林分类型	枯落物厚度/cm			枯落物蓄积量				总蓄量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )
	未分解层	半分解层	总厚度	未分解层		半分解层		
				蓄积量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	比例/%	蓄积量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	比例/%	
次生林	2.11±0.57a	2.69±1.36a	4.80±0.85a	6.98±2.46a	36.79	12.31±3.35a	63.21	19.28±4.40a
油松	1.57±0.60b	2.36±1.20a	3.93±1.79a	4.82±1.68b	32.74	9.90±3.78b	67.26	14.73±5.44b
侧柏	1.80±0.61b	2.83±0.42a	4.63±0.81a	5.85±1.52a	31.39	12.18±3.90a	68.61	18.03±4.28a
刺槐	2.40±0.36a	2.55±0.93a	4.95±1.26a	6.51±1.74a	36.90	11.14±3.14a	63.10	17.57±4.28a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一林分类型间差异显著( $P < 0.05$ )。

### 3.2 典型林分林下枯落物最大持水量(率)

森林生态系统中枯落物层能够拦蓄降雨、储水保土,将有限降雨储存以供树木生长吸收利用,枯落物层持水性能大小是反映生态水文功能的重要指标<sup>[14,21]</sup>。典型林分枯落物最大持水量(率)见图 1。最大持水量最高为次生林( $61.31 t/hm^2$ ),其次为刺槐( $54.03 t/hm^2$ )与侧柏( $42.36 t/hm^2$ ),油松最低( $30.92 t/hm^2$ ),未分解层、半分解层与枯落物层表现一致。由图 1b 和图 1c 可知,4 种林地最大持水率(深)变化依次为次生林(320%, 6.1 mm) > 刺槐(299%, 5.4 mm) > 侧柏(224%, 4.2 mm) > 油松(197%, 3.1 mm)。经 LSD 分析,于最大持水量研究中,次生林、刺槐、侧柏均与油松有显著差异( $P < 0.05$ );于最大持水率研究中,次生林与刺槐无显著相关,但与侧柏及油松存在显著差异( $P < 0.05$ )。综上,次生林及刺槐在最大持水性能上较侧柏与油松林存在显著差异,其持水能力差异较大。典型林分枯落物半分解层最大持水指标高于未分解层,这与张东等<sup>[15]</sup>和白英辰等<sup>[22]</sup>研究结果一致。

### 3.3 典型林分林下枯落物有效拦蓄量(率)

研究有效拦蓄指标可反映典型林分枯落物层对于自然状态下降雨的真实拦蓄特性<sup>[23]</sup>,林地枯落物有效拦蓄量(率、深)见图 2。4 种林地枯落物有效拦蓄能力不同,在各林地之间差异较为显著,有效拦蓄量变化为  $13.94 \sim 31.29 t/hm^2$ ,有效拦蓄率变化为 107%~173%,有效拦蓄深为 3.13~1.40 mm。有效拦蓄量次生林( $31.29 t/hm^2$ ) > 刺槐( $22.20 t/hm^2$ ) > 侧柏( $18.19 t/hm^2$ ) > 油松( $13.94 t/hm^2$ ),未分解层与半分解层有效拦蓄量与枯落物层表现一致。由图 2b 可知,有效拦蓄率与有效拦蓄量表现一致,次生林均远大于其他 3 种林地,为 1.73 倍自身质量的降雨量,油松均最小,为 1 倍降雨量。由图 2c 可知,次生林可有效拦蓄深 3.12 mm 降雨,刺槐次之,为 2.22 mm 降雨,油松最小,为 1.40 mm 降雨。半分解层有效拦蓄量普遍高于未分解层,但有效拦蓄率较低。研

究可知,半分解层已被部分分解,结构破碎,蓄积量大,未分解层结构完整,半分解层有效拦蓄量大,但有效拦蓄率低。对 4 种林地未分解层、半分解层、枯落物层进行 LSD 多重比较( $P < 0.05$ ),次生林的有效拦蓄显著差异于 3 种人工林种,但于人工林中比较,刺槐有效拦蓄显著差异于另 2 类林地。

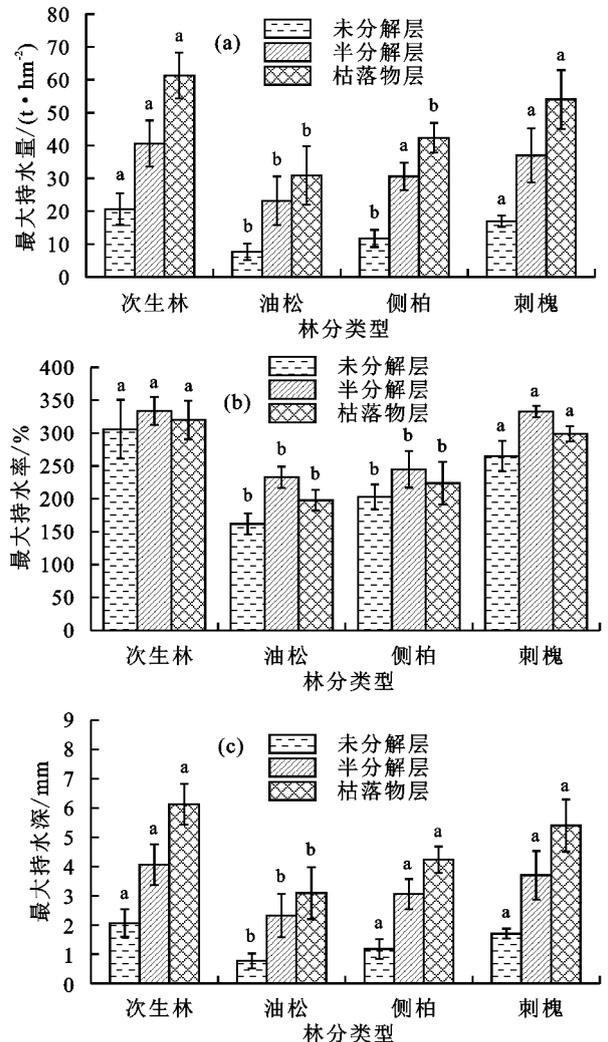


图 1 林地枯落物最大持水量、持水率和持水深

### 3.4 典型林分林下枯落物持水过程

枯落物持水量、持水率、吸水速率随浸水时间的变化趋势见图 3、图 4、图 5。枯落物未分解层、半分

解层均在室内浸水 2 h 内(即自然条件降雨刚开始阶段),持水量(率)曲线随时间迅速上升,速率在刚放入水中初始时最大,斜率迅速下降,呈逆“J”形,体现为枯落物正迅速吸水,次生林和刺槐增加较快,迅速增至高点,2 h 后各曲线增加速度明显减缓,10 h 持水过程变化趋于平缓,10~24 h 内持水量(率)几乎不再变化,速率接近于 0,可判定持水量达到饱和态,这与刘宇等<sup>[14]</sup>对林下枯落物连续持水过程水文特性研究结果一致。

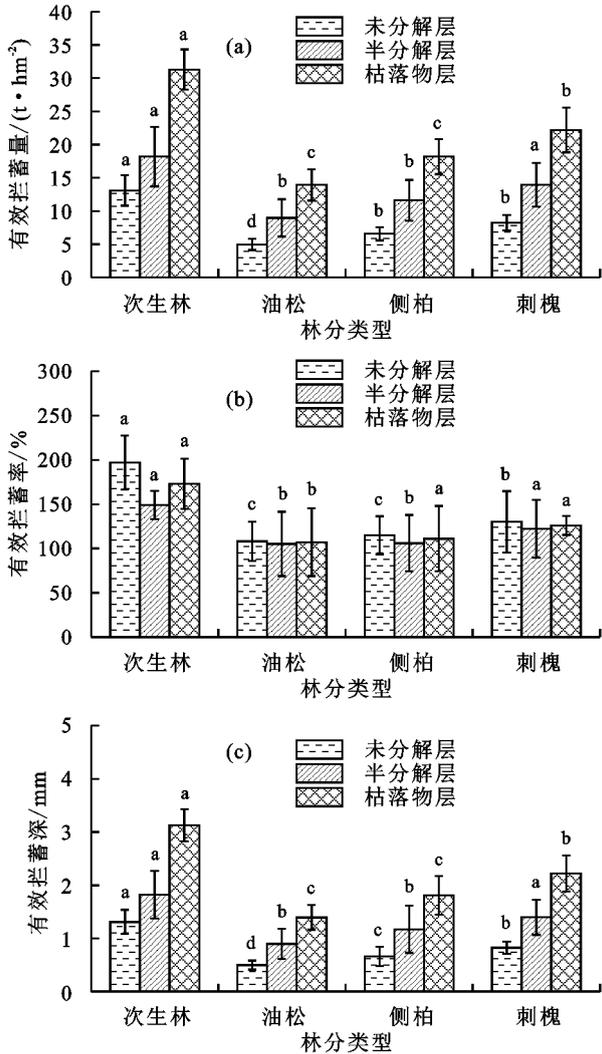


图 2 林地枯落物有效拦蓄量、拦蓄率和拦蓄深

比较典型林分枯落物持水过程及吸水速率变化,在前 0.5 h 内,次生林持水量(率)最迅速,吸水速率最大,次生林持水量迅速上升至最高,刺槐、侧柏次之,油松林吸水速率最小,最终持水量最低。不同典型林分间持水过程相差甚大,结合上文对于有效拦蓄研究分析,次生林在 4 种林地类型中持水能力最优,油松持水能力最低,刺槐为 3 种人工林中最好持水性能。

比较不同层次枯落物持水过程(图 3、图 4、图 5)可知,在浸入水中前 0.5 h,半分解层比未分解层吸水更快达平稳状态,观察曲线在 4~6 h 时,半分解层枯

枝落叶持水量基本不再变动,未分解层时间略晚,于 6~8 h 时几乎维持不变。

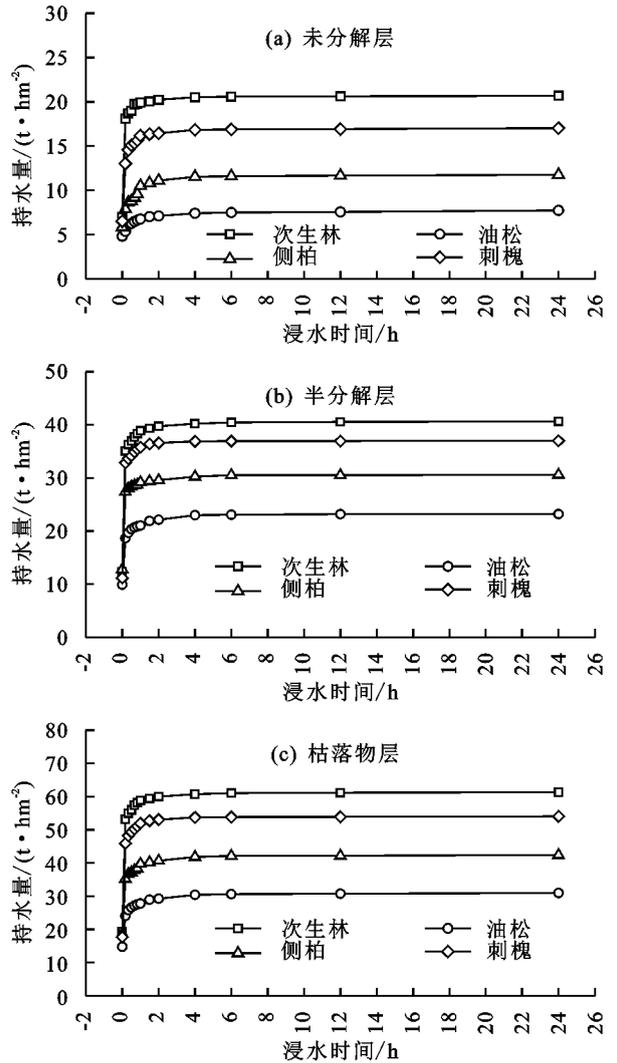


图 3 枯落物持水量随浸水时间的变化

对次生林、油松林、侧柏林、刺槐林林下各层持水量、吸水速率与浸水时间的关系进行回归分析发现,其与浸水时段分别存在对数函数( $R^2 > 0.89$ )和幂函数关系( $R^2 > 0.99$ ),建立方程见表 3,与韩路等<sup>[24]</sup>研究所得结论相同。

表 3 典型林分枯落物持水量、吸水速率与浸水时间关系式

林分类型	枯落物层	持水量		吸水速率	
		关系式	$R^2$	关系式	$R^2$
次生林	未分解	$y = 0.508 \ln(t) + 19.58$	0.91	$v = 19.605t^{-0.976}$	0.99
	半分解	$y = 1.141 \ln(t) + 38.14$	0.93	$v = 38.188t^{-0.972}$	0.99
油松	未分解	$y = 0.449 \ln(t) + 6.61$	0.91	$v = 6.584t^{-0.934}$	0.99
	半分解	$y = 0.965 \ln(t) + 21.01$	0.95	$v = 21.014t^{-0.956}$	0.99
侧柏	未分解	$y = 0.861 \ln(t) + 9.83$	0.93	$v = 9.768t^{-0.915}$	0.99
	半分解	$y = 0.700 \ln(t) + 28.93$	0.96	$v = 28.981t^{-0.978}$	0.99
刺槐	未分解	$y = 0.714 \ln(t) + 15.51$	0.89	$v = 15.496t^{-0.955}$	0.99
	半分解	$y = 1.705 \ln(t) + 35.97$	0.94	$v = 35.257t^{-0.977}$	0.99

注:  $y$  为枯落物单位面积持水量( $t/hm^2$ );  $t$  为浸水时间(h);  $v$  为枯落物单位面积吸水速率( $t/(hm^2 \cdot h)$ )。

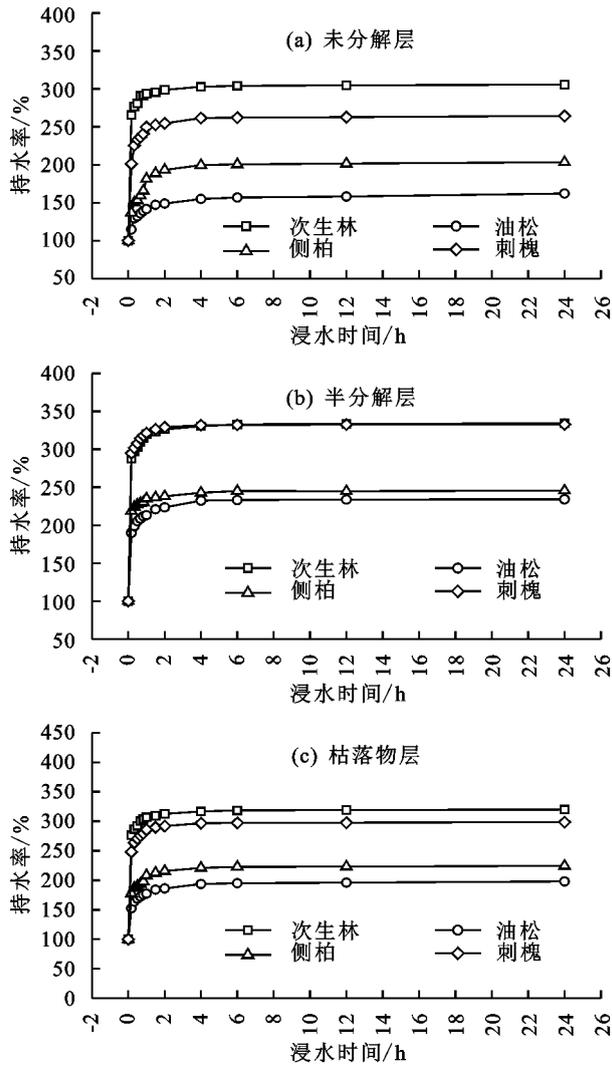


图 4 枯落物持水率随浸水时间的变化

## 4 讨论

通过对典型林分枯落物层的水文指标研究得出, 典型林分蓄积量、最大持水、有效拦蓄的表现不同, 进而得出 4 种典型林分枯落物层的生态水文潜力存在差异。本研究发现, 4 种林分枯落物蓄积量差异较大, 次生林的最大持水指标显著高于其他林分, 流域内次生林为天然林, 主要树种为山杨和辽东栎, 属于落叶阔叶林, 密度大, 叶片大, 生长较旺盛, 林下水热条件适宜, 枯落物堆积较为紧实, 孔隙度较小, 质量相对较大, 因此蓄积量最大。同时, 微生物活动活跃, 有利于枯枝落叶分解, 最大持水量(率)较高<sup>[15]</sup>。进一步讨论 3 种人工林, 刺槐林持水性明显高于侧柏与油松, 刺槐林为落叶阔叶林, 且郁闭度较好, 蓄积量较大, 较细小且蓬松柔软, 水热条件较好, 分解较快。油松、侧柏林为针叶林, 叶片细长, 林木间隙大, 蓄积量较少<sup>[25]</sup>; 且落叶含有大量油脂, 不易被分解, 针叶相互交错形成密实垫状结构, 这可能是油松持水能力较低的原因之一。典型林分枯落物有效拦蓄存在差异, 次生林为 4 种林地有效拦蓄最优, 而刺槐林是除次生

林外的人工林中, 有效拦蓄最好的林种, 这为晋西黄土区人工林选择树种提供了参考依据。

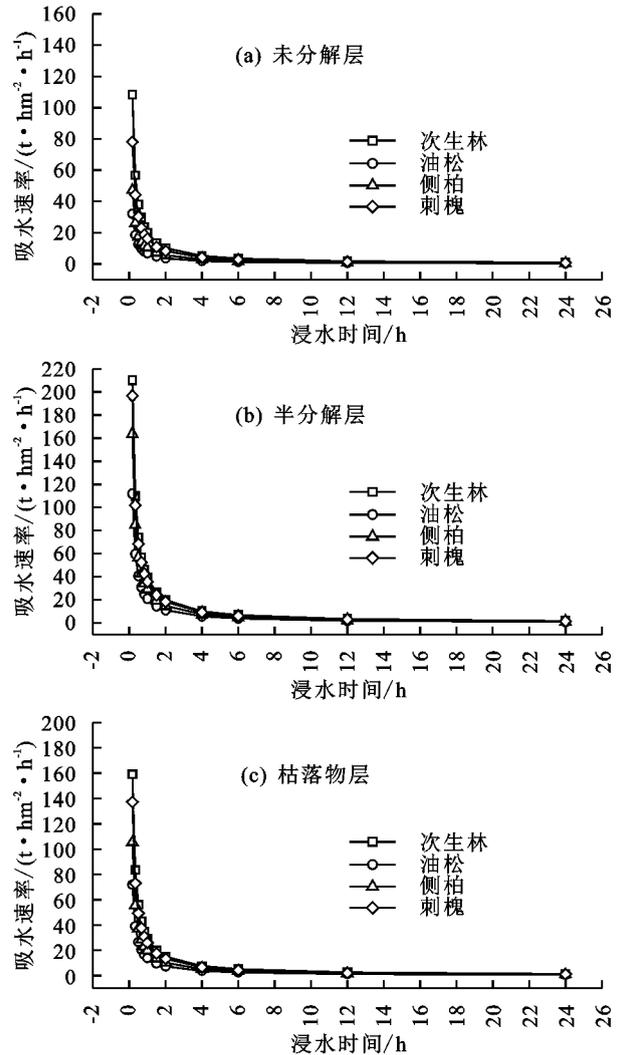


图 5 枯落物吸水速率随浸水时间的变化

持水初期, 枯落物持水量激烈剧增, 结合生物学讨论, 烘干的枯枝落叶表面、植物细胞等结构有足够储水空间, 基于渗透作用原理, 水分由高水势向低水势剧烈运动, 吸水量与吸水速率均较高。进一步体现枯落物截留拦蓄主要发生在降雨 2 h 内, 此后, 降雨继续, 但枯落物持水量已接近饱和状态, 吸水能力逐渐降低, 拦蓄作用下降。同时, 本研究发现, 半分解层较未分解层持水迅速, 达饱和快, 半分解层位于下方, 已部分分解, 表面积大, 吸水量大, 这体现了枯落物不同层次对于降水截留调蓄存在递进程度, 增加不同层次枯落物持水量, 充分发挥枯落物各层水文生态功能, 这与赵陟锋等<sup>[26]</sup>的研究结果基本一致。

自然状态下, 对于时间短、雨强大的降雨, 枯枝落叶有明显的截流拦蓄影响特性<sup>[27]</sup>。本文采用室内浸泡法研究枯落物生态水文特征, 在一定程度上能够代表拦蓄降雨能力, 但在自然界的水循环中, 枯落物拦蓄特性与室内长时间浸水条件不尽相同, 自然降雨中, 部分雨水能够被枯枝落叶有效拦截, 强降雨状态

下雨水很快下渗<sup>[28]</sup>,如何反映自然界真实降雨下枯落物有效拦蓄能力大小应进一步讨论研究。

本文通过对植被覆盖度(NDVI 指数)为 0.70~0.75 的 4 种样地取样调查,仅对高植被覆盖度下不同纯林林分典型样地讨论分析,未进一步考虑不同植被覆盖度层级、针阔叶混交林林地枯落物的生态水文性能,存在一定局限性,张东等<sup>[15]</sup>曾提出针阔混交林林地枯落物持水能力一般大于 2 种林型纯林地,在黄土高原植被恢复重建树种研究中,合理结合不同地区地貌条件,选取中低高植被覆盖度层级,进一步比较分析典型自然林、人工纯林、人工混交林枯落物层生态水文功能特性,仍具有较大研究空间与意义。

## 5 结论

(1)晋西黄土区蔡家川流域研究区域内,典型林分枯落物蓄积量差别明显,次生林(白杨与辽东栎混交林)蓄积量最大(19.28 t/hm<sup>2</sup>),油松最小(14.73 t/hm<sup>2</sup>)。未分解层蓄积量均小于半分解层。4 种典型林分枯落物最大持水量(率)依次为次生林,刺槐林,侧柏林,油松林。次生林最大持水性能差异显著( $P < 0.05$ )。

(2)4 种典型林分枯落物有效拦蓄特性差异显著( $P < 0.05$ ),表现为次生林(31.29 t/hm<sup>2</sup>) > 刺槐(22.20 t/hm<sup>2</sup>) > 侧柏(18.19 t/hm<sup>2</sup>) > 油松(13.94 t/hm<sup>2</sup>),半分解层有效拦蓄量低于未分解层,有效拦蓄率高于未分解层。次生林有效拦蓄潜力显著差异于其他林分,人工林中,刺槐林有效拦蓄潜力显著差异于其他 2 类林地。

(3)枯落物层有效拦蓄主要发生在降雨 2 h 内,持水曲线迅速上升,吸水速率迅速下降,以次生林最为迅速,其次为刺槐林,最次为油松林。两者与时间分别呈对数函数( $R^2 > 0.889$ )、幂函数关系( $R^2 > 0.99$ )。枯落物半分解层较未分解层变化迅速,达饱和时间短。

本文选取晋西黄土区蔡家川流域植被覆盖度 NDVI 指数(0.70~0.75)相近的 4 种典型林分类型,比较研究得出,次生林林下枯落物水文生态潜力最优,依次表现为次生林 > 刺槐 > 侧柏 > 油松。建议今后造林向近自然造林营林调控,合理配置刺槐、油松等人工营林树种,为充分发挥水土保持功能、植被优化配置提供参考,为晋西黄土区生态恢复和重建树种选择提供理论依据。

### 参考文献:

[1] David P E, Joseph A T, Douglas S, et al. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2014, 29(9): 511-520.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 赵芳,李雪云,赖国桢,等.飞播马尾松林不同林下植被类型枯落物及土壤水文效应[J].中国水土保持科学,2016,14(4):26-33.

[5] 李民义,张建军,郭宝妮,等.晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应[J].生态学杂志,2013,32(5):1083-1090.

[6] 王骄洋.冀北山区华北落叶松人工林林分主要因子与其水源涵养功能关系研究[D].河北保定:河北农业大学,2013.

[7] Steven B V, Cheley R Ford, James M V, et al. Future species composition will affect forest water use after loss of eastern hemlock from southern Appalachian forests[J]. Ecological Applications, 2013, 23(4): 777-790.

[8] Zhang H C, Yuan W P, Dong W J, et al. Seasonal patterns of litter fall in forest ecosystem worldwide[J]. Ecological Complexity, 2014, 20: 240-247.

[9] Wohl E, Barros A, Brunsell N, et al. The hydrology of the humid tropics[J]. Nature Reports Climate Change, 2012, 2(9): 655-662.

[10] 万春红,陶楚,杨小波,等.森林群落物种组成对凋落物组成的影响[J].生态学报,2015,35(22):7435-7443.

[11] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区刺槐林枯落物水源涵养功能综合评价[J].水土保持学报,2019,33(2):251-257.

[12] 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.

[13] 张祎,李鹏,刘晓君,等.黄土丘陵区不同植被类型枯落物持水效能研究[J].水土保持研究,2016,23(5):100-105.

[14] 刘宇,张洪江,张友焱,等.晋西黄土丘陵区不同人工林枯落物持水特性研究[J].水土保持通报,2013,33(6):69-74.

[15] 张东,邵社刚,赵辉.晋西黄土区丘陵沟壑区主要人工林枯落物水文特性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(5):97-101,110.

[16] 周娟,陈丽华,郭文体,等.大辽河流域水源涵养林枯落物持水特性研究[J].水土保持通报,2013,33(4):136-141.

[17] 鲁绍伟,高琛,李少宁,等.北京市松山不同海拔油松林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持通报,2014,34(1):1-6.

[18] 王忠禹,王兵,刘国彬,等.黄土丘陵区典型植被枯落物坡面分布及混入土壤对土壤性状的影响[J].自然资源学报,2018,33(11):2020-2031.

[19] 夏祥友.森林经营对东北林区主要森林类型蓄水保土功能的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.

[20] 周巧稚,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J].水土保持学报,2018,32(4):115-121.

量与年径流量均较大,有灌草覆盖的果园、林地的年土壤流失量与年径流量均较小。说明植物措施和工程措施对防治水土流失的重要性。乔灌草混交的水土流失防治效果良好,可以形成稳定的生态环境,多层次拦截降水,有效防止土壤溅蚀,分散、阻缓径流,达到最佳的水土保持效果。有关植物种类的配置和工程措施,针对不同的地类采用合理的植物配置和工程措施有待进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] 兰思仁,戴永务.生态文明时代长汀水土流失治理的战略思考[J].福建农林大学学报(哲学社会科学版),2013,16(2):1-4.
- [2] 翁伯琦,徐晓俞,罗旭辉,等.福建省长汀县水土流失治理模式对绿色农业发展的启示[J].山地学报,2014,32(2):141-149.
- [3] 王库,史学正,于东升,等.基于景观格局分析的兴国县土壤侵蚀演变研究[J].水土保持学报,2003,17(4):94-97.
- [4] 姚雄,余坤勇,刘健,等.南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J].应用生态学报,2016,27(3):735-745.
- [5] 徐涵秋.南方典型红壤水土流失区地表裸土动态变化分析:以福建省长汀县为例[J].地理科学,2013,33(4):489-496.
- [6] 朱鹤健,陈志彪,林惠花,等.长汀水土保持研究[M].北京:科学出版社,2013.
- [7] Jiao F, Wen Z M, An S S.Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J].Catena,2011,86:110-116.
- [8] 贾燕锋,吴猛,刘明波,等.长白山地丘陵区解冻期农耕地土壤侵蚀特征量化分析[J].水土保持学报,2019,33(5):15-20.
- [9] 路炳军,王志强.北京西部山区径流小区产流产沙和土壤养分流失特征[J].中国水土保持科学,2015,13(6):33-39.
- [10] Wang Z Q, LIU B Y, Zhang Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau[J].Journal of Geographical Sciences,2009,19:707-718.
- [11] 刘一霖,温娅檬,李巧玉.川西高山峡谷区 6 种森林枯落物的持水与失水特性[J].水土保持学报,2019,33(5):151-162.
- [12] 刘洁,李贤伟,纪中华,等.元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J].生态学报,2011,31(8):2331-2340.
- [13] 闫丽娟,王海燕,李广.黄土丘陵区 4 种典型植被对土壤养分及酶活性的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):190-196.
- [14] 侯晓龙,刘明新,蔡丽平,等.安溪崩岗侵蚀区不同植被配置模式与恢复效果研究[J].亚热带水土保持,2010,22(1):5-10.
- [15] 李品荣,孟广涛,方向京.滇东南石漠化山地不同植被恢复模式下土壤地力变化和水土流失状况研究[J].水土保持学报,2008,22(6):35-39.
- [16] 阮伏水,朱鹤健.福建省花岗岩地区土壤侵蚀与治理[M].北京:中国农业出版社,1997.
- [17] 杜轶,郭青霞,郭汉清.汾河上游不同土地利用方式对坡地水土流失的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):44-51.
- [18] 刘宝元,刘瑛娜,张科利,等.中国水土保持措施分类[J].水土保持学报,2013,27(2):80-84.
- [19] 常译方,毕华兴,许华森,等.晋西黄土区不同密度刺槐林对土壤水分的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):227-232.
- [20] 赵陟峰,郭建斌,赵廷宁,等.土桥沟流域不同林分枯落物的水文特性[J].西北林学院学报,2008,23(6):14-17.
- [21] 武鹏艳,张玉珍.3 种人工林枯落物持水性能及土壤水文效应的研究[J].西南农业学报,2016,29(12):2930-2934.
- [22] 白英辰,朱江,程小琴,等.密度调控对华北落叶松人工林枯落物水文特征的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):128-133.
- [23] 庞梦丽,孙明阳,王明远,等.河北太行山典型水土保持经济林枯落物持水特性[J].水土保持研究,2017,24(6):200-204.
- [24] 韩路,王海珍,吕瑞恒,等.塔里木河上游不同森林类型枯落物的持水特性[J].水土保持学报,2014,28(1):96-101.
- [25] 罗佳,田育新,周小玲,等.湘西北小流域不同植被类型枯落物层持水特性研究[J].湖南林业科技,2018,45(5):1-6.
- [26] 陈莉莉,王得祥,张宋智,等.不同密度油松人工林土壤特性及水源涵养功能研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(7):141-149.

(上接第 83 页)