

阿什河上游小流域主要林分枯落物层的持水特性

韩春华, 赵雨森*, 辛颖, 魏琳, 张欣

(东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:在阿什河上游的帽儿山实验林场境内,选取代表性的6种林分类型,测定了各林分枯落物层的蓄积量,采用室内浸泡法对持水能力进行研究。结果表明:6种林分枯落物层厚度为2.8~5.5 cm;枯落物总蓄积量为9.27~39.81 t·hm⁻²;最大持水量为25.65~136.83 t·hm⁻²;最大拦蓄水量为21.02~87.53 t·hm⁻²;总有效拦蓄水深为1.72~6.71 mm。6种林分枯落物层的持水能力排序为:兴安落叶松林>针阔混交林>红松林>蒙古栎林>樟子松林>水曲柳林。对6种林分枯落物的持水量、吸水率随浸泡时间的变化进行了回归拟合,表明枯落物持水量与浸泡时间存在对数关系,枯落物吸水速率与浸泡时间存在幂函数关系。

关键词:阿什河;小流域;枯落物;持水特性

中图分类号:S715.3

文献标识码:A

Water-Holding Characteristics of Litter Layers of Main Forest Types in the Upstream Small Watershed of Ashi River

HAN Chun-hua, ZHAO Yu-sen, XIN Ying, WEI Lin, ZHANG Xin

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: Six types of representative forest stands at the Maoershan Experimental Station in the Ashi River's upstream watershed were selected to investigate the forest stock volume and water-holding capacity of litter layers, and the data obtained were analyzed quantitatively. The results showed that the thickness of litter layer was in the range of 2.8~5.5 cm; the total stock volume of litter layer was in 9.27~39.81 t·hm⁻²; the maximum water holding capacity ranged from 25.65 t·hm⁻² to 136.83 t·hm⁻²; the maximum retain capacity was 21.02~87.53 t·hm⁻²; and the total effective retain deepness was 1.72~6.71 mm. The water-holding capacity of the six types of forest litter layers was listed in decreasing order as follows: *Larix gmelini* forest > conifer-broadleaved mixed forest > *Pinus koraiensis* forest > *Quercus mongolica* forest > *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest > *Fraxinus mandshurica* forest. Regression analysis for the six types of forest stand litters showed logarithmic relationships between water-holding capacity of litter and soaking time, and power functions between water absorption rate and soaking time.

Key words: Ashi river; small river basin; litter; water-holding characteristics

处于林分植物层与土壤层之间的枯枝落叶层(又称枯落物层)主要是由凋落的叶、枝、皮、花、果、种子等植物器官堆积而成的^[1],是森林生态系统与大气和矿质土壤进行物质与能量交换的一个重要场

所^[2]。枯落物层依靠其强大的表面积和疏松多孔的性质,具有明显的截持降水、调节地表径流、减少土壤流失及改善土壤理化性质的功能,成为森林生态系统调节水分分配的第二作用层^[3-5],具有保持水

土和涵养水源的重要作用^[6-8]。

阿什河发源于黑龙江省尚志市境内张广才岭余脉帽儿山镇尖山砬子沟,流经黑龙江省阿城市,在哈尔滨市境内汇入松花江。在阿什河中上游地区建有西泉眼水库,是哈尔滨市重要的水源地之一。因而,对于阿什河上游小流域水源涵养林和水土保持林的水文功能研究具有重要意义。本文依托东北林业大学帽儿山实验林场,对阿什河上游小流域内6种主要林分枯落物层的持水特性及作用机理进行研究,旨在为阿什河上游小流域水源涵养林和水土保持林的水文功能及森林生态评价提供依据。

1 研究区概况

研究区域位于帽儿山实验林场境内。地理坐标为127°36′~127°39′ E,45°23′~45°26′ N。该地区属长白山系张广才岭西北坡小岭余脉,为松嫩平原向张广才岭过渡的低山丘陵区。属中温带大陆性季风气候,四季较为分明。冬季漫长、寒冷而干燥,多西北风。夏季温热短促、降水集中。早春少雨多干旱,秋季降温迅速,常有冻害发生。早霜9月中旬,晚霜5月下旬。年平均气温2.8℃,年平均湿度70%,常年偏西南风,年降水量600~800 mm,年蒸发量1 093.9 mm,年日照时数2 471.3 h,无霜期120~140 d,属于自然资源较富饶的半山区次生林

地带。本研究区地带性植被是以红松(*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.)为主的针阔混交林,但经20世纪初的过度采伐,原生植被已不复存在,后期人工栽种了红松、兴安落叶松(*Larix gmelini* (Rupr.) Rupr.)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litvin.)、非人工栽种区域被水曲柳(*Fraxinus mandshurica* Rupr.)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch.)、椴树(*Tilia amurensis* Rupr.)、色木槭(*Acer mono* Maxim.)为主的阔叶混交林取代。在不同海拔高度和多种立地条件下均有林分分布。主要乔木有红松、樟子松、兴安落叶松、水曲柳、蒙古栎、胡桃楸(*Juglans mandshurica* Maxim.)、椴树、色木槭、榆树(*Ulmus pumila* L.)、白桦(*Betula platyphlla* Suk.)、杨树(*Populus davidiana* Dode)等10余种。

2 研究方法

2011年5—9月,通过对研究区不同林分的实地调查,选定6种代表性的林分类型作为实验样地。分别设置20 m×20 m的标准地(表1)。在标准地内依对角线分别在四角及中心位置设20 cm×20 cm的枯落物收集样方5个,测量并记录样方内枯落物未分解层和半分解层厚度,并分别收集样方中的枯落物、入袋封装。

表1 样地基本特征

林分类型	坡度/(°)	坡位	坡向	林龄等级	林冠郁闭度	平均树高/m	平均胸径/cm
水曲柳	5	下	东南	近	0.6	21.0	30.0
兴安落叶松	12	中	南	中	0.8	23.0	22.0
针阔混交	8	中上	东南	中	0.8	20.0	20.0
蒙古栎	20	上	南	近	0.7	19.0	22.0
樟子松	7	中	南	中	0.7	15.0	22.0
红松	10	中下	东南	近	0.7	15.0	18.0

枯落物带回实验室后,称其自然状态质量,在80℃下烘至恒定质量,称其干质量。以干物质质量推算不同林分枯落物蓄积量。采用室内浸泡法,将烘干后的枯落物装入网袋,并浸入盛有清水的容器中浸泡24 h,称质量后计算最大持水量和最大持水率。取未分解层、半分解层样品称质量后分别装入网袋,浸入清水后分别在0.25、0.5、1、2、4、8、12、24 h时测定质量变化,以计算吸水速度。

根据枯落物的最大持水率和平均自然含水率计算最大拦蓄率,公式为:最大拦蓄率=最大持水率-平均自然含水率;最大拦蓄量=最大拦蓄率×蓄积

量;有效拦蓄率=0.85×最大持水率-平均自然含水率。从而计算有效拦蓄量^[9],公式为:

$$W = (0.85R_m - R_0)M$$

式中:W为有效拦蓄量(t·hm⁻²);R_m为最大持水率(%);R₀为平均自然含水率(%);M为枯落物蓄积量(t·hm⁻²)。

3 结果与分析

3.1 不同林分枯落物蓄积量

从调查统计结果可以看出(表2),6种不同林分的枯落物蓄积量有较大差别,变动范围在9.27~

39.81 t · hm⁻²,依次为兴安落叶松林 > 针阔混交林 > 红松林 > 樟子松林 > 蒙古栎林 > 水曲柳林。针叶林和针阔混交林的枯落物蓄积量均高于阔叶林。分析其差别的原因,主要受到树种组成、林内环境等因素影响^[10]。阔叶树种枯落物与针叶树种相比更易于分解,最终导致阔叶林枯落物的积累量较少。针叶林和针阔混交林的枯落物分解速度较慢,因此相对阔叶林枯落物蓄积量多,尤其是落叶松,其蓄积量最大。其次,不同林分枯落物的各层蓄积量所占比

例不同,但均呈现出半分解层蓄积量所占比例高于未分解层,均在60%以上。红松林半分解层占比例最大,为78.13%;其次为樟子松林、水曲柳林、蒙古栎林、针阔混交林和兴安落叶松林。通常认为,枯落物层蓄积量取决于其在林地上的积累量、分解速度、积累年限等因子,而这些因子又与森林构成、林分发育、林分结构、林分生产力等有关^[11]。因此,枯落物储量状况反映了枯落物与所处环境的交互作用和富集程度,枯落物的蓄积量越多,持水能力越强^[12]。

表2 枯落物蓄积量

林分类型	枯落物厚度/cm		总厚度 /cm	未分解层		半分解层		总蓄积量 /(t · hm ⁻²)
	未分解层	半分解层		蓄积量/(t · hm ⁻²)	比例/%	蓄积量/(t · hm ⁻²)	比例/%	
水曲柳	0.8	2.0	2.8	2.44	26.32	6.83	73.68	9.27
兴安落叶松	2.1	3.4	5.5	14.64	36.77	25.17	63.23	39.81
针阔混交	1.4	2.4	3.8	7.50	33.36	14.98	66.64	22.48
蒙古栎	1.7	2.3	4.0	2.54	26.99	6.87	73.01	9.41
樟子松	1.5	2.9	4.4	3.85	25.00	11.55	75.00	15.40
红松	1.6	3.6	5.2	4.17	21.87	14.90	78.13	19.07

3.2 枯落物的持水性能

3.2.1 枯落物的持水能力 枯落物的持水能力一般用干物质的最大持水率、最大持水量表示,文中也采用枯落物浸水24 h后的持水率为最大持水率^[13]。6种林分枯落物的最大持水率(表3)变化范围为192.56%~343.67%,排序为兴安落叶松林 > 蒙古

栎林 > 针阔混交林 > 水曲柳林 > 红松林 > 樟子松林。从试验结果看,针叶与针叶、阔叶与阔叶、针叶与阔叶树种之间枯落物最大持水率均有差异,可能与其林分类型、林龄、枯落物分解状况、累积状况、前期水分状况等多种因素有关^[14]。

表3 枯落物的总拦蓄能力

林分类型	自然含水率 /%	最大持水率 /%	最大持水量 /(t · hm ⁻²)	最大拦蓄率 /%	最大拦蓄量 /(t · hm ⁻²)	有效拦蓄率 /%	有效拦蓄量 /(t · hm ⁻²)	总有效拦蓄深 /mm
水曲柳	50.03	276.78	25.65	226.75	21.02	185.23	17.17	1.72
兴安落叶松	123.81	343.67	136.83	219.86	87.53	168.31	67.00	6.71
针阔混交	67.70	334.46	75.19	266.76	59.97	216.59	48.69	4.87
蒙古栎	58.24	341.89	32.17	283.65	26.69	232.37	21.87	2.18
樟子松	35.37	192.56	29.65	157.19	24.21	128.31	19.76	1.98
红松	30.86	222.22	42.38	191.36	36.49	158.03	30.14	3.02

枯落物最大持水量是由其最大持水率和蓄积量决定的,反映了林分的持水能力。不同林分的最大持水量依次为:兴安落叶松林 > 针阔混交林 > 红松林 > 蒙古栎林 > 樟子松林 > 水曲柳林。各林分半分解枯落物最大持水量远大于未分解枯落物最大持水量,为其1.7~4.6倍。从排序看是枯落物的持水能力、蓄积量、分解状况、本身厚度等共同作用的结果^[15]。兴安落叶松林的枯落物最大持水率和最大持水量均最高,这是因为兴安落叶松凋落物蓬松柔软,常形成海绵状的吸水层,因而具有较大的持水

率,同时枯落物蓄积量也最大。根据实际调查,蒙古栎林林下草本层枯死物含量较多,因此可有效保持枯落物层不受破坏,为提高整个林分的涵养水源、保持水土功能起到很大作用。虽然蒙古栎林枯落物的最大持水率也较高,但其蓄积量比较低,所以最大持水量排序居后。樟子松林持水能力较小,主要是由于樟子松枯落物质地较硬,表面光滑且含有松脂,水分不易吸附在枯落物表面,虽然其最大持水率低于水曲柳林枯落物,但其蓄积量较高,所以最大持水量仍高于水曲柳林。水曲柳林样地位置位于坡下,水

热条件较好,且枯落物易于分解,因此枯落物蓄积量最小。虽然水曲柳林枯落物的最大持水率高于樟子松林和红松林,但受蓄积量小的影响,最大持水量在6种林分中最差。

3.2.2 枯落物的拦蓄能力 研究结果表明(表3):6种林分的最大拦蓄率范围为157.19%~283.65%;受枯落物自然含水率影响,最大拦蓄率与最大持水率排序发生了较大变化,为:蒙古栎林>针阔混交林>水曲柳林>兴安落叶松林>红松林>樟子松林。6种林分的最大拦蓄量范围为21.02~87.53 t·hm⁻²,不同林分的排序与最大持水量一致,为:兴安落叶松林>针阔混交林>红松林>蒙古栎林>樟子松林>水曲柳林。

实际上,山地森林坡面一般不会出现长时间浸水,6种林分的样地均有一定的坡度,落到枯落物层上的雨水除被拦蓄外会很快入渗。因此,枯落物层对降水的拦蓄能力用最大持水率和最大持水量来表示,其值高于实际的降水拦蓄效果。所以,在实际中多用有效拦蓄量(率)来估算自然条件下枯落物对降水的实际拦蓄效果,以比较不同林分类型枯落物的持水性能^[5]。试验表明:各林分的有效拦蓄率变化范围为128.31%~232.37%,排序为:蒙古栎林>针阔混交林>水曲柳林>兴安落叶松林>红松林>樟子松林;有效拦蓄量变化范围为17.17~67.00

t·hm⁻²,排序为:兴安落叶松林>针阔混交林>红松林>蒙古栎林>樟子松林>水曲柳林,可以看出,枯落物对降水的截留能力受林分类型等因子的影响^[16];总有效拦蓄深变化范围为1.72~6.71 mm,其中兴安落叶松林最大(6.71 mm),说明兴安落叶松林枯落物的降水拦蓄性能最高。

3.3 枯落物持水过程

3.3.1 枯落物持水量与浸泡时间的关系 不同林分的枯落物未分解层、半分解层的持水量随浸水时间的动态变化(表4)表明,在浸泡时间0~2 h内,持水量迅速增大;之后持水量增幅逐渐降低;当浸泡4~8 h时,持水量基本达到最大值;继续增加浸泡时间,持水量增加幅度很小。此时虽然枯落物的吸水没有达到动态平衡状态,但因枯落物中的空隙已被静水占据,持水量基本不再发生大的变化,基本达到枯落物的最大饱和持水量。从试验结果看,樟子松、红松的持水量相对其它树种低,与含油脂树种的枯落物吸水速度慢于不含油脂树种的枯落物^[17]的结论相符。对6种林分枯落物持水量与浸泡时间的数据进行回归分析(表5),二者之间存在对数关系: $y = a \ln t + b$ (式中: y 为枯落物持水量(g·kg⁻¹); t 为枯落物吸水时间(h); a 为方程回归系数; b 为方程常数项)。

表4 6种林分枯落物持水量

g·kg⁻¹

林分类型	枯落物层	浸水时间/h								
		0.25	0.5	1	2	4	6	8	12	24
水曲柳	未分解层	1 297.57	1 854.27	2 217.05	2 379.61	2 556.66	2 592.37	2 626.02	2 793.95	2 946.02
	半分解层	1 505.74	1 870.28	2 158.21	2 327.18	2 420.84	2 493.14	2 542.64	2 639.39	2 716.77
兴安落叶松	未分解层	1 478.07	1 985.08	2 404.99	2 767.71	2 823.23	2 922.37	3 045.68	3 169.52	3 314.46
	半分解层	2 150.46	2 643.62	2 836.16	3 023.27	3 199.91	3 236.60	3 288.69	3 372.22	3 448.84
针阔混交	未分解层	1 383.00	1 897.56	2 393.67	2 675.41	2 882.40	2 919.51	2 970.23	3 050.26	3 217.92
	半分解层	2 102.93	2 381.29	2 691.88	2 879.68	2 989.74	3 023.41	3 100.55	3 133.92	3 311.33
蒙古栎	未分解层	1 105.56	1 433.12	1 732.13	1 808.33	1 857.50	1 937.35	2 027.25	2 101.94	2 274.46
	半分解层	2 186.63	2 735.35	3 062.05	3 181.92	3 325.85	3 378.12	3 436.73	3 596.60	3 743.30
樟子松	未分解层	1 000.87	1 210.44	1 425.58	1 500.07	1 578.24	1 666.14	1 707.26	1 755.73	1 875.41
	半分解层	1 114.91	1 387.67	1 509.20	1 556.08	1 632.26	1 715.33	1 738.88	1 848.10	1 907.96
红松	未分解层	871.73	1 135.53	1 364.53	1 440.65	1 483.54	1 541.14	1 596.88	1 683.79	1 839.28
	半分解层	1 336.31	1 672.67	1 854.13	1 943.47	2 073.25	2 157.25	2 223.16	2 275.36	2 334.65

3.3.2 枯落物吸水速率与浸泡时间的关系 用6种林分不同层次的枯落物在不同浸泡时间间隔内的持水量除以浸泡时间间隔,可得到枯落物吸水速率的动态变化(表6)。可以看出,不同林分的枯落物吸水速率随时间的变化趋势是一致的,半分解层枯

落物的吸水速率大于未分解层枯落物;两个层次的枯落物吸水速率在浸水初期都很高,这是因枯枝落叶从风干状态刚浸入水时其死细胞或枝叶表面水势低^[15];吸水速率在0~2 h内下降最快,之后逐渐减缓,在8~12 h时因枯落物基本持水饱和,其吸水速

率趋向于0。对6种林分的枯落物吸水速率与浸泡时间的数据进行回归分析(表6),两者之间存在幂函数关系: $y = at^b$ (y 为枯落物吸水速率($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); t 为枯落物吸水时间(h); a 为方程回归系数; b

为指数)。根据拟合结果,可得到6种林分的枯落物未分解层及半分解层吸水速率(y)与浸泡时间(t)的回归方程,见表5。

表5 枯落物持水量、枯落物吸水速率与浸泡时间的关系

林分类型	枯落物层	持水量与浸泡时间关系		吸水速率与浸泡时间关系	
		关系式	R^2	关系式	R^2
水曲柳	未分解层	$y = 345.2 \ln(t) + 2041$	0.932	$y = 1970t^{-0.83}$	0.994
	半分解层	$y = 250.1 \ln(t) + 2032$	0.937	$y = 1996t^{-0.88}$	0.997
兴安落叶松	未分解层	$y = 381.1 \ln(t) + 2253$	0.939	$y = 2179t^{-0.83}$	0.995
	半分解层	$y = 263.7 \ln(t) + 2742$	0.925	$y = 2712t^{-0.90}$	0.998
针阔混交	未分解层	$y = 380.9 \ln(t) + 2195$	0.918	$y = 2111t^{-0.83}$	0.993
	半分解层	$y = 249.3 \ln(t) + 2582$	0.951	$y = 2557t^{-0.90}$	0.999
蒙古栎	未分解层	$y = 226.7 \ln(t) + 1568$	0.941	$y = 1533t^{-0.86}$	0.997
	半分解层	$y = 301.1 \ln(t) + 2864$	0.924	$y = 2826t^{-0.89}$	0.998
樟子松	未分解层	$y = 179.6 \ln(t) + 1334$	0.969	$y = 1311t^{-0.87}$	0.998
	半分解层	$y = 157.3 \ln(t) + 1434$	0.954	$y = 1417t^{-0.89}$	0.998
红松	未分解层	$y = 186.0 \ln(t) + 1242$	0.946	$y = 1214t^{-0.85}$	0.997
	半分解层	$y = 207.4 \ln(t) + 1765$	0.950	$y = 1739t^{-0.88}$	0.998

表6 不同林分枯落物吸水速率

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$

林分类型	枯落物层	浸水时间/h								
		0.25	0.5	1	2	4	6	8	12	24
水曲柳	未分解层	5190.26	3708.55	2217.05	1189.81	639.17	432.06	328.25	232.83	122.75
	半分解层	6022.96	3740.56	2158.21	1163.59	605.21	415.52	317.83	219.95	113.20
兴安落叶松	未分解层	5912.27	3970.17	2404.99	1383.86	705.81	487.06	380.71	264.13	138.10
	半分解层	8601.82	5287.25	2836.16	1511.63	799.98	539.43	411.09	281.02	143.70
针阔混交	未分解层	5532.01	3795.13	2393.67	1337.71	720.60	486.59	371.28	254.19	134.08
	半分解层	8411.70	4762.57	2691.88	1439.84	747.43	503.90	387.57	261.16	137.97
蒙古栎	未分解层	4422.23	2866.24	1732.13	904.17	464.37	322.89	253.41	175.16	94.77
	半分解层	8746.53	5470.71	3062.05	1590.96	831.46	563.02	429.59	299.72	155.97
樟子松	未分解层	4003.48	2420.88	1425.58	750.03	394.56	277.69	213.41	146.31	78.14
	半分解层	4459.64	2775.35	1509.20	778.04	408.06	285.89	217.36	154.01	79.50
红松	未分解层	3486.92	2271.06	1364.53	720.32	370.89	256.86	199.61	140.32	76.64
	半分解层	5345.25	3345.34	1854.13	971.74	518.35	359.54	277.90	189.61	97.28

4 结论与讨论

(1)阿什河上游小流域6种林分的枯落物层厚度变化范围在2.8~5.5 cm。大小顺序为:兴安落叶松林>红松林>樟子松林>蒙古栎林>针阔混交林>水曲柳林。枯落物总蓄积量变动范围在9.27~39.81 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,大小依次为:兴安落叶松林>针阔混交林>红松林>樟子松林>蒙古栎林>水曲柳林。枯落物各层蓄积量所占比例不同^[18],未分解层占总蓄积量的比例为兴安落叶松最大(36.77%),红松最小(21.87%);总体表现为半分解层所占比

例高,未分解层比例低。

(2)不同林分的枯落物最大持水率为192.56%~343.67%,大小顺序为:兴安落叶松林>蒙古栎林>针阔混交林>水曲柳林>红松林>樟子松林。最大持水量变化范围为25.65~136.83 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,各林分枯落物半分解层最大持水量为未分解层最大持水量的1.7~4.6倍。兴安落叶松林枯落物最大持水量最高,为136.83 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,水曲柳林分最小,为25.65 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。总有效拦蓄深依次为:兴安落叶松林(6.71 mm)>针阔混交林(4.87 mm)>红松林(3.02 mm)>樟子松林(1.98 mm)>蒙古栎林

(2.18 mm) > 水曲柳林(1.72 mm)。不同林分枯落物的最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量大小排序趋于一致^[19], 表现为:兴安落叶松林 > 针阔混交林 > 红松林 > 蒙古栎林 > 樟子松林 > 水曲柳林。

(3) 枯落物持水量与浸泡时间之间存在对数关系($y = a \ln t + b$), 其变化规律为:在 0 ~ 2 h 内枯落物持水量迅速增大, 浸泡 4 ~ 8 h 时后持水量基本上达到最大值; 浸泡 8 ~ 12 h 后持水量增加幅度很小, 12 h 后逐渐减少并趋近于 0。枯落物吸水速率与浸泡时间之间存在幂函数关系($y = at^b$), 枯落物吸水速率在浸泡 0 ~ 2 h 内降低最快, 之后降幅逐渐减缓, 6 ~ 8 h 后明显减缓, 8 ~ 12 h 时基本持水饱和, 吸水速率趋向于 0。枯落物持水量、持水速率与浸泡时间具有较好相关性, 这一结果与张振明等^[20]的研究趋同, 只是不同树种枯落物的持水量达到最大值的时间略有差异, 这与各树种枯落物的结构有关。

参考文献:

- [1] 朱金兆, 刘建军, 朱清科. 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
- [2] 郝向春. 灵空山主要森林类型枯落物生物量及持水性能[J]. 山西林业科技, 2000, 12(4): 1-2
- [3] 赵玉涛, 余新晓, 张志强, 等. 长江上游亚高山峨眉冷杉林地被物层界面水分传输规律研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 118-121
- [4] 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
- [5] 薛建辉, 郝奇林, 何常清, 等. 岷江上游两种亚高山林分枯落物层水文特征研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 168-172
- [6] 李雪峰, 韩士杰, 李玉文, 等. 东北地区主要森林生态系统凋落量的比较[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 783-788
- [7] Betson R P. Source area storm of runoff[J]. Water Resources Research, 1969, 5(3): 574-582
- [8] 张峰, 彭祚登, 安永兴, 等. 北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J]. 林业科学, 2010, 46(10): 6-14
- [9] 胡淑萍, 余新晓, 岳永杰. 北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 146-150
- [10] 吴毅, 刘文耀, 沈有信, 等. 滇石林地质公园喀斯特山地天然林和人工林凋落物与死地被物的动态特征[J]. 山地学报, 2007, 25(3): 317-325
- [11] 李红云, 杨吉华, 鲍玉海, 等. 山东省石灰岩山区灌木林枯落物持水性能的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 44-46
- [12] 赵艳云, 程积民, 万惠娥, 等. 六盘山不同森林群落地被物的持水特性[J]. 林业科学, 2009, 45(4): 145-150
- [13] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 106-109
- [14] 樊登星, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京西山不同林分枯落物层持水特性研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 177-181
- [15] 田超, 杨新兵, 李军, 等. 冀北山地阴地枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 97-103
- [16] Kawaadiaz V A, Alifragis D, Tsiontsis A, et al. Litterfall, litter accumulation and litter decomposition rates in four forest ecosystems in northern Greece[J]. Forest Ecology Management, 2001, 144(1/3): 113-127
- [17] 饶良懿, 朱金兆, 毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(1): 33-37
- [18] 姜海燕, 赵雨森, 陈祥伟, 等. 大兴安岭岭南几种主要森林类型土壤水文功能研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 149-153
- [19] 张卫强, 李召青, 周平, 等. 东江中上游主要森林类型枯落物的持水特性[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 130-134
- [20] 张振明, 余新晓, 牛健植, 等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 139-143