

黄土丘陵区不同植被类型枯落物持水效能研究

张 伟¹, 李 鹏¹, 刘晓君², 任宗萍¹, 马田田¹, 赵宾华¹, 徐国策¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;

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)

摘 要:选择陕北绥德县王茂沟流域 5 种不同退耕还林植物枯落物进行浸水试验,对其枯落物蓄积量、持水量与吸水速率进行了分析。结果表明:(1) 5 种植被类型枯落物贮量大小排序为苹果林>油松林>白羊草草地>杏树林>榆树林;枯落物层厚度与枯落物贮量存在对数关系: $y=4.55\ln(x)-8.74(R^2=0.8)$;枯落物层贮量与枯落物水储量存在指数关系 $y=0.69e^{0.22x}(R^2=0.7)$;(2) 枯落物层的最大持水量变化范围为 1.57~5.79 mm,有效拦蓄量变化范围为 0.89~3.02 mm,枯落物有效拦量表现为苹果林>油松林>白羊草草地>榆树林>杏树林;(3) 不同植被枯落物吸水速率随时间的变化过程较为相似,在 2 h 内吸水速率呈直线下降,24 h 各植被枯落物吸水速率基本为 0,达到最大持水量。对不同植被类型枯落物持水效能的研究,可以为解决黄土高原生态水资源短缺及水土流失治理提供理论基础及科技支撑。

关键词:黄土丘陵区; 枯落物蓄积量; 持水量; 吸水速率

中图分类号:TV121^{+.2}

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0100-06

Water Holding Capacity of Litter with Different Vegetation Types in the Loess Hilly Region

ZHANG Yi¹, LI Peng¹, LIU Xiaojun², REN Zongping¹, MA Tiantian¹, ZHAO Binhua¹, XU Guoce¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The amount, water holding capacity and water absorption rate of litter with 5 different types of grain to green vegetation in Wangmaogou region were analyzed in submerging test. The results showed that: (1) The order of the litter amount of the 5 vegetation types is: *Malus pumila* Mill. (MP) > *Pinus tabulaeformis* Carr. (PT) > *Bothriochloa ischaemum* (BI) > *Armeniaca vulgaris* Lam. (AV) > *Ulmus pumila* L. (UP). There is a logarithmic relationship between litter layer depth and amount: $y=4.55\ln(x)-8.74(R^2=0.8)$, and exponential relationship for amount and water storage of litter: $y=0.69e^{0.22x}(R^2=0.7)$. (2) The maximum water holding capacity of litter layer ranged from 1.57 mm to 5.79 mm while the effective holding capacity ranged from 0.89 mm to 3.02 mm. The order of the effective holding capacity is: MP > PT > BI > AV > UP. (3) The change trends of water absorption rate of litter among different vegetation were similar. It plummeted down within the first 2 hours, and then reached 0 at almost 24 hours later when the maximum water holding capacity appeared. Study on water capacity of litter with different vegetation types layer could provide a theoretical basis and technological support to solve the ecological water shortage and soil erosion prevention in the Loess Plateau.

Keywords: Loess Hilly Region; litter amount; water holding capacity; water absorption rate

收稿日期:2016-01-13

修回日期:2016-02-18

资助项目:国家自然科学基金重点项目“黄土高原生态建设的生态—水文过程响应机理研究”(41330858);国家自然科学基金“基于能量过程的坡沟系统侵蚀产沙过程调控与模拟”(41471226);水利部公益性行业科研专项经费“生产建设项目水土保持生态效应监测与评价技术研究”(201501045)

第一作者:张伟(1991—),男,山西长治人,硕士研究生,主要从事水土保持与土壤微生物方面研究。E-mail:18202915856@163.com

通信作者:李鹏(1974—),男,山东烟台人,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:liepng74@163.com

地上枯落物是植物地上部分产生并归还到地表的所有有机物质的总称^[1]。枯落物可有效减少地表径流和减缓土壤侵蚀,防止土壤溅蚀、拦蓄渗透降水、补充土壤水分等^[2]。在疏松的枯落物层,水分可以充满孔隙并依靠其表面张力储存在枯落物层中,从而使枯落物保持良好的持水能力,而枯落物持水能力是反映枯落物的一个重要水文指标^[3]。以水为介质,枯落物能够将养分归还至土壤及生态系统,从而传递营养和能量,改善土壤理化性质、维持土壤养分循环等,这一过程在整个土壤—植被—大气连续体中起着重要作用^[4]。已有很多学者对黄土丘陵区枯枝落叶的持水能力做了大量的研究^[5-6],吴钦孝等^[7]研究发现枯落物可以吸持自身干重 2~4 倍的水量;王玉琦等^[8]认为枯落物的持水能力主要表现在降雨前 2 h 内;韩路等^[9]研究得出枯落物吸水速率与浸泡时间呈幂函数的关系,但对不同植被类型枯落物吸水能力的比较研究较少。

黄土丘陵区地貌破碎、土壤侵蚀严重、地表植被和生态系统遭到严重破坏,降水不稳定,水分稀缺,研究不同植被类型枯枝落叶层在水土保持中发挥的作用就愈发重要。实施水土保持各项工程措施以来,黄土高原的植被得到了较好的恢复。本文通过对典型流域不同植被类型的枯落物进行分层,并对植被枯落物的贮量、水储蓄量、最大持水量、有效拦蓄量以及吸水速率的研究,可以揭示不同植被类型枯落物的持水性能,对于科学认识植被的水土保持作用,推动植物格局的优化配置起到引导作用。

1 研究区概况

1.1 概 况

王茂沟流域是陕西省绥德县韭园沟的一条支沟,是黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站的试验性治理小流域之一,也是我国最早的治理试验小流域之一^[10-11],流域面积 5.74 km²,主沟长 3.75 km,沟道平均比降为 2.7%,沟谷地面积 2.97 km²,沟壑密度 4.3 km/km²。流域内地质构造比较单纯,表层多被质地匀细、组织疏松的黄绵土覆盖,厚度 20~30 m。地貌复杂,以梁、峁为主,沟壑纵横,坡陡沟深,属典型的黄土丘陵沟壑地貌流域属大陆性季风气候,多年平均气温 10.2℃,多年平均降水量 513 mm,降雨量的年际变率大,年最大降雨量是年最小降水量的 3.5 倍,汛期降水量占年降水量的 73.1%,且多以暴雨形式出现,造成严重的水土流失,泥沙量的 95%集中在汛期,以水力侵蚀为主。流域土地利用类型以草地、坡耕地、梯田以及林地为主。主要植被类型为种植于梯田的苹果果园、坡面白羊草草地以及坡面杏树、油

松以及榆树林地(表 1)。

表 1 王茂沟流域概况

地区	王茂沟流域
气候类型	温带大陆性半干旱气候
地貌类型	丘陵
土壤类型	黄绵土
年降雨量/mm	513
年平均气温/℃	10.2
平均海拔/m	800~1300
主要植被类型	果园、草地、林地

1.2 研究方法

在研究区内,按照主要植被类型,分别选取了梯田(苹果树,*Maluspumila* Mill)、退耕还林(油松,*Pinustabulaeformis* Carr)、经济林(杏树,*Bothriochloaischaemumis*)、退耕还草(白羊草,*Armeniacavulgaris* Lam.)以及自然林地(榆树,*Ulmuspumila* L.)5 种不同植被类型作为研究对象,概况如表 2 所示。

表 2 样地基本情况

植被类型	年限	海拔/m	坡向	坡度/(°)
杏树林	15	979	南	21
油松林	30	973	南	23
白羊草	15	971	南	20
苹果林	15	1051	南	2
榆树林	15	965	南	20

1.2.1 枯落物的采集和测定 对林分环境因子进行实地调查,在样地内设置 20 m×20 m 样方,选取坡上、坡中、坡下,设置 0.5 m×0.5 m 样地进行凋落物厚度测定和采集,并设置 3 个重复。用钢尺测量枯落物的总厚度,并对枯落物进行分层,按照其分解状态分为 3 层,划分标准为:基本分解,已不能辨别出原有形态为已分解层;已开始分解,外形破碎,但仍然能辨别出原有形态为半分解层;由新鲜凋落物组成,原有颜色不变,保持原有形态为未分解层^[12-13]。测量枯落物各层厚度后,现场测量其鲜重。将枯落物样品装入自封袋中带回实验室自然风干后,测量其风干后重量。计算枯落物的自然含水率和单位面积枯落物贮量,公式如下:

$$S=\frac{w_2-w_1}{w_1}\times 100\% \tag{1}$$

$$M=\frac{w_2}{p}\times 100 \tag{2}$$

$$G=\frac{w_1-w_2}{p}\times 100 \tag{3}$$

式中:S 为自然含水率(%);w₁ 为枯落物自然状态下湿重(g);w₂ 为枯落物干重(g);M 为枯落物贮量(t/hm²);p 为取样面积(cm²);G 为枯落物水储量(t/hm²)。

1.2.2 枯落物持水动态测定 采用室内浸泡法测定枯落物的持水量和吸水速率。对风干后的枯落物进行浸水试验,浸泡时间分别为 5 min,15 min,30 min,1 h,2 h,4 h,8 h,12 h,24 h,将枯落物取出控干直至不再滴水为止,称其湿重^[14],并以此计算出不同浸水时间的持水量和吸水速度。以枯落物的 24 h 吸水量作为最大持水量^[15],并以此为基础计算即有效拦蓄量^[16],公式如下:

$$Z=(0.85R_m-S)\cdot M$$

$$Z_{\min}=(R_m-S)\cdot M$$

$$R_m=\frac{w_3-w_2}{w_2}$$

式中:Z 为有效拦蓄量(t/hm²);Z_{min}为最大拦蓄量(t/hm²);R_m 为最大持水率(%);S 为自然含水率(%);M 为枯落物的贮量(t/hm²);w₃ 为浸泡 24 h 枯落物重(g);w₂ 为枯落物干重(g)。

1.2.3 数据处理 采用 Excel 对数据进行公式计算及分析处理,Origin 8.0 进行图表绘制,SPSS 17.0 软件进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型枯落物贮量

表 3 为根据实测枯落物各层重量计算不同植被

类型枯落物厚度及贮量。由表 3 可知,5 种不同植被类型按枯落物贮量大小排序为苹果林(9.3 mm)>油松林(9.0 mm)>白羊草(3.6 mm)>杏树林(2.9 mm)>榆树林(1.4 mm),其中苹果林、油松林各层的贮量都显著高于杏树林、白羊草、榆树林(*p*<0.05)。枯落物层厚度大小排序为油松林(62 mm)>苹果林(37 mm)>白羊草(13 mm)=榆树林(13 mm)>杏树林(12 mm),油松枯落物层的厚度与杏树林、白羊草、榆树林存在极显著性差异(*p*<0.01),苹果林与其他四种植被枯落物层厚度存在显著性差异(*p*<0.05)。对枯落物层的厚度与贮量进行拟合方程得到对数方程:*y*=4.55ln(*x*)-8.74(*R*²=0.8)。

2.2 不同植被类型枯落物水储量

由表 4 可知不同植被类型枯枝落叶水储蓄量顺序表现为苹果林(11.3 mm)>油松林(2.6 mm)>杏树林(1.8 mm)>白羊草(1.5 mm)>榆树林(0.8 mm),苹果林枯落物水储蓄量显著高于其他枯落物的水储存量(*p*<0.01)。枯落物水储存量与枯落物贮量排序较为一致。对枯落物层厚度和水储量进行拟合得到多项式方程:*y*=-0.0152*x*²+1.1574*x*-10.837(*R*²=0.9)。对枯落物层贮量以及枯落物层水储量进行拟合得到指数方程:*y*=0.69e^{0.22*x*}(*R*²=0.7)。

表 3 不同植被类型枯落物厚度及贮量 mm

植被类型	未分解层		半分解层		已分解层		枯落物层	
	厚度	贮量	厚度	贮量	厚度	贮量	厚度	贮量
杏树林	4.0	1.3	5.0	1.4	3.0	0.2	12	2.9
油松林	20.0	4.5	21	3.7	1.0	1.8	62	9.0
白羊草	2.0	2.1	11	1.5	—	—	13	3.6
苹果林	4.0	4.8	8.0	3.8	25.0	0.7	37	9.3
榆树林	5.0	0.8	5.0	0.9	3.0	0.3	13	1.4

表 4 不同植被类型枯落物水储蓄量 mm

植被类型	未分解层		半分解层		已分解层		枯落物层	
	厚度	储量	厚度	储量	厚度	储量	厚度	储量
杏树林	4.0	0.8	5.0	0.9	3.0	0.1	12	1.8
油松林	20.0	1.3	21	0.7	1.0	0.6	62	2.6
白羊草	2.0	0.9	11	0.6	—	—	13	1.5
苹果林	4.0	4.1	8.0	1.2	25.0	0.5	37	11.3
榆树林	5.0	0.2	5.0	0.5	3.0	0.1	13	0.8

2.3 枯落物持水特征

2.3.1 枯落物持水量 枯落物的持水性能具体指标有最大持水量、最大拦蓄量以及有效拦蓄量。由表 5 可以看出,苹果林和油松林各指标均明显高于其他植被类型(*p*<0.05),5 种植被类型最大持水量的范围为 1.57~5.79 mm。对不同层次枯落物进行分析可知,苹果林已分解层中最大持水量最高,油松林次之,

榆树林最小,而相对于半分解层和未分解层,除苹果林外,其他几种植被类型持水量基本相似。

植被的有效拦蓄量由大到小依次为苹果林(3.02 mm)>油松林(2.48 mm)>榆树林(0.38 mm)>白羊草(1.15 mm)>杏树林(0.89 mm)。其中,苹果林最大持水量层为已分解层(*p*<0.05),而最大拦蓄

量、有效拦蓄量却出现在其未分解层。杏树林、油松林的最大持水量、最大拦蓄量及有效拦蓄量均出现在未分解层,榆树林的最大持水量、最大拦蓄量及有效拦蓄量均出现在已分解层。因此,在三个枯落物分解层中,苹果林均保持相对较高的持水性能。

表 5 不同植被类型枯落物最大持水量、最大拦蓄量、有效拦蓄量												mm
植被类型	最大持水量				最大拦蓄量				有效拦蓄量			
	未分	半分	已分	总合	未分	半分	已分	总合	未分	半分	已分	总合
杏树林	0.91	0.47	0.18	1.57	0.61	0.32	0.15	1.09	0.50	0.27	0.13	0.89
油松林	1.62	1.40	1.20	4.23	1.25	0.91	0.80	2.96	1.05	0.76	0.67	2.48
白羊草	0.63	1.30	—	1.93	0.55	0.84	—	1.39	0.46	0.69	—	1.15
苹果林	1.69	0.75	3.35	5.79	1.60	0.58	1.52	3.69	1.36	0.48	1.18	3.02
榆树林	0.56	0.64	0.74	1.94	0.48	0.51	0.66	1.64	0.40	0.42	0.56	1.38

表 6 不同植被类型各层次枯落物持水量											g/kg
植被类型	枯落物层	5 min	15 min	30 min	1 h	2 h	4 h	8 h	12 h	24 h	
杏树林	未分	894	1116	1283	1477	1700	1958	2255	2451	2825	
	半分	628	716	792	891	1023	1198	1434	1608	1988	
	已分	373	539	680	857	1081	1362	1717	1966	2478	
油松林	未分	377	534	667	837	1053	1330	168	1943	2481	
	半分	558	676	764	864	979	1109	1259	1356	1541	
	已分	379	478	570	701	895	1197	1684	2107	3220	
白羊草	未分	841	1163	1428	1753	2154	2646	3253	3671	4515	
	半分	511	618	700	794	905	1034	1185	1286	1481	
	已分	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
苹果林	未分	69283	69469	69627	69834	70115	70505	71061	71494	72502	
	半分	738	918	1082	1312	1654	2187	3056	3821	5862	
	已分	770	864	930	1001	1077	1159	1247	1302	1401	
榆树林	未分	1206	1473	1688	1949	2273	2681	3200	3570	4355	
	半分	1017	1238	1416	1636	1909	2253	2689	2999	3647	
	已分	179	352	557	901	1488	2501	4270	5874	10221	

图 1 显示枯落物已分解层持水量随时间推移呈幂函数曲线增长(未分解层和半分解层不再做图示,下同)。各类型植被在 0~2 h 内都存在一个急速上升的过程,其中持水量在 5~15 min 上升最明显,2 h 以后随着浸水时间增大,持水量缓慢趋于最大持水量。这一现象表明在降雨量足以浸湿地表枯落物层的情况下,各植被类型枯落物层在前 2 h 对降雨的吸持作用最强,2 h 以后各植被类型未分解层的吸水量增长速度减缓,24 h 后吸水量趋于稳定或达到饱和状态。

吸水速率即单位时间的持水量。随时间的推移,枯落物层吸水速率变化均呈幂函数曲线。由图 2 可以看出,各植被类型枯落物已分解层吸水速率均在浸水前期迅速降低,浸水 2 h 后下降速率明显变缓,浸水 8 h 之后,吸水速率接近于稳定,呈现缓慢降低的趋势,最终趋于 0。苹果林枯落物的未分解层和已分

2.3.2 枯落物的吸水量以及吸水速率 枯落物层的吸水速度不仅受枯落物的性质和分解程度影响,还与枯落物的水分含量有关,不同植被类型枯落物的种类、厚度、贮量及分解程度不同,其吸水过程和持水量变化也不同(表 6)。

解层中下降速率最快,且苹果林未分解层和已分解层枯落物吸水速率显著高于其他植被类型,在浸泡 8 h 之后趋于缓慢下降状态,枯落物半分解层中,杏树林的下降速率达到最大,变化规律与苹果林未分解层枯落物变化规律基本一致。

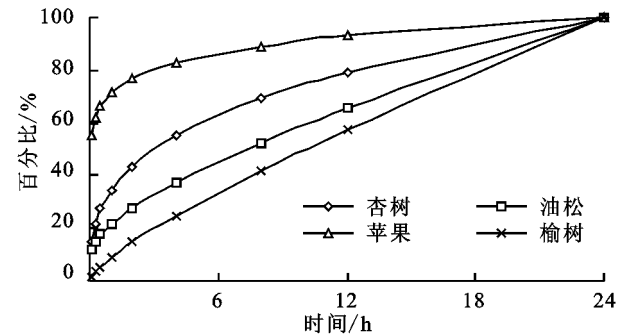


图 1 不同植被类型已分解层枯落物持水量所占最大持水量百分比

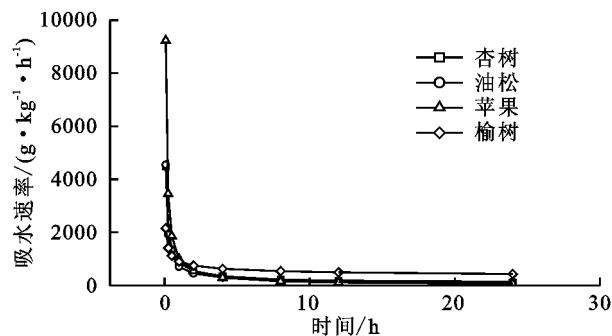


图2 不同植被类型已分解层枯落物吸水速率

3 讨论

苹果林立地环境为梯田,地面比较平坦,因而其枯枝落叶不易被降水冲走,枯落物累积速率较快。油松林贮量仅次于梯田苹果林,究其原因,可能是与枯落物自身结构有关,蒋积荣等^[17]研究结果认为相比其他林型,针叶林枯落物厚度及贮量较高。油松针叶林内部结构紧密,空隙小,因此枯落物的贮量较大^[18]。有研究表明梯田具有保水作用^[19],据已有学者实测研究^[20]表明,降雨为100~200 mm时,梯田可以将其一次拦蓄而不发生地面径流。种植于水平梯田上的苹果林对水分需求较大,且作为阔叶林种,其林下枯落物贮量也较大。已有研究表明^[21],阔叶林生长速度较快,其枯落物贮量明显比较高。因而相对于其他植被类型,苹果林下枯落物水储量最大;油松的根系比较发达,地上部分耗水量相对较小,并且属于针叶林^[22],叶片水含量较低,但是由于退耕还林年限比较长,枯落物堆积量比较大,因而水储蓄量相对较高。对枯落物的贮量、水储量以及厚度进行关系拟合得知,枯落物的厚度和水储量的关系不显著,但枯落物的水储量与枯落物贮量呈显著指数关系,表明其受枯落物贮量影响较大。苹果林位于梯田上,坡度比较小,有利于枯落物的积累,林下水热条件比较好,有利于枯落物的分解,半分解层就比较厚^[23],故其枯落物最大持水量、有效拦蓄量及最大拦蓄量相对较高。王丹丹等^[24]研究表明,坡度越大,其抗冲刷能力越弱,因而枯落物贮量较低。与苹果林相比,其他植被类型所处位置坡度较大,枯落物不容易发生堆积,较难被微生物分解,不同植被类型的形态结构变化存在差异,故持水能力也存在差异,这可能是导致其枯落物持水量较低的原因。

枯落物在自然风干后,植物的枯落物含有大量的死亡细胞,水势较高,浸入水后存在很大的水势差,刚入水时,吸水速率达到最大^[25];随着浸水时间的延长,水势差逐渐减小,吸水速率呈幂函数曲线减小,这与刘成功等^[26]研究结果一致,到24 h时,枯落物水

分达到饱和,枯落物吸水速率近似等于零。各植被类型地表枯枝落叶层持水量接近其最大持水量,逐渐趋于饱和,其吸水速率也变得缓慢。

实施水土保持工程退耕还林(草),改坡为梯,封山育林等措施以来,农耕地面积减小,梯田面积明显增加^[27],梯田自身有明显的保水作用,而作为经济作物,种植于梯田的苹果林又可为研究区提供经济来源。结合本文研究数据,种植于梯田苹果林枯落物的持水效能也是最高,因此推广梯田苹果林有利于研究区生态水文效应的发挥及经济发展。研究区内退耕还林所在的山坡坡度较大,严重的土壤侵蚀和频繁的干旱同时发生,退耕植被的适应性就显得尤为重要。油松根系发达,对水的需求量较小,适应环境能力较强^[28]。本文通过研究发现,种植于坡面油松林枯落物的持水效能较高,推广坡面退耕还林植被油松对防治研究区水土流失、提高水分涵养能力有较大的积极作用。

4 结论

(1) 王茂沟流域内,5种不同植被类型按照枯落物贮量排序大小为苹果林(9.3 mm)>油松林(9.0 mm)>白羊草(3.6 mm)>杏树林(2.9 mm)>榆树林(1.4 mm)。枯落物层厚度与枯落物贮量存在对数关系: $y = 4.56 \ln(x) - 8.74$ ($R^2 = 0.8$);枯落物层贮量与枯落物水储量存在指数关系: $y = 0.69e^{0.22x}$ ($R^2 = 0.7$)。

(2) 枯落物最大持水量大约为其自身重量的2~4倍,最大持水量变化范围为1.57~5.79 mm,有效拦蓄量变化范围为0.89~3.02 mm。通过浸水试验得出的数据得知,本研究认为枯落物层在降雨过程前期的2 h对降雨的吸持具有更重要的作用和意义。

(3) 王茂沟流域内,种植于梯田的苹果林、退耕还林的油松林具有比较好的持水效能。

参考文献:

- [1] Odum E P. Fundamentals of Ecology[M]. Philadelphia and London: W B Saunders Company, 1971: 109-121.
- [2] 吴钦孝,赵鸿雁,韩冰.黄土高原森林枯枝落叶层保持水土的有效性[J].西北农林科技大学学报:自然科学版, 2001, 29(5): 95-98.
- [3] 庞学勇,包维楷,张咏梅.岷江上游中山区低效林改造对枯落物水文作用的影响[J].水土保持学报, 2005, 19(4): 119-122, 155.
- [4] 逯军峰.不同林龄油松人工林凋落物及其对土壤理化性质的影响研究[D].兰州:甘肃农业大学, 2007.
- [5] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原人工油松林水文生态效应[J].生态学报, 2003, 23(2): 376-379.
- [6] 叶海英,赵廷宁,赵陟峰.半干旱黄土丘陵沟壑区几种不同人工水土保持林枯落物储量及持水特性研究[J].水

- 水土保持研究,2009,16(1):121-125,130.
- [7] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原森林植被水土保持机理研究[J].林业科学,2001,37(5):140-144.
- [8] 王云琦,王玉杰,张洪江,等.重庆缙云山几种典型植被枯落物水文特性研究[J].水土保持学报,2004,18(3):41-44.
- [9] 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.
- [10] 张金慧.从王茂沟治理典型看黄丘一副区小流域综合防治体系建设[J].人民黄河,1993(9):20-23.
- [11] 冯国安,郑宝明.陕北王茂沟流域综合治理的启示[J].人民黄河,1998(1):18-20.
- [12] 宋轩,李树人,姜凤岐.长江中游栓皮栎林水文生态效益研究[J].水土保持学报,2001,15(2):76-79.
- [13] 张洪江,程金花,余新晓,等.贡嘎山冷杉纯林枯落物储量及其持水特性[J].林业科学,2003,39(5):147-151.
- [14] 程良爽,宫渊波,关灵,等.山地森林—干旱河谷交错带不同植被枯落物水文效益研究[J].中国水土保持,2009(12):36-39,68.
- [15] 韩同吉,裴胜民,张光灿,等.北方石质山区典型林分枯落物层涵蓄水分特征[J].山东农业大学学报:自然科学版,2005,36(2):275-278.
- [16] 李学斌,陈林,田真,等.荒漠草原典型植物群落枯落物蓄积量及其持水性能[J].水土保持学报,2011,25(6):144-147.
- [17] 蒋积荣,牛赞,苗毓鑫.不同森林类型枯落物水文生态功能对比研究:以甘肃祁连山和云南元阳梯田水源林为例[J].防护林科技,2015(12):4-7.
- [18] 梁文俊,丁国栋,周美思,等.冀北山地油松和落叶松林下枯落物的水文效应[J].水土保持通报,2012,32(4):71-74.
- [19] 张国华,张展羽,左长清,等.红壤坡地不同类型梯田的水土保持效应[J].水利水电科技进展,2007,27(2):77-80.
- [20] 焦菊英,王万中.黄土高原水平梯田质量及水土保持效果的分析[J].农业工程学报,1999(2):65-69.
- [21] 张焜,张洪江,程金花.重庆四面山 4 种类型天然林枯落物水文效应[J].东北林业大学学报,2013,41(3):43-45.
- [22] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰,等.油松根系形态分布的分形分析研究[J].水土保持通报,2007,27(1):47-50,54.
- [23] 魏晓霞,李良,孙旭,等.塞罕坝地区几种林下枯落物持水特性研究[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2010,31(3):41-45.
- [24] 王丹丹.晋西黄土高原不同植被覆盖下的土壤抗冲性研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [25] 李荣桓,李磊,戴雷,等.北京山区不同林分类型枯枝落叶层持水性能的研究[J].安徽农业科学,2010,38(3):1636-1639.
- [26] 刘成功,万志兵,李燕,等.不同林龄无患子人工林枯落物的持水性[J].西南林业大学学报,2015,35(4):46-52.
- [27] 伍飞舟,杨卓,牛健,等.黄土高原丘陵沟壑区土地利用与水土保持措施的变化特征[J].水土保持研究,2010,17(2):10-14,19.
- [28] 刘秀萍,陈丽华,陈吉虎.刺槐和油松根系密度分布特征研究[J].干旱区研究,2007,24(5):647-651.

~~~~~

(上接第 99 页)

- [8] 张志良.植物生理学试验指导[M].北京:高等教育出版社,1990.
- [9] 叶子飘,于强.光合作用对胞间和大气 CO<sub>2</sub> 响应曲线的比较[J].生态学杂志,2009,28(11):2233-2238.
- [10] 马富举,李丹丹,蔡剑,等.干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):724-730.
- [11] 闫慧,吴茜,丁佳,等.不同降水及氮添加对浙江古田山 4 种树木幼苗光合生理生态特征与生物量的影响[J].生态学报,2013,33(14):4226-4236.
- [12] 宗宁,石培礼,宋明华,等.模拟放牧改变了氮添加作用下高寒草甸生物量的分配模式[J].自然资源学报,2012,27(10):1696-1707.
- [13] 张晓文,邢世岩,吴岐奎,等.氮添加对银杏幼林土壤有机碳化学组成及土壤微生物群落的影响[J].林业科学,2014,50(6):115-124.
- [14] 王浩,焦晓燕,王劲松,等.不同氮肥水平下生物炭对高粱苗期生长及有关生理特性的影响[J].华北农学报,2014,29(6):195-201.
- [15] 林仕欣,高承芳,刘远,等.添加绿汁发酵液和山梨酸对“大力士”饲用甜高粱青贮品质的影响研究[J].中国农学通报,2012,28(17):33-36.
- [16] 林贵刚,赵琼,赵蕾,等.林下植被去除与氮添加对樟子松人工林土壤化学和生物学性质的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1188-1194.