

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*

叶海英, 赵廷宁, 赵陟峰

(水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要:通过对土桥沟流域 SW33 - SW75 坡向的 4 种类型人工水土保持林(油松纯林、刺槐纯林、侧柏纯林、油松刺槐混交林)林下枯落物储量的调查结合室内持水试验,运用数理统计的方法分别得到 4 种林分林下枯落物的储量、最大储水量、吸水速率等水文特征参数。结果表明: 4 种林分的单位面积枯落物蓄积量 $2.35 \sim 3.32 \text{ t/hm}^2$, 其由大到小的排列顺序为:油松林 > 油松刺槐混交林 > 侧柏林 > 刺槐林; 4 种林分枯落物的最大持水量存在一定的差异。油松刺槐混交林、油松林、刺槐林、侧柏林的枯落物最大持水量分别相当于 $0.739, 0.73, 0.663, 0.524 \text{ mm}$ 的降雨。这 4 种林分枯落物最大可吸收其自身重量 $2.11 \sim 2.90$ 倍的降雨; 4 种林分枯落物的未分解层和半分解层的持水量与时间呈线性相关,在浸水的前 2 h 内,吸水速度较快,随着时间的延长趋势逐渐变缓,当枯落物在水中浸泡 8 h 时,持水量基本上达到最大值; 枯落物未分解层和半分解层的吸水速率与时间之间存在一定的相关关系,在浸水的前 0~2 h,吸水速率较快,4~6 h 后下降速率逐渐减缓。

关键词:黄土丘陵沟壑区; 人工水土保持林; 枯落物; 持水特性

中图分类号: S727.22; S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)01-0121-05

The Litter Storage and Its Water Capacity Characteristics in Different Artificial Soil and Water Conservation Forest Stands of Hilly and Gully Regions on the Loess Plateau

YE Hai-ying, ZHAO Ting-ning, ZHAO Zhi-feng

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The hydrological character parameters of the litter storage, the maximum water holding capacity and water absorption speed of the litter on the forest land under four kinds of soil and water conservation forest (pure *Pinus tabulaeformis* forest, pure *Robinia hispidata* forest, pure *Platycladus orientalis* forest, mixed forest of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia hispidata*) in Tuqiaogou basin were studied in this paper. The results showed: The litter storage of the four kinds of forest ranges from 2.35 t/hm^2 to 3.32 t/hm^2 . The sequence of the litter storage is pure *Pinus tabulaeformis* forest > mixed forest of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia hispidata* > pure *Platycladus orientalis* forest > pure *Robinia hispidata* forest; There are some differences in maximum water holding capacity of the four kinds of forest. The maximum water holding capacity of the mixed forest of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia hispidata* is equivalent to the rainfall of 0.739 mm , pure *Pinus tabulaeformis* forest 0.73 mm , pure *Robinia hispidata* forest 0.663 mm , pure *Platycladus orientalis* forest 0.524 mm . The four kinds of forest litter can absorb the rainfall from 2.11 to 2.9 of their dry weight; The relationship of four undecomposed litter and half-decomposed litter of water holding capacity and immersion time is that the water will be absorbed very quickly by the litter in the first

* 收稿日期: 2008-07-24

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2006BAD03A1201)

作者简介: 叶海英(1982-), 女, 陕西岚皋人, 在读硕士, 主要研究方向: 工程绿化。E-mail: cassieye@163.com

通信作者: 赵廷宁(1962-), 男, 河北阳原人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 工程绿化。E-mail: zhtning@bjfu.edu.cn

2 hours. But it will be slowed down and reach the peak after 8 hours. The relational expression of the absorption rate and immersion time is that, between 0 ~ 2 h, litter absorb water speed very fast, drop the speed to slow down gradually after 4 ~ 6 h.

Key words: hilly and gully region on the Loess Plateau; soil and water conservation forest; the litter storage; water capacity characteristics

林地枯落物层是指覆盖在林地土壤表面上的林地植物落下的枝叶、枝条、芽鳞、花、果实、树皮等凋落物及动植物等有机体分解物^[1], 又称地被物。它是森林生态系统的重要组成部分, 是影响土壤功能最重要的一层, 也是作用最广泛的表面层, 它不仅有覆盖地表防止雨滴击溅土壤、维持土壤结构、拦蓄渗透降水、分散滞缓减少地表径流和减少表层土壤水分蒸发等直接作用, 而且还通过影响土壤的形成和性状及林木生长对森林水文发生间接影响, 甚至有人认为枯落物层在山地森林水文作用中具有头等的重要性。因此, 对林下枯落物储量及其持水特性的研究可以为水土保持和水源涵养提供重要的参考依据。

水土流失是造成半干旱黄土丘陵沟壑区生态环境恶化的主要原因, 也是导致当地群众贫困落后的主要根源。仅山西省水土流失面积就达 10.8 万 km², 占总面积的 69%。为了改善本地区生态环境、加速经济发展和提高人民生活水平, 水土流失治理便成为当务之急。目前黄土高原水土流失区人工林地面积约 101.61 万 hm², 已有的研究表明, 人工林在半干旱黄土丘陵沟壑区的水土保持及生态环境建设中发挥着极其重要的作用。研究半干旱黄土丘陵沟壑区人工林林下枯落物层的水文生态功能, 对于探讨本地区人工林的可持续经营和管理以及其生态水文效益具有重要的意义。目前, 国内外许多学者对不同区域的多种森林类型林下的枯落物特性作了较多的研究, 在枯落物的凋落量、分解速度、截持降水、抑制土壤水分蒸发、增强土壤入渗、影响地表径流、持水特性等方面都取得了一定成果。马雪华等认为, 林下枯落物储量对其持水量有重大影响^[2]。Richard Lee 等认为, 地被物对降雨的截留量大小取决于地被物的蓄水容量^[3]。刘秉正等对黄土高原南部刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 林凋落物与其截留水量之间的关系进行了详细研究^[4]。刘向东等对黄土高原油松 (*Pinus tabulaeformis*) 人工林枯枝落叶层抑制土壤蒸发和阻滞径流速率等方面进行了研究^[5]。赵鸿雁等给出了枯枝落叶覆盖下土壤蒸发量的数学式^[6]。但是对半干旱黄土丘陵沟壑区不同人工水土保持林林分的枯落物储量及持水特性研究报道较少, 而且在不同地区、不同林型下, 林地地表枯

落物层的组成与结构性质有较大区别, 因此其水土保持和水源涵养功能也有较大差别。因此本文对半干旱黄土丘陵沟壑区的 4 种人工水土保持林林分枯落物储量及其持水特性进行定量研究, 通过研究并查明枯枝落叶层的蓄积量及持水特性, 为半干旱黄土高原丘陵沟壑区水土保持林的建造、水土保持规划和生态环境建设等提供理论依据。

1 研究区概况

试验地位于山西省吕梁山西麓的方山县峪口镇土桥沟流域(北纬 37°36'58", 东经 110°02'55")的北京林业大学径流林业试验场。流域内最高海拔 1446 m, 试区平均海拔 1200 m 左右。该地区属暖温带大陆性半干旱季风气候, 年平均气温为 7.3℃, 年平均 10℃ 的活动积温为 2223.5℃, 干燥度 1.3。冬春寒冷干燥, 秋季凉爽少雨, 夏季降雨集中, 无霜期 140 d。多年平均降水量 416 mm, 且年内分配非常不均, 6 - 9 月份降水占全年的 70% 以上; 多年平均水面蒸发量高达 1857.7 mm, 最大蒸发出现在 4 - 6 月, 表现出典型的北方严重春旱的特征。

试验区属典型黄土丘陵沟壑地貌, 地表大部分为新生代第四纪马兰黄土所覆盖, 土壤为黄绵土, 由黄土母质直接发育形成, 层次过渡不明显; 土层深厚, 质地均匀, 为中壤土, pH 值为 8.0 ~ 8.4。试验地平均土壤容重 120 g/cm³, 田间持水量 21.0% 左右。地表植被以人工林为主, 有油松纯林、刺槐纯林、侧柏纯林、油松刺槐混交林, 4 种人工林下主要野生灌木有杠柳 (*Periploca sepium*)、黄刺玫 (*Rosa xanthina*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、大果榆 (*Ulmus macrocarpa*) 等; 草本植物以菊科和禾本科为主, 菊科蒿属居多, 有铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*)、猪毛蒿 (*A. scoparia*)、阿尔泰紫苑 (*Heteropaspus altaicus*)、山野豌豆 (*Vicia amoena*) 等。

2 研究方法

2.1 枯落物蓄积量测定

2007 年 7 - 8 月在实地调查的基础上, 根据不同立地条件在各林分中设置 20 m × 20 m 的标准样地, 在标准地内分坡面上部、中部、下部各取面积为

50 cm × 50 cm 的枯落物样方 3 个,分层测定枯落物未分解层和半分解层厚度,收集装入塑料袋中,将采

集的样品带回室内称其自然湿重,然后放入烘箱中烘干(85)称重,计算其单位面积干物质蓄积量。

表 1 不同林型的基本概况

林型	海拔/m	坡度/(°)	坡向	平均胸径/cm	平均高/m	株行距/m	树龄/a	郁闭度	整地方式
油松	1357	4	SW75	8.3	5.2	1.0 × 1.5	26	0.8	水平沟
刺槐	1291	21	SW51	8.2	9.6	1.0 × 2.0	18	0.7	水平沟
侧柏	1256	39.8	SW33	5.9	5.2	2.0 × 2.0	18	0.3	隔坡水
平沟油松刺槐混交	1299	7.5	SW54	12.2	5.9	1.5 × 2.0	18	0.4	水平沟

2.2 枯落物持水量、吸水速率的测定

用室内浸泡法测定枯落物的持水量与吸水速率。将烘干、称重后的枯落物装入土壤筛,再将装有枯落物的土壤筛置于盛有清水的容器中,水面高于土壤筛的上沿。将枯落物浸入水中后,开始时每隔 25,30,60 min 将枯落物连同土壤筛一并取出,静置 5 min 左右,直至枯落物不滴水为止,迅速称量枯落物的湿重并进行记录。浸泡 2 h 后,每隔 2 h 将枯落物连同土壤筛一并取出称重,称重方法如上。待浸泡 10 h 后,每浸泡 24 h 称重一次。每次称得的枯落物湿重与其烘干重之差,即为枯落物浸泡不同时间时的持水量,该差值与浸水时间的比值即为枯落物的吸水速率。

年限、树种组成和林分所处的水热条件等的综合影响^[6]。土桥沟流域不同水土保持林林下的枯落物储量见表 2。由表 2 可看出,4 种林分的单位面积枯落物蓄积量在 2.35 ~ 3.32 t/hm²,其排列顺序为:油松林 > 油松刺槐混交林 > 侧柏林 > 刺槐林。从总储量上看,油松林林下枯落物储量最大,而刺槐林林下枯落物储量最小,说明针阔叶混交林和针叶林的枯落物蓄积量明显高于阔叶林。分析枯落物未分解层、半分解层储量,发现不同水土保持林林下枯落物各层次储量所占比例各不相同,刺槐林林下枯落物未分解层所占比例最小,占总储量的 35.74%;而油松林林下枯落物未分解层所占比例最大,占总储量的 57.83%。推断其原因主要是由于油松林的造林密度(1.0 m × 1.5 m)以及其郁闭度(0.8)较大,林冠下层大量枝条因光照不足而枯死,枯落物中枝条占有一定比例,不易分解,而且针叶林落叶较阔叶林落叶难分解,因此油松林下枯落物的蓄积量较大。

3 结果与分析

3.1 枯落物储量

枯落物储量受枯落物的输入量、分解速度、累积

表 2 不同林型林下枯落物储量

林型	未分解层 干重/g	半分解层 干重/g	总量 干重/g	总储量/ (t · hm ⁻²)	未分解层		半分解层	
					储量/ (t · hm ⁻²)	占总储量 比/%	储量/ (t · hm ⁻²)	占总储量 比/%
油松	48.04	34.86	82.90	3.32	1.92	57.83	1.40	42.17
刺槐	20.91	37.92	58.83	2.35	0.84	35.74	1.51	64.26
侧柏	23.79	39.41	63.20	2.53	0.95	37.55	1.58	62.45
油松刺槐混交	29.23	35.51	64.74	2.59	1.17	45.17	1.42	54.83

3.2 不同层次枯落物持水特性

枯落物层的持水性能与生态系统的树种组成、林分发育、林分水平及垂直结构,枯落物的组成、成分、特性、质地和分解程度等因子有关^[7]。在本文中,以枯落物充分浸水 24 h 后的持水量(率)为最大持水量(率),根据枯落物的最大持水率和储量,可以计算枯落物的最大持水量。

3.2.1 枯落物的最大持水量 通过分析比较表 3 中不同类型森林林下枯落物未分解层的最大持水量,可以看出油松林林下枯落物未分解层持水量最大为

3.75 t/hm²,其次是油松刺槐混交林林下枯落物未分解层的持水量为 3.68 t/hm²,再次是刺槐林林下枯落物未分解层的持水量为 2.67 t/hm²,最小的是侧柏林林下枯落物未分解层的持水量为 2.16 t/hm²。

同样,比较不同类型森林林下半分解层的最大持水量可以看出:刺槐林林下枯落物半分解层持水量最大为 3.96 t/hm²,最小为侧柏林下枯落物持水量为 3.08 t/hm²,其他分别是油松刺槐混交林为 3.71 t/hm²,油松纯林为 3.55 t/hm²。

通过分析可以看出,除油松林外,其余 3 种林下

枯落物半分解层的最大持水量都大于未分解层的最大持水量。分析原因主要是因为油松林下未分解层枯落物的储量大于半分解层枯落物的储量。

枯落物持水率是其在一定时段内截持(吸收)的水量占自身(风干)重量的百分数,是反映枯落物涵

蓄水分能力的重要指标^[7]。4 种林型最大持水率由大到小的顺序依次是:刺槐林 > 油松刺槐混交林 > 油松林 > 侧柏林,分别为 290.20%,287.84%,224.65%,211.15%,能吸收相当于其自重的 2.9 倍、2.87 倍、2.24 倍、2.11 倍的降雨。

表 3 不同林分枯落物的最大持水量及最大持水率

森林类型	最大持水量/(t·hm ⁻²)			最大持水率/%		
	未分解层	半分解层	总和	未分解层	半分解层	平均
油松	3.75	3.55	7.30	195.41	253.90	224.65
刺槐	2.67	3.96	6.63	318.04	262.36	290.20
侧柏	2.16	3.08	5.24	227.52	194.79	211.15
油松刺槐混交	3.68	3.71	7.39	314.69	260.99	287.84

3.2.2 枯落物持水量与浸泡时间的关系 由表 4 可以看出,不同林下枯落物的持水量都随时间的延长而增大。对所研究的 4 种水土保持林林下未分解层、半分解层持水量与浸泡时间的关系数据用 SPSS

软件进行分析拟合,可以得到以下的关系式:

$$W = k \ln t + l$$

式中:W——枯落物持水量(g/kg);t——浸水时间(h);k——方程系数;l——方程常数项。

表 4 不同林下枯落物持水量

林型	枯落物层	浸水时间/h							
		0.25	0.5	1	2	4	6	8	10
油松	未分解层	2194	2664	3010	3308	3520	3600	3672	3728
	半分解层	2302	2723	2979	3160	3328	3450	3512	3542
刺槐	未分解层	1844	2119	2315	2414	2506	2574	2624	2658
	半分解层	2603	3034	3361	3526	3720	3822	3894	3942
侧柏	未分解层	1040	1285	1489	1657	1825	1973	2077	2125
	半分解层	1756	2126	2410	2606	2802	2927	3035	3067
油松刺槐混交林	未分解层	2075	2490	2838	3128	3328	3492	3594	3653
	半分解层	2251	2699	3024	3236	3420	3569	3654	3688

表 5 为通过分析拟合得出的不同森林类型下枯落物持水量与浸泡时间之间的关系式,由表 3 和表 4 从不同林分类型枯落物未分解层、半分解层持水量实测值和计算值与浸水时间之间的关系可以看出,不同林分枯落物未分解层、半分解层持水量与浸水时间之间表现出较好的相关性,前 2 h 枯落物吸水速度较快,随着时间的延长趋势逐渐变缓,当枯落物在水中浸泡 8 h 时,其持水量基本上达到最大值,即 8 h 之后,增加浸泡时间,其持水量基本不再发生变化。

下枯落物吸水速率与浸泡时间之间的关系分析并进行拟合,发现林下枯落物吸水速率与浸泡时间之间存在如下的关系:

$$V = kt^n$$

式中:V——枯落物吸水速率[g/(kg·h)];k——方程系数;t——浸泡时间(h);n——指数。

3.2.3 枯落物吸水速率与浸泡时间的关系 由表 7 可以看出林下枯落物吸水速率与浸泡时间之间存在明显的相关关系,对所研究的 4 种水土保持林林

从表 6 可以看出,不同林分枯落物未分解层和半分解层吸水速率总的变化趋势是一致的,即在刚开始浸水的 0~2 h,吸水速率都很高。这是由于枯枝落叶从烘干状态浸入静水中后,枯枝落叶的死细胞间或者枝叶表面水势差较大,因此吸水速率高;4~6 h 之后吸水速度明显减慢趋于平缓,24 h 吸水基本停止,表明枯落物达到饱和状态。

表 5 林下枯落物持水量与浸泡时间的关系

林型	未分解层	半分解层
油松	$W = 397.974 \ln t + 2904.874$	$W = 316.514 \ln t + 2880.239$
刺槐	$W = 202.424 \ln t + 2225.535$	$W = 340.089 \ln t + 3225.296$
侧柏	$W = 287.14 \ln t + 1462.283$	$W = 341.968 \ln t + 2327.22$
油松刺槐混交林	$W = 414.562 \ln t + 2754.823$	$W = 370.228 \ln t + 2906.912$

表 6 不同林下枯落物持水速率

g/(kg·h)

林型	枯落物层	浸水时间/h								
		0.25	0.5	1	2	4	6	8	10	24
油松	未分解层	8776	1880	692	298	106	40	36	28	1.7
	半分解层	9208	1684	512	181	84	61	31	15	0.9
刺槐	未分解层	7376	1098	392	99	46	34	25	17	1.0
	半分解层	10412	1724	654	165	97	51	36	24	1.4
侧柏	未分解层	4160	980	408	168	84	74	52	24	2.6
	半分解层	7024	1480	568	195.5	98	62.5	54	16	0.8
油松刺槐混交林	未分解层	8300	1660	696	289.5	100	82	51	29.5	2.1
	半分解层	6432	1278	464	151.5	66	53	30.5	12	0.9

表 7 林下枯落物持水速率与浸泡时间的关系式

森林类型	未分解层	半分解层
油松	$V = 823.004t^{-1.685}$	$V = 712.331t^{-1.769}$
刺槐	$V = 490.763t^{-1.698}$	$V = 776.331t^{-1.711}$
侧柏	$V = 518.484t^{-1.399}$	$V = 698.674t^{-1.701}$
油松刺槐混交林	$V = 837.511t^{-1.588}$	$V = 792.722t^{-1.709}$

4 讨论

营造人工林具有从根本上治理水土流失的作用,但由于黄土高原严重的水土流失和干旱的气候环境,使得林木生长立地条件差,成活率较低,生长速度缓慢,为了有效提高成活率减少不利因素的影响,使得林分健康生长,可以通过对人工可调控因子的调节,达到水土保持林各项功能的最佳状态。通过本文的实验可以看出林下枯落物层作为水土保持林发挥水土保持与涵养水源功能最主要的水文作用层,其涵养降水能力与林分类型、枯落物构成及蓄积量大小密切相关,而林分类型、枯落物构成及其蓄积量是人为可调控因子。因此,一方面在对现有林分的经营管理中,我们应加强封山育林等措施对各种林分枯落物层的保护,同时注重树种的组成以及林分密度的调节,以利于蓄积量的积累,提高水土保持的能力。另一方面在营造水土保持林时,应做到适地适树,同时注重针阔混交林型的配置,更好地发挥森林植被的水土保持生态修复功能。当然,影响林分健康生长的因素比较多,而且不同地区的主要影响因子也各不相同,目前关于森林健康方面的研究还有很大的空间,有待于日后进一步探讨和研究。

5 结论

(1) 在山西省方山境内土桥沟流域的半干旱黄土丘陵沟壑区的 4 种主要林型中,4 种林分的单位

面积枯落物蓄积量为 2.35 ~ 3.32 t/hm²,其由大到小的排列顺序为:油松林 > 油松刺槐混交林 > 侧柏林 > 刺槐林。从总储量上看,油松林林下枯落物储量最大,而刺槐林林下枯落物储量最小。

(2) 4 种森林类型枯落物的最大持水量存在一定的差异。油松刺槐混交林下枯落物的最大持水量相当于 0.739 mm 的降雨,油松林下枯落物的最大持水量相当于 0.73 mm 的降雨,刺槐林下枯落物的最大持水量相当于 0.663 mm 的降雨,侧柏林下枯落物的最大持水量相当于 0.524 mm 的降雨。这 4 种林分枯落物最大可吸收其自身重量的 2.11 ~ 2.90 倍的降雨。

(3) 4 种林分枯落物未分解层和半分解层持水量和时间存在关系式: $W = k \ln t + c$,除油松外,其他 3 种林型均是未分解层持水量大于半分解层持水量,4 种林分枯落物前 2 h 吸水速度较快,随着时间的延长趋势逐渐变缓,当枯落物在水中浸泡 8 h 时,持水量基本上达到最大值,即 8 h 之后,增加浸泡时间,其持水量基本不再发生变化。

(4) 枯落物未分解层和半分解层吸水速率和时间存在以下关系式: $V = kt^n$,在 0 ~ 2 h,枯落物未分解层和半分解层吸水速率较快,在 4 ~ 6 h 后下降速率逐渐减缓。

综上所述,山西省土桥沟流域半干旱黄土丘陵沟壑区人工水土保持林林地枯枝落叶物有很强的截留降水能力,能较好地发挥其水土保持和涵养水源的作用。

参考文献:

[1] 贲越,周一杨,李璇,等. 枯落物分解与土壤蓄水能力关系的研究[J]. 安徽农业科学,2007,35(5):1416-1418.
 [2] 马雪华,杨茂瑞. 亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[J]. 林业科学,2003,39(3):199-206.

5 结论和建议

从单因素角度出发,阔叶林的 COD 达到 IV 类水指标,缙云山气温较高和雨量丰富,阔叶林下枯落物层厚,凋落物分解速率较高,较多的有机质被分解和淋溶,使其含量较高,并出现一定程度的有机污染。同时 5 种不同土地利用类型 TN 的含量比较高,而灌木林达到 IV 类水指标,具体原因还有待于进一步研究。综合指标法水质的结果皆为 III 类水,BP 神经网络运行多次的结果为缙云山 5 个不同土地利用类型的水质总体也在 III 类水以上,其中大气降水、农用地、楠竹林地表径流的水质达到 I 类水;混交林的地表径流达到 II 类水,阔叶林和灌木林地地表径流的水质达到 III 类水。

以大气降水为例,6 个指标中有 1 个指标为 II 类水指标,其余皆为 I 类水指标,BP 神经网络综合评价等级为 I 类水而综合指数法评价结果为 III 类水,因而 BP 神经网络和单因素评价结果具有更好的吻合性。因此在水质评价中 BP 神经网络相对于综合指数法更准确。BP 神经网络对水质评价是可行的,同时结合单因素分析,将对水质评价的准确性有提高。但由于影响 BP 神经网络学习和训练质量的因素有学习率、隐含层神经元的个数等。而这些正是引起 BP 神经网络局部收敛和收敛速度慢的原因。因此在创建神经网络时,应根据实际情况,选择最佳的学习率、训练函数及其它参数。

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局监督管理司. 中国环境影响评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000: 217-243.
 - [2] 吴业文, 戈建民, 黄奕龙. 应用灰色关联分析进行城市地表水环境质量评价[J]. 世界地质, 2000, 19(1): 53-56.
 - [3] 朱继业, 窦贻俭, 方红松. 动态系统物元模型在综合水质预报中的研究和应用[J]. 城市环境与城市生态, 1999(2): 51-53.
 - [4] 苏耀明, 苏小四. 地下水水质评价的现状与展望[J]. 水资源保护, 2007, 23(2): 4-12.
 - [5] 梁德华, 蒋火华. 河流水质综合评价方法的统一和改进[J]. 中国环境监测, 2002, 2(18): 63-66, 64.
 - [6] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 99-100.
 - [7] 娄申, 干晓蓉. 基于 BP 神经网络的水质评价[J]. 云南民族大学学报: 自然科学版, 2007, 16(2): 165-167.
 - [8] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB3828 - 2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
 - [9] 范立民. 长江徐六泾段渔业水环境现状初步调查[J]. 长江大学学报: 自然科学版(农学卷), 2007, 4(1): 36-38.
 - [10] 胡晋. 基于 Excel 的 BP 网络法在水质评价应用[J]. 环境监测技术, 2005, 17(3): 18-21.
 - [11] 张瑞丰. 精通 MATLAB6. 5[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 95-96.
-
- (上接第 125 页)
- [3] Richard L, Granillo A B. Soil protection by natural vegetation on clear cut forest land in Arkansas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1985, 40(4): 379-382.
 - [4] 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.
 - [5] 刘向东, 吴钦孝, 赵鸿雁. 黄土高原油松人工林枯枝落叶层水文生态功能研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(4): 87-91.
 - [6] 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.
 - [7] 刘少冲, 段文标, 赵雨森. 莲花湖库区几种主要林型枯落物层的持水性能[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 81-86.
 - [8] 罗跃初, 韩单恒, 王宏昌, 等. 辽西半干旱区几种人工林生态系统涵养水源功能研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 921-922.
 - [9] 韩同吉. 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.
 - [10] 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.
 - [11] 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.
 - [12] 张振明, 余新晓, 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.
 - [13] 程金花, 张洪江, 史玉虎, 等. 三峡库区三种林下地被物储水特性[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1825-1828.
 - [14] 刘尚华, 冯朝阳, 吕世海, 等. 京西百花山区 6 种植物群落凋落物持水性能研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 179-182.
 - [15] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.