

# 燕山北部山地典型植物群落水源涵养能力研究

贾彦龙<sup>1,2</sup>, 许晴<sup>1</sup>, 许中旗<sup>1</sup>, 李倩茹<sup>1,2</sup>, 卢金平<sup>3</sup>, 黄选瑞<sup>1</sup>

(1. 河北农业大学 林学院, 河北 保定 071000; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 生态网络观测与模拟重点实验室 CERN 综合研究中心, 北京 100101; 3. 河北省木兰围场国有林场管理局, 河北 围场 068400)

**摘要:** 对燕山北部山地常见的几种植物群落类型的水源涵养能力进行了比较研究。结果表明,凋落物截留量在地上植被层总截留量中占有最大比例,地上植被的截留量由高到低的顺序为:人工落叶松林(4.39 mm) > 天然次生杨桦林(3.81 mm) > 榛子灌丛(1.70 mm) > 绣线菊灌丛(0.18 mm);土壤最大持水量及总孔隙度都以榛子灌丛为最大,其次分别为天然次生杨桦林、人工落叶松林和绣线菊灌丛。土壤渗透速率以天然次生杨桦林为最大,榛子灌丛与人工落叶松林相近,绣线菊灌丛最低;群落水源涵养总量由高到低的顺序为:榛子灌丛(272.52 mm) > 天然次生白桦林(239.61 mm) > 人工落叶松林(221.53 mm) > 绣线菊灌丛(194.85 mm)。地上植被层截留量在水源涵养总量中所占比例较小,但截留量不能完全说明其对水源涵养功能的影响。说明在燕山北部山地,天然次生杨桦林和榛子灌丛具有良好的水源涵养能力,绣线菊灌丛水源涵养能力较差,需采取合理措施对该地区大面积分布的绣线菊灌丛进行改造,以提高其水源涵养能力。

**关键词:** 群落; 水源涵养; 土壤孔隙度; 土壤渗透性; 燕山北部

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0016-06

中图分类号: S714.7, S153.62

## Water Conservation Capacity of Typical Plant Communities in North Region of Yanshan Mountain

JIA Yan-long<sup>1,2</sup>, XU Qing<sup>1</sup>, XU Zhong-qi<sup>1</sup>, LI Qian-ru<sup>1,2</sup>, LU Jin-ping<sup>3</sup>, HUANG Xuan-rui<sup>1</sup>

(1. Forestry College, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000,

China; 2. Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network,

Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic

Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Mulanweichang National Forestry Administration of Hebei Province, Weichang, Hebei 068400, China)

**Abstract:** Water conservation capacity of the different plant communities were compared in north region of Yanshan mountain. The results showed that the interception by litter contributed most in the total interception of the aboveground layers. For total interception of aboveground vegetation layer, the plant communities were ranked in a descending order as follows: larch plantation(4.39 mm) > natural secondary poplar and birch forest(3.81 mm) > *Corylus heterophylla* shrub(1.7 mm) > *Spiraea pubescens* shrub(0.18 mm). Both soil water holding capacity and total soil porosity of *Corylus heterophylla* shrub were the biggest, followed by natural secondary poplar and birch forest, larch plantation, and *Spiraea pubescens* shrub. In terms of soil infiltration, natural secondary poplar and birch forest had the highest rate, larch plantation and *Corylus heterophylla* shrub had similar intermediate rates, and *Spiraea pubescens* shrub had the lowest. The total amount of water conservation of the plant communities in a descending order was *Corylus heterophylla* shrub (272.52 mm) > natural secondary poplar and birch forest(239.61 mm) > larch plantation (221.53 mm) > *Spiraea pubescens* shrub(194.85 mm). The amount of aboveground vegetation layer interception accounted only a very small portion of the total water conservation for all the communities, showing little importance in their overall water conservation capacity. It is concluded that *Corylus heterophylla* shrub and natural second-

收稿日期: 2011-11-16

修回日期: 2012-01-03

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目“华北中山区高效水土保持林构建技术研究与示范”(2012BAD38B0605); 林业公益性行业科研专项(200804027-07); 河北省科技厅科技支撑项目(10236728)

作者简介: 贾彦龙(1986—), 男(汉族), 河北省鹿泉市人, 硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。E-mail: jy1198620@163.com。

通信作者: 许中旗(1971—), 男(汉族), 河北省饶阳县人, 博士, 教授, 主要从事森林生态系统学、恢复生态学研究。E-mail: xzq7110@163.com。

ary poplar and birch forest are of critical values in water balance of the region, while the water conservation value of *Spiraea pubescens* shrub is low owing to frequent human and animal disturbances. As *Spiraea pubescens* shrub is widely distributed, some reasonable measures should be carried out to improve overall water conservation in this region.

**Keywords:** plant communities; water conservation; soil porosity; soil infiltration rates; north region of Yanshan Mountain

水源涵养是山地森林植被的主要生态功能之一,一直以来都是森林生态功能评价的主要组成部分<sup>[1-2]</sup>。森林生态系统的水源涵养功能一般决定于 5 个过程:林冠截留、林下植被层截留、凋落物吸水、土壤渗透和土壤持水量<sup>[3]</sup>,因此,森林植被的水源涵养功能因物种组成、林分结构、土壤类型、林分起源、外来干扰等因素的不同而有很大不同<sup>[2-6]</sup>。比较分析不同森林植被的水源涵养功能及其变化机制,对于水源涵养林的构建、经营措施的选择具有重要意义。燕山北部山地地处滦河水系的上游地区<sup>[7]</sup>,该地区森林植被水源涵养功能的高低对维持滦河水系的水量供给具有重要作用。

该区的森林植被具有明显的地域特点,属于燕山山地森林向坝上森林草原过渡的中间类型,是中国北方森林的重要组成部分,具有非常独特和重要的生态地位。本研究以燕山北部山地常见的 4 种由于不同人类活动所形成的群落类型(天然次生杨桦林、人工落叶松林、榛子灌丛和绣线菊灌丛)为研究对象,从林冠截留、凋落物吸水、土壤渗透速率及土壤的最大持水量等几个方面分析、评价其水源涵养能力的差异,为该地区森林植被的恢复、水源涵养林的构建及经营提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究地点位于河北省木兰围场国有林场管理局的孟滦林场小东沟作业区。该作业区地处浑善达克沙地南缘和滦河上游,属大兴安岭、燕山余脉的汇接地带以及从坝上草原到坝下山地森林的过渡地带,北纬 41°35′—42°40′,东经 116°32′—117°14′,海拔高度 750~1 998 m。该地区属半干旱向半湿润过渡地带大陆性季风型山地气候,无霜期 67~128 d,年平均气温 1.4~4.7 °C,年均降水量 380~560 mm,主要集中在 7—9 月。

本研究包括该地区分布面积最广的 4 种群落类型,分别为天然次生杨桦林、人工落叶松林、绣线菊(*Spiraea pubescens*)灌丛和榛子(*Corylus heterophylla*)灌丛。天然次生杨桦林是该地区天然次生林的主要类型之一,它是在皆伐迹地上通过自然恢复形成的森林群落;人工落叶松林是该地区分布面积最广的森林类型,它是原有森林被采伐后经人工造林形成的森林群落;绣线菊灌丛是在长期的人畜干扰(主要是放牧和樵采)下形成的一种群落类型;榛子灌丛也是在采伐迹地上通过自然恢复形成的群落类型,始终处于封育状态。4 种群落类型的试验地概况详见表 1。

表 1 试验地基本概况

群落类型	海拔/m	坡度/(°)	坡向	林种	干扰	郁闭度
绣线菊灌丛	1 400	25	SE	天然	放牧、樵采	0.6
榛子灌丛	1 400	20	NW	天然	围封	0.9
天然次生杨桦林	1 400	20	NW	天然	围封	0.9
人工落叶松林	1 400	25	NE	人工林	围封	0.9

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

于 2008 年 7—8 月在孟滦林场小东沟作业区分别在绣线菊灌丛、榛子灌丛、天然次生杨桦林和人工落叶松林中,选取具有代表性的地段设置标准地。天然次生杨桦林和人工落叶松林在坡上、坡中和坡下 3 个位置各设样地 1 块,样地面积为 20 m×20 m。绣线菊灌丛及榛子灌丛则在同样位置各设面积为 3 m

×3 m 样地 3 块。

### 2.2 林冠及林下植被层截留量的测定

采用收获法分别测定各群落类型乔木层及灌木层的生物量<sup>[8]</sup>。然后,对乔木及灌木的枝条进行分层抽样,采用“浸水法”测定林冠截留量及林下植被层截留量<sup>[9]</sup>。

### 2.3 凋落物持水量的测定

在设置的样地中,再分别设置 1.0 m×1.0 m 的样方 3 个,收集样方内全部凋落物。将取回的凋落物

于 80 °C 条件下烘干至恒重, 得其含水率, 计算凋落物的积累量。另取适量烘干凋落物装入自制网袋(网眼大小适中, 保证凋落物不掉出)中, 在水中浸泡 24 h, 称其湿重, 计算凋落物的最大吸水率, 由最大吸水率及凋落物的积累量计算凋落物持水量<sup>[10]</sup>。

#### 2.4 土壤持水量及渗透速率的测定

在所选样地中, 随机确定 3 个样点挖土壤剖面, 用环刀分层(0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm)取样, 每层 3 次重复, 带回室内进行土壤容重和孔隙度的测定。土壤容重和孔隙度测定均采用环刀法, 土壤渗透性测定采用双环渗透法<sup>[11]</sup>。同时, 利用孔隙度计算土壤最大持水量、非毛管持水量及毛管持水量。土壤最大持水量和非毛管持水量的计算公式为:  $W_t = 10\ 000P_t h$ ,  $W_o = 10\ 000P_o h$ ,  $W_c = 10\ 000P_c h$  式中:  $W_t$ ——土壤最大持水量( $t/hm^2$ );  $W_o$ ——土壤非毛管持水量( $t/hm^2$ );  $W_c$ ——土壤毛管持水量( $t/hm^2$ );  $P_t$ ——土壤总孔隙度(%);  $P_o$ ——土壤非毛管孔隙度(%);  $P_c$ ——土壤毛管孔隙度(%);  $h$ ——土壤厚度(m)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同群落类型地上植被层的截留量

本研究群落地上植被层的截留量由林冠截留量、灌木截留量及凋落物的截留量构成。由表 2 可以看出, 无论是乔木林还是灌丛, 凋落物层的截留量在总

截留量中都占有主导地位。两种乔木林中, 凋落物层截留量都占到了总截留量的 80% 以上, 榛子灌丛与绣线菊灌丛也分别达到了 50.59% 和 38.89%。该结果说明凋落物层在森林植被水源涵养功能的发挥中具有突出作用。同时, 由表 2 也可以看出, 在乔木林中, 林下灌木的截留作用较弱, 其所占比例分别只有 3.42% 和 1.57%。

不同群落地上植被的总截留量以人工落叶松林为最高, 其次为天然次生杨桦林, 然后依次为榛子灌丛和绣线菊灌丛, 分别为 4.39, 3.81, 1.70 和 0.18 mm。说明乔木林地上植被层的截留量明显高于灌木林。其主要原因在于乔木林凋落物的积累量远高于两种灌木林, 天然次生杨桦林与人工落叶松林的积累量分别为榛子灌丛的 5.18 和 4.48 倍, 为绣线菊灌丛的 31.78 和 27.49 倍。两种乔木林相比, 天然次生杨桦林的凋落物积累量高于人工落叶松林, 而后的截留量却高于前者, 导致这种结果的原因在于针叶树凋落物的持水率大于阔叶树, 二者的持水率分别为 289.41% 和 232.87%, 针叶树与落叶树凋落物持水率的这种差异已得到很多研究的证明<sup>[10-12]</sup>。

从表 2 也可以看出, 榛子灌丛灌木截留量(0.84 mm)要高于人工落叶松林及天然次生杨桦林中林冠截留量与灌木截留量之和(分别为 0.81 和 0.48 mm), 说明发育较好的灌木植被的地上部分对降水可以起到与乔木林相同甚至更为明显的调控作用。

表 2 不同群落类型地上植被层的截留量

群落类型	林冠截留量		灌木截留量			凋落物截留量			合计	
	截留量/ mm	百分比/ %	生物量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	截留量/ mm	百分比/ %	凋落物量/ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	截留量/ mm	百分比/ %	截留量/ mm	百分比/ %
绣线菊灌丛			2.67	0.11	61.11	0.45	0.07	38.89	0.18	100
榛子灌丛			16.26	0.84	49.41	2.76	0.86	50.59	1.70	100
天然次生杨桦林	0.42	11.02	1.05	0.06	1.57	14.30	3.33	87.40	3.81	100
人工落叶松林	0.66	15.03	2.51	0.15	3.42	12.37	3.58	81.55	4.39	100

两种灌木群落地上植被层的截留能力有很大差异, 无论是灌木截留量还是凋落物的截留量, 榛子灌丛都远远高于绣线菊灌丛, 地上植被总截留量前者约为后者的 9.44 倍。同为灌木群落, 但其形成原因、立地条件、生长状况和干扰条件都有很大不同, 导致其对降水的调节能力存在很大差别。榛子灌丛是在森林采伐迹地上发育起来的先锋群落, 由于采伐迹地土壤肥沃, 榛子灌丛生长迅速, 同时, 由于具有较高的经济价值, 受到了良好的保护, 因此群落盖度和生物量都较大, 地上植被层对降水的调节能力也较强<sup>[13]</sup>。绣线菊灌丛是在较差的立地条件及强烈人为干扰条

件下形成的一种群落类型, 由于立地条件较差, 且常年处于放牧及樵采干扰之下, 群落盖度及生物量都较低, 对降水的调节能力较弱。因此, 对于该地区广泛分布的绣线菊灌丛应该进行保护, 以改善群落的生长状况, 提高群落对降水的调节能力, 以发挥较好的水土保持及水源涵养功能。

#### 3.2 不同群落类型的土壤容重及孔隙特征

对于各种群落类型来说, 土壤容重都随土层深度的增加而增大(表 3)。就几种类型的比较来看, 土壤容重以绣线菊灌丛为最高, 变动范围为 1.21~1.35  $g/cm^3$ ; 天然次生杨桦林与人工落叶松林相近, 分别为

0.69~1.16 g/cm<sup>3</sup> 和 0.85~1.16 g/cm<sup>3</sup>; 榛子灌丛最低, 变动范围为 0.46~1.24 g/cm<sup>3</sup>。绣线菊灌丛土壤容重最高与其长期受到强烈的人畜干扰有关, 人畜对土壤的频繁踩踏使得土壤更为紧实, 导致容重增加。

与土壤容重的变化规律相似, 各群落类型土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度及总孔隙度都随土壤深度的增加而降低。就不同类型的比较来看, 土壤总孔隙度以榛子灌丛为最高, 其变动范围为 52.67%~82.07%,

然后依次为天然次生杨桦林、人工落叶松林和绣线菊灌丛, 其变动范围分别为 52.32%~65.26%, 50.03%~58.67% 和 40.87%~52.73%。不同群落类型土壤孔隙度的变化与土壤容重的变化相对应, 土壤容重较大意味着土壤具有较小的孔隙度。绣线菊灌丛土壤的孔隙度最小, 一方面与人畜的严重干扰有密切的关系, 另一方面, 与植被层对土壤的影响较弱有关。几种群落类型中, 绣线菊灌丛的生物量最小, 凋落物的积累量也最低, 植被层对土壤结构的影响最小。

表 3 不同群落类型土壤的孔隙特征及持水量

群落类型	土层厚度/ cm	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/ %	毛管孔隙度/ %	非毛管孔隙 度/%	毛管持水 量/mm	非毛管持水 量/mm	最大持水 量/mm
绣线菊灌丛	0—10	1.21	50.37	43.16	7.20	43.16	7.20	50.37
	10—20	1.26	52.73	39.78	12.94	39.78	12.94	52.73
	20—30	1.26	50.70	42.43	8.28	42.43	8.28	50.70
	30—40	1.35	40.87	33.94	6.93	33.94	6.93	40.87
	合计					159.31	35.35	194.67
榛子灌丛	0—10	0.46	82.07	71.42	10.65	71.42	10.65	82.07
	10—20	0.81	71.04	57.59	13.45	57.59	13.45	71.04
	20—30	0.96	65.77	54.42	11.35	54.42	11.35	65.77
	30—40	1.24	52.67	45.19	7.47	45.19	7.47	52.67
	合计					228.62	42.92	271.55
天然次生 杨桦林	0—10	0.69	65.26	42.16	23.11	42.16	23.11	65.26
	10—20	0.97	58.09	41.54	16.55	41.54	16.55	58.09
	20—30	0.94	60.13	43.09	17.03	43.09	17.03	60.13
	30—40	1.16	52.32	38.83	13.50	38.83	13.50	52.32
	合计					165.62	70.19	235.80
人工落叶松林	0—10	0.85	58.67	50.62	8.05	50.62	8.05	58.67
	10—20	0.97	56.41	47.00	9.41	47.00	9.41	56.41
	20—30	1.06	52.03	44.27	7.77	44.27	7.77	52.03
	30—40	1.16	50.03	42.34	7.69	42.34	7.69	50.03
	合计					184.22	32.92	217.14

### 3.3 不同群落类型的土壤持水量

从表 3 可以看出, 不同群落间土壤最大持水量差别较大, 由高到低的顺序为: 榛子灌丛 > 天然次生杨桦林 > 人工落叶松林 > 绣线菊灌丛, 它们的最大持水量分别为 271.55, 235.80, 217.14 和 194.67 mm, 最高的榛子灌丛为最低的绣线菊灌丛的 1.39 倍。非毛管持水量以天然次生杨桦林为最高, 达到了 70.19 mm, 其次为榛子灌丛, 为 42.92 mm, 华北落叶松人工林与绣线菊灌丛则较低, 分别为 32.92 和 35.35 mm。土壤最大持水量为毛管孔隙与非毛管孔隙水分贮蓄量之和, 能够反映土壤贮蓄和调节水分的潜在能力, 而非毛管持水量为土壤中透水孔隙所能够容蓄的水量, 这两个指标都是评价林地土壤水源涵养能力的

重要指标<sup>[3,14]</sup>。因此, 从总持水量及非毛管持水量来看, 天然次生杨桦林和榛子灌丛具有较好的水源涵养功能, 而绣线菊灌丛的水源涵养功能最差。

### 3.4 不同群落类型土壤的渗透速率

土壤的渗透性能是反映林分水源涵养功能的重要指标, 渗透性能越好, 渗透速率越大, 则会有更多的地表径流转化为壤中流和地下径流, 使土壤的蓄水量增加<sup>[15]</sup>。不同群落表层土壤渗透速率如图 1 所示。从图 1 可以看出, 不同群落类型表层土壤水分入渗过程类似, 入渗速度都随入渗时间的增加而减小, 初期入渗速率较大, 而后逐渐下降, 最后趋于稳定。由图 1 还可以看出, 土壤渗透速率以天然次生杨桦林为最高, 初渗速率和终渗速率分别为 30.00 和 14.29

mm/min, 榛子灌丛和人工落叶松林的土壤入渗速率相近, 榛子灌丛的初渗速率和终渗速率分别为 10.34 和 7.04 mm/min, 人工落叶松林的初渗速率和终渗速率分别为 9.38 和 7.14 mm/min, 绣线菊灌丛的渗透速率最低, 初渗速率和终渗速率分别为 1.25 和 0.98 mm/min。土壤的入渗速率主要决定于土壤非毛管孔隙的数量, 非毛管孔隙度越大, 土壤入渗速度越快, 反之则越慢。几种群落类型土壤入渗速率的变化与土壤非毛管孔隙度的变化基本一致, 土壤非毛管孔隙度由大到小分别为天然次生杨桦林、榛子灌丛、人工落叶松林和绣线菊灌丛(表 3)。

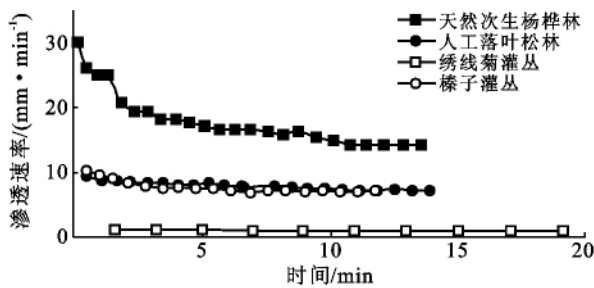


图 1 不同群落类型表层土壤(0—10 cm)水分入渗过程

### 3.5 不同群落类型的水源涵养能力

从土壤持水量、林冠截留量、灌木截留量及凋落物的持水量 4 个方面评价不同群落的水源涵养能力。

表 4 不同群落类型总的水源涵养量

群落类型	土壤持水量		林冠截留量		灌木截留量		凋落物截留量		涵养水量	
	持水量/ mm	比例/ %	截留量/ mm	比例/ %	截留量/ mm	比例/ %	截留量/ mm	比例/ %	截留量/ mm	比例/ %
绣线菊灌丛	194.67	99.91			0.11	0.06	0.07	0.03	194.85	100
榛子灌丛	271.55	99.38			0.84	0.31	0.86	0.31	272.52	100
天然次生杨桦林	235.80	98.41	0.42	0.17	0.06	0.03	3.33	1.39	239.61	100
人工落叶松林	217.14	98.02	0.66	0.30	0.15	0.07	3.58	1.61	221.53	100

## 4 结论

(1) 研究区地上植被总截留量(包括林冠截留量、灌木截留量及凋落物截留量)由高到低的顺序依次为:人工落叶松林>天然次生杨桦林>榛子灌丛>绣线菊灌丛,除受到强烈干扰的绣线菊灌丛外,凋落物截留量在地上植被层总截留量中占有最大比例。

(2) 最大持水量及总孔隙度都以榛子灌丛为最大,其次分别为天然次生杨桦林、人工落叶松林和绣线菊灌丛,但天然次生杨桦林的非毛管孔隙度高于榛子灌丛。表层土壤渗透速率以天然次生杨桦林为最高,绣线菊灌丛最低,榛子灌丛与人工落叶松林相近,

由表 4 可以看出,总的水源涵养量由高到低的顺序为:榛子灌丛>天然次生杨桦林>人工落叶松林>绣线菊灌丛,其值分别为 272.52, 239.61, 221.53 和 194.85 mm。在总的水源涵养量的构成中,土壤持水量占有主导地位,在 4 种群落中,其所占比例分别达到了 99.38%(榛子灌丛),98.41%(天然次生白桦林),98.02%(人工落叶松林)和 99.91%(绣线菊灌丛)。因此,水源涵养总量的排序与土壤最大持水量的排序相一致。同时也可以看出,榛子灌丛的水源涵养总量高于天然次生杨桦林和人工落叶松林,这说明有些类型的灌木植被同样可以具有较高的水源涵养功能,对这些灌丛应该加以保护和利用。

林冠截留量、灌木截留量及凋落物截留量在水源涵养总量中所占比例较小,但其在群落水源涵养功能的形成和维持中具有重要作用。林冠层、灌木层和凋落物层在降低雨滴的动能,保护土壤结构,尤其是土壤的孔隙结构方面具有重要作用,在以上 3 个层次的保护之下,土壤的孔隙结构得到保护,更多的降水能够以较高的入渗速率进入到土壤,从而维持较高的水源涵养功能<sup>[2]</sup>。本研究中,地上植被层发育更好的榛子灌丛、天然次生杨桦林和人工落叶松林的土壤孔隙度、土壤持水量及土壤渗透速率明显高于地上植被较差的绣线菊灌丛就充分说明了地上植被层在水源涵养功能形成中的作用。

土壤渗透速率的变化与非毛管孔隙度的变化相一致。

(3) 总的水源涵养量由高到低的顺序依次为:榛子灌丛(272.52 mm)>天然次生杨桦林(239.61 mm)>人工落叶松林(221.53 mm)>绣线菊灌丛(194.85 mm),地上植被层截留量在水源涵养总量中所占比例较小,截留量的大小不能完全说明地上植被层在水源涵养功能形成中的作用。

(4) 在燕山北部地区,天然次生杨桦林和榛子灌丛具有较好的水源涵养功能,而受到强烈人为干扰的绣线菊灌丛水源涵养功能最差,需采取合理的经营措施对该地区大面积分布的绣线菊灌丛进行改造,以提高其水源涵养能力。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王兵,任晓旭,胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业科学,2011,47(2):145-153.
- [2] 贺淑霞,李叙勇,莫菲,等. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J]. 生态学报,2011,31(12):3285-3295.
- [3] 魏强,张秋良,代海燕,等. 大青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,2008,22(2):111-115.
- [4] 成晨,王玉杰,潘玉娟,等. 重庆缙云山不同林分类型水源涵养功能研究[J]. 水土保持通报,2009,29(4):174-179.
- [5] 王鹏程,肖文发,张守攻,等. 三峡库区主要森林植被类型土壤渗透性能研究[J]. 水土保持学报,2007,21(6):51-56.
- [6] 秦嘉海,魏淑莲,金自学,等. 不同针叶林对祁连山森林灰褐土理化性质和水分涵养功能的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(5):84-87.
- [7] 赵建成,孔韶普. 河北木兰围场植物志[M]. 北京:科学出版社,2008:2-5.
- [8] 许中旗,李文华,刘文忠,等. 我国东北地区蒙古栎林生物量及生产力的研究[J]. 中国生态农业学报,2006,14(3):21-24.
- [9] 郑郁善,管大耀,李仁昌. 杉木(19年生)毛竹混交林水源涵养能力研究[J]. 浙江林学院学报,1998,15(1):63-68.
- [10] 潘紫重,杨文化,曲银鹏. 不同林分类型凋落物的蓄水功能[J]. 东北林业大学学报,2002,30(5):19-21.
- [11] 马雪华,王淑元. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1994:213-253.
- [12] 闫俊华,周国逸,唐旭利,等. 鼎湖山3种演替群落凋落物及其水分特征对比研究[J]. 应用生态学报,2001,12(4):509-512.
- [13] 李倩茹,许中旗,许晴,等. 燕山西部山地灌木群落凋落物积累量及其持水性能研究[J]. 水土保持学报,2009,23(2):75-78.
- [14] 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.
- [15] 吴钦孝,韩冰,李秧秧,等. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J]. 中国水土保持科学,2004,2(6):1-5.

(上接第15页)

- [11] McHale P J, Mitchell M J. Disturbance effects on soil solution chemistry due to heating cable installation[J]. Biology Fertility of soil, 1996,22(1/2):40-44.
- [12] Fawcett J K, Scott J E. A rapid and precise method for the determination of urea[J]. Journal of Clinical Pathology, 1960,13(2):156-159.
- [13] Lamber H, Chapin III F S, Pons T L. Plant Physiological Ecology[M]. New York: Springer, 1998: 43-45.
- [14] Weltzin J F, Pastor J, Harth C, et al. Response of bog and fen plant communities to warming and water-table manipulations[J]. Ecology, 2000,81(12):64-78.
- [15] Ryan G R. Effects of climate change on plant respiration[J]. Ecol. Appl., 1991,1(2):157-167.
- [16] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate systems [J]. Science, 2002,298(5601):2173-2176.
- [17] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, et al. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures[J]. Ecol. Appl., 1994,4(3):17-25.
- [18] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. Soil Biol. Biochem., 1995,27(6):53-60.
- [19] Gough L, Hobbie S E. Responses of moist nonacidic arctic tundra to altered environment: Productivity, biomass, and species richness[J]. Oikos, 2003,103(1):204-16.
- [20] Koerselman W, Meuleman A F M. Vegetation N : P ratio: A review[J]. Environmental Pollution, 2003, 124(5):179-221.