

辽西低山丘陵区人工油松林和沙棘林的水文生态效应

魏 晶, 吴 钢*

(中国科学院生态环境研究中心 系统生态国家重点实验室 北京 100085)

摘要:利用设置在不同地类内的径流小区,对辽西大凌河流域的沟壑丘陵区进行定位观察,探讨辽西半干旱区主要造林树种油松和沙棘的水文生态效应。结果表明:2002 年 6 月~2004 年 6 月平均降水量为 238.9mm 时,油松和沙棘平均林冠截留量分别为 55.5mm 和 76.05mm,其截留率分别为 23.08% 和 32.28%,即约有 1/4~1/3 降水被林冠截留。油松林中凋落物平均截留率为 14.17%,沙棘林为 20.8%。油松林和沙棘林年均径流深分别为 2.516mm 和 0.893mm;侵蚀量为 15.57 t km^{-2} 和 0.76 t km^{-2} ;林地内径流深和侵蚀量约为荒地(对照)的 1/20 和 1/50。林地土壤理化性质,除土壤容重之外,0~20cm 土层的总孔隙度、非毛管孔隙度、饱和含水量和非毛管持水量都高于 20~40cm 土层;油松林和沙棘林土壤有机质、全氮、全钾和速效钾含量均显著高于荒地;pH、全磷和速效磷在地类和不同土层深度中没有显著差异。沙棘林和油松林的非毛管持水量分别是荒地的 275.9% 和 182.1%。

关键词:低山丘陵;人工油松林;沙棘林;水文生态效应

文章编号:1000-0933(2006)07-2087-06 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Hydro-ecological effects of artificial *Pinus tabulaeformis* carr. and *Hippophae rhamnoides* stands in low mountainous upland of western Liaoning Province, China

WEI Jing, WU Gang* (State Key Laboratory of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2087~2092.

Abstract: *Pinus tabulaeformis* carr. and *Hippophae rhamnoides* are widely planted in the low mountainous upland and loess plateau, and are main species for afforestation in the semiarid region. In order to expound their roles in controlling serious soil and water loss and the mechanism of role, a study on the hydro-ecological effects of the stands was carried out in the period from 2002 to 2004, using the method of runoff plot set up in different stands and soil physical and chemical analyses.

The experimental stands are located in the low mountainous upland of western Liaoning Province, where the annual average air temperature is $5.4\sim 8.7^{\circ}\text{C}$, the annual precipitation is 450~580mm, of which in June averages 238.9mm, the annual average humidity is 38%~82%. Vegetation cover is 28% of entire land area. The age of *Pinus tabulaeformis* Carr. stand is 28 year old, and its density is 2825 tree/hm², and forest crown coverage is 0.75; while those *Hippophae rhamnoides* stand is 11 year old, 8950 tree/hm², 0.90, respectively.

The results showed that the intercepting rates of canopy in *Pinus tabulaeformis* carr. and *Hippophae rhamnoides* stand were 23.08% and 32.28%. The litter intercepting rate averaged 14.17% in *Pinus tabulaeformis* carr. and 20.8% in *Hippophae rhamnoides* stands, respectively. The runoff depths were 2.516mm and 0.893mm in *Pinus tabulaeformis* carr. and *Hippophae rhamnoides* stands while erosion amounts 15.57 t km^{-2} and 0.76 t km^{-2} , respectively. Under the comprehensive action of the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40473054);国家科技部农业科技成果转化资金资助项目(05EFN216600446)

收稿日期:2006-01-09;修订日期:2006-04-07

作者简介:魏晶(1973~),女,山西人,博士,主要从事环境管理和恢复生态学研究. E-mail: weijingrcees@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wug@rcees.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40473054); Agriculture Technological Production Translation of Science and Technology of Ministry(05EFN216600446)

Received date: 2006-01-09; **Accepted date:** 2006-04-07

Biography: WEI Jing, Ph.D., mainly engaged in environment management and restoration ecology. E-mail: weijingrcees@126.com

artificial stands, the runoff depth and erosion amount from woodland were, respectively, 1/20 and 1/50 of that from wasteland, which indicated the great hydro-ecological functions of *Pinus tabulaeformis* carr. and *Hippophae rhamnoides* forests.

Litter and died roots may be decomposed into organic matter and nutrient substances with the help of microbe; thus will be distinctly improved the physical and chemical properties of its soil after death. In comparison with wasteland, the bulk density of soil decreased in woodland, while the content of organic matter, total N, total K and available K significantly increased. The physical properties of soil in woodland, such as total porosity, non-capillary porosity, saturated moisture content, non-capillary water-holding capacity etc., were distinctly higher in surface soil (0 ~ 20 cm) than those of soil at the depth of 20 ~ 40 cm. There was no significant difference in pH, total P and available P among different land types or different soil depth. The non-capillary water-holding capacities in *Pinus tabulaeformis* carr. and *Hippophae rhamnoides* stands were 182.1% and 275.9% times in wasteland, respectively.

Key words: low upland; artificial *Pinus tabulaeformis* carr.; *Hippophae rhamnoides*; hydro-ecological effects

辽西大凌河流域低山丘陵区是辽宁省生态环境最脆弱的地区,由于气候恶劣,加之人为破坏,致使植被退化,水土流失严重,水库淤积,自然灾害频繁,严重制约辽西地区的经济和社会的发展。大凌河流域不仅具有调洪蓄水,保护城市、农田、村庄及其人民群众生命财产安全的重要作用,也是阜新、锦州、朝阳以及辽河三角洲地区重要的水源地。因此,其生态环境的改善,对于促进辽西国民经济持续、快速发展起着举足轻重的作用。

油松和沙棘是大凌河流域防治水土流失进行生态恢复的主要树种之一。尽管油松和沙棘在调节洪水、涵养水源、保持水土及保护生态环境等方面有明显的改善作用,但对低山丘陵区人工油松林和沙棘林的水文生态效应进行长期定位研究,不仅能够对该区水土保持功能进行定量分析,而且能够为辽西半干旱区生态规划和生态恢复提供理论依据。因此,本文以该区的主要造林树种油松和沙棘为主要研究对象,揭示其对降雨(雨季)生态效应的分布规律和内在作用机制。

1 研究区概况

大凌河流域低山丘陵区位于东经 118°50' ~ 121°20', 北纬 40°24' ~ 42°20', 地处内蒙古黄土高原与松辽平原结合处,属于土石低山丘陵区。流域总面积为 12867.91 km², 其中水土流失面积为 6603.18 km², 占流域总面积的 51.3%。该区属北温带半湿润半干旱大陆性季风气候, 年均降水为 450 ~ 580 mm, 其中 6 ~ 8 月降水占全年 80% 以上, 年均气温 5.4 ~ 8.7℃, 年均日照时数 2600 ~ 2900 h, 大于 10℃ 积温 2800 ~ 3500℃, 年均蒸发量 2100 mm, 年均相对湿度 38% ~ 82%, 无霜期 120 ~ 156 d。流域内地表年均流量为 8.82 亿 m³, 洪峰流量为 14800 m³/s, 输沙量为 903 万 t。区内植被处华北植物区系向内蒙古植物区系的过渡带, 属森林草原植被, 除有小面积的以蒙古柞、椴树、桦树等树种为主的天然针阔混交林, 其余大部分为解放后营造的各种人工林, 以油松、沙棘、刺槐等居多; 草本植物以胡枝子、隐子草、针茅、碱草、羊胡草等为主, 森林覆盖率为 28%。土壤类型主要是棕壤土、褐土、草甸土和风沙土, 土壤肥力较低, 土层较薄。

2 研究方法

2.1 径流小区设置

在油松林(林龄 28, 密度 2825 ind./hm², 平均胸径 6.9 cm, 平均树高 4.7 m, 郁闭度 0.75; 阳坡, 坡度约 15°)、沙棘林(林龄 11, 密度 8950 ind./hm², 平均胸径 4.3 cm, 平均树高 1.9 m, 郁闭度 0.90; 阳坡, 坡度约 15°) 和荒地(撂荒约 10 a, 阳坡, 坡度约 15°) 3 种不同地类中设置径流小区, 面积为 100 m² (20 m × 5 m), 四周筑有高 35 cm (地上 20 cm, 地下 15 cm) 的围堰, 在小区下方中间部位设置接流槽, 接流槽下方设圆形接流池, 区外设排水沟。用雨量筒观测降雨量; 降雨结束、地表径流终止后测量接流池内水深推算径流总量; 根据测定的含沙率计算土壤侵蚀量; 同时用常规方法测定径流和侵蚀土壤中的氮、磷、钾含量^[1]。

2.2 土壤样品采集和土壤理化性质测试

于 2002、2003、2004 年在 3 种不同地类的每块标准地内分别选设 3 个土壤剖面, 按 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 分两层采集土样。用质量法测定土壤含水量, 用环刀法测定土壤容重、毛管孔隙度、饱和含水量, 土壤有机质、

全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、pH 值等采用常规农化方法测定^[2, 3]。根据土壤孔隙度和土层厚度计算土壤贮水量。

2.3 林冠、树干截留量观测

于 2002、2003、2004 年每年 6 月在 3 种不同地类的各标准地内进行降雨量、林内穿透雨、树干径流量的观测,测定方法见《森林生态系统定位研究技术规范》和相关文献^[4-6]。具体做法:在林外开阔地段布置 3 个雨量筒收集大气降雨,并参照当地气象观测站资料;在各标准地内均布置 10 个穿透雨收集器测定林内穿透雨;选取油松林 3 个径级的标准木各 3 株,在离地面 1.2 m 处用聚氯乙烯胶管蛇形环绕树干,接引到树干茎流收集器中(测定树干茎流量)。树冠截留量按公式: $P_i = P - P_j - P_k$ 计算,式中, P_i 为树冠截留量; P 为大气降雨量; P_j 为乔木树干茎流量; P_k 为穿透雨量。

2.4 凋落物贮量和持水量的测定

于 2002、2003、2004 年在 3 种不同地类的每块标准地内沿对角线设 20 cm × 20 cm 的小样方 5 个,测量枯落物层的厚度并收集样方中所有枯落物;室内烘干称重,测得枯落物的自然含水率与干重,以此推算单位面积的枯落物贮量;枯落物最大持水量测定用浸水法^[7]。

3 结果分析

3.1 人工油松林和沙棘林的树冠截留量和树干径流量

大气降水因部分降水被林冠枝叶截持并蒸发到大气中,使林地内实际降水量减少。林冠层的截留作用不仅减少了林下径流量,而且推迟了产流时间^[8]。林冠截留功能受树种组成、树冠大小、形状、枝叶密度、吸着水的能力、林分郁闭度、降雨量、降雨强度等多种因素影响^[9-12],导致林冠对降雨截留能力有较大的差异。连续 3a 定位观察结果(表 1)表明,不同年份林冠截留量差异较大。2004 年 6 月降雨量比 2002 和 2003 年同期分别增加了 31.7mm 和 52.6mm,但截留量却分别减少了 11.2mm(油松)、14.08mm(沙棘)和 13.5mm(油松)、12.72mm(沙棘)。根据当地气象资料分析可知,2004 年 6 月的降水多以历时短的暴雨形式出现,即雨强大,时间短,降雨的穿透性强。可见,除大气降水量外,影响林冠截留量的主要因子是降雨强度和连续降雨时间。2002~2004 年间,6 月平均降水为 238.9mm 时,油松林和沙棘林树冠截留量分别为 55.5mm 和 76.05mm,平均截留率为 23.08% 和 32.28%,即约有 1/4~1/3 的降水被林冠截留,使林地内径流减少,这与文献^[13]的研究结果基本一致。从 2002~2004 年大凌河低山丘陵区人工油松林 6 月平均树干径流量为 7.96mm,占降水 3.37%(表 1),这与文献^[3, 6, 13]在陕北黄土高原的研究结果即树干径流量为 12.8mm 偏低,而占年均降水 3.3% 基本一致。人工油松林树干径流量偏低的原因是在本研究中仅野外测试了夏季 6 月份的树干径流量。

表 1 大凌河流域低山丘陵区人工油松林和沙棘林树冠截留量(mm)

Table 1 Canopy intercepting amount of artificial *Pinus tabulaeformis* carr and *Hippophae rhamnoides* in Dalinghe River watershed(mm)

时间 Time	6 月降水量 Rainfall in June	油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> carr				沙棘林 <i>Hippophae rhamnoides</i>			
		林内降水量 Rainfall under canopy	林冠截留量 Intercepting amount	林冠截留率 Intercepting rate(%)	树干茎流量 Stem flow amount	茎流率 Stem flow rate (%)	林内降水量 Rainfall under canopy	林冠截留量 Intercepting amount	林冠截留率 Intercepting rate (%)
2002.6	235.2	162.98	65.1	27.68	10.12	4.3	154	81.2	34.5
2003.6	214.7	147.18	57.4	26.73	6.65	3.1	134.86	79.84	37.19
2004.6	266.9	216.35	43.9	16.45	7.12	2.7	199.78	67.12	25.15
平均 Ave.	238.9	175.5	55.5	23.23	7.96	3.33	162.88	76.05	31.83

3.2 人工油松林和沙棘林凋落物截留量

不同森林生态系统内,凋落物的质和量各不相同,其吸水特性也不尽相同^[12, 14, 15]。表 2 为低山丘陵区人工油松林和沙棘林凋落物量及其截留量。6 月降雨量为 238.9mm,油松林中凋落物截留量是 33.83mm,平均截留率为 14.17%;而沙棘林中凋落物截留量是 48.5mm,平均截留率为 20.8%。分析表 2 可知,沙棘林中凋落物量及其截留量都远大于人工油松林,这主要是由于沙棘林枝叶繁茂,落叶量多,且郁闭度高,透光性差,林内温度较低,不利于凋落物分解,所以林内凋落物量较大^[16]。

表 2 人工油松林和沙棘林凋落物截留量

Table 2 Litter intercepting amount of artificial *Pinus tabulaeformis* carr. and *Hippophae rhamnoides* in Dalinghe River watershed

时间 Time	6月降水量 Rainfall in June (mm)	油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> carr.				沙棘林 <i>Hippophae rhamnoides</i>			
		凋落物现存量 Litter amount (kg·hm ⁻²)	凋落物厚度 Litter thickness (cm)	凋落物对6月 降水的截留量 Intercepting amount of litter (mm)	截留率 Intercepting rate (%)	凋落物现存量 Litter amount (kg·hm ⁻²)	凋落物厚度 Litter thickness (cm)	凋落物对6月 降水的截留量 Intercepting amount of litter (mm)	截留率 Intercepting rate(%)
2002-06	235.2	2378.1	1.9	34.5	14.7	5578.1	3.9	45.7	19.4
2003-06	214.7	2285.9	1.9	29.1	13.6	6425.2	4.1	49.6	23.1
2004-06	266.9	2409.4	2.1	37.9	14.2	6719.3	4.4	53.2	19.9
平均 Ave.	238.9	2357.8	1.97	33.83	14.17	6240.87	4.13	48.5	20.8

3.3 人工油松林、沙棘林和荒地的土壤理化性状

从表3可看出,除土壤容重之外,0~20cm土层总孔隙度、非毛细孔隙度、饱和含水量和非毛细持水量都高于20~40cm土层,且油松林和沙棘林中这些物理性状明显高于荒地。这是森林表层土壤长期积累凋落物并腐烂从而形成较厚腐殖质层的结果。沙棘林和油松林的非毛细持水量比荒地分别是荒地的275.9%和182.1%,因此在低山丘陵区人工种植沙棘和油松能够显著改善土壤结构,有利于保持水土,防止区域水土流失。有关研究表明,生态系统土壤的渗透性能取决于其非毛细孔隙,在饱和持水量中,非毛细孔隙中滞留的重力水在调蓄水方面具有更为重要的作用^[7, 17~19]。因此,近年来不少研究提出,将土壤非毛细孔隙度大小作为判断生态系统土壤蓄水能力大小的主要指标,并用它和土层厚度来计算土壤蓄水量^[17]。

表 3 人工油松林、沙棘林和荒地 0~40cm 土壤物理性质

Table 3 Physical properties of soil (0~40cm) in artificial *Pinus tabulaeformis* carr., *Hippophae rhamnoides* forest and wasteland

地类 Land type	土层 Soil depth (cm)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity (%)	非毛细孔隙度 Non-capillary porosity (%)	饱和含水量 Saturated moisture content (%)	非毛细持水量 Non-capillary water-holding capacity (mm)
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> carr.	0~20	1.23	53.36	7.12	45.78	14.24
	20~40	1.26	52.37	4.73	41.53	9.46
沙棘林 <i>Hippophae rhamnoides</i>	0~20	1.05	59.3	10.71	57.4	21.42
	20~40	1.09	57.88	8.22	50.95	16.44
荒地 Wasteland	0~20	1.31	50.72	3.91	37.95	7.82
	20~40	1.33	50.06	3.56	36.02	7.12

根系的分泌、死亡、腐烂和凋落物分解使土壤,尤其是对表层土壤的容重、有机质、土壤养分、微生物种群等产生重要影响。由表4的显著性检验可看出,pH、全磷和速效磷在不同地类和土层没有显著差异;有机质、全氮、全钾和速效钾含量在油松林和沙棘林土壤中显著高于荒地,但在同一地类土壤,0~40cm土层中却没有显著差异;速效氮在油松林和沙棘林中含量显著大于荒地,但在油松林中,0~20cm表层土中速效氮含量与20~40cm土壤中含量差异显著。

3.4 人工油松林、沙棘林和荒地的径流量和侵蚀量

表5为2002~2004年6~8月人工油松林、沙棘林和荒地的径流深和侵蚀量。油松林和沙棘林3a平均径流深分别是2.516mm和0.893mm;而侵蚀量分别是15.57 t km⁻²和0.76 t km⁻²;径流深和侵蚀量约为荒地的1/20和1/50,表明沙棘和油松能显著减少地表径流和土壤侵蚀量,但沙棘的减流减沙率比油松好,这主要是由沙棘林和油松林中的树冠性状、枯落物层和土壤理化性状等差异综合作用的结果^[16]。

4 结论与讨论

4.1 2002~2004年6月平均降水为238.9mm时,油松林和沙棘林树冠截留量3a平均为55.5mm和76.05mm,

平均截留率为 23.08% 和 32.28%, 即约有 1/4 ~ 1/3 的降水被林冠截留, 而人工油松林 3a 平均树干茎流量为 7.96mm, 占降水量的 3.37%。不同植被类型中, 树冠对降雨均有较大截留作用, 平均截留率为 16.45% ~ 37.19%。

表 4 人工油松林、沙棘林和荒地 0~40cm 土壤化学性质

Table 4 Chemical properties of soil (0~40cm) in artificial *Pinus tabulaeformis* carr., *Hippophae rhamnoides* and wasteland

地类 Land type	土层 Soil depth (cm)	pH	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全 N Total N (g kg ⁻¹)	全 P Total P (g kg ⁻¹)	全 K Total K (g kg ⁻¹)	速效氮 Available N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> carr	0~20	8.5a	12.2a	0.77a	0.61a	27.81a	4.517b	0.038a	5.381a
	20~40	8.3a	8.34a	0.6a	0.63a	25.02a	3.052a	0.076a	4.108a
沙棘林 <i>Hippophae rhamnoides</i>	0~20	8.5a	13.87a	0.98a	0.65a	31.98a	7.512a	0.042a	7.033a
	20~40	8.4a	10.62a	0.74a	0.71a	27.7a	5.021a	0.083a	5.056a
荒地 Wasteland	0~20	8.6a	9.89b	0.63b	0.73a	21.25b	3.844c	0.05a	4.007b
	20~40	8.8a	5.89b	0.53b	0.53a	19.87b	2.453b	0.075a	3.501b

注:表中同一栏带不同字母的数字,表示在 5% 水平上差异显著;人工林种植后几乎没有人为的抚育措施,仅为自然生长状态。The different letters in the same column shows that there is significant difference at the level of 5%; The planted forest grows in a natural state.

表 5 人工油松林、沙棘林和荒地的径流深和侵蚀量

Table 5 Runoff depth and erosion amount from *Pinus tabulaeformis* carr., *Hippophae rhamnoides* and wasteland

时间 Time	夏季降水 Rainfall in summer (mm)	径流深 Runoff depth(mm)			侵蚀量 Erosion amount (t km ⁻²)		
		油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> carr	沙棘林 <i>Hippophae rhamnoides</i>	荒地 Wasteland	油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> carr	沙棘林 <i>Hippophae rhamnoides</i>	荒地 Wasteland
2002-06~08	309	2.912	0.795	34.642	15.64	0.9	789.87
2003-06~08	282.1	2.854	0.908	37.534	14.01	0.99	829.96
2004-06~08	350.7	1.782	0.976	54.342	17.07	0.39	913.23
平均 Ave.	313.9	2.516	0.893	42.17	15.57	0.76	844.35

4.2 油松林中凋落物截留量是 33.83mm, 平均截留率为 14.17%; 而沙棘林中凋落物截留量是 48.5mm, 平均截留率为 20.8%。凋落物最大持水率在 269.8% ~ 315.2% 之间, 约为自身干重的 2.7 ~ 3.2 倍。除土壤容重之外, 各地类 0~20cm 土层总孔隙度、非毛管孔隙度、饱和含水量和非毛管持水量都高于 20~40cm 土层, 且油松林和沙棘林中这些物理性状明显高于荒地。这是森林表层土壤长期积累凋落物并腐烂从而形成较厚腐殖质层的结果。沙棘林和油松林的非毛管持水量分别是荒地的 275.9% 和 182.1%。其中土壤有机质、全氮、全钾和速效钾含量也显著高于荒地。

4.3 2002~2004 年 6~8 月油松林和沙棘林 3a 平均径流深分别是 2.516mm 和 0.893mm; 而侵蚀量分别是 15.57 t km⁻² 和 0.76 t km⁻²; 径流深和侵蚀量约为荒地的 1/20 和 1/50。影响林内地表径流量和侵蚀量的因子很多, 主要受降雨量、降雨强度、降雨持续时间、植被状况及类型、林地凋落物量、土壤结构、土壤渗透性能及地形、坡度等条件的综合影响^[18~21]。为了进一步了解大凌河低山丘陵区不同地类中地表径流量与凋落物量、土壤物理性状间的关系, 本研究对同一地类各样方 (15×3) 数据进行回归分析, 结果表明大凌河低山丘陵区林内地表径流量与林内凋落物量、土壤非毛管孔隙度呈显著负相关; 与土壤容重呈显著正相关 (表 6)。这为以后在大凌河流域连续定位观察土壤环境因子提出了新的研究内容和研究方向, 同时为该区综合治理和生态恢复提供了详实数据和定量分析方法。

表 6 地表径流量 (Y) 与林地凋落物量、土壤物理性质 (X) 的回归方程

Table 6 Regression equation between runoff and litter, physical properties in forestland

项目 Content	回归方程 Regression equation	R ² (n = 15)
凋落物量 Litter amount	$Y = 7136.2 - 156.91X$	0.8422
土壤容重 Bulk density	$Y = 0.9743 + 0.0072X$	0.9312
土壤非毛管孔隙度 Soil non-capillary porosity	$Y = 12.02 - 0.1274X$	0.933

References:

- [1] Liang Y H. Forest hydrology and its measurement methods. Journal of Northeast Forestry College, 1983, 11(4):1~9.
- [2] Soil Science Society of China. Chemical analysis of agricultural soil sciences. Beijing: Science Press, 1983. 23~56.
- [3] Institute of soil science, Chinese Academy of Sciences. Analysis of soil physical & chemical properties. Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 1978. 45~56.
- [4] Zhao S D. Orientation study of forest ecosystem. Beijing: Science Press, 1995. 23~34.
- [5] Chen B F, Zhou G Y, Ceng Q B, *et al.* Hydrological processes and nutrients dynamics of hilly secondary rain forest in tropical zone. Journal of Forestry Science, 1994, 7(5):525~530.
- [6] Chen B F, Zhou G Y. Hydro-chemical cycling of hilly rain forest in tropical zone. Journal of Forestry Science, 1997, 10(2): 111~117.
- [7] Ma X H. Hydro-ecology of forest. Beijing: China Forestry Press, 1993. 91~132.
- [8] Huang Z L, Kong G H, Yu Q F, *et al.* Hydrological effect and its nutrient dynamics of evergreen broad-leaves forest in Southern tropical zone. Acta Phytocological Sinica, 2000, 24 (2): 157~161.
- [9] Zhou X F. Chinese forest and eco-environment. Beijing: China Forestry Press, 1999. 23~45.
- [10] Zhou X F. Ecological functions of forest and its management techniques. Beijing: China Forestry Press, 1999. 34~67.
- [11] Guo L Q, Wang Q H, Zhou H C, *et al.* Tree intercepting rainfall of main forest types in Plateau region of middle Yunnan. Science & technology of Forestry (Yunnan) 1999, (1): 22~25.
- [12] Liu X D, Wu Q X, Zhao H Y. Hydro-ecological effects of litter from artificial Chinese pine stand in Loess Plateau. Journal of water & soil conservation, 1991, 5(4): 87~92.
- [13] Zhao H Y, Wu Q X, Liu G B. Studies on hydro-ecological effects of artificial Chinese pine stand in Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(2): 376~379.
- [14] Geng Y Q, Wang B P. Water conservation functions of litter in forest ecosystem. Journal of Beijing Forestry University, 2000, 22 (5): 49~52.
- [15] Wu Q X, Zhao H Y. Hydrological effect of Forest and cover index of plants in Loess Plateau. Journal of Water & Soil Conservation, 2000, 20 (5): 32~34.
- [16] Luo Y C, Han S H, Wang H C, *et al.* Water conservation functions of several artificial forest ecosystems in semiarid region of Western Liaoning. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6):919~923.
- [17] Hao Z Q, Wang L H. Soil moisture characteristics of different forest types from upland in Eastern Liaoning. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9 (3): 237~241.
- [18] Huang Q F, Gao J, Wu Z M. Water conservation and soil fertility of different forest types. Journal of Anhui Agriculture University, 2002, 29 (1): 82~86.
- [19] Zhang J C, Hu H B, Zhu K C, *et al.* Water and soil holding of different land uses in upland of Southern Jiangsu. Journal of Nanjing Forestry University, 1995, 19 (3): 6~10.
- [20] Huang C B, Wei B E, Li J J. The surface runoff of different vegetation types in Guangxi. Forestry Science, 1991, 27(5): 490~497.
- [21] Huang C B, Wen A C. Climate-hydrological effect of evergreen broadleaves forest and artificial fir forest in Liluo region. Chinese Journal of Ecology, 1993, 12(3): 1~7.

参考文献:

- [1] 梁蕴华. 森林水文学及其试验研究方法. 东北林学院学报, 1983, 11(4):1~9.
- [2] 中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983. 23~56.
- [3] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 45~56.
- [4] 赵士洞. 森林生态系统定位研究技术规范. 北京: 科学出版社, 1995. 23~34.
- [5] 陈步峰, 周光益, 曾庆波, 等. 热带山地次生雨林生态系统的水文过程与养分动态. 林业科学研究, 1994, 7(5):525~530.
- [6] 陈步峰, 周光益. 热带山地雨林生态系统水文化学循环规律的研究. 林业科学研究, 1997, 10(2): 111~117.
- [7] 马雪华. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社, 1993. 91~132.
- [8] 黄忠良, 孔国辉, 余清发, 等. 南亚热带季风常绿阔叶林水文功能及其养分动态的研究. 植物生态学报, 2000, 24 (2): 157~161.
- [9] 周晓峰. 中国森林与生态环境. 北京: 中国林业出版社, 1999. 23~45.
- [10] 周晓峰. 森林生态功能与经营途径. 北京: 中国林业出版社, 1999. 34~67.
- [11] 郭立群, 王庆华, 周洪昌, 等. 滇中高原区主要森林类型森林植物的降雨截留功能. 云南林业部科技, 1999, (1): 22~25.
- [12] 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. 水土保持学报, 1991, 5(4): 87~92.
- [13] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原人工油松林水文生态效应. 生态学报, 2003, 23(2):376~379.
- [14] 耿雪清, 王保平. 森林地表枯枝落叶层涵养水源作用的研究. 北京林业大学学报, 2000, 22 (5): 49~52.
- [15] 吴钦孝, 赵鸿雁. 黄土高原森林水文生态效应和林草适宜覆盖指标. 水土保持通报, 2000, 20 (5): 32~34.
- [16] 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. 应用生态学报, 2004, 15(6):919~923.
- [17] 郝占庆, 王力华. 辽东山区主要森林类型林地土壤涵养水性能的研究. 应用生态学报, 1998, 9 (3): 237~241.
- [18] 黄庆丰, 高健, 吴泽民. 不同森林类型土壤肥力状况及水源涵养功能的研究. 安徽农业大学学报, 2002, 29 (1): 82~86.
- [19] 张金池, 胡海波, 朱克成, 等. 苏南丘陵区不同土地利用状况的蓄水保土功能研究. 南京林业大学学报, 1995, 19 (3): 6~10.
- [20] 黄承标, 韦炳二, 黎洁娟. 广西不同植被类型地表径流的研究. 林业科学, 1991, 27(5): 490~497.
- [21] 黄承标, 文受春. 里骆林区常绿阔叶林和人工杉木林气候水文效应. 生态学杂志, 1993, 12(3): 1~7.