

长江上游森林水源涵养功能及空间分布特征

李双权¹, 苏德毕力格^{2,3}, 哈斯¹, 马广文^{2,4}

(1. 北京师范大学 资源学院, 北京 100875; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012;

3. 国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012; 4. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 以长江上游森林生态系统为研究对象, 按照植被类型将研究区域划分成 11 个评估单元。根据研究区各森林类型林冠层、枯枝落叶层和土壤层的指标数据和 2001 年 NOAA 影像, 结合野外调查, 应用 GIS 技术对整个长江上游森林水源涵养功能及其在空间上的分布特征进行了探讨。结果表明: (1) 长江上游森林水源涵养功能平均值为 79.33 mm。林冠层、枯落物层、土壤层水源涵养功能平均值分别为 1.29、2.81 和 75.21 mm。长江上游森林水源涵养总量为 1.6675×10^{10} t。林冠层、枯落物层和土壤层分别占涵养总量的 1.63%、3.54% 和 94.81%。土壤层是森林系统水源涵养总量的主体。(2) 长江上游森林水源涵养功能由南向北呈现先增加后减少的抛物线趋势, 由西向东表现出近似幂函数曲线的逐渐减少趋势。这与林冠层的变化趋势相反, 与土壤层的变化趋势具有一致性。(3) 在水平方向上, 长江上游森林水源涵养功能以岷山—茶坪山—夹金山—锦屏山—玉龙山—一线为界, 表现出西强东弱的空间分布格局; 在垂直方向上, 森林水源涵养功能随着海拔的升高逐渐增加, 至海拔 4 200 m 左右, 出现减少的趋势。

关键词: 长江上游; 森林系统; 水源涵养功能; 空间分布特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)04-0062-06

中图分类号: S718.55

Water Conservation Function of Forest Ecosystem and Its Spatial Distribution Characteristics in Upper Reaches of the Yangtze River

LI Shuang-quan¹, Sudebilige², HASI¹, MA Guang-wen²

(1. College of Resource Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing

100875, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing

100012, China; 3. State Environment Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function

Assessment, Beijing 100012, China; 4. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Forest system in the upper reaches of the Yangtze River was chosen as the research object. The study area was divided into 11 assessment units by the forest vegetation types. According to the index of canopy, litter and soil layer of different forest types and NOAA remote sensing in 2001 and field investigation, water resource conservation of forest ecosystem and its spatial distribution characteristics in the upper reaches of the Yangtze River were studied by the method of GIS. Results showed that mean comprehensive water conservation function of forest ecosystems was 79.33 mm and that of canopy, litter, and soil layer was 1.29, 2.81 and 75.21 mm respectively. The total volume of comprehensive water resource conservation was 1.6675×10^{10} t and the water resource conservation of canopy, litter, and soil layer accounted for 1.63%, 3.54% and 94.81% of the total volume. The soil layer was the main part of the total water resource conservation of forest ecosystems. The water conservation function of forest ecosystems firstly increased then decreased from the south to the north and decreased gradually from the west to the east, showing as curve and power function trend respectively. This change trend coincided with that of the soil layer and was contrary with that of the canopy layer. In the horizontal direction, the water conservation function of forest ecosystem presented the west-high and east-low spatial pattern. The border was the line of Min Mountain—Chaping Mountain—Jiajin Mountain—Jinping Mountain—Yulong Mountain. In the vertical direction, the forest

收稿日期: 2011-01-09

修回日期: 2011-01-28

资助项目: 联合国环境规划署/全球环境基金项目(UNEP/GEF)“长江流域自然保护与洪水控制”(IMIS: GFL-2328-2740-4822; PMS: GF-3030-04-05-01)

作者简介: 李双权(1981—), 男(汉族), 内蒙古自治区扎赉特旗人, 博士, 主要从事干旱区地貌与土壤侵蚀。E-mail: lishuangquan@mail.bnu.edu.cn.

通信作者: 苏德毕力格(1972—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 副研究员, 主要从事生态规划与设计等方面研究。E-mail: su@cras.org.cn.

water conservation increased gradually to altitude of 4 200 m, thereafter it declined.

Keywords: upper reaches of the Yangtze River; forest ecosystem; water conservation function; spatial distribution characteristics

森林生态系统水源涵养功能是指森林拦蓄降水, 涵蓄土壤水分、补充地下水和调节河川径流的功能^[1], 近年来这方面已成为生态学研究中的一个热点问题。长江上游是长江水源区, 该地区的水源涵养和保护对长江流域和全国水资源具有重要的保障作用^[2]。其中森林是长江上游陆地生态系统的主体, 有巨大的涵养水土、调节河川径流的功能, 是维护整个长江流域生态平衡的屏障^[3]。目前, 对森林生态系统水源涵养功能的研究还存在以下的不足, 对林冠层、枯落物层和土壤层的研究较多^[4-9], 但对其综合水源涵养功能研究较少; 对某一特定地区研究较多^[5-7, 10-12], 流域尺度的研究较少。长江上游森林系统水源涵养功能已经有了一些成果^[1, 3, 35-36], 但缺乏空间分布格局特征的研究。

针对以上问题, 本研究以长江上游流域森林系统为研究对象, 根据研究区各森林类型林冠层、枯枝落叶层和土壤层的指标数据和 2001 年 NOAA 影像, 结合野外调查, 基于 GIS 技术对长江上游流域的森林水源涵养功能进行评估, 揭示其空间分布特征。深入了解长江上游生态系统现状, 为加强长江上游地区生态建设提供依据。

1 研究区概况

长江发源于青海省各拉丹东雪山, 从源头至宜昌的上游主干河道长约 4 511 km, 约占长江总长度的 70%, 流域面积约为 $1.08 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。研究区地处我国的第一和第二阶梯过渡地带, 海拔从 4 000 m 以上, 降到 500~600 m, 地势起伏大^[3]。地貌类型多样, 有山地、高原、丘陵、盆地和平原。跨高原、北亚热带和中亚热带三大气候区, 以亚热带为基带, 区内有局部南亚热带、暖温带、温带、寒温带气候类型分布, 生态环境复杂, 生物多样性丰富^[2]。森林资源独具特色, 面积约为 $2.10 \times 10^5 \text{ km}^2$, 森林树种有 700 种之多, 其中云杉 11 种, 冷杉 9 种。

2 研究方法

2.1 水源涵养潜力计量

森林水源涵养功能是林冠层、枯落物层和土壤层这 3 者水源涵养功能的总和^[13-14]。植被盖度对植被层水源涵养功能有影响, 借鉴石培礼等人对长江上游地区主要森林植被类型蓄水功能的计量方法, 利用植被盖度对其进行了修订。以栅格(500 m × 500 m)为单位, 构建水源涵养功能的计算模型:

$$H_i = H_{if} + H_{il} + H_{is} \quad (1)$$

$$H_{if} = C_{Li} \times F_{ci} \quad (2)$$

$$H_{il} = L_{ci} \times F_{ci} \quad (3)$$

$$H_{is} = P_i \times D_i \quad (4)$$

式中: H_i —— i 栅格水源涵养功能(mm); H_{if} , H_{il} 和 H_{is} ——分别为 i 栅格林冠层、枯落物层、土壤层的水源涵养功能(mm); C_{Li} ——为 i 栅格冠层和林下灌、草丛枝叶的次降水过程中林冠的最大截留量(mm); L_{ci} —— i 栅格枯落物最大持水量(mm); P_i —— i 栅格土壤的非毛管孔隙度(%); D_i —— i 栅格土壤的厚度(mm); F_{ci} —— i 栅格林地覆盖度(%)。

2.2 数据获取

以 2001 年 NOAA 影像为数据源, 在先验模型的基础上利用归一化植被指数(NDVI) 定量估算长江上游地区植被盖度^[15], 并利用实地采样数据对植被盖度进行修正。森林植被数据来源于 2007 年由中国科学院中国植被图编辑委员会编纂完成 1: 100 万中国植被图的数字化数据库。土壤剖面厚度数据来源于中国科学院南京土壤研究所建立的 1: 100 万中国土壤数据库。依据张新时^[16]主编《中华人民共和国植被图(1: 100 万)》的分类系统, 将植被型作为长江上游森林水源涵养功能评估的基本单元, 划分出 11 个评估单元。根据已有文献资料, 整理统计了长江上游地区各森林类型林冠层、枯枝落叶层和土壤层的数据(表 1)。

3 结果分析

3.1 森林水源涵养功能

由表 2 可知, 长江上游森林水源涵养功能平均值为 79.33 mm, 变化在 50.62~111.20 mm 之间, 变幅较大。与石培礼等人的研究结果较为相近。各森林类型的林冠结构、枯落物组成及现存量 and 土壤物理性质不同, 致使水源涵养功能存在差异性。各森林类型水源涵养功能序列为: 亚热带和热带山地针叶林 > 亚热带硬叶常绿阔叶林 > 寒温带和温带山地针叶林 > 亚热带山地针阔混交林 > 亚热带热带竹林及竹丛 > 亚热带常绿、阔叶落叶混交林 > 亚热带常绿阔叶林 > 亚热带落叶阔叶林 > 温带落叶阔叶林 > 亚热带针叶林 > 温带针叶林。

森林水源涵养总量为 $1.6675 \times 10^{10} \text{ t}$, 林冠层、枯落物层和土壤层分别占森林水源涵养总量的 1.63%, 3.54% 和 94.81%。可见, 土壤层是长江上游森林生态系统水源涵养功能的主体。由于植被类

型的面积的不同,各森林类型水源涵养总量的大小排序与森林水源涵养功能的并不一致,长江上游各森林类型水源涵养总量序列为:亚热带和热带山地针叶林 > 亚热带针叶林 > 亚热带硬叶常绿阔叶林 > 亚热带

常绿阔叶林 > 温带落叶阔叶林 > 亚热带热带竹林及竹丛 > 亚热带常绿、阔叶落叶混交林 > 亚热带落叶阔叶林 > 寒温带和温带山地针叶林 > 亚热带山地针阔混交林 > 温带针叶林。

表 1 长江上游森林生态系统水源涵养功能指标

评估单元	林冠层		枯落物层		土壤层	
	最大截留量/	标准差/	最大持水量/	标准差/	非毛管孔隙度/	标准差/
	mm	mm	mm	mm	%	mm
寒温带和温带山地针叶林	2.56	0.44	10.20	1.37	13.44	4.61
温带针叶林	2.37	1.48	3.24	2.23	7.75	5.09
亚热带针叶林	2.03	0.94	3.71	3.22	8.95	7.56
亚热带和热带山地针叶林	1.90	0.38	3.84	3.23	18.21	4.17
亚热带山地针阔混交林	1.51	0.96	3.29	1.98	12.52	6.50
温带落叶阔叶林	1.55	1.28	3.11	1.29	9.06	4.12
亚热带落叶阔叶林	1.77	1.07	3.04	1.88	9.60	7.86
亚热带常绿、阔叶落叶混交林	1.01	0.51	4.26	1.33	11.72	10.96
亚热带常绿阔叶林	1.79	1.00	4.08	2.31	10.61	6.80
亚热带硬叶常绿阔叶林	0.92	0.21	6.64	3.86	14.72	2.73
亚热带热带竹林及竹丛	1.92	2.27	3.71	2.95	11.80	6.46

注: 各项指标数据来源于统计的文献资料[17-42]。

表 2 长江上游森林生态系统水源涵养功能

评估单元	面积/ 10 ⁴ hm ²	林冠层		枯落物层		土壤层		森林系统	
		平均/	总量/	平均/	总量/	平均/	总量/	平均/	总量/
		mm	10 ⁸ t	mm	10 ⁸ t	mm	10 ⁸ t	mm	10 ⁸ t
寒温带和温带山地针叶林	16.39	1.37	0.02	5.45	0.09	80.32	1.32	87.15	1.43
温带针叶林	24.79	1.81	0.04	2.47	0.06	46.33	1.15	50.62	1.25
亚热带针叶林	737.69	1.45	1.07	2.66	1.96	52.99	39.16	57.1	42.12
亚热带山地针叶林	680.85	1.26	0.85	2.54	1.73	107.4	73.16	111.2	75.71
亚热带山地针阔混交林	16.15	0.99	0.02	2.16	0.03	74.73	1.21	77.87	1.26
温带落叶阔叶林	153.17	1.27	0.19	2.54	0.39	53.99	8.32	57.8	8.85
亚热带落叶阔叶林	55.41	1.29	0.07	2.22	0.12	56.82	3.16	60.32	3.34
亚热带常绿、阔叶落叶混交林	59.46	0.77	0.05	3.27	0.19	70.16	4.19	74.21	4.41
亚热带常绿阔叶林	132.39	1.36	0.18	3.1	0.41	63.26	8.38	67.72	8.97
亚热带硬叶常绿阔叶林	150.03	0.66	0.10	4.74	0.71	86.28	12.95	91.68	13.75
亚热带热带竹林及竹丛	75.63	1.39	0.10	2.68	0.20	70.65	5.35	74.71	5.65
长江上游森林生态系统	2 101.96	1.29	2.71	2.81	5.90	75.21	158.09	79.33	166.75

3.2 森林各层水源涵养功能

林冠层水源涵养功能平均为 1.29 mm。各森林类型林冠水源涵养功能平均值介于 0.66~1.81 mm 之间,差异明显。其中,温带针叶林林冠层水源涵养功能最大,亚热带硬叶常绿阔叶林最小,二者相差近两倍。各森林植被类型林冠层水源涵养总量为 2.71 × 10⁸ t。其中,林冠层水源涵养总量最大为亚热带针叶林,其面积占长江上游总面积的 35.10%,占水源涵养量总量的 39.62%;最小的为亚热带山地针阔混交林,面积仅占上游总面积的 0.77%,水源涵养量为 2.00 × 10⁶ t,占总量的 0.59%。

枯落物层水源涵养功能平均为 2.81 mm。变幅在 2.16~5.45 mm 之间,存在较大的差异性。寒温带和温带山地针叶林枯落物层水源涵养功能最大,其

次为亚热带硬叶常绿阔叶林,亚热带山地针阔混交林最小。各森林植被类型枯落物层水源涵养总量为 5.90 × 10⁸ t。其中,枯落物层水源涵养总量最大是亚热带针叶林,其面积为长江上游总面积的 35.10%,占长江上游森林枯落物水源涵养总量的 33.19%。亚热带山地针阔混交林面积最小,水源涵养量仅占总量的 0.59%。

长江上游面积大,土壤类型多样,土壤厚度差异较大,土壤水分渗透峰面厚度取值为植被主要根系分布的有效土层深度。以土壤基准厚度 60 cm 为临界值,当土壤剖面厚度 > 60 cm 时,土壤水分渗透的峰面厚度以 60 cm 计算,否则以土壤剖面厚度的实际值进行计算。结果表明,土壤层水源涵养功能平均值为 75.21 mm,变幅在 46.33~107.40 mm 之间。土壤

水源涵养功能最大的是亚热带和热带山地针叶林, 其次是亚热带硬叶常绿阔叶林, 温带针叶林林最小, 相差近两倍。各种类型森林土壤层水源涵养总量大小取决于水源涵养功能平均值和森林面积。长江上游森林土壤层水源涵养总量为 1.5809×10^{10} t。土壤层水源涵养量最大的是亚热带和热带山地针叶林, 占长江上游面积的 32.39%, 水源涵养量占土壤涵养水源总量的 46.20%。其次为亚热带针叶林, 面积为长江上游的 35.10%, 水源涵养量占总量的 24.73%。最小的为温带针叶林, 面积较小, 占土壤层水源涵养总量的 0.73%。

3.3 森林生态系统水源涵养功能空间分布特征

利用 ARCGIS 地统计分析中趋势分析模块, 分析森林及各层水源涵养功能的空间变化趋势及分布状况如图 1—2 所示。长江上游森林水源涵养功能空间变化趋势明显(图 1), 由南向北呈现先增加后减少的抛物线趋势, 由西向东呈现出近似幂函数逐渐减少的趋势。形成西强东弱的空间分布格局, 以岷山—茶坪山—夹金山—锦屏山—玉龙山—线为界(图 2a), 以西森林面积为 8.6075×10^6 hm^2 , 占整个上游的 40.95%, 水源涵养总量却占长江上游森林系统的 52.41%。平均水源涵养功能为 101.52 mm, 远大于界线以东的 63.93 mm。界线以西主要为亚热带、热带山地针叶林和亚热带硬叶常绿阔叶林, 平均植被覆

盖度较高, 为 63.32%, 土壤层较厚, 大部分坡度大于 15° , 受人为干扰影响较小, 枝叶繁茂, 根系发达, 分布较深, 枯落物较多, 有利于土壤孔隙度发育; 具有良好的土壤结构和通气状况, 有利于林木生长与涵养水源, 促使长江上游西部水源涵养功能强于东部。

林冠层水源涵养功能由南向北及由西向东都表现为先减少后增加的变化趋势(图 1), 与森林水源涵养功能变化趋势相反。形成了嘉陵江上游地区、川西南山区的雅砻江、安宁河、黑水河流域、横断山区和金沙江流域林冠层涵养水源功能较强, 四川盆地西北的大渡河与涪江流域林冠层水源涵养功能较弱的空间分布格局(图 2b)。川西南山区的雅砻江、安宁河、黑水河流域、横断山区和金沙江流域分布着大量的温带针叶林和亚热带针叶林, 这些林地的覆盖度较高, 林冠层水源涵养功能强, 平均为 2.46 和 1.45 mm。

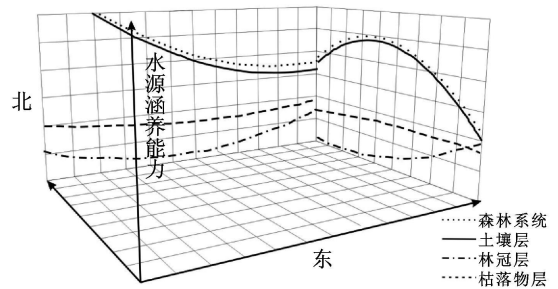


图 1 长江上游森林生态系统水源涵养功能空间变化

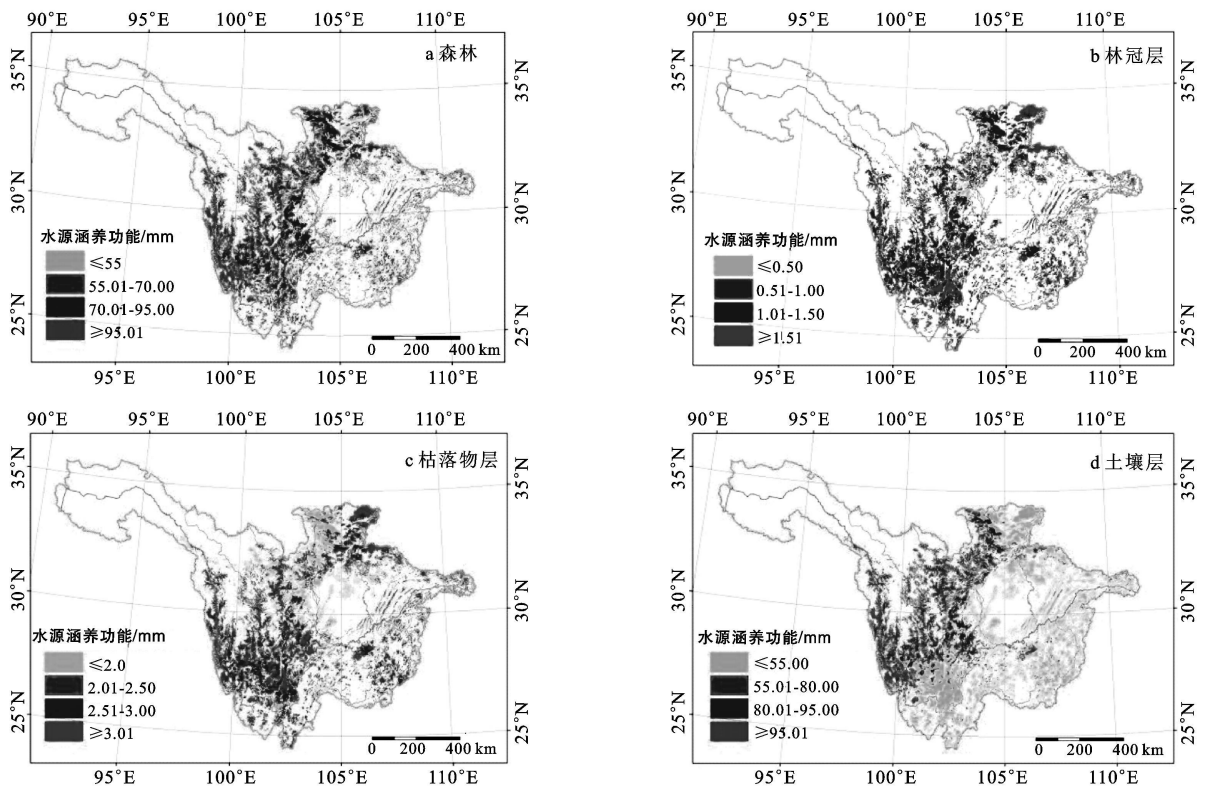


图 2 长江上游森林生态系统水源涵养功能的空间分布

枯落物层水源涵养功能空间变化趋势不明显(图 1, 图 2c), 由南向北呈缓慢减少的趋势, 由西向东都表现为先增加后减少的趋势, 变幅较小。在空间分布格局表现最强的区域为嘉陵江上游地区、川西南山地和横断山区, 与林冠层具有一致性。四川盆地西北部、岷山山区和乌江流域森林系统枯落物层水源涵养功能较弱。嘉陵江上游地区分布着大量的温带落叶阔叶林, 森林覆盖度达到 75% 以上, 温带落叶阔叶林系统中枯落物最大截持水为 3.11 mm。在横断山区主要为金沙江及其支流沿河两侧较强, 呈带状分布。主要植被类型为亚热带和热带山地针叶林, 森林覆盖率超过 60%, 枯落物层最大截持水功能为 3.84 mm。川西南山区主要植被亚热带硬叶常绿阔叶林和亚热带常绿阔叶林为主, 枯落物最大截持水为 4.64 和 4.08 mm。覆盖度高达 70% 以上。四川盆地西北山区主要是亚热带和热带山地针叶植被覆盖度较低一般约为 45%, 水源涵养功能较弱。乌江流域主要植被为亚热带针叶林, 最大持水量较弱, 为 3.71 mm, 森林覆盖度约为 50%。

土壤层水源涵养功能空间变化趋势明显(图 1), 由南向北趋势线呈现先增加后减少的抛物线趋势, 从西向东近似为幂函数减少的趋势, 与森林水源涵养功能变化趋势具有一致性。空间格局总体表现以岷山—茶坪山—夹金山—锦屏山—玉龙山一线为界, 表现为西强东弱的空间分布特征(图 2d)。界线以西森林面积为长江上游森林总面积 40.95%, 森林土壤层水源涵养量占土壤层水源涵养总量的 52.62%, 大于界线以东的区域。主要森林类型为亚热带和热带山地针叶林、亚热带硬叶常绿阔叶林, 非毛管孔隙度分别较大, 土壤层较厚, 平均土壤水源涵养量较大。界线以东主要森林类型为亚热带针叶林、温带落叶阔叶林和亚热带常绿阔叶林, 非毛管孔隙度相对较小, 土壤剖面厚度相对较小, 低于整个上游流域土壤层涵养水源功能的平均值。

地形创造了局部生境的小气候条件, 进而影响森林植被格局和土壤层理化性质及土壤层厚度。因此, 森林生态系统水源涵养功能受到了地形的影响。根据数字高程模型统计不同海拔高度的森林涵养水源功能, 通过拟合发现, 长江上游森林水源涵养功能随海拔升高而呈正态分布(图 3) 峰值约出现在 4 200 m, 拐点约出现在 2 600 m。整体特征表现为: 随着海拔的升高, 森林水源涵养功能逐渐增加, 约至海拔 4 200 m, 森林水源涵养功能出现减少的趋势。由此可知平均海拔在 4 000 m 以上的岷山—茶坪山—夹金山—锦屏山—玉龙山一线以西区域, 具有较强的,

进一步说明了该区水源涵养功能西强东弱的空间分布格局。

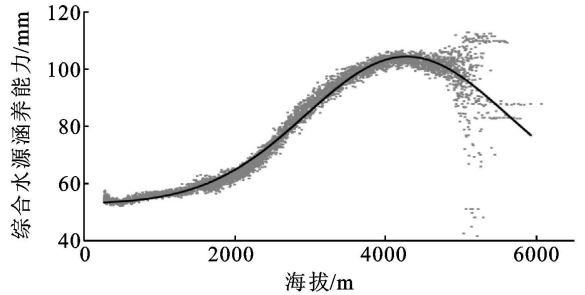


图 3 长江上游森林水源涵养功能与海拔的关系

4 结论

(1) 长江上游森林生态系统水源涵养功能平均值 79.33 mm。林冠层、枯落物层、土壤层的水源涵养功能平均值分别为 1.29, 2.81, 75.21 mm; 长江上游森林生态系统水源涵养总量为 1.6675×10^{10} t。林冠层、枯落物层和土壤层分别占涵养总量的 1.63%, 3.54% 和 94.81%。土壤层是森林系统水源涵养功能的主体。

(2) 长江上游森林水源涵养功能由南向北呈现先增加后减少的抛物线趋势, 由西向东呈现出近似幂函数逐渐减少的趋势。这与林冠层水源涵养功能变化趋势相反, 与土壤层水源涵养功能变化趋势具有一致性。

(3) 在水平方向上, 长江上游森林水源涵养功能以岷山—茶坪山—夹金山—锦屏山—玉龙山一线为界, 表现出西强东弱的空间分布格局; 在垂直方向上, 森林水源涵养功能随着海拔的升高逐渐增加, 约至海拔 4 200 m, 森林水源涵养功能出现减少的趋势。

[参 考 文 献]

- [1] 邓坤枚, 石培礼, 谢高地. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究[J]. 资源科学, 2002, 24(6): 68-73.
- [2] 陈治谏. 长江上游的战略地位与生态环境功能[J]. 山地学报, 2000, 8(3): 258-262.
- [3] 石培礼, 吴波, 程根伟, 等. 长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 351-360.
- [4] 殷有, 周永斌, 崔建国, 等. 林冠截留模型[J]. 辽宁林业科技, 2005(5): 10-12.
- [5] 谢春华, 关文斌, 吴建安, 等. 贡嘎山暗针叶林生态系统林冠截留特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 68-71.

- [6] 刘世海, 余新晓. 北京市密云水库库区水源涵养林冠层水文特征研究[J]. 林业科学, 2005, 41(1): 194-197.
- [7] 常宗强, 王金叶, 常学向, 等. 祁连山水源涵养林枯枝落叶层水文生态功能[J]. 西北林学院学报, 2001, 16(S): 8-13.
- [8] 郑培龙, 肖江伟, 吴云, 等. 重庆缙云山典型林分林地土壤贮水特性研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 195-197.
- [9] 党宏忠, 周泽福, 赵雨森, 等. 祁连山水源涵养林土壤水文特征研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(1): 39-44.
- [10] 周择福, 林富荣, 宋吉红. 不同经营模式的水源涵养林生态防护功能研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(2): 189-195.
- [11] 蒋文伟, 姜志林, 余树全, 等. 安吉主要森林类型水源涵养功能的分析与评价[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2002, 26(4): 71-74.
- [12] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 北京市森林生态型通的水源涵养功能[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5619-5624.
- [13] 刘世荣, 孙鹏森, 王金锡, 等. 长江上游森林植被水文功能研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 451-456.
- [14] 温光远, 刘世荣. 我国森林生态系统类型降水截留规律的数最分析[J]. 林业科学, 1995, 31(4): 289-298.
- [15] Gillies R R, Carlson T N, Cui J, et al. A verification of the triangle method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurement of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3145-3166.
- [16] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中华人民共和国植被图(1:1000000)[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [17] 何东宁, 王占林, 张洪勋. 青海乐都地区森林水源涵养能力研究[J]. 植物生态学与地植物学报, 1991, 15(1): 71-78.
- [18] 党宏忠, 周泽福, 赵雨森. 青海云杉林冠截留特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 60-64.
- [19] 闫文德, 张学龙, 王金叶, 等. 祁连山森林枯落物水文作用研究[J]. 西北林学院学报, 1997, 12(2): 7-14.
- [20] 傅辉恩. 东祁连山西段(北坡)森林涵养水源作用的初步研究[J]. 北京林学院学报, 1983(1): 27-41.
- [21] 傅辉恩. 森林土壤涵养水源功能的研究[J]. 林业实用技术, 1985(8): 14-17.
- [22] 闫顺国. 桥山林区油松林水源涵养功能探讨[J]. 水土保持学报, 1989, 3(2): 57-64.
- [23] 雷瑞德. 秦岭火地塘林区华山松水源涵养功能的研究[J]. 西北林学院学报, 1984(1): 19-34.
- [24] 杨茂生, 陈海滨, 高甲荣. 秦岭辛家山锐齿栎林水源涵养功能的若干特点[J]. 西北林学院学报, 1991, 6(1): 1-8.
- [25] 钟顺祥. 长苞铁杉天然林水源涵养功能研究[J]. 福建林学院学报, 1999, 19(3): 261-264.
- [26] 王震红, 张玲. 滇中三种典型人工林群落结构与土壤侵蚀关系研究[J]. 水土保持研究, 2001, 8(2): 74-79.
- [27] 刘文耀, 荆贵芬, 和爱军. 滇中常绿阔叶林及云南松林凋落物和死地被物中的养分动态[J]. 植物学报, 1990, 32(8): 637-646.
- [28] 刘文耀, 刘伦辉, 郑征. 滇中不同群落结构云南松林的水文作用[J]. 北京林业大学学报, 1992, 14(2): 38-45.
- [29] 马雪华, 杨光滢. 杉木、马尾松人工林土壤物理性质及水分含量变化的研究[J]. 林业科学研究, 1990, (1): 63-69.
- [30] 孟广涛, 郎南军, 方向京, 等. 滇中高原山地防护林体系水土保持效益研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 66-69.
- [31] 黄承标, 韦峰. 广西亚热带主要森林植被气候及水文生态功能规律的研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(S): 1-8.
- [32] 张万儒, 许本彤, 杨承栋. 山地森林土壤枯枝落叶层结构和功能的研究[J]. 土壤学报, 1990, 27(2): 121-131.
- [33] 蒋有绪. 川西亚高山冷杉林枯枝落叶层的群落学作用[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1981, 5(2): 89-98.
- [34] 郭立群, 王庆华, 周洪昌, 等. 滇中高原区主要森林类型枯枝落叶层对降雨的截留功能[J]. 云南林业科技, 1999, 86(1): 22-25.
- [35] 慕长龙, 龚固堂. 长江中上游防护林体系综合效益的计量与评价[J]. 四川林业科技, 2001, 22(1): 15-23.
- [36] 蒋文伟, 余树全. 安吉地区不同森林植被水源涵养功能的研究[J]. 江西农业大学学报, 2002, 24(5): 635-639.
- [37] 张保华, 何毓蓉, 周红艺, 等. 长江上游典型区亚高山不同林型土壤的结构性与水分效应[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 127-129.
- [38] 袁春明, 郎南军. 长江上游云南松水土保持生态效益的研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 87-90.
- [39] 王金锡. 长江中上游典型防护林综合效益监测与计量评价研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2006.
- [40] 黄承标, 韦峰. 广西亚热带主要森林植被气候及水文生态功能规律的研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(S): 1-8.
- [41] 温远光, 黄承标. 里骆森林涵养水源功能的初步分析[J]. 林业实用技术, 1988(5): 19-22.
- [42] 王彦辉, 刘永敏. 江西省大岗山毛竹林水文效应研究[J]. 林业科学研究, 1993, 6(4): 373-379.