

西庄河流域森林生态系统涵养水源的价值

艾夕辉, 许建初^{*}, 高 富, 杨立新, 钱 洁, 李巧宏

(中国科学院昆明植物研究所, 云南 昆明 650204)

摘 要: 森林的生态服务功能在很长时间内被人们漠视和忽略, 很大程度上是因为森林的生态和文化价值难以用货币的形式进行衡量, 因此, 生态服务功能价值化已成为国外研究的一个热点。以云南保山西庄河流域为研究区, 通过在流域建立水文站、气象站和雨量站等组成监测网络, 获取了多年的各类气象和水文要素的观测值, 进而利用水量平衡公式分析流域森林生态服务功能中的涵养水源总量, 并通过影子工程等评价方法计算出其所蕴藏的经济价值。QUICKBIRD 高空间分辨率卫星影像的应用, 有助于提取西庄河流域森林生态系统的面积、组分及平均树龄。结果显示, 西庄河流域多年平均年降雨量 1 516.9 mm, 年径流量 $1.950 \times 10^4 \text{ m}^3$, 森林生态系统平均年蒸散量为 952.7 mm。研究表明: 西庄河流域森林生态系统年均涵养水源能力为 $1.949.88 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其涵养水源功能的经济总价值为 $1.306.4 \times 10^4$ 元/a, 每公顷森林面积涵养水源的价值为 6 963.84 元/a。

关键词: 西庄河流域, 森林生态系统, 生态服务功能, 生态价值

中图分类号: X2, X171.1

文献标识码: A

森林生态系统服务功能 (Forest ecosystem services), 是指森林生态系统在其运行过程中形成的维持人类生存的自然环境条件和效用, 它不仅包括各种提供给人类的物质产品, 也包括各种非实物形态的服务^[1]。由于对后者的价值缺乏正确的认识, 常造成自然环境和自然资源的过度开发, 并导致生态系统的退化。漠视和偏见森林的生态服务功能在很大程度上是因为森林的生态和文化价值难以用货币的形式进行衡量, 因此, 生态服务功能价值化已成为近年来国外研究的一个热点^[2]。然而, 由于缺乏第一手田野实测数据, 森林生态服务功能的价值估计人为因素较重, 因缺少数据支撑而没有可信度。本文以云南保山山地流域——西庄河流域为研究对象, 采用多年实地观测数据, 并运用遥感和地理信息系统等多种技术手段, 定量分析流域内森林生态系统的生态服务功能中的涵养水源的经济价值。

西庄河流域是怒江流域的一个典型的山地小流域, 位于 $99^{\circ}06' \sim 99^{\circ}13' \text{ E}$, $25^{\circ}13' \sim 25^{\circ}17' \text{ N}$, 面积 $3\,456 \text{ km}^2$, 海拔 $1\,700 \text{ m} \sim 3\,100 \text{ m}$, 总人口 4 273 人 (2002)。受印度洋西南季风的影响, 干湿季明显, 属亚热带高原山区气候。流域植被按照海拔分为两类, 2 200 m 以下是旱地作物植被和茶园植被类型, 其原生植被为北亚热带松栎混交林区; 2 200 m 以上多为以云南松、华山松、思茅松为主的人工林和少量以栎类、西南桦、旱冬瓜、杨树等树种为主的天然次生林。红壤、黄棕壤和棕壤是流域内分布的主要土壤类型^[3-4]。

1 森林生态系统服务功能的构成

森林生态系统是地球上最丰富的生态系统之一, 在全球环境和气候变化中具有举足轻重的地位。

收稿日期 (Received date): 2004- 09- 11; 改回日期 (Accepted): 2004- 11- 20。

基金项目 (Foundation item): 云南省科委国际科技合作项目 (编号: 2000C004) 和山地流域人与资源动态关系项目 (PARDYP)。[Founded by International Cooperation Program of Yunnan Committee of Science and Technology (ID: 2000C004) and The People and Resources Dynamics Project (PARDYP) Funded by International Development and Resources Center (IDRC- Canada), Sweden Development Cooperation (SDC- Sweden) and International Center for Integrated Mountain Development (ICIMOD- Nepal).]

作者简介 (Biography): 艾夕辉 (1971-), 四川安岳人, 硕士。主要从事资源与环境、生态系统研究。[Ai Xihui (1971-), female, born in Anyue County of Sichuan Province. She holds a master degree in Environmental Science. Her research interest is resources and environment, ecosystem study. Email: aixh@hotmail.com. Tel: 0871- 5223218, 13698751248.]

^{*} 通讯作者 (Corresponding author): 许建初 (1964-), 江苏宜兴人, 研究员, 博士, 博士生导师。[Xu Jianchu (1964-), born in Yixing City of Jiangsu Province, PhD, Professor, Professor of PhD student. Email: xujianchu@cbik.ac.cn

按照 Costanza^[1]等人的观点, 生态服务功能和生态功能共有 17 类, 如表 1 所示。西庄河流域森林生态系统服务功能也具备了表 1 所列的 17 种生态服务功能和生态功能。

2 涵养水源功能的经济价值评估方法

2.1 QUICKBIRD 卫星影像和遥感地理信息技术

QUICKBIRD 是迄今为止空间分辨率最高的卫星影像之一, 星下点的全色影像(panchromatic)空间

分辨率为 61 cm, 多光谱影像(multispectral)空间分辨率为 2.44 m, 影像的地面定位精度为 23 m^[5]。QUICKBIRD 卫星影像, 客观真实地提供了地面的森林生态系统面积、森林组分和林龄, 为西庄河流域森林生态系统的生态价值评估提供了良好的基础。

遥感与地理信息系统, 提供了强大的空间数据处理技术。经过地理信息系统软件(ARCVIEW 3.3)处理后, 并结合地面样方调查, 得出西庄河流域森林生态系统组成和蓄积量(表 2)。

表 1 Costanza 等划分的 17 类生态服务功能和生态功能

Table 1 The 17 items of ecological services and functions of ecosystem from Costanza's (1997)

序号 No.	生态服务功能 Ecological services	生态功能 Ecological fuction	举例 Example
1	气体管理 Gas management	大气化学成分调节	CO ₂ /O ₂ 平衡、O ₃ 防护 UV-B 和 SO ₂ 水平
2	气候调节 Climate regulation	调节全球温度、降水以及其他受生物影响的全球或局部气候过程	温室气体调节、影响云形成的硫化甲酯生成
3	干扰调节 Regulation of disturbance	生态系统对环境波动的容纳、延迟和整合能力	防止风暴、控制洪水、干旱恢复以及其他由植被控制的生境对环境变化的反应
4	水分管理 Water management	调节水文过程	为农业、工业或运输等提供水分
5	水分供给 Water provision	涵养水源, 即水分的保持和储存	由集水区、水库和含水层供给水分
6	侵蚀控制和沉积物保持 Erosion control and deposit conservation	生态系统内的土壤保持	防止风蚀、保持径流和其他运移过程, 把淤泥保存在湖泊和湿地中
7	土壤形成 Soil formation	成土过程	岩石风化和有机物的积累
8	养分循环 Nutrient cycling	养分存储、内循环、转化和获取	固 N、P 和其他元素或养分循环
9	废弃物处理 Treatment of residues	移动性养分的恢复、过剩或有毒物质的转移或分解	废弃物处理、污染控制和解除毒性
10	传粉 Pollination	植物配子的移动	为植物种群的繁殖提供传粉者
11	生物控制 Biological control	调节种群的营养级动态	关键捕食者对猎物种类的控制、顶级捕食者使草食动物数量较少
12	栖息地 Habitat	为定居和临时种群提供生境	为迁徙种提供繁育和栖息地、为当地种提供区域栖息地或越冬场所
13	食物生产 Foodstuff production	总初级生产中可作食物的部分	鱼、猎物、作物、果实的捕获与采集, 给养农业或渔业生产
14	原材料 Raw materials	总初级生产中可作原材料的部分	药物、材料科学产品、抗植物病原和作物害虫的基因、装饰物种
15	遗传资源 Genetic resources	独有生物材料和产品来源	药物、材料科学产品、抗植物病原和作物害虫的基因、装饰物种
16	休闲 Recreations	提供休闲娱乐机会	生态旅游、钓鱼运动和其他户外娱乐活动
17	文化 Culture	提供非商业用途机会	生态系统的美学、艺术、教育、精神和科学价值

表 2 云南保山西庄流域不同林龄组的面积和蓄积量状况

Table 2 The area and stands stock of Xizhuang watershed forest at different age class

年龄级 ^① Age class	面积 Area (hm ²)	蓄积量 ^② Stands stock (m ³)	占流域总面积的百分比 Percentage of total area (%)	占总蓄积量的百分比 Percentage of total stands stock (%)	年生长量 ^③ Stands stock for per years (m ³)	每年的木材 价值 & (元) ^④ Market value per year (yuan)
成熟林(38 a)	860	12.89×10 ⁴	24.88	59.37	3 392.1	58.4×10 ⁴
中龄林(19 a)	606	6.36×10 ⁴	17.73	29.30	3 347.4	57.7×10 ⁴
幼龄林(< 10 a)	410	2.46×10 ⁴	12.00	11.33	2 733.3	47.1×10 ⁴
总计	1 876	21.71×10 ⁴	54.90	100	9 472.8	163.2×10 ⁴

① 年龄级划分标准参见云南省林业调查规划院森林资源调查主要技术规定(The standard for age class classification is according to the technique criterion of forest resource investigation of Yunnan Academy of Forestry Investigation and Planning);

② 蓄积量计算根据多年野外工作经验公式, 即每 0.07 hm² 成熟林(松林)蓄积量为 10 m³, 中龄林为 7 m³, 幼龄林为 4 m³;

③ 年生长量为总蓄积量除以生长年限;

④ 活立木的的市场价值参照石培礼^[4]等的研究结果, 为 172.3 元/m³。

2.2 气象和水文数据处理

2.2.1 数据监测网络

兴都库什—喜马拉雅山地区域人与资源动态关系项目(PARDYP)根据项目总体设计,自 1996 年开始在流域内设置了 1 个气象站, 11 个雨量站和 4 个

水文站, 获取了该流域内的水文和气象方面的基础数据。表 3 为基本监测网络及收集数据状况。根据多年观测资料, 整理出流域内各个雨量站多年平均年降雨量(表 4)。

表 3 基础数据源监测网络及选用数据指标*

Table 3 Baseline data sources network and index for data using

监测站	站名	开始监测时间	结束监测时间	监测内容	选用数据
气象站	干旺坑	1997- 06- 01	2003- 09- 30	气温、降雨量、蒸发量、地温、风速、风向、湿度	蒸发量
水文站	西庄	1997- 06- 01	2003- 09- 30	水位、流速、径流量、泥沙、水质	流域出口处西庄站的径流量
	清水河	1997- 06- 01	2003- 09- 30	水位、流速、径流量、泥沙、水质	
	沈家河	1997- 06- 01	2002- 12- 31	水位、流速、径流量、泥沙、水质	
	三沟水	1997- 06- 02	2003- 09- 30	水位、流速、径流量、泥沙、水质	
雨量站	西庄	1998- 01- 01	2003- 09- 30	降雨量	降雨量。将点降雨量转化为面降雨量, 得出全年降雨量
	老虎洞	1998- 06- 01	2000- 12- 31	降雨量	
	石场洼子	1998- 06- 01	2000- 12- 31	降雨量	
	挖金塘	2001- 06- 01	2003- 09- 30	降雨量	
	清水	1997- 06- 01	2003- 09- 30	降雨量	
	干旺坑	1997- 06- 01	2003- 09- 30	降雨量	
	大窝坡	1998- 06- 01	2003- 09- 30	降雨量	
	李家寺	1997- 06- 01	2003- 09- 30	降雨量	
	三沟水	1998- 05- 01	2003- 09- 30	降雨量	
	大麦地	1997- 06- 01	2003- 09- 30	降雨量	
	一碗水	2000- 01- 01	2002- 12- 31	降雨量	

* 分析 7 a 的观测资料, 根据多年平均数据计算西庄河森林生态系统的涵养水源量。

表 4 各个雨量站的多年平均观测降雨量

Table 4 Average precipitation for monitored years for each rainfall gauge

站名	西庄	老虎洞	石场洼子	挖金塘	清水	干旺坑	大窝坡	李家寺	三沟水	大麦地	一碗水
雨量(mm)	1 277. 4	1 331. 2	1 308. 6	1 411. 5	1 329. 7	1 390. 7	1 587. 4	1 352. 8	1 510. 8	1 476. 5	2 076. 9

2. 2. 2 西庄河流域多年平均降雨量和蒸发量

在以流域为单位的研究中,经常会碰着面降雨量的计算问题。因为一般只有观测的站点数据,如何由点到面,把点上的数据转化为面上的数据,进而计算平均降雨量,这是一个十分困难而且具有现实意义的问题。传统上等降雨量线通常是根据等高线、坡度、坡向等影响因素由人工根据经验绘制,误差较大。而地理信息系统软件 ARCVIEW 则提供了一个技术手段,通过内插值的方法,根据监测台站

的三维坐标和监测值(降雨量),以及流域边界层(Coverage)和流域的等高线层,可以自动产生等降雨量线,并得出整个流域的多年平均降雨量。层(Coverage)是地理信息系统的专有术语,含有表征其空间位置的数字坐标和表征其特性的属性数据。西庄河流域 1998~ 2002 年的面降雨量分布如图 1 所示^[6],多年平均年降雨量为 1 516. 9 mm。选择 1998~ 2002 年,因为这 4 a 的观测数据最为齐全(表 2)。



图 1 西庄河流域 1998~ 2002 多年平均面降雨量分布图

Fig. 1 Mean yearly spatial rainfall value of Xizhuang watershed during 1998~ 2002

据干旺坑气象站观测,2001 年蒸发量为 1 178. 5 mm,但这只是代表该地点的最大蒸发量,因为实际蒸发量受温度、湿度、土壤水分状况、地面覆盖物等多种因素的制约,是很难直接测定的因子。这里我们通过水量平衡公式^[7]: $E = P - R + \Delta W$ 确定其蒸发量的大小。式中: E 为蒸发量, P 为多年平均降雨量, R 为径流量, ΔW 为土壤中水分变化,由于是取多年平均,这里假设土壤中水分无实际变化,即 $\Delta W = 0$ 。根据流域出口处西庄水文站多年观测数据,多年平均径流量为 $1\,950 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,而上文

根据 ARCVIEW 软件求出多年平均降雨量为 1 516. 9 mm/a,即全年降雨量为 $3\,456 (\text{hm}^2) \times 1\,516. 9 \text{ mm/a}$,通过单位换算,为 $5\,242. 4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,由此得出多年平均蒸发量为 $3\,292. 4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,单位蒸发量为 952. 7 mm/a。

2.3 森林涵养水源的经济价值评价方法

水源涵养量用水量平衡法^[8,9]来计算森林水源涵养量

$$W = (R - E) \cdot A = \theta R \cdot A$$

式中 W 为涵养成水源量(m^3/a), R 为平均降雨

量(mm/a); A 为研究区域面积(hm^2); E 为平均蒸散量(mm/a); θ 为径流系数。

森林涵养水源的价值为年涵养水源量乘以水价, 水价用影子工程价格替代, 即以 1988~1991 年全国水库建设投资测算的每建设 1 m^3 库容需投入成本费为 0.67 元^[10]。

3 蓄水功能的经济价值

西庄河流域多年平均年降雨量为 $1\,516.9 \text{ mm}$, 年径流量为 $1\,950 \times 10^4 \text{ m}^3$, 森林生态系统平均年蒸散量为 952.7 mm 。研究得到西庄河流域森林生态系统年均涵养水源能力为 $1\,949.88 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 其涵养水源功能的经济总价值为 $1\,306.4 \times 10^4/\text{a}$ 元, 每公顷森林面积涵养水源的价值为 $6\,963.84/\text{a}$ 元。

4 结论

1. 西庄河流域森林生态系统的涵养水源的经济价值, 每年为 $1\,306.4 \times 10^4$ 元, 远远高于其木材的价值 163.2×10^4 元/a(见表 2)。可见, 森林生态系统提供的生态功能, 远远高于其所提供的实物形态的价值。因此, 为获取木材或者其他林副产品而进行毁林活动是非常不可取的, 对森林进行的森林经营活动务必要顾及其生态功能。

2. 相对于其他森林生态系统而言, 西庄河流域森林生态系统涵养水源的能力仍然偏低。例如, 肖寒^[9]等人在海南尖峰岭曾做出研究, 尖峰岭热带原生生态系统的水源涵养能力的经济价值为 $8\,827.37$ 元/ hm^2 , 明显高于西庄河流域的森林生态系统的 $6\,963.84$ 元/ hm^2 。

3. 西庄河流域森林生态系统涵养水源能力较低, 这与其为次生、人工林、针叶树种为主要树种有很大关系。西庄河流域森林生态系统树种单一(以华山松、云南松为主)、结构单调、林下层树种少、人工栽培, 因此其涵养水源的能力不高。为了提高森林生态系统的涵养水源能力, 必须丰富群落结构。

4. 此外, 西庄河流域属于怒江流域, 怒江以其山高坡陡为显著特征。以西庄河流域 34 km^2 的面积, 海拔从 $1\,700 \text{ m}$ 上升到 $3\,100 \text{ m}$, 陡峭的地形, 也

不利于水源的涵养, 增加了森林生态系统涵养水源的压力。

参考文献(References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, Rudolf de Groot, et al.. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, **387**: 253~260.
- [2] Shi Peili, Li Wenhua, He Weiming, et al.. Economic estimation of ecosystem services of natural forests in western Sichuan, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, **20**(1): 75~79. [石培礼, 李文华, 何维明, 等. 川西天然林生态服务功能的经济价值[J]. 山地学报, 2002, **20**(1): 75~79.]
- [3] Li Mingui, Sha Liqing. A primary study on phosphorus adsorption of forest soils in Xizhuang watershed, Baoshan, Yunnan[J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, **20**(3): 313~318. [李明锐, 沙丽清. 云南保山西庄河流域森林土壤磷吸附特性[J]. 山地学报, 2002, **20**(3): 313~318.]
- [4] Ai Xihui, Lin Hai, Fan Lizhang, et al.. A study of agroclimatic resources of main cultivated crops in Xizhuang watershed of Yunnan[J]. *Journal of Mountain Science*, 2003, **21**(2): 210~215. [艾夕辉, 林海, 范立张, 等. 云南西庄河流域主要栽培作物的农业气候资源分析[J]. 山地学报, 2003, **21**(2): 210~215.]
- [5] Wu Peizhong. Quickbird-2 satellite's technical parameters and its application. 2002, <http://www.cast.ac.cn/cbw/GJTK/200210/2.htm>. [吴培中. 快鸟-2 卫星的技术性能与应用[N]. 2002, <http://www.cast.ac.cn/cbw/GJTK/200210/2.htm>.]
- [6] Gao Fu, Ai Xihui, Ma Xing, et al.. Spatial rainfall occurrence in Xizhuang watershed during 1997-2002[R]. In *PARDYP/China Work Paper Series-Water Resources*.
- [7] Zhang Shengli, Lei Ruide, Lu Yuliang, et al.. Water-Balance of forest ecosystem in Huoditang Area of Qinling Mountain[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2000, **20**(6): 18~22. [张胜利, 雷瑞德, 吕瑜良, 等. 秦岭火地塘林区森林生态系统水量平衡研究[J]. 水土保持通报, 2000, **20**(6): 18~22.]
- [8] Kong Fanwen, He Naihui. China forest resource accounting[A]. *Proceeding of Scandinavian Forest Economics Biannual Meeting* [C]. 1991.
- [9] Xiao Han, Ouyang Zhiyun, Zhao Jingzhu, et al.. Forest ecosystem services and their ecological valuation—a case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(4): 481~484. [肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(4): 481~484.]
- [10] Xue Dayuan. Economic valuation of biodiversity: A case study on Changbaishan Mountain biosphere reserve in northeast China[M]. Beijing: China Environmental Science Press. 1997. [薛达元. 生物多样性的经济评估——中国东北部长白山山地生物保护圈案例研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.]

Economic Evaluation of Water Reservation of Forest Ecosystem in Xizhuang Watershed

AI Xihui, XU Jianchu, GAO Fu, YANG Lixin, QIAN Jie, LI Qiaohong

(Kunming Institute of Botany, Kunming 650204, China)

Abstract: Ecological services of forest ecosystem have been ignored for long time, largely depending on difficulty to evaluating ecological services of forest ecosystem. Therefore, Economic evaluation on forest ecosystem has been a hotspot of research area. This paper studies water conservation values among other 16 ecological services of forest ecosystem in a small mountain watershed —— Xizhuang watershed in Baoshan, Yunnan Province. Based on six-years of primary field data of precipitation, evaporation and runoff, and also introduced high spatial resolution satellite QUICKBIRD image to delineate the boundary of different forest ecosystem in the watershed, This paper evaluates the economic values of water reservation of forest ecosystem in Xizhuang watershed. Result shows that average annual precipitation, runoff and evaporation is 1 516.9 mm, $1\,950 \times 10^4 \text{ m}^3$ and 952.7 mm, respectively. The total amount of water reserved by forest ecosystem is $1\,949.88 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{yr}^{-1}$, the total economic value of water reservation in Xizhuang watershed is $\text{RMB } 1306.4 \times 10^4 \text{ yuan} \cdot \text{yr}^{-1}$, the average economic value of forest ecosystem is $\text{RMB } 6\,963.84 \text{ yuan} \cdot \text{yr}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$.

Key words: Xizhuang watershed; forest ecosystem; ecological services; economic values

欢迎订购《山地学报》百期光盘

该光盘收录了《山地学报》(原名《山地研究》, 1998 年改为现名) 自 1983 年创刊至 2003 年共 100 期及其间编辑出版的几期增刊。光盘按栏目分为山地学基础理论、山地环境、山地灾害及其防治、山地研究方法与技术等, 较全面地反映了近 20 年来我国山地研究的成果。

《山地学报》系中国自然科学核心期刊、中国科技论文统计源期刊、中国科学引文数据库源刊, 并被多种文摘收录。曾获全国、中国科学院、四川省及中国地理学会优秀科技期刊奖。

《山地学报》是目前我国唯一专门报道山地科学研究与山区开发、环境整治、生态建设实践相结合的综合性科技期刊, 内容涵盖自然科学与人文科学两大门类中与山地有关的学科, 重点报道山地资源开发与山地环境演变、山区工程建设与山地灾害(滑坡、泥石流、水土流失、山洪等) 防治、山区社会发展与城镇规划、山区经济发展与产业结构调整等领域的理论、应用技术、研究方法和实验方法、管理经验等。

为适应科技文化传播发展的需要, 《山地学报》编辑部与中国学术期刊(光盘版) 电子杂志社联合编辑, 由清华同方电子出版社出版《山地学报》百期光盘。《山地学报》百期光盘订价 78 元, 具有按“年、期、篇名、关键词、作者、机构、全文”进行检索的功能, 欢迎订阅。凡需订购者请直接与本刊编辑部联系。

联系地址: 成都市人民南路四段 9 号中科院成都山地所《山地学报》编辑部

邮编: 610041

联系人: 冯海燕

电话: (028) 85223826

E-mail: hyfeng@imde.ac.cn or fenghaiyan 126@ 126.com