应用与环境生物学报 2009, **15** (4): 453~458
Chin J Appl Environ Biol=ISSN 1006-687X
2009-08-25
DOI: 10.3724/SP.J.1145.2009.00453

岷江上游典型生态系统水源涵养量及价值评估*

秦嘉励 杨万勤** 张 健
(四川农业大学林学园艺学院 雅安 625014)

摘 要 岷江上游自然生态系统由于具有重要的水源涵养功能, 被誉为长江流域“水塔”的重要组成部分. 通过野外实地调查和已有文献资料收集分析, 初步核算了岷江上游典型生态系统的水源涵养量; 并利用生态经济学价值量评估方法, 分别估算了该区典型生态系统的水源涵养价值. 岷江上游森林、灌丛和草地3种典型生态系统的水源涵养量分别为21.23×10^8 m^3、17.92×10^8 m^{3}和14.00×10^8 m^3, 价值6.34×10^{8}元、5.36×10^{8}元和4.19×10^{8}元. 植被冠层和土壤层是水源涵养的主要作用层, 而枯枝落叶层水源涵养量和价值均较小. 3种典型生态系统中以森林生态系统水源涵养价值最大, 占总价值的39.92%, 灌丛和草地生态系统分别占33.73%和26.35%. 森林生态系统中以冷杉林的水源涵养量和价值为最高, 占整个森林系统涵养水源价值的51.22%, 整个研究区价值的20.48%, 在涵养水源过程中占据主导地位. 图2 表4 参31
关键词 水源涵养; 岷江上游; 生态价值; 生态经济学
CLC Q948.112.3

Assessment of Ecosystem Water Conservation Value in the Upper Minjiang River, Sichuan, China*

QIN Jiali, YANG Wanqin** & ZHANG Jian
(*Faculty of Forestry, Sichuan Agricultural University*, Ya'an 625014, Sichuan, China)

Abstract The natural ecosystems in the upper reaches of the Minjiang River in Sichuan, China have great water stock, which is an important component for the “water tower” of the Yangtze River. The field investigation combined with the analysis of inventory data and published literature was conducteded to evaluate the water conservation quantity of the major ecosystems (forest, shrub and grass) in the upper Minjiang River. Furthermore, the economic value of water conservation was also accounted according to the ecological economics assessment methods. The water conservation quantity was 21.23×10^8 m^3, 17.92×10^8 m^3 and 14.00×10^8 m^3 in the forest, shrub and grass ecosystems in the study region, respectively. Correspondingly, the values were 6.34×10^8 Yuan, 5.36×10^8 Yuan and 4.19×10^8 Yuan in forest, shrub and grass ecosystems, respectively. The majority of water conservation in the three systems was distributed to the canopy and soil layer, and relatively smaller in the litter layer. The forest ecosystems showed the largest water conservation economic value, which accounted for 39.92% of the total value in the study region. Comparatively, the shrub and grass systems accounted for only 33.73% and 26.35% of the total value. In addition, the spruce forests played the most dominant role in conserving water, which accounted for 51.22% of the total forest ecosystem value and 20.48% of the total value in the study region. Fig 2, Tab 4, Ref 31
Keywords water conservation; the upper reaches of the Minjiang River; ecological value; ecological economics
CLC Q948.112.3

水资源短缺被认为是21世纪最为重要的资源和环境问题[1]. 修建水坝可以在一定程度上解决水资源短缺, 但由于其带来的各种环境问题而受到质疑[2, 3]. 自然生态系统如森林、灌丛和草地等有着巨大的水源涵养功能, 具有“天然绿色水库”的美誉, 并且能通过植被冠层、枯枝落叶层和土壤层的综合作用来缓和地表径流、补充地下水和调节河流量等[4, 5], 在缓解水资源短缺、调节河川径流、防治区域洪涝和旱灾等自然灾害方面具有重大的意义[6, 7]. 岷江上游是岷江的主要水源涵养区, 不仅是庇护四川和成都平原的天然绿色“万里长城”, 而且是长江流域“水塔”的重要组成部分, 在长江流域水资源和水环境安全以及经济社会可持续发展中有着举足轻重的作用[8, 9]. 但长期的人为活动干扰及其与脆弱生态环境之间的叠加效应使该区生态系统功能下降, 严重削弱了系统的水源涵养功能. 有效评估水源涵养功能及其价值是建立长效生态补偿机制的基础, 可为进一步保护天然植被和增加生态建设提供保障, 但一直缺乏应有的关注. 因此, 本文在野外实地调查与已有文献调研分析的基础上, 假定相同植被类型的水源涵养功能一致, 利用生态经济学价值量评估方法, 分别评估了岷江上游典型生态系统(森林、灌丛和草地)的水源涵养价值, 以期为合理保护、利用和开发当地资源提供基础数据, 并服务于该区生态、经济、社会的可持续发展.

1 研究区概况

岷江上游地处青藏高原向四川盆地的过渡地带(30º45′ ~ 33º09′ N, 102º35′ ~103º56′ E), 全长337 km, 流域面积2.47×10^4 km^2, 人口37万余人, 是我国最大的藏羌族聚居区. 区内年均温5.7~13.5 ℃, 1月均温−7.4~3.1 ℃, 7月均温14.5~22.7 ℃, 年降水量490.7~835.8 mm, 年蒸发量1 100~1 600 mm, 年相对湿度62%~72%. 植被垂直分异明显, 主要为常绿、落叶阔叶

收稿日期: 2008-07-29 接受日期: 2008-10-24
*国家自然科学基金项目(No. 30771702, 30471378), 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(No. NCET-07-0592), 国家“十一五”重大科技支撑计划课题(No. 2006BAC01A11)和四川省杰出青年学科带头人培养基金(No. 07ZQ026-022) Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 30771702, 30471378), the Program for New Century Excellent Talents in Universities of China (No. NCET-07-0592), the National “11th Five-year Plan” Key Science and Technology Program of China (No. 2006BAC01A11), and the Excellent Youth Science and Technology Foundation of Sichuan, China (07ZQ026-022)
**通讯作者 Corresponding author (E-mail: scyangwq@163.com; ywq918@yahoo.com)

混交林，针、阔叶混交林，亚高山/高山针叶林，亚高山灌丛草甸(3 500~4 000 m)和高山流石滩稀疏植被(>4 000 m). 众多的土壤类型随地貌及生物气候条件的垂直分异也呈垂直带状分布，发育了包括山地燥褐土、山地褐土、山地棕壤、高山灌丛草甸土和高山寒漠土等土壤类型.

2 研究方法

2.1 数据搜集与来源

研究基本数据主要来源于阿坝州第6次森林资源二类清查资料、《阿坝州2005年统计年鉴》、《阿坝州林业2005年年鉴》、《四川植物志》、《四川森林》、《四川森林土壤》以及已有的研究成果等. 岷江上游地区典型生态系统主要包括森林、灌丛和草地(表1)，其中森林主要包括柏木(*Cupressus*)、桦木(*Betula*)、冷杉(*Abies*)等为主的天然次生林，广泛分布在中山、亚高山以及高山地区，面积达775 808 hm^2；而灌丛主要是群落演替过程中形成的次生林，面积约786 695 hm^2，主要分布在河谷地区和亚高山、高山地区；草地 (包括高山草甸) 面积约797 069 hm^2，主要分布在亚高山和高山地区.

表1 岷江上游典型生态系统类型

Table 1 Main ecosystems in the upper reaches of the Minjiang River

生态系统类型 Ecosystem type	代表性植物 Representative plant	面积 Area (A/hm^2)	土壤类型 Soil type
森林 Forest	柏木 *Cupressus*	4047	褐土、黄棕壤、棕壤、暗棕壤 Cinnamon soil, yellow brown soil, brown soil, dark brown soil
	华山松 *Pinus armandii*	2780	
	桦木 *Betula*	100389	
	冷杉 *Abies*	344793	
	栎类 *Quercus*	35877	
	落叶松 *Larix*	10016	
	杉木 *Cunninghamia*	12510	
	铁杉 *Tsuga*	16463	
	杨树 *Populus*	2178	
	油松 *Pinus tabulaefrmis*	16192	
	云杉 *Picea*	230561	
	小计 Subtotal	775808	
灌丛 Shrub	白刺花、虎榛子、高山栎、悬钩子、高山杜鹃等 *Sophora*, *Ostryopsis*, *Quercus*, *Rubus*, *Rhododendron*, etc.	786695	燥褐土、褐土、棕壤 Dry-cinnamon soil, cinnamon soil, brown soil
草地 Grass	珠芽蓼、火绒草、四川蒿草、矮生嵩草等 *Polygonum*, *Leontopodium*, *Kobresis setchwahensis*, *Kobresis humilis*, etc.	797069	暗棕壤、亚高山草甸土、高山草甸土 Dark brown soil, subalpine meadow soil, alpine meadow soil

2.2 生态系统水源涵养量的估算

目前，国内外对生态系统水源涵养功能的理论研究已趋于成熟，特别是森林，一般有两种研究方法：一种是植被区域水量平衡法；一种是根据植被不同作用层的蓄水力来计算[14]. 根据该区的实际情况和特殊地理位置以及现有资料数据，为使结果具有可比性，本研究采用第2种方法对各类典型生态系统的水源涵养价值进行估算，即冠层(CL)截留、枯落物层(LL)持水以及土壤层(SL)蓄水3个部分.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

式中，Q为生态系统总的持水量(×10^6 m^3)；Q_1、Q_2、Q_3分别为冠层截留量、枯落物层持水量和土壤层蓄水量(×10^6 m^3)

2.2.1 **冠层截留量** 冠层截留量除与冠层自身的结构、林分郁闭度、叶形等有关外，降雨量和降雨强度及风等都是其重要的影响因子[15, 16]. 计算公式如下：

$$Q_1 = \sum(S_i \times m \times \alpha_i) \quad (2)$$

式中，Q_1为冠层截留量(×10^6 m^3)，S_i为第i种植被类型的面积(×10^4 hm^2)，m为该区年降水量(mm)，α_i为第i种植被类型的冠层截流率(%) [13, 15, 17~20](表2).

2.2.2 **枯枝落叶层持水量** 枯枝落叶层持水量的大小取决于枯枝落叶干重、枯枝落叶最大持水率、植被面积等因子. 计算公式如下：

$$Q_2 = \sum(S_i \times L_i \times \beta_i) \quad (3)$$

式中，Q_2为生态系统枯枝落叶持水量(×10^6 m^3)；L_i为第i种植被类型单位面积枯枝落叶积累量(t/hm^2)；β_i为第i种植被类型枯枝落叶最大持水率(%) [13, 18, 21~23](表2).

2.2.3 **土壤层蓄水量** 土壤蓄水量主要取决于土壤非毛管孔隙度的大小和土层厚度. 只有土层厚，土壤非毛管孔隙度高，贮存于土壤中的水量才多. 计算公式如下：

$$Q_3 = \sum(S_i \times \gamma_i \times H_i) \quad (4)$$

式中，Q_3为土壤层蓄水量(×10^6 m^3)；γ_i为第i种植被类型下土壤的非毛管孔隙度(%)；H_i为第i种植被类型下土层厚度(根据实际调查，取平均厚度60 cm) [13, 17, 18, 21, 25](表2).

2.3 生态系统水源涵养价值的估算

表2 岷江上游主要植被类型的水文特征

Table 2 Hydrological characteristics of major vegetation types in the upper reaches of the Minjiang River

主要植物类型 Major vegetation type	冠层截留率 Interception rate of canopy layer (r/%)	枯落物积累量 Litter stock (ρ/t hm^{-2})	枯落物最大持水率 Maximal water holding capacity (r/%)	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity (r/%)	参考文献 Reference
A	20.6	15.5	256.6	8.91	[15, 18]
B	16.1	18.1	273.0	10.16	[18, 30]
C	24.3	22.3	286.7	12.40	[15, 18]
D	33.3	22.0	366.6	14.45	[13, 18]
E	24.3	14.0	287.9	13.92	[18, 30]
F	28.9	13.9	204.8	8.38	[18, 30]
G	20.6	15.5	256.6	8.91	[15, 18]
H	28.9	26.2	304.0	13.30	[18, 30]
I	18.0	18.4	269.4	11.50	[15, 18]
J	28.9	18.1	273.0	10.16	[18, 30]
K	23.5	27.2	326.1	12.23	[18, 30]
L	25.0	9.0	388.0	9.80	[13, 25]
M	16.8	3.6	193.0	10.58	[17, 25]

A：柏木；B：华山松；C：桦木；D：冷杉；E：栎类；F：落叶松；G：杉木；H：铁杉；I：杨树；J：油松；K：云杉；L：灌丛；M：草地. 下同

A: *Cupressus*; B: *Pinus armandii*; C: *Betula*; D: *Abies*; E: *Quercus*; F: *Larix*; G: *Cunninghamia*; H: *Tsuga*; I: *Populus*; J: *Pinus tabulaefrmis*; K: *Picea*; L: Shrub; M: Grass. The same below

生态系统水源涵养的价值主要包括冠层截留价值、枯枝落叶层持水价值和土壤蓄水价值. 目前多根据水库的蓄水成本、供水价格、电能生产成本、级差地租、海水淡化费用和区域水源运费等确定[26]. 本研究主要采用影子价格法对生态

系统水源涵养量进行价值化. 公式为:

$$v = Q \times a \quad (5)$$

式中, v为生态系统水源涵养价值(×10^{8}元); Q为生态系统水源涵养量(×10^6 m^3); a为水的单价(元/m^3). 其中, 水的单价取用四川综合平均水成本0.43元/t [27]和三峡工程单位库容建设成本2.29元/m^3 (以1993年不动价为基准) (三峡工程建设委员会)的平均值, 即1.36元/m^3.

2.4 评估价值的修正

评估生态系统服务功能价值时, 如果不考虑社会的发展程度和人类的支付意愿, 就可能会导致其结果远远超过社会经济的承受能力, 补偿落实不到实处, 这有悖于生态系统服务功能价值评估的初衷[28]. 为弥补这一不足, 引入李金昌等(2002)提出的可以表征人们支付意愿的社会阶段发展系数[29]对典型生态系统水源涵养的总价值进行修正, 将其所产生的"外部效益"进行"内部化", 公式如下:

$$V = v \times l = v \times \frac{1}{1 + e^{(3-1/En)}} \quad (6)$$

式中, V为修正后的生态系统水源涵养价值; l为社会阶段发展系数; e为自然对数底数; En为恩格尔系数(58.0%, 由岷江上游地区2005年城镇与农村居民的平均恩格尔系数按其人口比例加权平均);

由上式可得, 岷江上游地区2005年生态服务功能价值修正系数为0.22.

3 结果与分析

3.1 典型生态系统水源涵养价值

由表3可以看出, 岷江上游典型生态系统水源涵养总量约53.14×10^8 m^3, 价值15.89×10^{8}元. 其中, 森林、灌丛、草地3种不同生态系统的涵水总量分别为21.23×10^8 m^3、17.92×10^8 m^{3}和14.00×10^8 m^3, 价值为6.34×10^{8}元、5.36×10^{8}元和4.19×10^{8}元, 分别占总价值的39.92%、33.73%和26.35%. 3种典型生态系统中, 均以植被冠层和土壤层涵养水源价值最大, 而枯枝落叶层最小. 从表3还可以看出, 3种典型生态系统单位面积涵养水源价值大小为森林>灌丛>草地. 同时, 3种生态系统不同作用层单位面积的水源涵养能力表现出较大的差异(图1). 森林冠层、枯枝落叶层和土壤层单位面积截留量均大于灌丛和草地, 而草地土壤层单位面积截留量略大于灌丛.

3.2 森林生态系统水源涵养价值

根据现有资料, 结合实地调查, 该区主要森林植被类型包括柏木、华山松和桦木等11种, 其中冷杉、云杉和桦木为该区的典型森林植被类型, 面积分别占森林生态系统的44.44%、29.72%和12.94%. 通过计算, 这11种主要森林植被类型中, 涵水量最多、价值最大的3种植被类型是冷杉、云杉和桦木, 其涵水总量分别为10.88×10^8 m^3、5.49×10^8 m^{3}和2.43×10^8 m^3, 价值分别为3.26×10^{8}元、1.64×10^{8}元和0.73×10^{8}元, 分别占森林生态系统总价值的51.22%、25.87%和11.45% (表4). 如图2所示, 11种主要森林植被类型中, 冠层单位面积截留量最大的是冷杉, 其次是铁杉和油松, 余下次之; 而枯枝落叶层单位面积蓄水量最大的是云杉, 其次是铁杉和冷杉; 土壤层单位面积蓄水量最大的是冷杉, 其次是栎类和铁杉. 这3个不同作用层单位面积的综合水源涵养能力与冠层单位面积截留能力相同, 大小依次是: 冷杉>铁杉>油松>栎类>落叶松>桦木>云杉>柏木>杉木>杨树>华山松.

4 结论与讨论

4.1 典型生态系统水源涵养价值

在充分了解岷江上游地区的丰富生物资源、特殊生态地位的基础上, 选择该地区典型的生态系统(森林、灌丛和草

表3　岷江上游典型生态系统水源涵养量(Q)及其价值(V)

Table 3　Water conservation quantity (Q) and value (V) of major ecosystems in the upper reaches of the Minjiang River

生态系统类型 Ecosystem type	面积 Area (A/10^4 hm^2)	冠层 Canopy layer		枯落物层 Litter layer		土壤层 Soil layer		合计 Total		单位面积价值 Value per unit (Yuan/hm^2)
		Q	V	Q	V	Q	V	Q	V	
森林 Forest	77.6	1450.6	4.34	59.4	0.16	612.9	1.84	2122.8	6.34	819
灌丛 Shrub	78.7	1301.9	3.90	27.3	0.08	462.6	1.38	1791.9	5.36	681
草地 Grass	79.7	888.2	2.66	5.5	0.02	506.0	1.51	1399.7	4.19	525
合计 Total	236.0	3640.7	10.90	92.2	0.26	1581.5	4.73	5314.4	15.89	674

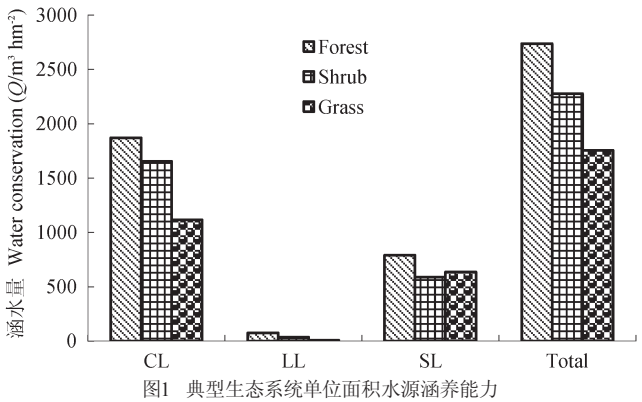


图1　典型生态系统单位面积水源涵养能力

Fig. 1　Water conservation capacity of per unit area of major ecosystems in the upper reaches of the Minjiang River

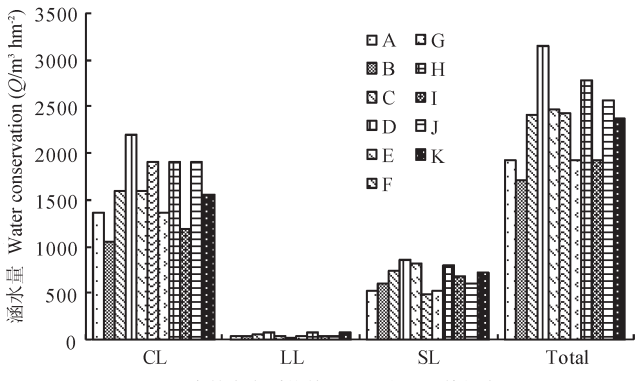


图2　森林生态系统单位面积水源涵养能力

Fig. 2　Water conservation capacity of per unit area of forest ecosystem in the upper reaches of the Minjiang River

表4 岷江上游森林生态系统水源涵养价值
Table 4 Water conservation value of forest ecosystem in the upper reaches of the Minjiang River

植被类型 Vegetation type	面积 Area (A/10^4 hm^2)	冠层 Canopy layer		枯落物层 Litter layer		土壤层 Soil layer		合计 Total	
		Q	V	Q	V	Q	V	Q	V
A	0.4	5.5	0.02	0.2	0.00	2.2	0.01	7.9	0.02
B	0.3	3.0	0.01	0.1	0.00	1.7	0.01	4.8	0.01
C	10.0	161.8	0.48	6.4	0.02	74.7	0.22	242.9	0.73
D	34.5	761.6	2.28	27.8	0.08	298.9	0.89	1088.3	3.26
E	3.6	57.8	0.17	1.4	0.00	30.0	0.09	89.2	0.27
F	1.0	19.2	0.06	0.3	0.00	5.0	0.02	24.5	0.07
G	1.3	17.1	0.05	0.5	0.00	6.7	0.02	24.3	0.07
H	1.6	31.6	0.09	1.3	0.00	13.1	0.04	46.0	0.14
I	0.2	2.6	0.01	0.1	0.00	1.5	0.00	4.2	0.01
J	1.6	31.0	0.09	0.8	0.00	9.9	0.03	41.7	0.12
K	23.1	359.4	1.08	20.5	0.06	169.2	0.51	549.0	1.64
合计 Total	77.6	1450.6	4.34	59.4	0.16	612.9	1.84	2122.8	6.34

地)作为研究对象，应用影子价格法对不同生态系统水源涵养功能所蕴含的生态价值进行初步估算得出，岷江上游典型生态系统水源涵养量为53.14×10^8 m^3，其总价值高达15.89×10^{8}元. 系统如此巨大的水资源蕴藏量和价值为岷江流域提供了基础保障，同时也从另一方面看出自然生态系统调节径流水量以及生态和经济价值的潜在意义.

森林、灌丛和草地是岷江上游3种典型的生态系统，其水源涵养功能分别为21.23×10^8 m^3、17.92×10^8 m^{3}和14.00×10^8 m^3，价值分别为6.34×10^{8}元、5.36×10^{8}元和4.19×10^{8}元. 虽然森林面积仅占总植被面积的32.88%，但其水源涵养价值却为总价值的39.22%，是岷江上游水源涵养功能的主要贡献者. 这主要是由于该区分布着丰富的天然林，面积高达65.7×10^4 hm^2，占该区森林总面积的84.7%，蓄积超过1.3×10^8 m^3，占该区森林总蓄积的96.7%，如此繁茂的林冠，枝叶表面积较大，郁闭度也较大，为冠层的截留提供了充足的条件，因而其单位面积截留量明显大于灌丛和草地. 其次，森林生态系统的枯落物量大于灌丛和草地，且郁闭度较高，特别是亚高山云冷杉林，林冠层透光性差，林地温度较低，枯落物分解较慢，同时疏松的结构也为其持水能力提供了较大的潜力，所以森林生态系统的枯落物单位面积涵水量亦最大. 第三，森林枝叶茂盛，根系粗壮，分布广而深，枯落物较多，有利于土壤孔隙度的发育，而灌丛和草地由于植被低矮、稀疏、根系浅，所以其涵水能力不如森林.

4.2 森林生态系统水源涵养价值

本研究结果显示，岷江上游森林生态系统的主要植被类型包括柏木、华山松和桦木等11种，其中冷杉、云杉和桦木是最典型的植被类型，面积分别占森林生态系统总面积的44.44%、29.72%和12.94%，涵水价值分别占森林生态系统总价值的51.22%、25.87%和11.45%，在该区森林生态系统涵养水源过程中占据主导地位. 但由于该区云杉林有近一半的面积是人工林，其单位面积水源涵养能力仅2 381 m^3/hm^2，在11种主要森林植被类型中居第7位. 而铁杉、油松和栎类虽然所占面积比例不大，但单位面积水源涵养能力却较强. 这主要是由于该区的铁杉和油松属于温带山地落叶与常绿针叶林，特殊的群落结构使其冠层截留率高达28.92% [30]，这在很大程度上决定了其综合水源涵养能力. 因为本研究采用一次降水的最大截留率，没有考虑其巨大的蒸发蒸腾作用，从而在一定程度上高估了植被冠层对系统涵养水源所作出的贡献. 但铁杉林的枯落物现存量、最大持水量和土壤毛管孔隙度亦较大[18]，从而进一步增强了其单位面积截留能力(2 795 m^3/hm^2)，仅次于冷杉(3 156 m^3/hm^2).

4.3 水源涵养价值估算的不确定性分析

水源涵养是自然生态系统服务功能的重要组成部分，主要表现为对降雨的再分配过程. 国内外许多学者对自然生态系统特别是森林生态系统的水源涵养功能及其价值进行了研究，但估算结果差异较大. 这主要是由于研究过程中的水源涵养量估算方法[7, 31]、植被水文特征[13, 15, 18, 30]等不同造成的. 张文广等(2007)对岷江上游森林生态系统(包括灌丛)涵养量及价值的研究发现，由于该区2000年实施了“天然林保护工程”与“退耕还林还草”政策，森林生态系统水源涵养能力得到了有效改善，涵水量1.39×10^{10} m^3，价值高达93.07×10^{8}元. 据此，到2005年，该区森林生态系统的水源涵养量及其价值应该得到进一步的增长. 但本文的研究结果显示，2005年岷江上游森林生态系统(包括灌丛)涵水量仅0.39×10^{10} m^3，价值仅11.71×10^{8}元，远远低于前者. 这主要有3方面的原因：第一，基础数据(植被面积)来源不同. 张文广等(2007)主要根据Landsat TM遥感影像图对该区森林面积进行提取分析，这为大中型尺度地区的研究提供了方便，但缺乏较为详尽的实地调查，不利于对该区特殊地貌生态价值的准确评估. 本研究主要采用阿坝州第6次森林资源二类清查资料和《阿坝州2005年统计年鉴》等资料，数据详尽具体，但工作量大. 如果将二者有效结合将有利于该区甚至更大尺度生态价值的分析研究. 第二，涵水量估算方法不同. 前者将该区森林划分为落叶林、针阔混交林、针叶林和灌木林四大类，而本文对该区主要的11种植被类型进行了更为详细的分类，这导致所引用的水文特征数据存在较大差异. 如前者在计算阔叶林时，冠层截留率引用的是梁建民等(1980)的32.1%，而本文所研究的阔叶林主要是桦木林，冠层截留率引用的是张立恭(1997)对岷江上游水源涵养林涵水能力的研究结果(24.3%)，更接近实际情况. 再者，前者仅对林冠层和土壤层涵水量进行研究，忽略了枯枝落叶层在生态系统水源涵养过程中的重要作用. 本文弥补了这一问题，但评估过程中没有考虑植被的腐殖质层等，这使得枯枝落叶层的水源涵养价值结果可能偏低. 第三，价值估算方法不同，前者主要采用的是1988~1991年

全国水库建设投资预算的每建设1 m^3库容需投入成本费0.67元, 而本文考虑到该区生态系统水源涵养的主要受益群体及作为生态补偿参考依据的可行性, 水的单价取用四川综合平均水成本和三峡工程单位库容建设成本的平均值, 并用社会阶段发展系数对其进行了调整.

受科学技术水平、估算方法和研究手段的限制, 不同学者对生态系统水源涵养量及其价值的研究所得出的结果存在较大差异, 有必要进一步优化其估算方法和研究手段. 但可以肯定的是, 岷江上游典型生态系统具有巨大的水源涵养价值, 这在一定程度上印证了该区作为水源生命线的重要战略地位. 但同时也应该认识到, 岷江上游作为一个典型的生态与环境脆弱地带, 受自然灾害和人类活动叠加效应的影响, 生态系统(特别是次生林和人工林)结构和功能还不够完善. 这部分生态系统如果得到有效的改善, 将会产生更大的生态效益. 另一方面, 作为经济相对较为落后的地区, 除了通过国家宏观调控方式进行补偿外, 按照市场经济原则, 根据生态系统服务价值建立一套完善的生态补偿机制就显得尤其重要. 这既可以解决政府“买单”的不公平性和有限性, 也可以提高人们对该区的生态保护意识, 支持和鼓励当地居民更多地承担保护生态而非经济发展的责任, 符合国际上普遍实施的为实现生态保护与经济社会协调发展而采取的生态恢复重建与生态系统功能转型战略.

Reference

1 Zeiher LC. The ecology of architecture, a complete guide to creating the environmentally conscious building. New York, USA: Whitney Library of Design, 1996

2 Cheng CL. Evaluating water conservation measures for Green Building in Taiwan. *Building & Environ*, 2003, **38**: 369~379

3 Wu JS (吴季松). Modern Water Resources Management Methodology. Beijing, China (北京): China Water Power Press, 2002

4 Wen YG (温远光), Liu SR (刘世荣). Quantitative analysis of the characteristics of rainfall interception of main forest ecosystems in China. *Sci Silv Sin* (林业科学), 1995, **31** (4): 289~298

5 Primack R, Rozzi R, Feinsinger P, Dirzo R, Massado F. Fundamentos de conservacion biologica. Perspectivas Latinoamericanas Fondo de Cultura Economica, Mexico, 2001

6 Wilcox, BP, Thurow TL. Emerging issues in rangeland ecohydrology: Vegetation change and the water cycle. *Rangeland Ecol & Manage*, 2006, **59**: 220~224

7 Deng KM (邓坤枚), Shi PL (石培礼), Xie GD (谢高地). Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze River and its benefits. *Resour Sci* (资源科学), 2002, **24** (6): 68~73

8 Yao J (姚建), Ding J (丁晶), Ai NS (艾南山). Assessment of ecological valnerability in upper reaches of Minjiang River. *Resour & Environ Yangtze Basin* (长江流域资源与环境), 2004, **13** (4): 380~383

9 Chen ZJ (陈治谏). The strategic position and the ecological and environmental function of the upper reaches of the Yangtze river. *J Mountain Sci* (山地学报), 2000, **8** (3): 258~262

10 Zhang WG (张文广), Hu YM (胡远满), Zhang J (张晶), Liu M (刘淼), Yang ZP (杨兆平), Chang Y (常禹), Li XZ (李秀珍). Forest water conservation and its benefits in upper reaches of Minjiang River in recent 30 years.. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 2007, **26** (7): 1063~1067

11 Man ZC (满正闯), Su CJ (苏春江), Xu Y (徐云), Liu XL (刘兴亮), Zhang JY (张金盈). An analysis on water conservation capacity variation of forest in the upper reaches of Minjiang River. *Res Soil & Water Conserv* (水土保持研究), 2007, **14** (3): 223~226

12 Virginia HD, Stephen P. Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecol Econ*, 2007, **64**: 286~296

13 Li ZX (李振新), Ouyang ZY (欧阳志云), Zheng H (郑华), Liu XN (刘兴良), Su YM (宿以明). Comparison of rainfall redistribution in two ecosystems in Minjiang upper catchments, China. *J Plant Ecol* (植物生态学报), 2006, **30** (5): 723~731

14 Li J (李晶), Ren ZY (任志远). Study on function and value of vegetation water conservation on Qinba mountain. *J Soil & Water Conserv* (水土保持学报), 2003, **17** (4): 132~134, 138

15 Zhang LG (张立恭). A comprehensive evaluation of water-storage ability of water conservation forest in the upper reaches of Minjiang river. *Sichuan For Exploration & Assign* (四川林勘设计), 1997 (4): 27~31

16 Wang KY (王开运). Processes of Subalpine Forest Ecosystems in the West of Sichuan. Chengdu, China (成都): Sichuan Publishing House of Science &Technology, 2004

17 Yang C (杨澄), Dang KN (党坤良), Liu JJ (刘建军). Water-source conservation and regulating efficacy of artificial forest of *Quercus acutissima*. *J Northwest For Coll* (西北林学院学报), 1997, **12** (2): 15~19

18 Shi PL (石培礼), Wu B (吴波), Cheng GW (程根伟), Luo J (罗辑). Water retention capacity evaluation of main forest vegetation types in the upper Yangtze basin. *J Nat Resour* (自然资源学报), 2004, **19** (3): 351~360

19 Cheng GW (程根伟), Yu XX (余新晓). Hydrologic cycle and mathematical simulation of mountain forest ecosystem. Beijing, China (北京): Science Press, 2004

20 Dong TS (董铁狮), Zhao YS (赵雨森), Li CJ (李成军), Jiang ZH (姜忠灏). Study on water conservation function of scrub of *Corylus* spp. in eastern of Heilongjiang province. *Prot For Sci & Technol* (防护林科技), 2006, **71** (2): 3~6

21 Lin B (林波), Liu Q (刘庆), Wu Y (吴彦), He H (何海), Pang XY (庞学勇). Water holding capacity of moss and litter of subalpine coniferous plantations in western Sichuan, China. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2002, **8** (3): 234~238

22 Yang YP (杨玉坡). Sichuan Forest. Beijing, China (北京): China Forestry Publishing House, 1992

23 Sun YH (孙艳红), Zhang HJ (张洪江), Cheng JH (程金花), Wang YJ (王玉杰), Shi J (石健), Cheng Y (程云). Soil characteristics and water conservation of different forest types in Jinyun mountain. *J Soil & Water Conserv* (水土保持学报), 2006, **20** (2): 106~109

24 Dong W (董伟), Han B (韩波), Wang ZP (王兆品). Water conservation of forests in the south mountain areas of Jinan city. *Shandong For Sci & Technol* (山东林业科技), 2006 (2): 18~19

25 Zhu PF (朱鹏飞). Sichuan Forest Soil. Chengdu, China (成都): Sichuan Technology Press, 1989
26 Hou YZ (侯元兆). Assessment of the forest resources in China. Beijing, China (北京): China Forestry Publishing House, 1995
27 Gao SP (高素萍). The currency valuation of ecological benefit of nature forest based on GIS in the west of Sichuan province. Nanjing, China (南京): Nanjing Forestry University (南京林业大学), 2002
28 Wang JN (王金南), Zhuang GT (庄国泰). Ecological compensation mechanism and its policy design. Beijing, China (北京): China Environmental Science Press, 2005
29 Li JC (李金昌). Value assessment is the key of environmental assessment. *China Population Resour & Environ* (中国人口资源与环境), 2002, **12** (3):11~17
30 Chen DL (陈东立), Yu XX (余新晓), Liao BH (廖邦洪). Analysis on the function of conservation water of the Chinese forest ecosystem. *World For Res* (世界林业研究), 2005, **18** (1): 49~54
31 Cheng GW (程根伟), Shi PL (石培礼). Benefits of forest water conservation and its economical value evaluation in upper reaches of Yangtze River. *Sci Soil & Water Conserv* (中国水土保持科学), 2004, **2** (4): 17~20

欢迎订阅2010年《中国生态农业学报》

《中国生态农业学报》由中国科学院遗传与发育生物学研究所和中国生态经济学会主办，中国科学院主管，科学出版社出版。中文核心期刊、中国科技核心期刊，被美国化学文摘、国际农业生物学文摘、美国乌利希国际期刊指南以及中国科学引文数据库、中国期刊全文数据库等多家检索系统和数据库收录。荣获第三届、四届全国农业优秀期刊一等奖和首届北方优秀期刊奖，连续三届获得河北省优秀期刊奖。

《中国生态农业学报》主要报道农业生态学、生态学、农业资源与环境保护、农业生态经济学及生态农业建设等领域创新性研究成果。适于从事农业生态学、生态学、生态经济学以及环境保护等领域科技人员、高等院校有关专业师生，农业及环境管理工作者和基层从事生态农业建设的广大技术人员阅读与投稿。

《中国生态农业学报》国内外公开发行，国内刊号CN13-1315/S，国际刊号ISSN1671-3990。双月刊，国际标准大16开本，192页，每期定价35元，全年210元。邮发代号：82-973，全国各地邮局均可订阅。漏订者可直接汇款至编辑部补订（需另加邮资24.00元）。

地址：(050021)河北省石家庄市槐中路286号 《中国生态农业学报》编辑部
电话：(0311)85818007　传真：(0311)85815093
网址：http://www.ecoagri.ac.cn　E-mail：editor@sjziam.ac.cn