

基于综合蓄水能力法的森林水源涵养功能估算

——以江西兴国县为例

李 佳^{1,3}, 邵全琴², 刘纪远²

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011, 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101,
3 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要:以江西兴国县第 6 次二类调查森林小班数据为基础(2003 年), 根据综合蓄水能力法, 计算了兴国县森林涵养水源的功能, 并比较分析了不同森林类型、海拔和坡位条件上森林涵养水源功能的差异, 结果表明: 1) 2003 兴国县森林生态系统面积 $22.65 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 年涵养水源量 $1.93 \times 10^8 \text{ m}^3$, 单位面积森林涵养水源量 $852.45 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; 2) 不同森林类型涵养水源的功能不同, 其中针叶林涵养水源贡献最大, 而从单位面积涵养水源能力来看, 阔叶林 > 混交林 > 针叶林 > 灌木林; 3) 不同海拔高度上森林水源涵养功能的贡献不同, 其中海拔 100~300、300~500 和 500~1 000 m 森林为涵养水源功能的主体, 其中海拔 300~500 m 森林的涵养水源能力最高; 4) 不同坡位上森林涵养水源的贡献也不同, 其中全坡的森林最高, 但是全坡森林单位面积涵养水源能力低。

关键词:水源涵养; 综合蓄水能力法; 森林小班数据; 兴国

中图分类号:S715.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2012)04-0083-05

Forest Conservation Estimation Based on the Integrated Storage Capacity Method ——A Case Study of Xingguo County in Jiangxi

LI Jia^{1,3}, SHAO Quan-qin², LIU Ji-yuan²

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Wulumuqi, Xinjiang 830011, China;
2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the data of Category II of the sixth forest inventory in Xingguo(2003), we estimated the water conservation of the forest ecosystem by integrated storage capacity method. The characteristics of water conservation of different forest types in different locations were analyzed too. The results showed that a volume of $1.93 \times 10^8 \text{ m}^3$ water was conserved in the local forest ecosystem. The capacity of water conservation of forests differs among different forest types. Conifer forest had the most contribution to the conservation. However, comparing to the forest conservation per unit, broadleaf forest took the first, followed by mixed forest, conifer forest, the last was shrub forest. Water conservation of forests located in the region differs with altitude. Most contributions were from the forests located at the altitude of 100 to 300 m, 300 to 500 m, 500 to 1 000 m which the strongest of water conservation capacity of forest in an altitude 300 to 500 m. Forests in different slope locations also demonstrated different levels of water conservation. Forests growing in a whole slope exhibited the most contributions to water conservation, however, the per unit of water conservation of these forests was much low.

Key words: water conservation; integrated storage capacity method; forest inventory data; Xingguo

随着全球水资源需求量的不断增加以及水环境的急剧恶化,水资源紧缺已成为世人所共同关注的全球性问题,由于森林生态系统是清洁水源的发祥地,因而其涵养水源的功能尤其受到人们的重视。目前森林水源涵养功能不仅关注森林生态系统内的水文过程,同时也关注于多个水文过程所产生的综合效应,所以水源涵养功能的概念有狭义和广义之分。狭义的水源涵养功能是指“森林拦蓄降水或调节河川径流量的功能”,而广义的水源涵养功能指森林生态系统通过林冠层、枯落物层和土壤层对降水再分配,从而有效涵养水分、调节径流、缓洪补枯和净化水质等功能^[1-2]。水源涵养服务功能是森林生态系统的重要服务功能之一^[3]。一些研究者针对不同区域对森林的水源涵养功能和价值进行了专题研究^[4-6]。

对于狭义的水源涵养功能,主要就是计算其森林拦蓄降水的功能。森林拦蓄降水的功能计量方法主要有土壤蓄水能力法、综合蓄水能力法、水量平衡法、年径流量法和多因子回归法等 8 种,不过这些方法都存在一定的局限性,实际应用中需要综合考虑^[7]。

综合蓄水能力法是指综合考虑了林冠层截留量、枯落物持水量和土壤层贮水量的方法^[6,8],其中林冠层截留量可以通过截留率与降水量计算,枯落物持水量通过凋落物存量与最大(或有效)持水能力计算,土壤层蓄水量通过土壤非毛管孔隙度和土壤

厚度计算。这种方法综合考虑了森林 3 个作用层对降水的拦蓄作用,比较全面,有助于比较分析不同作用层拦蓄降水功能的大小,但需要大量的实测数据,因此运用这种方法估算森林水源涵养量的研究不多。然而,森林资源清查小班数据包含丰富的森林生态系统数据库,不仅能运用于估算森林植被生物量和碳储量^[9],而且其具有丰富基于小班尺度的水文和土壤属性方面数据,可以直接被综合蓄水能力法利用估算区域森林水源涵养量。

本文旨在运用森林水源涵养计量方法中的综合蓄水能力法,以江西兴国县森林生态系统为例,将其森林资源二类清查小班数据为基础,得到了各小班的涵养水源量,分析了兴国县森林生态系统水源涵养功能。

1 研究区概况

兴国县位于江西省中南部,面积 3 214. 46 km²,东西长 84 km,南北宽 71. 5 km,地貌以低山、丘陵为主,局部有中山、低山。兴国县系亚热带季风湿润气候,年平均气温为 18. 8 ℃,年平均降水量为 1 515. 6 mm,年平均无霜期 284 d,年平均蒸发量为 1 635. 8 mm,年均相对湿度为 78%,风向以西北风为主导;夏季为西南偏南风,年平均风速为 1. 8 m · s⁻¹,极大风速达 22 m · s⁻¹。年平均径流深 835. 9 mm,径流总量为 26. 87 亿 m³。

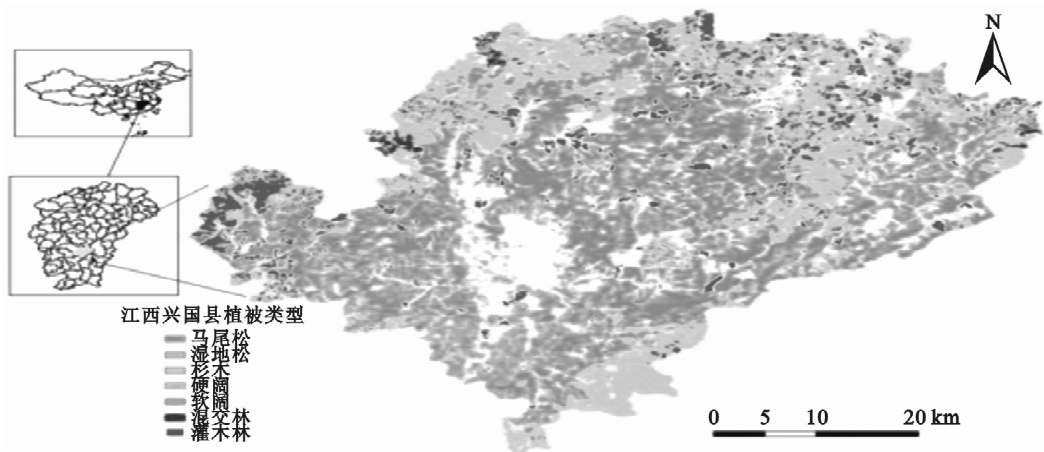


图 1 江西兴国县森林植被类型

Fig. 1 Forest types in Xingguo County of Jiangxi Province

兴国县的地带性植被为亚热带针叶林、常绿阔叶。根据兴国县第 6 次二类资源清查结果,2003 年森林面积 2.26×10^5 hm²,其中针叶林面积 2.08×10^5 hm²,阔叶林面积 0.07×10^5 hm²,针阔混交林面积 0.01×10^5 hm²,以及灌木林地 0.1×10^5 hm²;主

要树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、硬阔、软阔、混交林、毛竹(*Phyllostachys edulis*)林,经济林,灌木林等。兴国县位于地带性土壤为红壤的区域。丘陵低山上广布着各种类型的红壤,山地较高

部位发育黄红壤,高山上发育山地黄壤,石灰岩上发育棕色石灰土,紫色岩上发育紫色土,平原地区主要是各种类型的水稻土。

2 研究方法

在江西兴国县森林资源第 6 次二类调查小班数据基础上,结合不同森林类型的林冠层截留率(%)、枯枝落叶层最大持水量($t \cdot hm^{-2}$)、土壤非毛管孔隙度(%)等参数(表 1),运用综合蓄水能力法研究兴国县森林水源涵养功能。

森林的拦蓄降水功能是指森林生态系统对降水的拦截和贮存作用,主要包括林冠截留量、枯枝落叶层的截留以及土壤蓄水,是森林涵养水源的主要表现形式。因此,森林生态系统水源涵养量可以表示为:

$$WR=C+L+SW$$
(1)

其中,WR 森林生态系统截留量,C 林冠层的截留量,L 枯枝落叶层截留量,SW 土壤蓄水量。

林冠层截留量:

$$C=\sum_{i=1}^n a_i \cdot R \cdot A_i$$
(2)

其中, a_i 是 i 种森林类型的林冠层截留率(%), R 是一年中降水量最大那天的降水(mm), A_i 是 i 种森林类型的小班面积(hm)。

森林枯枝落叶层持水量:

$$L=\sum_{i=1}^n \delta_i \cdot A_i$$
(3)

其中, δ_i 是枯枝落叶层最大持水量。

土壤储水量:在森林生态系统不同界面间的水分传输中,土壤层对降水资源分配格局影响最为明显,森林土壤是森林发挥水文调节作用的主要场所^[15],林分的主体贮水在林地土壤中。林地土壤非毛管孔隙度是林地土壤贮水作用最主要而显著的因素^[16],土壤层厚度和非毛管孔隙度可综合反映土壤水源涵养的潜在能力^[17],因此采用不同森林类型的土壤非毛管孔隙度和林地土壤层厚度计算林地土壤蓄水量 $SW^{[13-14]}$ 。

$$SW=\sum_{i=1}^n \beta_i \cdot A_i \cdot h_i$$
(4)

其中, β_i 是非毛管孔隙度(%), h_i 是森林类型对应的土层厚度(cm)。

3 结果分析

根据公式(1)计算得到 2003 年兴国县森林生态系统共涵养水源 $1.93 \times 10^8 m^3$,单位面积森林涵养水源量 $852.45 m^3 \cdot hm^{-2}$ 。

3.1 不同森林类型水源涵养功能的差异

兴国县森林生态系统主要有针叶林、阔叶林、混交林和灌木林 4 种类型。不同类型的森林水源涵养

功能大小主要是根据单位面积的水源涵养量决定的。就单位面积森林涵养水源量来看,阔叶林最高,为 $1\,128.28 m^3 \cdot hm^{-2}$,其次为混交林和针叶林,分别为 $977.78 m^3 \cdot hm^{-2}$ 和 $838.08 m^3 \cdot hm^{-2}$,灌木林单位面积涵养水源功能最低,为 $752.44 m^3 \cdot hm^{-2}$ 。阔叶林的水源涵养功能最高主要由于其林冠层截留、枯枝落叶层最大持水量、土壤非毛管孔隙度在所有森林类型中最大,后面紧随混交林,针叶林,而灌木林最小(表 1)。

表 1 不同森林类型的林冠层截留率、枯枝落叶层最大持水量和土壤非毛管孔隙度的参数值

Table 1 Parameters of canopy interception rate, non-capillary porosity of soil and water-holding capacity of litters in different forest types

森林类型	林冠层截留/%	枯枝落叶层最大持水量/($t \cdot hm^{-2}$)	土壤非毛管孔隙度/%	文献来源
马尾松	15.7	19.0	9.9	[15]
湿地松	17.3	17.6	9.3	[15]
杉木	16.3	21.6	10.5	[16,10]
阔叶林	17.8	23.3	13.8	[10,17]
混交林	13.8	22.3	11.2	[15]
灌木林	—	15.6	9.1	[18]
毛竹林	11.1	10.6	11.1	[10,19]
经济林	12.5	23.8	12.7	[15]

一定区域内不同类型森林在涵养水源重的贡献,主要取决于:涵蓄能力和面积。从图 2 发现,针叶林涵养水源功能的贡献最大,其贡献率为 90.6%,而灌木林、阔叶林和混交林的贡献率仅为 5.3%、3.7%和 0.4% 针叶林水源涵养贡献率最高,主要是其面积最大,尽管阔叶林和混交林单位面积涵养水源能力并不低,但是其面积所占比例最小,以至于其涵养水源的贡献率很低,而灌木林水源涵养贡献率也较低,这是由于其面积较小和单位面积水源涵养量低所致。

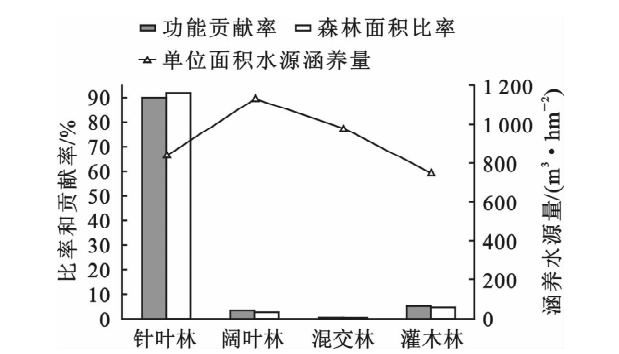


图 2 兴国不同森林类型涵养水源功能特征

Fig. 2 Characteristics of water conservation in different forest types in Xingguo

3.2 不同海拔高度森林水源涵养功能的差异

根据兴国县森林资源分布地区的海拔高度,可以划分为 <100 、 $100 \sim 300$ 、 $300 \sim 500$ 、 $500 \sim 1\,000$

和>1 000 m等5个级别(图3)。结果发现,兴国县森林的水源涵养功能主要来自于海拔100~1 000 m地区(其累积贡献率为95.8%),其中,100~300、300~500和500~1 000海拔高度上的森林涵养了总水源量的29.8%、43.4%和22.6%,海拔高度<100 m和>1 000 m的森林涵养水源功能的贡献率较低,分别为3.2%和1%;不同海拔高度上森林单位面积涵养水源量不同,其中位于海拔<100 m的森林单位面积涵养水源能力最大,为1 262.77 m³·hm⁻²,而位于海拔高度>1 000和500~1 000 m处的森林单位面积涵养水源能力比较接近,分别为1 054.27 m³·hm⁻²和1 030.54 m³·hm⁻²,海拔100~300和300~500 m处森林的涵养水源能力差异不大,分别为920.76 m³·hm⁻²和926.62 m³·hm⁻²。海拔高度100~300、300~500和500~1 000 m地区的森林,其涵养水源的贡献率较高主要是因为森林分布面积较大,而海拔高度<100和>1 000 m地区的森林,其水源涵养价值贡献率低,则主要是森林面积较少的原因。

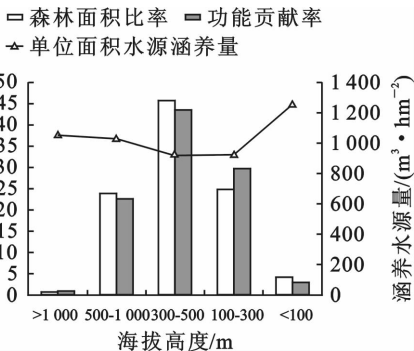


图3 位于不同海拔高度森林涵养水源功能特征
Fig. 3 Characteristics of water conservation in the forests with different elevations

3.3 不同坡位森林水源涵养功能的差异

根据兴国森林资源二类调查数据,坡位共分为山脊、上部、中部、下部、山谷、平地 and 全坡7种类型(图4),其中位于全坡的森林水源涵养贡献率最高,为54.24%,其次下部森林的涵养水源贡献率为19.58%,二者的累积贡献率达到了73.82%;就其单位面积森林涵养水源能力来看,山谷森林的单位面积涵养水源量最大,为1 091.58 m³·hm⁻²,其次为中部、下部、平地的森林,其单位面积涵养水源量分别为1 076.64、1 058.14、1 002.39 m³·hm⁻²,位于上部森林涵养水源能力居中,为948.46 m³·hm⁻²,而位于山脊和全坡的森林单位面积涵养水源的能力最小,分别为825.04和886.32 m³·hm⁻²。

不同坡位上森林水源涵养功能不仅反映在单位面积的水源涵养量,还应考虑森林分布面积的大小。不难发现尽管全坡上森林的涵养水源能力低,但是

其面积比重最大,因此其水源涵养功能的贡献率(54.24%)仍高于其他坡位上森林,下部上的森林涵养水源能力和面积比率都较高,因而其水源涵养贡献率也较高(19.58%),而位于平地 and 山谷的森林,尽管其单位面积涵养水源量并不低,但是由于它们的面积较小,因而其水源涵养的贡献率并不高,山脊的森林由于单位面积涵养水源量和面积都小,所以水源涵养的贡献率很低。

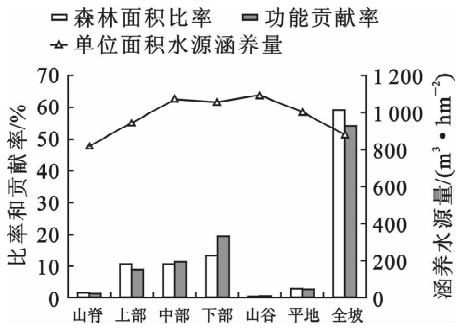


图4 兴国县不同坡位上森林涵养水源价值特征
Fig. 4 Characteristics of water conservation in the forests with different slope locations

4 结论与讨论

1)2003 兴国县森林生态系统面积 22.65×10⁴ hm²,年涵养水源量 1.93×10⁸ m³,单位面积森林涵养水源量 852.45 m³·hm⁻²。2)不同森林类型涵养水源的功能不同,其中针叶林涵养水源贡献最大,而从单位面积涵养水源能力来看,阔叶林>混交林>针叶林>灌木林;3)不同海拔高度上森林水源涵养功能的贡献不同,其中海拔100~300、300~500和500~1 000 m森林为涵养水源功能的主体,其中海拔300~500 m森林的涵养水源能力最高;4)不同坡位上森林涵养水源的贡献也不同,其中全坡的森林最高,但是全坡森林单位面积涵养水源能力低。

森林生态系统的水源涵养功能及其价值评估计算方法很多。综合蓄水能力法作为其中一种也有局限性,会忽略了森林蒸发散消耗的影响。森林生态系统的水源涵养功能及其价值评估已成为当前生态服务功能研究的热点问题和难点问题。在研究中需要根据实际情况选择不同的方法去解决问题。

本研究在评价分析兴国县森林生态系统涵养水源的功能及其差异的过程中,没有考虑不同林地小班上降水量和蒸发散率的差异性,尤其是较大降雨事件中产生的快速地表径流等因素的影响,主要因为这部分径流量较小^[20],尽管本研究所引用的参数不能十分精确地反映兴国县森林生态系统涵养水源功能的真实情况,并且由于数据资源和研究方法的局限性,仅对森林生态系统的蓄水功能做出了的粗

略估计,但这并不妨碍人们对于兴国县森林涵养水源的功能及其差异的认识。随着未来评估方法和监测技术手段的不断完善,森林水源涵养功能的评价及其价值估算将会更加合理与准确。

参考文献:

[1] 李少宁,王兵,郭浩,等. 大岗山森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 中国水土保持科学,2007,5(6):58-64.
LI S N, WANG B, GUO H, *et al.* Assessment of forest ecosystem services value in Dagangshan[J]. Science of Soil and Water Conservation,2007,5(6):58-64. (in Chinese)

[2] 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.
DENG K M, SHI P L, XIE G D. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze River and its benefits[J]. Resources Science,2002,24(6):68-73. (in Chinese)

[3] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 等. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究[J]. 自然资源学报,2010,25(4):585-593.
LI S M, XIE G D, ZHANG C X, *et al.* Flow process of water conservation service of forest ecosystem[J]. Journal of Natural Resources,2010,25(4):585-593. (in Chinese)

[4] 吴钢,赵景柱,肖寒,等. 长白山森林生态系统服务功能[J]. 中国科学 C 辑, 2001,31(5): 471-480.
WU G,ZHAO J Z, XIAO H,*et al.* forest ecosystem services value in Chang Baishan[J], Science in China: Series C, 2001, 31(5): 471-480. (in Chinese)

[5] 王威,郑小贤,宁杨翠,北京山区水源涵养林典型森林类型结构特征研究[J]. 北京林业大学学报,2011,33(1):60-63
WANG W, ZHENG X X, NING Y C. Structural characteristics of typical water conservation forests in mountain areas of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011,33 (1):60-63. (in Chinese)

[6] ZHANG B, LI W H, XIE G D, *et al.* Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J], Ecological Economics, 2010, 69:1416-1426.

[7] 张彪,李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学杂志,2009, 28(3):529-534.
ZHANG B , LI W H , XIE G D,*et al.* Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009,28(3):529- 534. (in Chinese)

[8] 郎奎建,李长胜,殷有,等. 林业生态工程 10 种森林生态效益计量理论和方法[J]. 东北林业大学学报,2000,28(1):1-7.
LANG K J, LI C S, YIN Y, *et al.* The measurement theory and method of 10 forest ecological benefit for forestry ecological engineering[J], Journal of Northeast Forestry University, 2000,28(1):1-7. (in Chinese)

[9] 吴丹,邵全琴,刘纪远,等. 1985-2030 年江西泰和县森林植被碳储量的时空动态[J]. 应用生态学报, 2011,22(1):41-46.
WU D, SHAO Q Q, LIU J Y,*et al.* Spatiotemporal dynamics of forest carbon storage in Taihe County of Jiangxi Province in 1985-2030[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22 (1):41-46(in Chinese)

[10] 王燕,王兵,赵广东,等. 江西大岗山 3 种林型土壤水分物理

性质研究[J]. 水土保持学报, 2008,22(1):151-153.
WANG Y, WANG B, ZHAO G D, *et al.* Soil moisture physical characteristics of three forest types in Dagangshan Mountain in Jiangxi Province[J], Journal of Soil and Water Conservation,2008,22(1):151-153. (in Chinese)

[11] 黄金玲,李晓明,王永安,等. 湖南省主要森林植被类型涵养水源能力的研究[J]. 中南林业调查规划,1997,16(4):37-42.
HUANG J L, LI X M,WANG Y G, *et al.* Study on water conservation of main forest types in Hunan Province[J], Contral South Forest Inventory and Planning,1997,16(4): 37-42. (in Chinese)

[12] 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.
DENG K M, SHI P L, XIE G D. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze River and its benefits [J]. Resources Science,2002,24(6):68-73. (in Chinese)

[13] 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.
SHI P L, WU B, CHENG G W, *et al.* Water retention capacity evaluation of main forest vegetation types in the upper Yangtze basin[J], Journal of Natural Resources, 2004,19 (3):351-360. (in Chinese)

[14] 高成德,余新晓. 水源涵养林研究综述[J]. 北京林业大学学报,2000,22(5):78-82.
GAO C D,YU X X. Review on researches of water conservation forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2000, 22(5):78-82(in Chinese)

[15] 喻荣岗,左长清,杨洁,等. 红壤侵蚀区几种水土保持林水文效应研究[J]. 水土保持通报, 2007,27(6):194-198.
YU R G, ZUO C Q,YANG J, *et al.* Hydrological effects of soil and water conservation forest in red-soil erosion region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007,27(6): 194-198. (in Chinese)

[16] 岳永杰. 福建省主要森林水库特性与动态[D]. 福州:福建农林大学,2003.

[17] 潘军. 黔东南州森林效益计量及经济评价[J]. 林业调查规划, 2006,31(2):62-66.
PAN J. Forest benefit measure and economic evaluation of prefecture of Southeast Qian[J]. Forest Inventory and Planning, 2006,31(2):62-66. (in Chinese)

[18] 成晨. 重庆缙云山水源涵养林结构及功能研究[D]. 北京:北京林业大学. 2009.

[19] 丁访军,王兵,钟洪明. 赤水河下游不同林地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2009,23(3): 179-183.
DING F J, WANG B, ZHONG H M, *et al.* Physical characteristics of soil and function of soil and water conservation for three main forest land types in the lower reaches of Chuishuihe River[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(3):179-183. (in Chinese)

[20] 陈东立,余新晓,廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析[J]. 世界林业研究, 2005, 18(1):49-54.
CHEN D L, YU X X, LIAO B H. Analysis on the function of conservation water of the Chinese Forest Ecosystem[J], World Forestry Research,2005,18(1):49-54. (in Chinese)