

重庆缙云山森林生态系统服务功能价值评估

刘  勇  王玉杰  王云琦  张会兰  朱锦奇  李云鹏  刘  楠

(北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室)

**摘要:**通过野外实地调查、典型样地试验及生态站长期观测等手段,以重庆缙云山4种典型森林类型为研究对象,对其2010年涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化空气、生物多样性保护和森林游憩7项服务功能价值作了评估。结果表明:缙云山森林生态系统4种森林类型提供的生态系统服务功能总价值为10.99亿元/a,单位面积生态系统服务功能价值为14.46万元/(hm<sup>2</sup>·a)。7项森林生态系统服务功能价值为:森林游憩(2.82亿元/a) > 生物多样性保护(2.56亿元/a) > 涵养水源(2.25亿元/a) > 保育土壤(1.60亿元/a) > 固碳释氧(1.37亿元/a) > 营养物质积累(0.36亿元/a) > 净化空气(0.04亿元/a)。4种森林类型单位面积生态系统服务功能价值(森林游憩价值功能除外)中,针阔混交林、常绿阔叶林、灌木林服务功能价值接近,分别为11.21万、11.07万和10.84万元/(hm<sup>2</sup>·a);竹林服务功能价值最低,为6.98万元/(hm<sup>2</sup>·a)。

**关键词:**森林生态系统服务功能; 价值评估; 缙云山

**中图分类号:**S718.55+7  **文献标志码:**A  **文章编号:**1000-1522(2013)03-0046-10

LIU Yong; WANG Yu-jie; WANG Yun-qi; ZHANG Hui-lan; ZHU Jin-qi; LI Yun-peng; LIU Nan.  
**Value assessment on service function of forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing City of southwestern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2013)35(3)46-55 [Ch,41 ref. ] School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

Based on field investigation, experiments in typical sample plots and long-term observation, service function of forest ecosystem in Jinyun Mountain of southwestern China in 2010 was evaluated. Totally seven kinds of ecological service functions of four typical forest types were studied, including water conservation, soil conservation and fertility maintenance, CO<sub>2</sub> fixation and O<sub>2</sub> generation, nutriment accumulation, air purification, biodiversity protection and forest recreation. Results showed that the total value of forest ecosystem services in Jinyun Mountain was 1.099 billion RMB/a, and the unit value was 14.46 × 10<sup>4</sup> RMB/(hm<sup>2</sup>·a). The order of seven ecological functions was given as followings: forest recreation (0.282 billion RMB/a) > biodiversity protection (0.256 billion RMB/a) > water conservation (0.225 billion RMB/a) > soil conservation and fertility maintenance (0.160 billion RMB/a) > CO<sub>2</sub> fixation and O<sub>2</sub> generation (0.137 billion RMB/a) > nutriment accumulation (0.036 billion RMB/a) > air purification (0.004 billion RMB/a). In terms of the unit value of ecosystem service function (except for the forest recreation function), bamboo forest had the lowest value of 6.98 × 10<sup>4</sup> RMB/(hm<sup>2</sup>·a), mixed broadleaf-conifer forest (11.21 × 10<sup>4</sup> RMB/(hm<sup>2</sup>·a)), evergreen broadleaved forest (11.07 × 10<sup>4</sup> RMB/(hm<sup>2</sup>·a)) and shrubbery (10.84 × 10<sup>4</sup> RMB/(hm<sup>2</sup>·a)) got approximately same value.

**Key words** service function of forest ecosystem; value assessment; Jinyun Mountain

森林生态系统具有涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化空气、森林防护、物种保育和森林游憩等多种服务功能<sup>[1]</sup>。1970年,联合国大学(United Nations University)发表了《人类对全球环境的影响报告》,其中首次提出了生态系统服务功能这一概念,并且阐述了一些环境服务功能<sup>[2]</sup>。之

收稿日期:2013-01-08  修回日期:2013-03-01  
基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201304308)。  
第一作者:刘勇。主要研究方向:林业生态工程。Email: liuyongsuifeng@163.com  地址:100083北京市清华东路35号北京林业大学水土保持学院。  
责任作者:王玉杰,教授,博士生导师。主要研究方向:土壤侵蚀、林业生态工程。Email: wyujie@bjfu.edu.cn  地址:同上。  
本刊网址: http://journal.bjfu.edu.cn

后,Holder 等<sup>[3]</sup>、Westman<sup>[4]</sup>和 Odum<sup>[5]</sup>等都对这方面作了早期的研究。生态系统服务就是人类从生态系统获得的所有惠益<sup>[6-8]</sup>。直到 20 世纪 90 年代后,生态系统服务功能价值评估方法的研究开始兴起。到 90 年代中期,Costanza 等<sup>[6]</sup>的研究对生态系统服务价值评估产生深远影响,标志着这一领域的研究取得突破性进展。生态系统服务功能的研究是当前国际上科学研究的热点和前沿<sup>[9-10]</sup>。近 40 年来,生态系统服务功能评估的研究取得了一系列成果<sup>[8-9]</sup>,在全球或区域生态系统<sup>[11-15]</sup>、流域生态系统<sup>[16-18]</sup>、草地生态系统<sup>[19-20]</sup>、森林生态系统<sup>[21-23]</sup>、农田生态系统<sup>[24-25]</sup>等不同尺度和不同生态系统类型上都作了大量的研究。余新晓等<sup>[26]</sup>2005 年评估我国森林生态系统 8 类生态系统服务功能价值为 3.06 万亿元/a,根据王兵等<sup>[27]</sup>2009 年的评估结果,中国森林生态系统服务功能价值为 10 万亿元/a,其中重庆市森林生态系统服务功能价值为 1 539.60 亿元/a。缙云山自然保护区位于三峡库区的尾端,是三峡库区亚热带常绿阔叶林保存最完整的区域,是研究和评价森林理水调洪功能理想的天然实验室,对于库区生态安全和生态系统的稳定具有重要作用。本文依据 LY/T 1721—2008《森林生态系统服务功能评估规范》<sup>[28]</sup>,对缙云山几种森林类型的生态服务功能价值作了分类系统评估,在相对较小的尺度上对生态服务功能作对比研究,旨在以点代

面,深入了解缙云山这个点的生态系统服务功能价值,更好地为整个三峡库区森林生态系统服务价值评估提供一定的依据,为库区政策制订提供有效参考,尤其对库区陡坡耕地退耕还林工作和天然林保护工作提供有效指导,以期对于提高人们的环境意识、促进将环境纳入国民经济核算体系及正确处理社会经济发展与生态环境保护之间的关系,以及科学、合理地实施可持续发展战略等起到很好的作用。

## 1 研究区域概况

本研究区位于三峡工程库区尾端,重庆市北碚区境内嘉陵江小三峡之温塘峡西岸的缙云山自然保护区,地理坐标为 E106°22'、N9°49',是华莹山复式背斜山脉分支的一段,面积 7 600 hm<sup>2</sup>(图 1),其中针阔混交林 4 299.32 hm<sup>2</sup>,常绿阔叶林 2 507.24 hm<sup>2</sup>,灌木林 59.28 hm<sup>2</sup>,竹林 734.16 hm<sup>2</sup>。海拔 350 ~ 951.5 m,具有亚热带季风湿润性气候特征,年均气温 13.6 ℃,年均降水量 1 611.8 mm,年均蒸发量 777.1 mm,年均日照 1 293.9 h,年均相对湿度 85% 以上。缙云山的土壤以酸性(pH 值 4.0 ~ 4.5)黄壤及水稻土为主。缙云山保护区内植物资源非常丰富,植被类型较多,森林覆盖率达到 96.6%,主要植被类型为常绿阔叶林、针阔混交林、竹林、常绿阔叶灌丛,另外还有亚热带灌草丛和水生植被<sup>[29]</sup>。

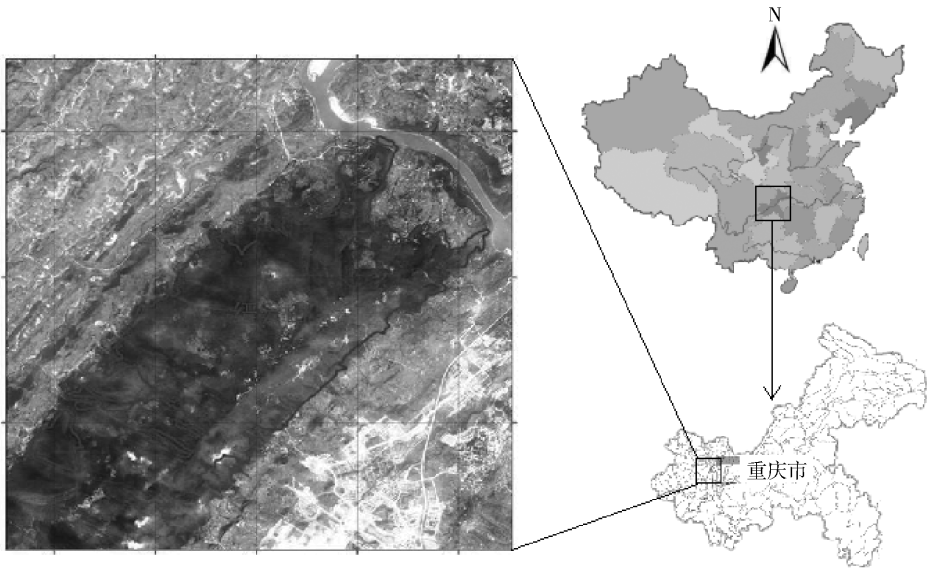


图 1 缙云山位置示意图  
Fig. 1 Location of Jinyun Mountain in Chongqing City, southwestern China

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

生态站长期野外实验观测数据(试验小区基本

情况见表 1);引用已发表论文中数据、社会公共数据。

### 2.2 指标体系

参照由国家林业局 2008 年发布并实施的 LY/T

1721<sup>[28]</sup>,并结合缙云山实际情况,本研究的评估指标体系为涵养水源(调节水量和净化水质)、保育土壤(固土和保肥)、固碳释氧(固碳和释氧)、积累营养物质(林木营养元素积累)、净化空气(提供负离子

和吸收污染物)、生物多样性(物种保育)、森林游憩(休闲娱乐),因保护区内均为天然林,无农田防护林,因此放弃森林防护这一指标。

表 1 不同林分试验小区基本情况  
Tab. 1 Basic situation of different forest types in study area

森林类型	立地因子			林分				
	海拔/m	坡向	坡度/(°)	起源	龄级	郁闭度	下木盖度/%	地被物盖度/%
针阔混交林	760	西北	16~25	天然	V	0.9	40	30
常绿阔叶林	825	西北	26	天然	V	0.9	40	20
灌木林	800	西北	10	天然	V	0.95	60	50
竹林	860	西北	11	天然	V	0.85	10	80

2.3 评估方法

本次研究参照 LY/T 1721<sup>[28]</sup>中提供的方法对以上指标进行评估。

2.3.1 涵养水源功能

涵养水源功能是森林生态系统生态功能的重要组成部分,其功能主要体现在调节径流和净化水质方面。

调节水量:  
$$G_{\text{调}} = 10A(P - E - C) \tag{1}$$

调节水量价值:  
$$U_{\text{调}} = G_{\text{调}}C_V \tag{2}$$

式中: $G_{\text{调}}$ 为林分年调节水量, $\text{m}^3/\text{a}$ ;  $A$ 为林分面积, $\text{hm}^2$ ;  $P$ 为降水量, $\text{mm}/\text{a}$ ;  $E$ 为林分蒸散量, $\text{mm}/\text{a}$ ;  $C$ 为地表径流量, $\text{mm}/\text{a}$ ;  $U_{\text{调}}$ 为林分年调节水量价值,元/ $\text{a}$ ;  $C_V$ 为水库建设单位库容投资,6.110 7 元/ $\text{m}^3$ <sup>[30]</sup>。下同。

净化水质的量:  
$$G_{\text{净}} = G_{\text{调}} \tag{3}$$

净化水质价值:  
$$U_{\text{净}} = KG_{\text{净}} \tag{4}$$

式中: $G_{\text{净}}$ 为林分年净化水质的量, $\text{m}^3/\text{a}$ ;  $U_{\text{净}}$ 为林分年净化水质价值,元/ $\text{a}$ ;  $K$ 为水的净化费用,2.09 元/ $\text{t}$ <sup>[30]</sup>。

2.3.2 保育土壤功能

土壤被地表植被及枯枝落叶层所覆盖,避免了水滴直接冲击表土并缓解地表径流,很大程度上减少了土壤侵蚀;同时枯落物分解植物根系的活动提高了土壤肥力、改善了土壤结构;因此森林保育土壤的功能表现在固土和保肥两个方面。

固土量:  
$$G_{\text{固}} = A(X_2 - X_1) \tag{5}$$

固土价值:

$$U_{\text{固}} = G_{\text{固}}C/\rho \tag{6}$$

式中: $G_{\text{固}}$ 为林分年固土量, $\text{t}/\text{a}$ ;  $X_2$ 为裸地土壤侵蚀模数, $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;  $X_1$ 为林地土壤侵蚀模数, $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;  $U_{\text{固}}$ 为林分年固土价值,元/ $\text{a}$ ;  $C$ 为挖取和运输单位体积土方所需费用,12.6 元/ $\text{m}^3$ <sup>[28]</sup>;  $\rho$ 为林地土壤密度, $\text{t}/\text{m}^3$ 。

保肥量:  
$$G_{\text{保}} = G_N + G_P + G_K + G_M = AN(X_2 - X_1) + AP(X_2 - X_1) + AK(X_2 - X_1) + AM(X_2 - X_1) \tag{7}$$

保肥价值:  
$$U_{\text{保}} = G_N C_N / R_N + G_P C_P / R_P + G_K C_K / R_K + G_M C_M \tag{8}$$

式中: $G_{\text{保}}$ 为林分年保肥总量, $\text{t}/\text{a}$ ;  $G_N$ 、 $G_P$ 、 $G_K$ 、 $G_M$ 分别为林分年保 N、P、K 和有机质的量, $\text{t}/\text{a}$ ;  $N$ 为林分土壤含氮质量分数,%;  $P$ 为林分土壤含磷质量分数,%;  $K$ 为林分土壤含钾质量分数,%;  $M$ 为林分土壤含有机质质量分数,%;  $U_{\text{保}}$ 为林分年保肥的价值,元/ $\text{a}$ ;  $R_N$ 为磷酸二铵化肥含氮质量分数,为 14.0%;  $R_P$ 为磷酸二铵化肥含磷质量分数,为 15.01%;  $R_K$ 为氯化钾化肥含钾质量分数,为 50.0%;  $C_N$ 、 $C_P$ 为磷酸二铵化肥价格,2 400 元/ $\text{t}$ ;  $C_K$ 为氯化钾化肥价格,2 200 元/ $\text{t}$ ;  $C_M$ 为有机质价格,320 元/ $\text{t}$ 。下同。

2.3.3 固碳释氧功能

森林作为地球的肺,是主要的固定  $\text{CO}_2$  和释放  $\text{O}_2$  的场所,是陆地 C 的主要存储库,森林土壤碳库也储存着大量的有机碳,对于缓解温室效应起到了非常重要的作用<sup>[31]</sup>。

固碳量:  
$$G_{\text{碳}} = G_{\text{植}} + G_{\text{土}} = 1.63R_{\text{碳}}AB_{\text{年}} + AF_{\text{土}} \tag{9}$$

固碳价值:  
$$U_{\text{碳}} = C_{\text{碳}}G_{\text{碳}} \tag{10}$$

式中: $G_{\text{碳}}$ 为林分年总固碳量, $\text{t}/\text{a}$ ;  $G_{\text{植}}$ 、 $G_{\text{土}}$ 分别为植

被年固碳量和土壤年固碳量,  $t/a$ ;  $R_{\text{碳}}$  为  $\text{CO}_2$  中 C 的质量分数, 为 27.27%;  $B_{\text{年}}$  为林分净生产力,  $t/(hm^2 \cdot a)$ ;  $F_{\text{土}}$  为单位面积林分土壤年固碳量,  $t/(hm^2 \cdot a)$ ;  $U_{\text{碳}}$  为林分年固碳价值, 元/a;  $C_{\text{碳}}$  为固碳价格, 1 200 元/ $t^{[30]}$ 。

释氧量:  
$$G_{\text{氧}} = 1.19AB_{\text{年}} \quad (11)$$

释氧价值:  
$$U_{\text{氧}} = C_{\text{氧}} G_{\text{氧}} \quad (12)$$

式中:  $G_{\text{氧}}$  为林分年释氧量,  $t/a$ ;  $U_{\text{氧}}$  为林分年释氧价值, 元/a;  $C_{\text{氧}}$  为氧气价格, 600 元/ $t$ 。

2.3.4 积累营养物质功能

植物在生长过程中, 不断从环境中吸收各种营养物质, N、P、K 等营养元素不断从土壤中转移到植物体内积累起来, 因此可以通过 N、P、K 等营养元素的积累量来评估森林积累营养物质的效益。

营养物质积累量:  
$$G_{\text{营养}} = G_N + G_P + G_K = AB_{\text{年}}N_{\text{营养}} + AB_{\text{年}}P_{\text{营养}} + AB_{\text{年}}K_{\text{营养}} \quad (13)$$

营养物质积累的价值:  
$$U_{\text{营养}} = G_N C_N / R_N + G_P C_P / R_P + G_K C_K / R_K \quad (14)$$

式中:  $G_{\text{营养}}$  为营养物质积累量,  $t/a$ ;  $G_N$  为林分固氮量,  $t/a$ ;  $G_P$  为林分固磷量,  $t/a$ ;  $G_K$  为林分固钾量,  $t/a$ ;  $N_{\text{营养}}$ 、 $P_{\text{营养}}$ 、 $K_{\text{营养}}$  分别为林木 N、P、K 元素质量分数, %;  $U_{\text{营养}}$  为营养物质积累的价值, 元/a。

2.3.5 净化空气功能

森林的树冠、枝叶的尖端放电以及光合作用过程的光电效应均会促使空气电解, 产生大量的空气负离子。重庆市主要的气体污染物为  $\text{SO}_2$ , 氮氧化物和氯化物的污染量很少<sup>[32]</sup>; 因此, 本文忽略森林植被对氮氧化物和氯化物的吸收, 仅以  $\text{SO}_2$  吸收量作为缙云山森林吸收空气污染物的指标。

提供空气负离子的量:  
$$G_{\text{离}} = 5.256 \times 10^{15} Q_{\text{离}} AH / L \quad (15)$$

提供空气负离子的价值:

$$U_{\text{离}} = G_{\text{离}} K_{\text{离}} \quad (16)$$

式中:  $G_{\text{离}}$  为林分年提供负离子的量, 个/a;  $Q_{\text{离}}$  为林分负离子密度, 个/ $\text{cm}^3$ ;  $H$  为林分高度, m;  $L$  为负离子寿命, min;  $U_{\text{离}}$  为林分年提供负离子价值, 元/a;  $K_{\text{离}}$  为每个负离子生产费用,  $5.8185 \times 10^{-18}$  元/个<sup>[30]</sup>。

吸收污染物的量:  
$$G_{\text{污}} = G_{\text{SO}_2} = A Q_{\text{SO}_2} \quad (17)$$

吸收污染物的价值:  
$$U_{\text{污}} = G_{\text{污}} K_{\text{污}} \quad (18)$$

式中:  $G_{\text{污}}$  为林分吸收污染物的量,  $\text{kg/a}$ ;  $G_{\text{SO}_2}$  为吸收  $\text{SO}_2$  的量,  $\text{kg/a}$ ;  $Q_{\text{SO}_2}$  为单位面积林分吸收  $\text{SO}_2$  的量,  $\text{kg}/(hm^2 \cdot a)$ ;  $U_{\text{污}}$  为林分吸收污染物的价值, 元/a;  $K_{\text{污}}$  为污染物的治理费用, 1.2 元/ $\text{kg}^{[30]}$ 。

2.3.6 生物多样性保护功能

森林物种多样性保育功能是指森林生态系统为生物物种提供生存与繁衍的场所, 从而对其起到保育作用的功能<sup>[33]</sup>。Shannon-Wiener 指数法是计算物种多样性保护的一种客观方法<sup>[34]</sup>; 但引入濒危指数和特有种指数的 Shannon-Wiener 法更具有客观性和准确性<sup>[35]</sup>, 因此本文采用此法。

物种保育量:  
$$G_{\text{总}} = G_{\text{动}} + G_{\text{植}} \quad (19)$$

物种保育价值:  
$$U_{\text{总}} = \left(1 + 0.1 \sum_{m=1}^x E_m + 0.1 \sum_{n=1}^y B_n\right) S_{\text{生}} A \quad (20)$$

式中:  $G_{\text{总}}$  为林分物种总储量;  $G_{\text{动}}$ 、 $G_{\text{植}}$  分别为林分动物和植物总储量;  $U_{\text{总}}$  为林分物种保育价值, 元/a;  $E_m$  为评估林分内物种  $m$  的濒危分值;  $B_n$  为评估林分内物种  $n$  的特有种指数;  $x$  为计算濒危指数物种数量;  $y$  为计算特有种指数物种数量;  $S_{\text{生}}$  为单位面积物种多样性保育价值量, 元/ $(hm^2 \cdot a)$ 。

$S_{\text{生}}$  按照 Shannon-Wiener 指数 ( $H$ ) 划分为 6 个等级: 当  $H < 1$  时,  $S_{\text{生}}$  为 5 000 元/ $(hm^2 \cdot a)$ ; 当  $1 \leq H < 2$  时, 为 1 万元/ $(hm^2 \cdot a)$ ; 当  $2 \leq H < 3$  时, 为 2 万元/ $(hm^2 \cdot a)$ ; 当  $3 \leq H < 4$  时, 为 3 万元/ $(hm^2 \cdot a)$ ; 当  $4 \leq H < 5$  时, 为 4 万元/ $(hm^2 \cdot a)$ ; 当  $H \geq 5$  时,  $S_{\text{生}}$  为 5 万元/ $(hm^2 \cdot a)$ 。

2.3.7 森林游憩功能

随着社会发展, 森林生态旅游越来越受到人们的欢迎, 森林提供休闲娱乐的功能也越来越强。针对缙云山的实际情况, 旅游开发和“农家乐”产业非常发达, 本文对森林游憩功能的价值通过旅游人次及其消费水平来进行评估。

森林游憩的价值:  
$$U_{\text{游}} = \sum_{i=1}^n F P_i \rho_i \quad (21)$$

式中:  $U_{\text{游}}$  为林区森林游憩的价值, 元/a;  $F$  为景区参观人次, 245 万人/a;  $P_i$  为游客平均消费, 元/人,  $\rho_i$  为第  $i$  类游客所占比例, %。据崔翰柔<sup>[36]</sup> 的调查, 在缙云山旅游人数中 85% 的消费水平在 100 元左右, 15% 的消费水平在 200 元左右。



### 3 结果与分析

#### 3.1 涵养水源功能

由式(1)~(4)计算各森林类型涵养水源功能,见表2。图2a、图3为单位面积上森林涵养水源功能。由表2可以得出:缙云山森林生态系统涵养水源量为2745.67万t/a;涵养水源功能总价值为2亿2516.47万元/a。其中,调节水量价值为1亿6778.01万元/a,净化水质价值为5738.46万元/a。从表2还可以看出,不同森林类型涵养水源功能价值不同。涵养水源价值针阔混交林>常绿阔叶林>竹林>灌木林,其值分别为1亿3373.96万、7717.68万、1232.42万和192.42万元/a。

由图2a可以看出:4种森林类型中,针阔混交林、常绿阔叶林和灌木林单位面积涵养水源量差别不大,都在3800t/(hm<sup>2</sup>·a)左右,其中灌木林稍高,但都远大于竹林单位面积涵养水源量,为3387.94t/(hm<sup>2</sup>·a);评估结果与孙艳红等<sup>[37]</sup>的研究结果比较一致,这主要受枯落物蓄积量、枯落物最大持水率、最大持水量以及土壤非毛管持水量等共同作用的影响。由图3可知,单位面积涵养水源价值为2.78万元/(hm<sup>2</sup>·a)。4种森林类型调节水量的价

值都大于其净化水质的价值,并且变化趋势与涵养水源量一致。

表 2 缙云山森林生态系统涵养水源功能评估

Tab. 2 Assessment on water conservation function of forest ecosystem in Jinyun Mountain				
森林类型	调节与 净化水量/ (万 t·a <sup>-1</sup> )	调节水量 价值/ (万元·a <sup>-1</sup> )	净化水质 价值/ (万元·a <sup>-1</sup> )	涵养水源 价值/ (万元·a <sup>-1</sup> )
针阔混交林	1 630.83	9 965.52	3 408.44	13 373.96
常绿阔叶林	941.10	5 750.78	1 966.89	7 717.68
灌木林	23.46	143.38	49.04	192.42
竹林	150.28	918.33	314.09	1 232.42
总计	2 745.67	16 778.01	5 738.46	22 516.47

#### 3.2 保育土壤功能

由式(5)~(8)计算各森林类型保育土壤功能,见表3。图2b、图3为单位面积上森林涵养水源功能。由表3可得:缙云山森林生态系统固土量为189.07万t/a,保肥量为7.81万t/a,保育土壤价值为1亿6003.46万元/a,其中固土价值1980.98万元/a,保肥价值1亿4022.48万元/a。不同森林类型保育土壤价值差别很大,针阔混交林保育土壤价值最大,为8051.18万元/a;灌木林最小,为269.97万元/a。

表 3 缙云山森林生态系统保育土壤功能评估

Tab. 3 Assessment on soil conservation and fertility maintenance function of forest ecosystem in Jinyun Mountain					
森林类型	固土量/(万 t·a <sup>-1</sup> )	固土价值/(万元·a <sup>-1</sup> )	保肥量/(万 t·a <sup>-1</sup> )	保肥价值/(万元·a <sup>-1</sup> )	保育土壤价值/(万元·a <sup>-1</sup> )
针阔混交林	99.28	1 051.23	4.31	6 999.95	8 051.18
常绿阔叶林	69.24	721.03	2.75	5 002.16	5 723.19
灌木林	1.64	24.01	0.15	245.96	269.97
竹林	18.91	184.71	0.60	1 774.41	1 959.12
总计	189.07	1 980.98	7.81	14 022.48	16 003.46

由图2b可以看出,4种森林类型固土保肥能力不同。灌木林单位面积固土量与保肥量都最高,分别为276.38、24.59t/(hm<sup>2</sup>·a)。由图3可知,单位面积保育土壤价值为2.20万元/(hm<sup>2</sup>·a),灌木林单位面积固土保肥价值都最高,常绿阔叶林其次,针阔混交林最低,说明灌木林固土保肥能力最强,常绿阔叶林其次,针阔混交林固土保肥能力最差。就保肥能力来看,灌木林>常绿阔叶林>针阔混交林>竹林,这是由于灌木林地郁闭度最高,枯落物含量较高,其N、P含量远大于其他森林类型。其有机质含量也存在很大的差别,灌木林表土层有机质含量为楠竹林的3.75倍,针阔混交林有机质含量为楠竹林

的2.22倍,常绿阔叶林有机质含量为楠竹林的1.53倍<sup>[37]</sup>。

#### 3.3 固碳释氧功能

由式(9)~(12)计算各森林类型固碳释氧功能,见表4。图2c、图3为单位面积森林固碳释氧功能。由表4可得:缙云山森林生态系统固碳量为5.02万t/a,释氧量为12.71万t/a,固碳释氧价值为1亿3665.12万元/a,其中固碳价值为6037.87万元/a,释氧价值为7627.25万元/a。缙云山4种森林类型中,针阔混交林固碳、释氧量最多,分别为2.66万、6.92万t/a,固碳释氧价值最大,为7342.23万元/a。

表 4  缙云山森林生态系统固碳释氧功能评估

Tab. 4  Assessment on CO<sub>2</sub> fixation and O<sub>2</sub> generation function of forest ecosystem in Jinyun Mountain

森林类型	固碳量/(万 t·a <sup>-1</sup> )	固碳价值/(万元·a <sup>-1</sup> )	释氧量/(万 t·a <sup>-1</sup> )	释氧价值/(万元·a <sup>-1</sup> )	固碳释氧价值/(万元·a <sup>-1</sup> )
针阔混交林	2. 66	3 191.05	6. 92	4 151. 18	7 342. 23
常绿阔叶林	2. 01	2 415. 92	4. 86	2 913. 32	5 329. 24
灌木林	0. 02	25. 32	0. 05	31. 76	57. 08
竹林	0. 34	405. 58	0. 89	531. 00	936. 58
总计	5. 02	6 037. 87	12. 71	7 627. 25	13 665. 12

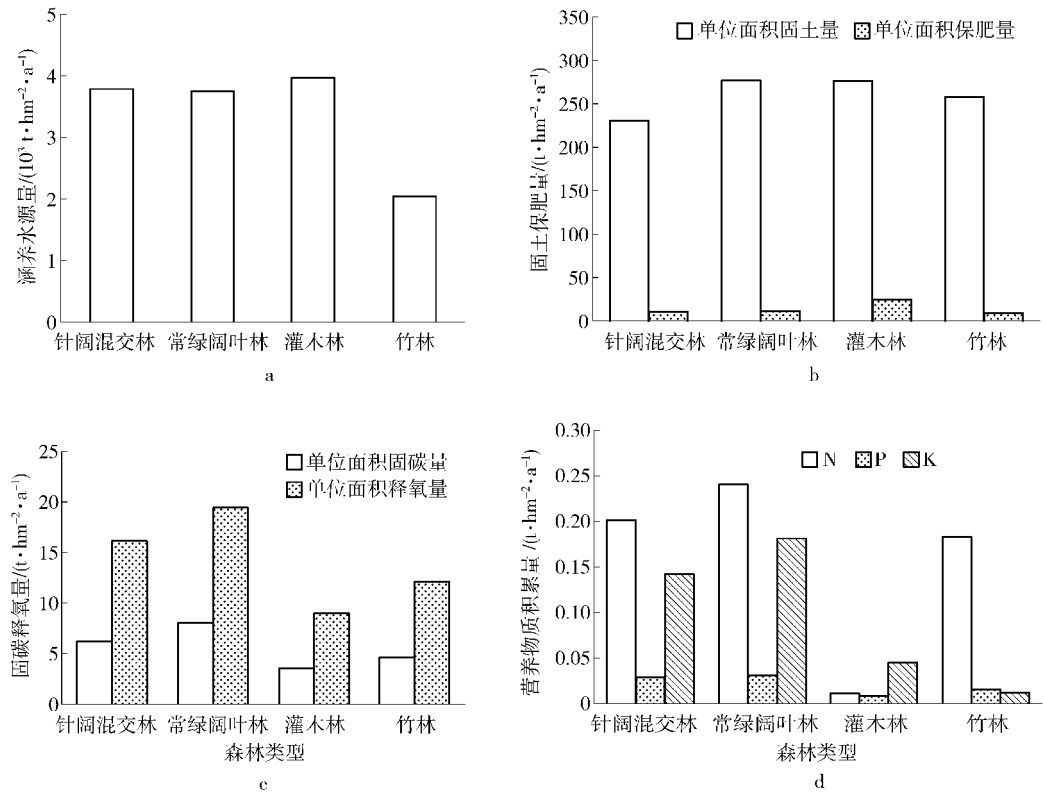


图 2  缙云山单位面积森林生态系统各项服务功能量化评估

Fig. 2  Quantitative assessment on forest ecosystem service funtion per unit area in Jinyun Mountain

由图 2c 可知,缙云山 4 种森林类型固碳释氧能力不同,单位面积固碳量和释氧量均表现为常绿阔叶林>针阔混交林>竹林>灌木林。这是由于固碳释氧量的多少在很大程度上取决于植物净光合作用积累有机物的量,灌木林植株相对矮小,林分蓄积量的年增长量最少,因此其固碳释氧量最少。这也说明常绿阔叶林单位面积的蓄积量增长最快。结合表 4 和图 2c 可以看出,针阔混交林单位面积固碳释氧能力虽然弱于常绿阔叶林,但其固碳释氧量最大,这是由于缙云山针阔混交林面积大于常绿阔叶林面积,约为常绿阔叶林面积的两倍。由图 3 可以看出: 4 种森林类型单位面积固碳释氧价值与固碳释氧量大小表现一致,缙云山森林生态系统单位面积固碳释氧价值为 4. 9 万元/a。

3. 4  净化空气功能

由式(13)和(14)计算各森林类型净化空气功能,见表 5。可以得出:缙云山森林生态系统提供负氧离子的量为 6 万 5 291. 5 亿个/a,吸收 SO<sub>2</sub> 的量为 891. 33 t/a,净化空气价值为 388. 91 万元/a,其中提供负氧离子的价值为 37. 99 万元/a,吸收 SO<sub>2</sub> 的价值为 350. 92 万元/a。4 种森林类型净化空气价值比较,针阔混交林>常绿阔叶林>竹林>灌木林。据魏虹等<sup>[38]</sup>2005 年对缙云山降水 pH 值的分析,缙云山降水 pH 值平均值为 5. 23,降水的酸化程度以及污染程度都低于重庆市区和我国南方其他酸雨区域,这有力地说明了缙云山森林生态系统对空气的净化作用。

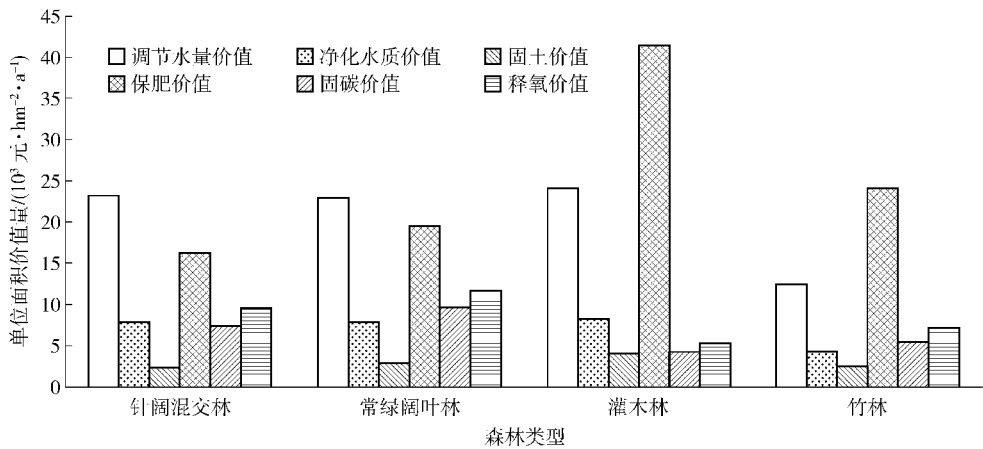


图 3 缙云山单位面积森林生态系统各项服务功能价值评估

Fig. 3 Value assessment on forest ecosystem service funtion per unit area in Jinyun Mountain

表 5 缙云山森林生态系统净化空气功能评估

Tab. 5 Assessment on air purification function of forest ecosystem in Jinyun Mountain

森林类型	负氧离子量/ (亿个·a <sup>-1</sup> )	负氧离子价值/ (万元·a <sup>-1</sup> )	吸收 SO <sub>2</sub> 量/ (t·a <sup>-1</sup> )	吸收 SO <sub>2</sub> 价值/ (万元·a <sup>-1</sup> )	净化空气价值/ (万元·a <sup>-1</sup> )
针阔混交林	38 811. 3	22. 58	654. 03	257. 49	280. 07
常绿阔叶林	20 272. 1	11. 80	222. 27	87. 51	99. 31
灌木林	76. 5	0. 04	3. 11	1. 22	1. 26
竹林	6 131. 5	3. 57	11. 93	4. 70	8. 27
总计	65 291. 5	37. 99	891. 33	350. 92	388. 91

3. 5 积累营养物质功能

由式(15)~(18)计算各森林类型积累营养物质功能,见表6、7。图2d为单位面积营养物质累积量功能。由表6可以得出,缙云山森林生态系统对N、P、K的积累量分别为1 604. 71、211. 27、1 072. 43 t/a,积累营养物质的量为2 888. 41 t/a;针阔混交林、常绿阔叶林、灌木林、竹林积累营养物质的量分别为1 597. 10、1 134. 32、3. 79、153. 20 t/a。由表7可以得出,缙云山森林生态系统积累N、P、K的价值分别为2 750. 92 万、337. 80 万、471. 87 万元/a,积累营养物质的价值为3 560. 59 万元/a。针阔混交林、常绿阔叶林、灌木林、竹林积累营养物质的价值分别为1 948. 11 万、1 358. 56 万、3. 10 万、250. 92 万元/a。

表 6 缙云山森林生态系统积累营养物质功能量化评估

Tab. 6 Quantitative assessment on nutriment accumulation function of forest ecosystem in

Jinyun Mountain					t·a <sup>-1</sup>
森林类型	N 积累量	P 积累量	K 积累量	营养物质积累量	
针阔混交林	866. 28	122. 09	608. 72	1 597. 10	
常绿阔叶林	603. 88	77. 53	452. 91	1 134. 32	
灌木林	0. 68	0. 49	2. 62	3. 79	
竹林	133. 87	11. 16	8. 18	153. 20	
总计	1 604. 71	211. 27	1 072. 43	2 888. 41	

表 7 缙云山森林生态系统积累营养物质功能价值评估

Tab. 7 Value assessment of nutriment accumulation function of forest ecosystem in Jinyun Mountain

万元·a <sup>-1</sup>				
森林类型	N 积累价值	P 积累价值	K 积累价值	营养物质积累价值
针阔混交林	1 485. 05	195. 22	267. 84	1 948. 11
常绿阔叶林	1 035. 23	123. 96	199. 28	1 358. 56
灌木林	1. 16	0. 78	1. 15	3. 10
竹林	229. 48	17. 84	3. 60	250. 92
总计	2 750. 92	337. 80	471. 87	3 560. 59

由图2d可以看出,缙云山不同森林类型单位面积积累营养物质的量不同,这与不同树种的净生产力有关。一般来说,阔叶树的年生长量最大,而灌木林由于树高、胸径等都相对最小,不同树种单位面积营养物质含量差别相对较小,因此单位面积积累营养物质的量为:常绿阔叶林>针阔混交林>竹林>灌木林;植物对不同元素的积累能力也不同,对各元素的积累能力N>K>P。

3. 6 生物多样性保护功能

缙云山自然保护区属于亚热带森林生态系统,有大面积的常绿阔叶林,成为典型亚热带常绿阔叶林生态综合体的物种基因库,物种多样性非常丰富。

常绿阔叶林主要乔木包括四川大头茶 (*Gordonia acuminata*)、四川山矾 (*Symplocos setchuensis*)、广东山胡椒 (*Lindera kwangtungensis*)、四川杨桐 (*Adinandra bockiana*) 等;针阔混交林主要以马尾松 (*Pinus massoniana*) 和杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 混交四川大头茶、四川山矾、广东山胡椒等;竹林主要有毛竹林 (*Phyllostachys heterocycla*)、慈竹林 (*Neosinocalamus affinis*) 等;常绿阔叶灌丛植被主要有里白 (*Hicriopteris glauca*)、铁芒萁 (*Dicranopteris linearis*)、细齿叶柃 (*Eurya nitida*)、杜茎山 (*Maesa japonica*)、淡竹叶 (*Lophatherum sinense*)

表 8 缙云山森林生态系统生物多样性保护功能价值评估  
Tab. 8 Value assessment on biodiversity protection of forest ecosystem in Jinyun Mountain

指 标	森林类型				总计
	针阔混交林	常绿阔叶林	灌木林	竹林	
$H$	4.3	3.6	2.5	1.7	
$E_m$	0	0	0	0	
$B_n$	0	0	0	0	
$U_{\text{总}}/(\text{万元}\cdot\text{a}^{-1})$	17 197.28	7 521.72	118.56	734.16	25 571.72

3.7 森林游憩功能

由于 4 种森林类型共同组成缙云山森林生态系统,其提供的森林游憩功能为一个统一的有机整体,因此无法区分这 4 种森林类型各自的森林游憩价值。据统计,缙云山自然保护区旅游人数约 245 万人次/a,占到重庆市年均国内旅游人次的 1.7% 左右,说明缙云山为重庆市民旅游休闲提供了一个良好的场所。由式(21)计算各森林类型森林游憩的价值,可以得出,缙云山森林生态系统森林游憩功能的价值为 2 亿 8 175.00 万元/a。

3.8 缙云山森林生态系统功能

缙云山森林生态系统 4 种森林类型提供的生态系统服务功能总价值为 10.99 亿元/a,单位面积生态系统服务功能价值为 14.46 万元/(hm<sup>2</sup>·a)。由图 4 可以看出:森林游憩服务功能价值最高,占总价值的 26%;其次为物种保育功能价值,占总价值的 23%;净化空气价值最低。7 项生态系统服务功能价值比较,森林游憩>生物多样性保护>涵养水源>保育土壤>固碳释氧>营养物质积累>净化空气。

由图 5 可知,缙云山森林生态系统 4 种森林类型单位面积生态系统服务功能价值不同,单位面积价值量(森林游憩除外)比较,针阔混交林>灌木林>常绿阔叶林>竹林。不同森林类型主要生态系统服务功能也不相同,这说明不同的森林类型在森林生态系统服务中所起的作用是不同的。针阔混交林和常绿阔叶林提供的主要服务为涵养水源和物种保

等<sup>[39]</sup>。据《重庆缙云山植物志》<sup>[40]</sup>统计,缙云山的维管束植物 202 科、870 属、1 701 种(包括亚种、变种、变型),其中蕨类植物 38 科、74 属、149 种、4 变种,裸子植物 7 科、25 属、37 种、5 变种、4 栽培变种,被子植物 157 科、771 属、1 357 种、115 变种、10 亚种、20 变型。

由式(20)计算各森林类型生物多样性保护功能的价值,见表 8。可以得出,缙云山森林生态系统物种保育的价值为 25 571.72 万元/a。不同森林类型物种保育价值差别较大,表现为针阔混交林>常绿阔叶林>竹林>灌木林。

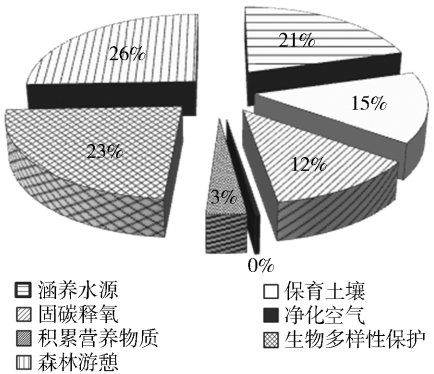


图 4 缙云山森林生态系统服务功能价值比较  
Fig. 4 Comparison of service function values of forest ecosystem in Jinyun Mountain

育,灌木林和竹林提供的主要服务是涵养水源和固土保肥。

4 结论与讨论

以野外考察、实验样地观测为数据源,基于王兵等<sup>[28]</sup>提出的评估规范对缙云山森林生态系统服务涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化空气、生物多样性保护和森林游憩 7 项服务功能作出评价,结果表明:

缙云山森林生态系统提供的生态系统服务功能总价值和单位面积价值分别为 10 亿 9 900 万元/a 和 14.46 万元/(hm<sup>2</sup>·a)。其中,森林游憩功能价值最高,为 2 亿 8 200 万元/a,其次为生物多样性保护



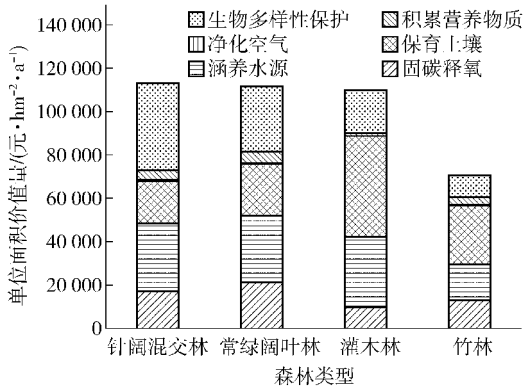


图 5 缙云山森林生态系统单位面积价值比较  
Fig.5 Comparison of service function value of forest ecosystem per unit area in Jinyun Mountain

价值,为 2 亿 5 600 万元/a,净化空气价值最低,为 400 万元/a。7 项生态系统服务功能价值比较:森林游憩价值(2 亿 8 200 万元/a) > 生物多样性保护价值(2 亿 5 600 万元/a) > 涵养水源价值(2 亿 2 500 万元/a) > 保育土壤价值(1 亿 6 000 万元/a) > 固碳释氧价值(1 亿 3 700 万元/a) > 营养物质积累价值(3 600 万元/a) > 净化空气价值(400 万元/a)。评估结果与饶良懿等<sup>[41]</sup>关于重庆四面山的森林生态系统服务功能价值评估结果较一致,森林生态系统各项功能中森林游憩功能价值都最高,而由于未对生物多样性保护功能价值作评估,她的评估结果中涵养水源功能价值其次。

缙云山森林生态系统 4 种森林类型单位面积生态系统服务功能价值不同,表现为针阔混交林(11 万 2 100 元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )) > 灌木林(11 万 700 元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )) > 常绿阔叶林(10 万 8 400 元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )) > 竹林(6 万 9 800 元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )),针阔混交林、灌木林、常绿阔叶林单位面积生态系统服务功能价值相差不大。

本文评估结果表明:缙云山单位面积森林生态系统服务功能价值为 14 万 4 600 元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ),而据余新晓等<sup>[26]</sup>的评估结果,单位面积的各种森林生态系统所提供的年平均价值为 2 万 3 000 元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ),低于本文的评估结果。余新晓等<sup>[26]</sup>根据 Costanza 等<sup>[6]</sup>的计算方法所作的估算考虑了林木、林副产品的价值,而本文根据评估规范所作的评估未将此项考虑在内;但由于缙云山自然保护区林分郁闭度远高于全国平均水平,所以森林生态系统各项服务功能价值都较大。重庆市森林生态系统服务功能价值为 1 539 亿 6 000 万元/a,单位面积森林生态系统功能价值为 4 万 8 800 元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )<sup>[27]</sup>,缙云山的森林面积仅占重庆市的 0.241%,而其森林生态系统服务功能的价值却占到了重庆市的

0.714%,约为重庆市单位面积森林生态系统服务功能价值的 3 倍,这充分说明了三峡库区森林生态系统具有巨大的生态服务价值。

缙云山森林生态系统服务功能价值评估结果表明,森林生态系统为当地提供了巨大的生态服务。本研究为三峡库区森林生态系统服务功能价值评估提供了一定的参考依据,有利于人们更好、更直观地认识森林与人类之间的关系,为政府部门规划管理提供了有效的参考,对陡坡耕地退耕还林政策的实施也提供了一定的理论依据。但由于受到资料以及研究方法的限制,本评估仅对缙云山森林生态系统服务作了一个保守的评估;不过这对于人们对森林生态系统服务的认识、对生态环境保护政策的制订,以及对陡坡耕地退耕还林工程的实施具有重要的意义,能为科学、合理地实施可持续发展战略提供重要的指导性依据。

参 考 文 献

[ 1 ] 王兵,马向前,郭浩,等. 中国杉木林的生态系统服务价值评估 [ J ]. 林业科学,2009,45(4):124-130.  
[ 2 ] UNITED NATIONS UNIVERSITY. Man's impact on the global environment: Assessment and recommendations for action [ R ]. Cambridge: MIT Press,1970.  
[ 3 ] HOLDER J, EHRLICH P R. Human population and global environment [ J ]. American Scientist,1974, 62:282-297.  
[ 4 ] WESTMAN W E. How much are nature's services worth? [ J ]. Science, 1977, 197:960-964.  
[ 5 ] ODUM H T. Energy in ecosystems [ M ]//POLUNIN N. Environmental monographs and symposia. New York:John Wiley, 1986:34-45.  
[ 6 ] COSTANZA R,ARGE R, DE-GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [ J ]. Nature,1997, 386(6630):253-260.  
[ 7 ] 李文华. 北京市森林的生态服务与生态补偿 [ J ]. 中国农学通报,2009,25(增刊):8-9.  
[ 8 ] 冯剑丰,李宇,朱琳. 生态系统功能与生态系统服务的概念辨析 [ J ]. 生态环境学报,2009,18(4):1599-1603.  
[ 9 ] 虞依娜,彭少麟. 生态系统服务价值评估的研究进展 [ J ]. 生态环境学报,2010,19(9):2246-2252.  
[ 10 ] 陈能汪,李焕承,王莉红. 生态系统服务内涵价值评估与 GIS 表达 [ J ]. 生态环境学报,2009,18(5):1987-1994.  
[ 11 ] PIMENTAL D, WILSON C, MCCULUM A. Economic and environmental benefits of biodiversity [ J ]. Bioscience, 1997, 47(11):747-757.  
[ 12 ] SUTTON P C,COSTANZA R. Global estimates of market and non-market values derived from nighttime satellite imagery,land cover, and ecosystem service valuation [ J ]. Ecological Economics,2002, 41:509-527.  
[ 13 ] Millennium Ecosystem Assessment Board. Millennium ecosystem assessment frameworks [ M ]. Washington D C: World Resources Institution ,2005:13-32.

- [14] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报,1999,19(5):607-613.
- [15] 何浩,潘耀忠,朱文泉,等. 中国陆地生态系统服务价值测量[J]. 应用生态学报,2005,16(6):1122-1127.
- [16] GREN I M, GROTH K H, SYLVAN M. Economic values of Danube Flood Plains[J]. Journal of Environmental Management,1995,45:333-345.
- [17] DIXON J. Analysis and management of watersheds [M]// DASGUPATA P, GORAN M K. The environment and emerging development issues. Oxford:Clarendrom Press,1997:43-55.
- [18] PAUUTANAYAK S K. Valuing watershed services: Concepts and empirics from southeast Asia [J]. Agriculture Ecosystem & Environment, 2004,104:171-184.
- [19] 谢高地,张钊锂,鲁春霞,等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报,2001,16(1):47-53.
- [20] 赵同谦,欧阳志云,贾良清,等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. 生态学报,2004,24(6):1101-1110.
- [21] 陶宝先,张金池,俞元春. 苏南丘陵区典型森林生态系统服务价值估算[J]. 生态环境学报,2010,19(9):2054-2060.
- [22] 赵同谦,欧阳志云,郑华,等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. 自然资源学报,2004,19(4):480-491.
- [23] 胡章翠,戴广翠. 日本森林生态服务价值核算考察报告[J]. 林业经济,2008(1):77-80.
- [24] 尹飞,毛任钊,傅伯杰,等. 农田生态系统服务功能及其形成机制[J]. 应用生态学报,2006,17(5):929,934.
- [25] 王勇,骆世明. 农业生态服务功能评估的研究进展和实施原则[J]. 中国生态农业学报,2008,16(1):212-216.
- [26] 余新晓,鲁绍伟,靳芳,等. 中国森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报,2005,25(8):2096-2102.
- [27] 王兵,任晓旭,胡文,等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业科学,2011,47(2):145-153.
- [28] 王 兵,杨锋伟,郭浩,等. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [29] 冯华敏,王玉杰,王云琦,等. 重庆市缙云山3种森林类型的土壤呼吸特征研究[J]. 水土保持通报,2011,31(5):38-44.
- [30] 张乐勤,方宇媛,许杨,等. 池州森林生态系统服务价值评估与分析[J]. 广西植物,2011,31(4):463-468.
- [31] 刘楠,王玉杰,王毅力,等. 重庆缙云山典型林分土壤有机碳密度特征[J]. 生态环境学报, 2009,18(4):1492-1496.
- [32] 鲍雷,余家燕,李大年,等. 重庆缙云山气态污染物梯度对比监测及分析[J]. 安徽农业科学,2008,36(12):5086-5087.
- [33] 李少宁. 江西森林生态系统服务功能研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2007:54.
- [34] 王兵,郑秋红,郭浩,等. 基于 Shannon-Wiener 指数的中国森林物种多样性保育价值评估方法[J]. 林业科学研究,2008,21(2):268-274.
- [35] 王兵,宋庆丰. 森林生态系统物种多样性保育价值评估方法[J]. 北京林业大学学报,2012,34(2):155-160.
- [36] 崔翰柔. 北碚区旅游市场调查与预测调查报告[J]. 城市旅游规划,2012(6):42.
- [37] 孙艳红,张洪江,王玉杰,等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持报,2006,20(2):106-109.
- [38] 魏虹,王建力,李建龙,等. 重庆缙云山降水 pH 值和化学组成特征分析[J]. 农业环境科学学报,2005,24(2):344-348.
- [39] 赵洋毅. 缙云山水源涵养林结构对生态功能调控机制研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.
- [40] 熊济华,郭守锡,潘体常,等. 重庆缙云山植物志[M]. 重庆:西南师范大学出版社,2005:65-71.
- [41] 饶良懿,朱金兆. 重庆四面山森林生态系统服务功能价值的初步评估[J]. 水土保持学报,2003,7(5):5-7.

(责任编辑 李 雯)