

森林生态系统服务的价值评估和补偿:概念、原则和指标

马志波¹ 孙伟² 黄清麟^{3*}

(1. 廊坊市农林科学院,河北 廊坊 065000;

2. 新疆农业大学 计算机与信息工程学院,乌鲁木齐 830052;

3. 中国林业科学研究院 资源信息研究所/国家林业局林业遥感与信息技术重点实验室,北京 100091)

摘要 通过生态系统服务价值评估途径制定森林生态补偿标准,意味着立足于市场评估森林生态系统服务的经济价值。但是,一些问题困扰着评估实践,选择哪些指标用于评估就是难题之一。评估存量还是流量,选择指标时应遵循的原则,也必须事先得到明确界定。本研究应用生态学和经济学理论,提出了评估本身应遵循的范畴和原则,以及应当选取的价值类型和评估指标。

关键词 森林生态系统服务;生态补偿;价值类型;原则;指标

中图分类号 S 718.55

文章编号 1007-4333(2014)05-0263-06

文献标志码 A

Valuation and payments for forest ecosystem service: Concepts, principles and indicators

MA Zhi-bo¹, SUN Wei², HUANG Qing-lin^{3*}

(1. Langfang Academy of Forestry and Agriculture, Langfang 065000, China;

2. College of Computer and Information Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

3. Institute of Forest Resource Information Techniques/Key Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information Technology of State Forestry Administration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract It is meant to account for forest's ecosystem services (ES) on an equal footing with the market economy while deciding the standard of payments for ecosystem services (PES) by approach of valuing the forest's ES. However several problems bedevil the application of valuation approach. One is what should count. The others include what are the valuation principles, and how value the stock or the flux of ES. In this paper, ecology and economics theory were used to describe what should be counted and the principles should be followed. The types of ES value and ES flux were clearly defined and evaluated as well.

Key words forest ecosystem services; payments for ecosystem services; types of value; principles; Indicators

经济利益驱使是引起森林面积减少的根本原因^[1],因此实施经济刺激可能成为保护资源的有效途径。基于这种思考发展起来的生态补偿(Payments for environmental/ecological services, PES)是目前深受关注的一种经济刺激方法^[2-5]。森林生态效益补偿研究是其中开展较早的重要领域^[6-10],目前,在世界各地得到越来越多的重视,出现了各种尺度(从一个小的流域到整个国家)的应用实例^[2,5],用以保

护森林和扶持林业发展,达到持续获得维持生物多样性、涵养水源、固定二氧化碳等目的。

补偿标准是关键和核心^[8-9],理论上,可以参考交易对象(即森林生态系统服务)的价值量制定补偿标准,但是在实践中,森林生态系统服务价值核算结果很难用于制定补偿标准,一般认为是其评估方法和指标不统一,评估结果过于离散且较为巨大所致^[10-16]。实际上,不能明确地定义研究范畴、评估价

收稿日期:2013-11-22

基金项目:国家林业局“948”项目(2013-4-81);国际热带木材组织(ITTO)项目(ITTO RED-SPD 075/12 Rev.1 (F))

第一作者:马志波,助理研究员,博士,主要从事森林可持续经营研究,E-mail:mateco@sina.cn

通讯作者:黄清麟,研究员,博士生导师,主要从事森林可持续经营理论与技术研究,E-mail:huangql@caf.ac.cn

值类型和评估原则是根本原因。

本研究通过解决概念、价值类型、评估原则和评估指标界定不清等根本性问题,旨在促进基于生态系统服务价值评估途径制定生态补偿标准从研究走向实践。

1 生态系统服务的定义

目前有2种较为流行的定义。

第一种定义是以联合国千年生态系统评估(MA)的定义^[17]为代表,认为生态系统服务(Ecological services, ES)是人类从生态系统获得的各种利益。既包括纤维、食品和药材等生态系统产出物,也包括维持生物多样性、消纳废物和水土保持等来自生态系统自身功能及其变化过程的利益。在Daily等^[18]关于生态系统服务的论著和Costanza等^[11]关于全球生态系统服务价值核算研究中都使用了这种较宽泛的定义。

第二种定义把生态系统产品和服务视为2个不同的范畴,把生态系统有形产出物称为“产品”,把人类获得的、通常不以实物形式出现的利益称为“服务”。De Groot等^[19]在探讨生态系统功能与生态系统产品和服务之间关系的论述中就区分了这2个范畴。

研究生态补偿(包括森林生态补偿)应使用第二种定义,因为根据生态补偿的概念,可以把生态补偿看作一种交易,很明显,交易对象是无形的“服务”而不是传统意义上的有形的“产品”。如果在生态补偿

研究中使用第一种定义,将引起价值评估结果偏大,使补偿标准偏高。下文提及的生态系统产品和服务均属于第二种定义的范畴。

2 森林生态系统产品与服务的价值类型

参考普遍认同的MA报告^[17],同时结合第1节的分析以及生态补偿研究与实践的需要,可以把生态系统服务分为调节、文化和支持三大类型。

支持服务是森林生态系统得以存在的根本,是森林提供调节和文化服务的基础。对支持服务的探讨更多的是在生态学和环境保护学范畴内展开,所以讨论支持服务中的土壤形成、养分循环和维持生物多样性的生态价值比经济价值更有意义。支持服务中的初级生产则兼有生态和经济价值,由该过程产出的木材和非木质林产品具有消耗性使用价值。

调节服务中的子类型,例如固定二氧化碳、水文调节和农田防护等,间接为人类提供福利,属于间接使用价值。文化服务中的森林游憩和精神宗教价值属于非消耗性使用价值,科教价值大体上属于非消耗性使用价值,因为科教活动以非消耗性使用为主。

根据是否具有市场价格、是否可以在市场上进行交易,是另外一种分类方法。此时,可以把森林生态系统产品价值划归“市场价值”,把生态系统服务价值划归“非市场价值”。在这种分类方法中,产品的“市场价值”与服务的“非市场价值”之和相当于图1分类系统中的总价值。

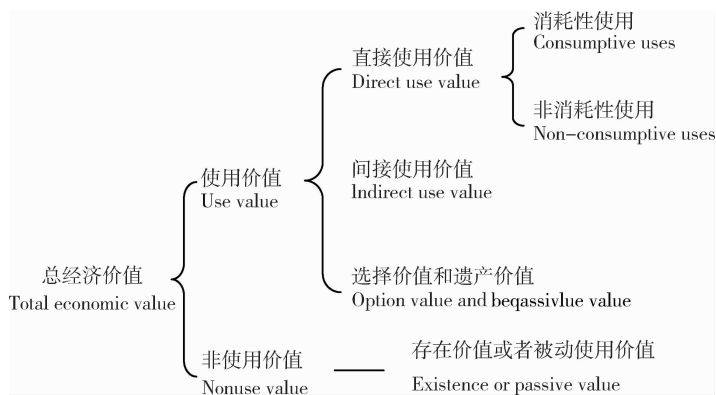


图1 森林生态系统产品和服务价值类型^[1]

Fig. 1 Types of the forest ecosystem goods and services^[1]

3 生态补偿的概念、内涵与要素

目前国内外对生态(效益)补偿没有统一的定义,但是具有代表性的一般都是从环境或生态经济

学角度给出,例如Wunder^[3]提出的PES定义,李文华等^[4]对生态补偿概念和内涵的解析。

综合国内外研究^[2-10],本研究认为可以把生态补偿理解为:为保证一定数量和质量的生态系统服

务的可持续供应,而向生态系统服务提供者支付现金或提供物质、技术和优惠政策等作为奖励,或者向破坏者收费用以补偿和修复生态系统的一种基于利益关系调节的经济刺激手段或制度安排。这是从较宽泛角度的理解,包括激励和惩罚 2 个方面。

因此,可以把森林生态效益补偿看作是一种市场化的交易行为^[3],它包括供应者、购买者、交易对象和交易价格等要素,这些要素缺一不可。

1) 供应者一般是林权所有人或者实际占有者,在土地私有制国家一般指私有林地所有人。在中国,北方主要是国有林区;南方为集体林区,经过林权改革,个人林权所有者比例已经增大。

2) 交易对象是具有一定价值的某一种或者几种森林生态系统服务,具有“公共物品”属性,其载体是特定林地和地上森林植被构成的生态系统。交易对象的“外部性”特征决定了它们的边界有时不甚清晰,但其载体具有清晰的边界和权属关系,这是实现交易的前提。

3) 购买者通常是公共利益的代表者——政府,当然也可以是一些非政府组织、国际机构等,或者多种组织的联合体。

4) 交易价格即补偿标准。为便于实践操作,一般按森林面积逐年支付,元/(hm²·年)。

4 “理性”决策下的机会成本

本节中“理性”是指经济学“理性人”概念中的“理性”。

现实中经常存在 2 个决策单位,一是政府(整体长远利益的代表),二是经营者(私人、局部利益的代表)。“理性政府”决策目标是整体长远利益最大化,随着社会经济发展和人们对生态系统服务认识的提高,优先考虑森林生态系统服务价值逐渐成为世界潮流,例如现有植被是天然林的,要求维持自然状态;是人工林的,要求尽量经营混交林、延长轮伐期和实行择伐。“理性人”(经营者)决策目标是经济利益最大化,从生产成本、产品产量和市场价格等因素出发,通常选择经营人工纯林,缩短轮伐期,实行皆伐。

对同一林分而言,产品和服务价值的最大化不可能同时实现,必然有所取舍。为示区别,称政府选择的经营模式为“经营模式 I”,经营者选择的为“经营模式 II”。2 种经营模式获得的服务价值存在差异(图 2)。图 2 假定现有植被为天然林,长方形的

高度示意单位面积天然林和人工林 ES 流量价值的相对大小。

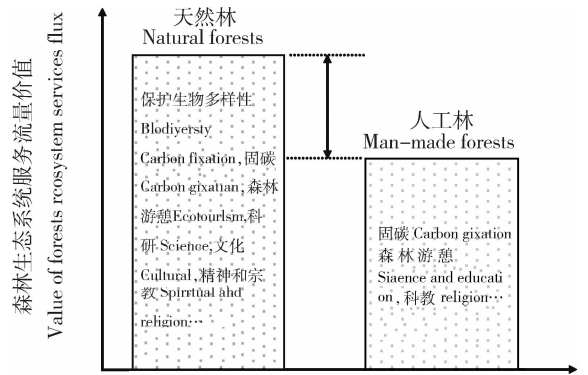


图 2 单位面积森林生态系统服务价值流量示意

Fig. 2 Values of forest ecosystem services flux in unit area

一般情况下,人工林每年单位面积的 ES 价值低于天然林,因为:人工林的物种多样性显著降低于天然林;群落结构相对单一使人工林保持水土、养分循环等方面的价值低于天然林。此外,为保持人工林的稳定性和林木的较快生长,通常需要投入一定量的农药、化肥,这些物质进入环境后容易污染水体、破坏大自然食物链。

当选择经营模式 I 时,意味着保留天然林,公众可以获得高于人工林的 ES 价值,高出部分用图 2 中的 Δ 表示,显然它是一个差值。Δ 也可以解释为选择经营模式 II 时(表现为皆伐天然林后持续营造和经营人工纯林),公众因选择的改变而引起的 ES 价值的损失。

图 2 使了流量的概念,并且关注不同森林类型生态系统服务的差异,原因是:1) 正如消费者入住酒店时,付费购买的是所需的服务(按时间计费,视为“流量”),不是酒店的资产(“存量”),森林生态效益补偿交易的是生态系统提供的服务“流”,很少涉及到生态系统本身的交易(或者说森林资产“存量”的买卖)。2) 当某一块土地林地使用价值属性不变(现实中,受法律法规的约束,林地不能随意转变为其他用途的土地),而地上植被面临不同选择时,损失的是一个差值,不是生态系统服务全部。正如图 2 给出天然林和人工林经营决策“博弈”的例子,天然林和人工林都可以提供涵养水源、保持水土和固定二氧化碳等服务,所不同的是数量和质量。

因此,实践中应当分析、界定和评估“流量”价

值,用流量价值作为制定补偿标准的参考依据。当面临林地用途不变、地上森林类型可能发生变化的情景时,应正确评估生态系统服务可能发生的得失,并根据经济学中机会成本的定义,选择最大的差值(Δ)作为该情景下补偿标准的参考。例如,假定在我国亚热带林区拟通过生态补偿防止某片天然阔叶林(流量价值为 ES_0)转变为人工林,当地最流行的人工林是马尾松林和杉木林,同等立地条件下流量价值分别为 ES_1 和 ES_2 ,则 $\Delta = \max(ES_0 - ES_1, ES_0 - ES_2)$ 。进一步,可以得出:1)对于公益林,评估其 ES 总流量价值;2)对于商品林中的天然林(即天然商品林),评估天然与潜在转变的人工林类型的 ES 总流量价值之差。而一般情况下商品林中的人工林生态价值不高,一般不予生态补偿。

5 评估原则与指标

5.1 评估原则

根据生态系统服务及其载体的基本特征,参考生态系统服务价值评估和绿色 GDP 核算等相关理

论和实践经验^[13,20-21],提出 4 项评估原则:1)评估对象应是可以给人类带来福利的,虽然属于非市场价值,但是具有直接或者间接使用价值的 ES。这些 ES 是生态系统自身过程和功能的結果,但不等同于过程和功能本身。2)评估对象的载体(指具体的森林实体)应具有明确的时空范围和权属关系;3)评估对象的流量可以计量;4)根据生态补偿的定义,评估对象应具有“公共物品”的性质。

5.2 指标筛选

根据 5.1 的 4 个原则,参考 MA 中 ES 的分类^[17],以及 1、2 和 3 节对生态系统服务和生态补偿概念和价值类型等的界定,对常见森林生态系统服务评估指标分析和筛选情况见表 1。

总体上,由于调节服务的物理量可测,价值评估的方法多样,因此这部分指标均可采用。文化服务指标受社会经济发展水平和人的主观影响较大,因此这部分指标不适合。支持服务属于为人类提供各种福利的生态系统过程和功能,不是结果,例如物质循环过程可以改善森林生态系统输出水分的水质,

表 1 森林生态系统服务价值评估指标筛选

Table 1 Indicators for valuation the forest ecosystem services

| 森林生态系统服务 Forests ES | 是否满足以下原则(Y or N) Satisfy the rules | | | | 是否同时满足 4 项 原则(Y or N) Satisfy all the four rules |
|---|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|---|
| | 原则 1 Rule 1 | 原则 2 Rule 2 | 原则 3 Rule 3 | 原则 4 Rule 4 | |
| 调节服务 Regulating | | | | | |
| 传粉 Pollination | Y | Y | Y | Y | Y |
| 调节气候 Climate regulation | Y | Y | Y | Y | Y |
| 农田防护 Protection farmland | Y | Y | Y | Y | Y |
| 净化大气 Air purification | Y | Y | Y | Y | Y |
| 防止土壤侵蚀和保持营养元素 Prevention soil erosion and maintain nutrition elements | Y | Y | Y | Y | Y |
| 调节水量、改善水质 Regulation water flux and water purification | Y | Y | Y | Y | Y |
| 固定 CO ₂ 和释放 O ₂ Fixation CO ₂ and release O ₂ | Y | Y | Y | Y | Y |
| 文化服务 Cultural | | | | | |
| 森林游憩 Forests ecotourism | Y | Y | Y | N | N |
| 精神与宗教 Spiritual and religion | — | Y | N | Y | N |
| 科教 Educational | — | Y | N | Y | N |
| 支持服务 Supporting | | | | | |
| 土壤形成 Soil formation | N | Y | — | — | N |
| 养分循环 Nutrient cycling | N | Y | Y | Y | N |
| 初级生产 Primary production | N | Y | Y | Y | N |
| 维持生物多样性 * Preserve biodiversity * | — | — | — | — | — |

注:“维持生物多样性”在下文讨论。

Note: Preserve biodiversity service was discussed below.

就生态补偿而言,需要评估的是具有一定质量和一定输出水量的价值,而不是该生态系统过程,因此支持服务包括的指标也不适用于面向生态补偿的价值评估,但较为特殊、需要讨论的是维持生物多样性价值。具体细节如表1。

表1中,同时满足前述4项原则的有:

1)传粉。指某一森林中传粉昆虫发挥的作用。传粉使特定经济植物正常完成开花结果,出产经济物品,使人们从中获益^[22]。可以用避免损失成本法评估其价值。

2)调节气候。森林植被的存在改变了地球下垫面性质、影响光辐射,森林还可以调节水、气循环,森林这些都会影响气候,作用于人居环境,影响人们的生产生活。例如:一定面积的城市森林可以减轻热岛效应,可以用生产近似法、替代成本法评估。

3)农田防护。主要是人工林,例如我国北方地区的农田林网,在夏季可以减轻干热风的危害,保障作物稳产、高产。可以用避免损失成本法评估。

4)净化大气。森林植物可以吸附大气中的有害物质。一般使用替代成本法评估该种价值。

5)控制土壤侵蚀和保留营养元素。控制土壤侵蚀是森林保持水土和涵养水源2种功能共同作用的结果。森林植被的存在可以减轻降水对土壤直接冲击;森林植物通过与土壤的相互作用使森林土壤保持较强蓄水能力,森林枯落物也具有较强蓄水能力,这些都可以减弱地表径流,从而减少被水流带走的表土量。可以用避免损失成本法、替代成本法评估。

6)调节水量和改善水质。在旱季森林缓慢释放土壤中的水分进入水系,在雨季森林对地表径流的形成有一定的消减作用,森林植被通过蒸腾作用消耗土壤水分,这些作用共同形成调节水文循环、调节流域水量的作用。降水在进入森林生态系统后,其中含有的有害物质可以因一些生化反应而降解,或者被植物吸收、被森林土壤过滤,从而得到净化。同样可以用替代的思路评估森林调节水量和改善水质的经济价值。

7)固定CO₂和释放O₂。森林通过光合作用将大气中的CO₂固定在生物量之中,同时释放O₂。可以用替代成本法评估。固定CO₂价值也可以用碳税法来评估。

表1中,不能同时满足4项评估原则的指标有:

1)森林游憩。该项价值属于非消耗性直接使用价值,属于“市场价值”类型,不属于“公共物品”。而

且,受交通、地形等因素限制,不是所有森林都具有游憩价值。

2)精神与宗教。精神与宗教属于历史、文化等非物质文化遗产范畴,其载体通常是一个具有一定区域分布的、完整的生态系统(例如神山和圣地),不宜割裂,因此不适合用单位面积价值描述其价值,也不适合评估流量价值。

3)科教价值。科教价值取决于人类认知水平、重视程度和社会经济发展水平,难以按流量评估。

4)土壤形成。土壤的形成需要自然和生物作用的漫长过程,不宜按年为单位计量流量。

5)养分循环。养分循环是生态系统的内部反应过程,相应于人类利用而言属于中间过程。

6)初级生产。初级生产是生态系统自身得以维持的根本,是一个生物化学过程,该过程的产出物流通于市场后成为具有“市场价值”的生态系统产品(木材和果实等),因此不应入选。

最后,需要讨论的是维持生物多样性价值。生物多样性一般包括3个层次:基因多样性、物种多样性和生态系统多样性。生物多样性的价值具有两重性:一方面,3个层次的多样性都具有使用价值,可以在市场上进行交易,属于“市场价值”类型,体现在高价值的基因、物种和森林生态系统(森林景观)的开发利用和产品、产权的交易等社会经济活动中,可以用市场定价法、条件价值法、旅行费用法等传统的价值评价方法进行估计^[17];另一方面,3个层次的多样性又都具有从人类精神、情感上定义的存在价值的特征,属于“非市场价值”,一般采用支付意愿调查或者基于特定人群(例如专家评审团)打分的方法等进行评估^[23]。根据前述原则,须在生态效益补偿研究中评估“非市场价值”涉及的内容。

6 结论与讨论

6.1 结论

森林生态补偿具有市场交易行为特征,但是其内涵和目标决定交易对象通常是森林生态系统服务“流”,不是木材、食品、草药等森林生态系统产品“流”,也几乎不涉及森林资产(存量)的买卖。用“元/(hm²·年)”表征服务“流”的价值(即流量价值)较为直观,符合补偿金按面积逐年发放的实际。

在常见价值评价指标中,适用于生态效益补偿标准制定的有8种:传粉、调节气候、农田防护、净化大气、控制土壤侵蚀与保留营养元素、调节水量和改

善水质、固定 CO₂ 与释放 O₂, 以及维持生物多样性(特指“非市场价值”涵盖的内容)。需注意, 在具体评估实践中选择某一项、某几项或者全部上述指标进行评估, 取决于对象的自然特征和功能。因此要求研究者对森林特征和功能有清晰的认识。

森林的消失与加快气候变化、增加土壤侵蚀与水土流失、生物灭绝等关系密切, 保护森林, 尤其是天然林, 已经成为世界各国共同关切的重要问题^[1,17,24]。在这一背景下, 林地不容易转变为其他用途(比如农用地和建筑用地等), 但是经常面临森林类型的改变, 这与林地和林木的权属关系相关。集体林权改革完成以后, 天然商品林的林权所有者有权选择皆伐天然林、经营人工林, 如果准备用生态补偿政策鼓励林权所有人持续经营天然林, 避免皆伐天然林, 可以用需要保护的森林和潜在转变的森林类型供应的 ES 流量价值的差作为补偿标准的参考值。

6.2 讨论

1) 补偿标准的动态和极限。森林生态系统是生命与非生命组分共同组成的有机体, ES 价值量会伴随演替过程而发生变化, 同时, 人们对 ES 的购买力也随社会经济发展而发生变化。因此, 补偿标准也应当具有动态性和极限——随支付能力的增强而加大补偿力度是合理的, 但是标准上限应趋近、但不超过系统处于相对稳定状态(顶级群落)供应的 ES “流”的价值量。现实中, 兼顾考虑森林生态系统演替动态的, 尚属空白。

2) 商品林的生态补偿。我国已经实施了从国家到地方各种尺度的公益林的生态效益补偿机制, 但是截至目前尚未对具有重要生态功能的商品林生态补偿问题进行专门探讨, 尤其是天然商品林。在实施集体林权改革, 把一部分具有重要生态价值的天然林分配给农户而转变为商品林用途后, 该问题变得较为紧迫, 本研究仅就天然商品林转变成人工纯林的情景做了简单分析(图 2), 今后, 对“后林改时期”的商品林生态补偿问题还需要做进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] Pearce D W. The economic value of forest ecosystem[J]. *Ecosystem Health*, 2001, 7(4): 284-296
- [2] 徐大伟, 涂少云, 常亮, 等. 基于演化博弈的流域生态补偿利益冲突分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(2): 8-11
- [3] Wunder S. Payments for environmental services: Some nuts and bolts[M]. Bogor: Center for International Forestry Research, 2005: 3-8
- [4] 李文华, 李芬, 李世东, 等. 森林生态效益补偿的研究现状与展望[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(5): 676-688
- [5] 刘春腊, 刘卫东, 陆大道. 1987—2012 年中国生态补偿研究进展及趋势[J]. *地球科学进展*, 2013, 32(12): 1780-1792
- [6] 蒋海, 苏志尧. 生态公益林补偿若干理论问题探讨[J]. *生态经济*, 1997(1): 41-43
- [7] 胡小飞, 傅春, 陈伏生, 等. 国内外生态补偿基础理论与研究热点的可视化分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(11): 1395-1401
- [8] 黄选瑞, 张玉珍, 藤起和, 等. 环境再生产与森林生态效益补偿[J]. *林业科学*, 2002, 38(6): 164-168
- [9] 李平星, 孙威. 经济地理学角度的区域生态补偿机制研究[J]. *生态环境学报*, 2010, (6): 1507-1512
- [10] 李文华, 李世东, 李芬, 等. 森林生态补偿机制若干重点问题研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(2): 13-18
- [11] Costanza R, d' Arge R, de Groot R S, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260
- [12] Holub H W, Tappeiner G, Tappeiner U. Some remarks on the 'System of integrated environmental and economic accounting' of the United Nations[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 329-336
- [13] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展[J]. *资源科学*, 2001, 23(6): 5-9
- [14] Turner R K, Daily G C. The ecosystem services framework and natural capital conservation[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2008, 39(1): 25-35
- [15] 侯元兆, 吴水荣. 森林生态服务价值评价与补偿研究综述[J]. *世界林业研究*, 2005, 18(3): 1-5
- [16] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008: 20-33
- [17] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and Human Well-being: Synthesis [M]. Washington DC: Island Press, 2005: 4-9
- [18] Daily G C, Postel S, Bawa K, et al. Nature's services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington DC: Island Press, 1997: 3-6
- [19] de Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services[J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408
- [20] 侯元兆. 我国绿色 GDP 核算研究的公关方向与核算务实前景[J]. *世界林业研究*, 2005, 18(6): 1-10
- [21] Boyd J. Nonmarket benefits of nature: What should be counted in green GDP? [J]. *Ecological Economics*, 2007, 61(4): 716-723
- [22] Kremen C, Williams N M, Aizen M A, et al. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: A conceptual framework for the effects of land-use change[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(4): 299-314
- [23] Farber S, Costanza R, Childers D L, et al. Linking ecology and economics for ecosystem management[J]. *Bio Science*, 2006, 56(2): 121-133
- [24] Walter G R, Post E, Convey P, et al. Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395