

三江源区生态系统服务间接使用价值评估

赖敏^{1,2}, 吴绍洪^{1*}, 戴尔阜¹, 尹云鹤¹, 赵东升¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 论文利用替代成本法、机会成本法和影子工程法等经济学方法, 对三江源区生态系统提供的间接使用价值进行了评估。研究表明: 2008年三江源区生态系统的间接使用价值共计 1.74×10^{11} 元, 其中水源涵养价值为 1.07×10^{11} 元, 占 61.38%, 土壤保持价值为 4.60×10^{10} 元, 占 26.50%, 气候调节价值为 2.01×10^{10} 元, 占 11.56%, 空气质量调节价值为 9.56×10^8 元, 占 0.55%。该结果突出反映了三江源区作为水源发源地在水量平衡、调节区域水分循环和改善水文状况等方面做出的贡献。

关键词: 生态系统服务; 间接使用价值; 三江源区

中图分类号: F062.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2013)01-0038-13

三江源区地处青藏高原腹地、青海省南部, 行政区域涉及果洛、玉树、海南、黄南 4 个藏族自治州的 16 个县和格尔木市的唐古拉乡, 土地总面积约为 $36.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区是长江、黄河和澜沧江的发源地, 素有“中华水塔”之称, 是中国生态安全和区域可持续发展的生态屏障。由于生态系统群落结构简单, 抗干扰和自我恢复能力低下, 三江源区同时也是中国生态系统最敏感和最脆弱的地区之一。近几十年来, 受全球气候变暖和不合理人类活动的影响, 三江源区生态质量逐渐下降, 源头产水量不断减少, 草地退化和沙化面积继续扩大, 水土流失日趋严重, 生物多样性急剧萎缩。为此, 2005 年国务院批准了“青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划”(以下简称“规划”), 实施了退牧还草、退耕还林等一系列生态环境保护建设项目, 旨在保护和恢复生态功能, 改善区域生态环境, 促进人与自然和谐发展。评价三江源区生态系统服务价值, 尤其是对生态服务的间接使用价值进行定量化研究, 不仅可以强化人们对三江源区生态环境的认识, 而且能够为解决区域生态问题、评价“规划”项目实施效果以及制定后续生态保护和经济发展政策提供科学依据。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

三江源区 16 个气象台站的月降水量和日均气温数据来源于国家气象局, 时间为 1994—2008 年。中国县域行政界线图、数字高程模型(DEM)、全国 1:100 万土壤类型分布图和 2008 年的土地利用类型图来源于中国资源与环境数据中心, 分辨率为 1 km。因研究

收稿日期: 2011-11-07; 修订日期: 2012-03-22。

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2009BAC61B05)。

第一作者简介: 赖敏(1982-) 女, 江西赣州人, 博士研究生, 主要从事自然环境变化与格局综合研究。E-mail: laim.09b@igsnrr.ac.cn

* 通信作者简介: 吴绍洪(1961-) 男, 广东潮州人, 博士生导师, 主要从事自然环境变化与格局综合研究。E-mail: wush@igsnrr.ac.cn

需要 采用 2004 年中国县域行政界线图对三江源区范围进行了适当调整,以保持行政界限的完整性。结合土地利用和区域生态环境等相关资料,将三江源区划分为六大生态系统类型^[1]:农田生态系统主要包括水田和旱地,森林生态系统主要包括密林地(有林地)、灌丛、疏林地和其他林地,草地生态系统主要包括高覆盖度草地、中覆盖度草地和低覆盖度草地,水体与湿地生态系统主要包括沼泽地、河渠、湖泊、水库、冰川与永久积雪及滩地,其他生态系统主要包括居民点(城镇、农村居民点和工矿用地)、裸土地和裸岩石砾地,荒漠生态系统主要包括沙地、戈壁、盐碱地和高寒荒漠。在此基础上,制定了 2008 年三江源区生态系统类型分布图(图 1)。NPP 数据来源于美国蒙大拿大学森林学院工作组(The Numerical Terrady-namic Simulation Group)提供的 MOD17A3 的 NPP 源数据(基于 BIOME - BGC 模型计算,分辨率为 1 km)。NDVI 数据来源于“国际科学数据服务平台”提供的 MODIS 月植被指数 L3 产品,分辨率为 1 km,时间为 2008 年 2 月至 2009 年 1 月。

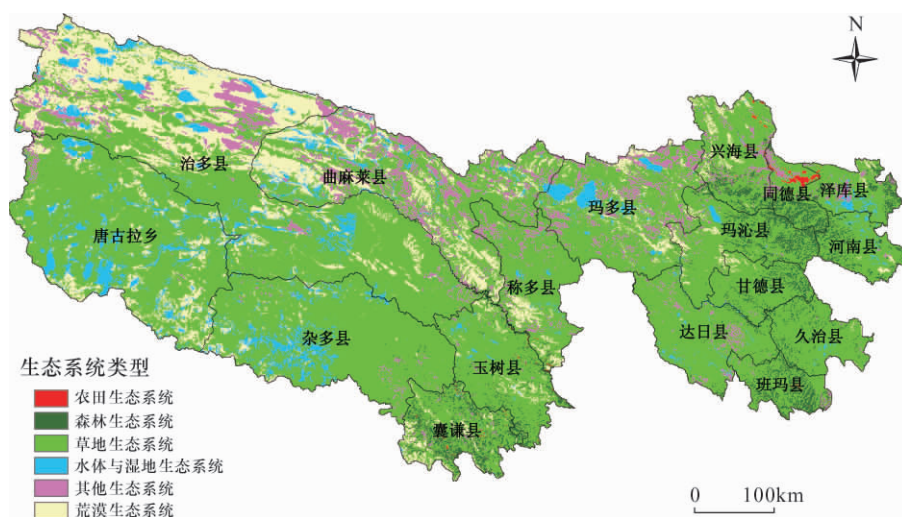


图 1 2008 年三江源区生态系统类型空间分布

Fig. 1 Spatial pattern of ecosystem type in the Three-River Headwaters Region (TRHR) in 2008

1.2 评估指标

依据联合国千年评估工作组提出的生态系统服务分类体系,将三江源区生态系统服务归纳为供给服务、调节服务、文化服务和支撑服务 4 类。其中,供给服务包括水资源供给和动植物产品供给,调节服务包括水源涵养、空气质量调节、气候调节和土壤保持服务,文化服务主要体现在游憩服务方面,而支撑服务主要为初级生产、土壤形成、提供栖息地以及生态多样性等。供给服务和文化服务中的游憩服务构成了三江源区生态系统的直接使用价值,可以通过直接的市场收入来衡量其价值大小;水源涵养、空气质量调节、气候调节和土壤保持服务构成了三江源区生态系统的间接使用价值,它们是三江源区生态系统提供的重要服务类型,有其特殊的生态作用。由于这些服务无法通过市场交易而直接获得销售收入,其价值大小变得难以判断,因而本文重点探讨间接使用价值的定量评估。

支撑服务是为生产其他所有的生态系统服务而必需的那些生态系统服务,它是所有其他服务的基础,价值全部体现在其他三种服务类型上,对其估价会造成价值的重复计算,故不对支撑服务进行估价^[2]。

1.3 评估方法

1.3.1 水源涵养

水源涵养是三江源区生态系统提供的一项重要生态服务类型。本文将水源涵养界定为在某一空间范围和区域尺度上,生态系统在降水、蒸发、入渗和径流等若干水文过程中所发挥的调节作用和影响,包括截留降水、抑制蒸发、涵蓄土壤水分、缓和地表径流、补充地下水和调节河川流量等。

(1) 物质量评估

关于生态系统水源涵养量的测算有多种方法,比较常见的有土壤蓄水能力法、综合蓄水能力法、林冠截留剩余量法、水量平衡法、降水储量法、年径流量法等^[3],其中,以水量平衡法使用频率最高。该方法将生态系统视为一个“黑箱”,以水量的输入和输出为着眼点,从水量平衡的角度,以降水量与蒸散发量及其他消耗的差来计算水源涵养量^[4],计算结果比较准确,而且容易操作,从理论上说是水源涵养定量研究的最“完美”的方法。本研究按照水源涵养的定义,参考众多水源涵养量评估研究对水量平衡法的实际应用^[5-14],利用 InVEST(The Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型对三江源区生态系统在水文调节方面所起的作用进行量化,计算包括地表径流在内的水源涵养量(即水文调节量,在 InVEST 模型中被称为产水量)。

InVEST 模型由美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会联合开发,目前已成功应用于北美^[15]和中国的部分区域^[16-17]。其计算原理如下:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) \cdot P_x \quad (1)$$

式中: Y_{xj} 为栅格单元 x 土地覆被类型 j 的年产水量, AET_{xj} 为栅格单元 x 土地覆被类型 j 的实际年蒸散发量, P_x 为年均降水量。为了对应土地利用数据,本文先对 2006—2010 年的降水量求年平均,然后用 ANUSPLIN 模型进行插值,获得降水空间栅格数据。

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (2)$$

式中: 实际蒸散与降水的比值 $\frac{AET_{xj}}{P_x}$ 是 Zhang 等^[19]在 Budyko 曲线基础上提出的实际蒸散的近似算法; ω_x 为休整植被年可利用水量与预期降水量的比值, Zhang 等^[18]将其定义为表征自然气候-土壤性质的非物理参数; R_{xj} 为栅格单元 x 土地覆被类型 j 的 Budyko 干燥指数(即实际蒸散与降水的比值),无量纲。

$$R_{xj} = \frac{k_{xj} \cdot ET_0}{P_x} \quad (3)$$

式中: k_{xj} 为植被蒸散系数, ET_0 为参考作物蒸散。本文应用 FAO 的计算方法^[19]估算不同植被覆盖的蒸散系数; ET_0 由经辐射校正的 FAO56-PM 模型计算获得^[20]。

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (4)$$

式中: Z 为 Zhang 系数, AWC_x 为土壤有效含水量。Zhang 系数是表征降水特征的常数,模型默认值为 9.433,适用于降水具有明显的季节变化且降水次数较多(一个季节大约 100 次降水)的区域。对总量相等的区域,降水次数越多, Zhang 系数越大。根据研究区内水文站多

年平均蒸散量和平均产水量观测数据对该系数进行了校验,得出当 Zhang 系数为 3.326 时, InVEST 模拟的产水量模拟效果最优; AWC_x 由 Zhou 等^[21]的计算结果得到。

(2) 价值量评估

水源涵养的经济价值可用影子工程价格替代,本研究采用水利工程水库建设的价格作为水源涵养的影子工程价格。根据国家林业局发布的森林生态系统服务功能评估规范^[22], 2005 年单位水库库容造价为 6.11 元/ m^3 ,而 2008 年的固定资产投资价格指数增长了 14.9%,则 2008 年的单位库容造价为 7.02 元/ m^3 。由于水库为固定资产投资,需要通过折现率和使用年限折算成年金现值,计算公式如下:

$$V_a = V_w \times \{ i \times (1+i)^t / [(1+i)^t - 1] \} \quad (5)$$

式中: V_a 为水源涵养的年金价值(元); V_w 为水源涵养的总价值(元); i 为社会贴现率(%); t 为项目运行年限(a)。这里折现率取 10%,水库使用年限按 20 a 计^[23]。

1.3.2 空气质量调节

绿色植物被称为“生物过滤器”,在其抗生范围内能吸收和减少空气中有害物质的含量,并能依靠其表面的吸附能力,对空气具有较强的滞尘作用^[24]。三江源区虽然工业污染较少,但其自然生态系统对周边区域大气环境的净化起到了积极作用。本文针对三江源区的实际情况,分别估算了森林和草地生态系统吸收主要有害气体 SO_2 的价值。

(1) 森林吸收 SO_2 的价值

森林吸收 SO_2 的价值主要与不同树种吸收 SO_2 的能力及森林面积的大小有关,计算公式如下:

$$V_f = K_s \times A_f \times Q_s \quad (6)$$

式中: V_f 为森林年吸收 SO_2 的价值(元); K_s 为 SO_2 的治理费用(元); A_f 为森林面积(hm^2); Q_s 为单位面积森林 SO_2 吸收量(kg/hm^2)。

三江源区森林主要由云杉、柏木和桦木等树种组成,根据对青海省不同树种吸收 SO_2 的能力进行测算,单位面积的云杉、柏木和桦木吸收 SO_2 的量分别为 117.60、411.60 和 88.65 kg/hm^2 ^[25],本研究取这三者的平均值,得到三江源区森林吸收 SO_2 的能力为 205.95 kg/hm^2 。植被吸收 SO_2 的价格按国家发展与改革委员会等四部委 2003 年第 31 号令《排污费征收标准及计算方法》对 SO_2 排污费征收标准 0.6 元/kg 来估算。

(2) 草地吸收 SO_2 的价值

草地生态系统的净化能力同草地生产力有极其重要的关系。草地生产力高,则吸收有害气体能力强,否则,会减弱草地生态系统对空气净化能力^[24]。据测定,每 kg 草叶(干重)每天可吸收 0.001 kg SO_2 ,植物干物质中碳元素的含量大约占 45%,而草地生态系统中地上生物量约占总生物量的 35%,因此生长期末单位面积草叶干重约为 $(NPP/45\%) \times 35\% = 0.7778 NPP g/(m^2 \cdot a)$ (NPP 为植被净初级生产力)。由于生物量的积累是一个“慢—快—慢”的过程,该过程符合 Logistic 生长函数,因此从植物返青开始第 t 天的草叶干重可表示为: $0.7778 NPP / [1 + \exp(a - kt)] g/(m^2 \cdot a)$ ^[26],根据赵亮等^[27]对高寒草甸的模拟结果可推算 $a = 2.194930$, $k = 0.029266$ 。三江源区每年牧草生长期以 150 d 计^[28],以 SO_2 排污费征收标准 0.6 元/kg 来估算,在已知三江源区草地净初级生产力的情况下,可推算出三江源区单位面积的草地吸收 SO_2 的经济价值为:

$$\int_0^{150} 0.001 \times 0.001 \times 0.6 \times 0.7778 NPP / [1 + e^{(2.19493 - 0.029266 t)}] dt,$$

即 $35.0013 \text{ NPP 元}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

1.3.3 气候调节

生态系统既对局地的气候产生影响,同时也对全球的气候产生影响。例如,在局地尺度上,土地覆被变化可以对气温和降水产生影响;在全球尺度上,通过吸收和排放温室气体(如 CO_2) 进行气候调节^[2]。受研究方法和基础资料所限,本文仅评价三江源区森林和草地生态系统在固碳方面的经济价值。

(1) 物质质量评价

生态系统的固碳能力可通过净生态系统生产力(NEP)来反映。NEP 是未受干扰生态系统大气与植被间的净碳交换量,它等于植被净初级生产力(NPP)与土壤呼吸(R_h)的差。本文所用的 NPP 数据来源于美国蒙大拿大学森林学院工作组(The Numerical Terradynamic Simulaiton Group)提供的 MOD17A3 的 NPP 源数据, R_h 则引用裴志永等^[29]对青藏高原草地和森林土壤碳排放的模拟结果。

由于三江源区草地以高寒草甸和高寒草原为主,本文采用裴志永等^[29]的研究成果来估测三江源草地生态系统土壤呼吸的分布状况,计算公式如下:

$$R_h = 0.22 [\text{Exp}(0.0913T) + \text{Ln}(0.3145P_r + 1)] \times 30 \times 46.5\% \quad (R = 0.77, p < 0.001) \quad (7)$$

式中: R_h 为土壤呼吸量, T 为日均温, P_r 为年降水量。

王琳^[30]在青藏高原东部山地生态系统碳过程研究中进行了室内土壤碳矿化培养实验,根据林型对土壤碳矿化速率和温、湿度之间的关系进行了指数拟合,在此基础上得到常绿落叶阔叶林、针阔混交林、暗针叶林、亚高山灌丛等植被类型下的土壤呼吸量。三江源区森林植被以亚高山暗针叶林和高寒灌丛为主,面积比例约为 1:3,因此本文采用以上两种林型土壤呼吸量的加权平均值作为三江源区森林生态系统的土壤呼吸量,约为 $107.86 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

(2) 价值量评价

生态系统的固碳价格使用碳税法来计算。本研究借用环境经济通用的瑞典碳税率 0.15 美元/kg C,人民币/美元汇率按 2008 年汇率 6.8 进行换算,则三江源区生态系统的固碳价格为 1.02 元/kg C。

1.3.4 土壤保持

受环境、地形、地貌等自然因素的影响,三江源区自然成土过程缓慢,土层薄,肥力水平低,生态系统极为脆弱,加之近 100 a 来高强度的人类干扰,使得该地区的生态系统不堪重负^[31]。本文从恢复生态学角度出发,评价三江源区在保持土壤养分、减少废弃土地和减少泥沙淤积的作用,并通过机会成本法、市场价值法和影子工程法,对三江源退化生态系统在生态恢复过程中的土壤保持经济价值及其特征进行研究。

(1) 物质质量评价

运用当前广泛应用的通用土壤流失方程(USLE)估算三江源区潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量,两者之差即为三江源区生态系统土壤保持量。潜在土壤侵蚀量是指生态系统在没有植被覆盖和水土保持措施下的土壤侵蚀量。在通用土壤流失方程中不考虑地表覆盖因素和水土保持因素,即 $C = 1$, $P = 1$,此时通用土壤流失方程成为:

$$A_p = R \times K \times Ls \quad (8)$$

现实土壤侵蚀量考虑地表覆盖和水土保持因素,通用土壤流失方程为:

$$A_r = R \times K \times Ls \times C \times P \quad (9)$$

由公式(8)和公式(9)可以计算土壤保持量:

$$A_c = A_p - A_r \quad (10)$$

式中: A_p 为单位面积潜在土壤侵蚀量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; A_r 为单位面积现实土壤侵蚀量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; A_c 为单位面积土壤保持量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 为降雨侵蚀力因子 [$MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$]; K 为土壤可蚀性因子 [$t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$]; Ls 为坡长坡度因子, 又称地形因子, 无量纲; C 为地表植被覆盖因子, 无量纲; P 为土壤保持措施因子, 无量纲^[32]。

(2) 价值量评价

运用市场价值法、机会成本法和影子工程法从保持土壤养分、减少废弃土地和减少泥沙淤积 3 个方面来评价三江源退化生态系统在整个恢复过程中的土壤保持经济价值。

• 保持土壤养分的单位价值

土壤侵蚀造成土壤养分大量流失, 土壤肥力快速降低, 主要包括土壤 N、P、K 和有机质的损失。根据土壤侵蚀量和单位质量土壤各营养物质含量来计算土壤应用物质损失总量, 采用替代市场法来估算土壤肥力的损失价值, 计算公式为:

$$V_{s1} = \sum R_i \times (1/n_i) \times P_i \quad (11)$$

式中: V_{s1} 为保持土壤养分的单位价值(元/t); R_i 为单位质量土壤中养分(碱解氮、速效磷、速效钾)的平均含量(t); n_i 为土壤中速效氮、速效磷和速效钾分别在磷酸二铵和氯化钾中的含量, 分别为 14%、15.01% 和 50%^[22]; P_i 为化肥(磷酸二铵、氯化钾)价格(元/t)。由《青海土壤》^[33]可知, 三江源区土壤中养分含量为: 碱解氮 216.78 mg/kg、速效磷 5.64 mg/kg、速效钾 209 mg/kg。化肥价格采用《2009 年中国物价年鉴》^[33]中提供的磷酸二铵和进口氯化钾的价格, 分别为 4 436 元/t 和 4 125 元/t。由此可得三江源区生态系统保持土壤养分的单位价值为 8.76 元/t。

• 减少废弃土地的单位价值

根据三江源区生态系统保持土壤总量和土壤容重计算保持土壤的体积, 再根据青海省土壤平均厚度推算出因防止土壤侵蚀而减少的废弃土地面积, 最后应用机会成本法计算出减少废弃土地的经济价值, 计算公式如下:

$$V_{s2} = \sum P_i / (10^4 \times \rho \times h) \quad (12)$$

式中: V_{s2} 为减少废弃土地的经济价值(元/a); ρ 为土壤容重(t/m^3); h 为土壤厚度(m); P_i 为第 i 种生态系统单位面积的机会成本, 或者第 i 种生态系统的年均效益[元/($hm^2 \cdot a$)]。三江源区平均土壤容重为 $1.05 t/m^3$, 土壤厚度为 $0.45 m$ ^[33]。根据《2009 年青海统计年鉴》, 2008 年种植业、林业和牧业的机会成本分别为 6 695、44 和 164 元/ hm^2 (水体与湿地和荒漠生态系统的机会成本用牧业的机会成本替代), 由此可得到三江源区生态系统减少废弃不同类型土地(农田、森林、草地、水体与湿地以及荒漠)的单位价值分别为 1.42、0.01、0.03、0.03 和 0.03 元/t。

• 减少泥沙淤积的单位价值

土壤侵蚀流失的泥沙可造成水库库容、江河湖泊容积减少, 进一步可造成水库防洪、发电、灌溉和养鱼等功能的破坏及相应的经济损失。按照我国主要流域的泥沙运动规律, 土壤流失的泥沙有 24% 淤积在水库、江河、湖泊^[34]。根据土壤保持量和淤积量, 采用影子工程法来估算减少泥沙淤积的经济价值, 公式如下:

$$V_{s3} = 0.24 \times C/\rho$$

(13)

式中: V_{s3} 为减少泥沙淤积的单位价值(元/a); C 为单位库容造价(元/ m^3); ρ 为土壤容重(t/m^3)。2008年的单位库容造价为7.02元/ m^3 ,则减少泥沙淤积的单位价值为1.60元/ m^3 ;通过折现率和使用年限折算为年金现值^[24],则减少泥沙淤积的年单位价值为0.19元/($\text{m}^3 \cdot \text{a}$)。

2 结果与分析

2.1 水源涵养价值

2008年三江源区生态系统水源涵养总量约为 $1.29 \times 10^{11} \text{ m}^3$,总价值为 1.07×10^{11} 元,单位价值为 3.07×10^5 元/ km^2 。由图2可以看出,三江源区水源涵养空间分布差异显著,水源涵养能力从西到东呈现明显的增强趋势,东部的班玛县和久治县一带降水和热量相对充沛,植被覆盖状况良好,水源涵养能力较高,而治多县、曲麻莱县的中北部以及唐古拉乡的北部因水热条件限制,植被生长环境恶劣,水源涵养能力远不及东部和中部地区。

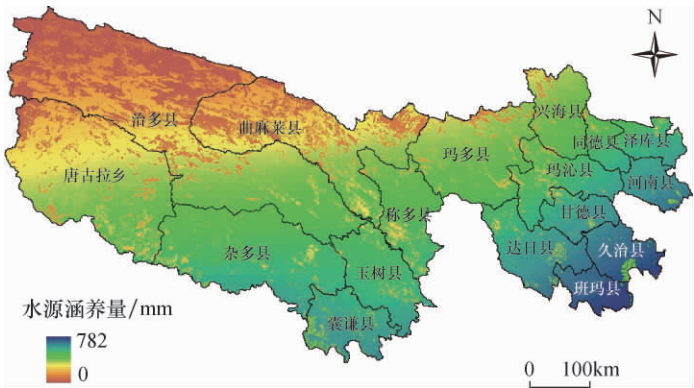


图2 2008年三江源区水源涵养量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of water conservation in the TRHR in 2008

以三江源区生态系统类型作为研究对象(表1),发现森林、草地、水体与湿地3种典型生态系统是三江源区水源涵养服务的主要贡献者,其中森林和草地的水源涵养能力较高,水源涵养单位价值分别为 4.73×10^5 元/ km^2 和 3.66×10^5 元/ km^2 ;农田和水体与湿地生态系统的水源涵养能力仅次于森林和草地,但由于面积比例并不大,两者水源涵养价值分别为 5.20×10^8 元和 4.65×10^9 元;荒漠和其他生态系统水源涵养总量分别达到 3.00×10^9 元和 3.95×10^9 元,但因水源涵养能力很弱,两者水源涵养单位价值仅为 7.92×10^4 元/ km^2 和 1.29×10^5 元/ km^2 。

表1 2008年三江源区生态系统的水源涵养经济价值

Table 1 Water conservation value of different ecosystem types in the TRHR in 2008

生态系统类型	面积/ km^2	水源涵养量/ 10^8 m^3	经济价值/ 10^8 元	单位价值/(10^4 元/ km^2)
农田	1 457.00	6.31	5.20	35.72
森林	11 924.00	68.44	56.43	47.33
草地	242 586.00	1 077.49	888.46	36.62
水体与湿地	18 139.00	56.36	46.47	25.62
其他	23 236.00	36.37	29.99	12.91
荒漠	49 903.00	47.91	39.50	7.92
共计	347 245.00	1 292.88	1 066.07	30.70

2.2 空气质量调节价值

三江源区森林吸收 SO_2 的能力为 205.95 kg/hm^2 , 2008 年三江源区森林生态系统的面积为 $11\,924.00 \text{ km}^2$, 由此推算出 2008 年三江源区森林吸收了 $2.46 \times 10^8 \text{ kg SO}_2$ 。植被吸收 SO_2 的价格按排污费征收标准 0.6 元/kg 估算, 则 2008 年三江源区森林吸收 SO_2 的经济价值为 $1.46 \times 10^8 \text{ 元}$ 。据前文所述, 三江源区草地吸收 SO_2 的单位经济价值为 $35.001\,3 \text{ NPP 元}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 在已知 2008 年三江源区草地净初级生产力的情况下, 可以推算出 2008 年三江源草地吸收 SO_2 的价值为 $8.09 \times 10^8 \text{ 元}$ 。

运用 ArcGIS 9.3 软件对三江源区森林吸收 SO_2 的价值分布图和草地吸收 SO_2 的价值分布图进行叠加, 得到 2008 年三江源区生态系统空气质量调节价值的空间分布图(图 3)。由图 3 可知, 三江源区生态系统空气质量调节能力较强且总经济价值较高的县主要集中在东部地区, 包括玛沁、班玛、甘德、久治、泽库和河南县, 其中以河南县调节能力最强, 单位价值为 $1.10 \times 10^4 \text{ 元/km}^2$, 玛沁县总经济价值最高($0.83 \times 10^8 \text{ 元}$); 由于森林面积积极少、草地生产力十分低下, 三江源中部及西部各县呈现出单位价值极低而总价值接近或低于平均水平的一致特征。

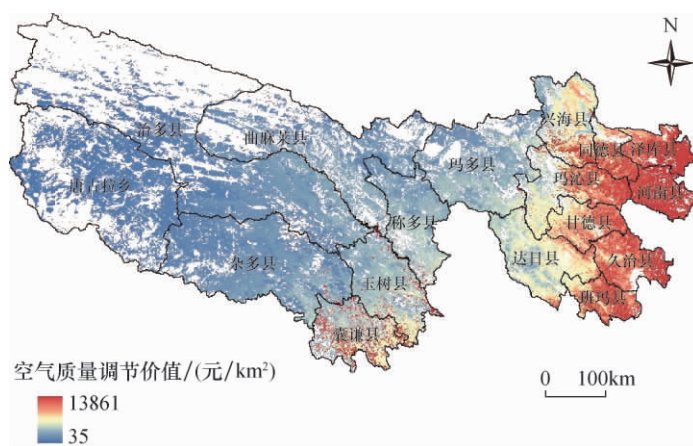


图 3 2008 年三江源区空气质量调节价值的空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of economic values of air quality regulation in the TRHR in 2008

2.3 气候调节价值

根据 1.3.3 节的方法对三江源区土壤呼吸量(R_h)进行估算, 得到 2008 年三江源区草地土壤呼吸量在 $15.83 \sim 20.61 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间, 森林土壤呼吸量为 $107.86 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。在此基础上, 结合三江源区植被净初级生产力(NPP)数据, 得到 2008 年三江源区草地和森林区域上的净生态系统生产力(NEP)(图 4), 发现三江源区东部地区固碳能力最强且差异明显, 固碳量超过 $121 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 最高地区可达 $341 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 以上; 中部地区固碳能力较为均衡, 固碳量在 $11 \sim 120 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 之间; 西部地区固碳能力最弱, 固碳量低于 $10 \text{ g C}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。按照气候调节服务的价值量评价方法, 生态系统的固碳价格采用 1.02 元/kg C 进行估算, 得到 2008 年三江源区气候调节价值为 $2.01 \times 10^{10} \text{ 元}$, 其中草地固碳 $18\,299.43 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 价值 $1.87 \times 10^{10} \text{ 元}$; 森林固碳 $1\,388.79 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$, 价值 $1.42 \times 10^9 \text{ 元}$ 。

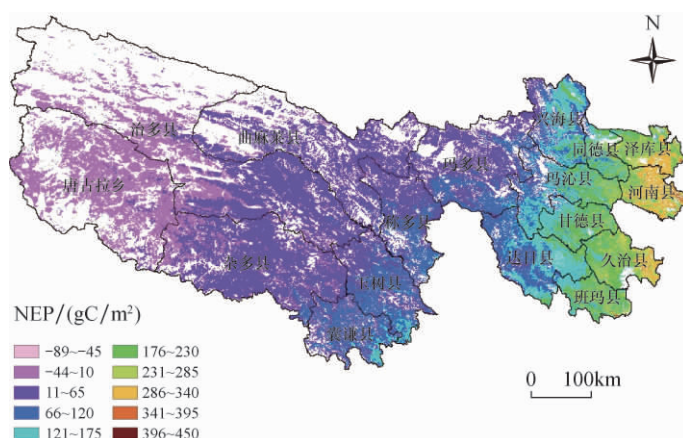


图4 2008年三江源区NEP空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of NEP in the TRHR in 2008

2.4 土壤保持价值

在计算 USLE 方程各参数值的基础上,运用公式(8)、(9)分别估算2008年三江源区潜在土壤侵蚀量和现实土壤侵蚀量,并根据公式(10)得到三江源区生态系统土壤保持量及空间分布图(图5)。2008年三江源区土壤保持量在空间分布上没有明显的梯度变化,但是东部和中南部地区的土壤保持量普遍高于西部及北部地区;治多县的西北部、曲麻莱县的北部、称多县的北部以及唐古拉乡和玛多县的大部分地区土壤保持量接近于0,其他地区土壤保持数量存在空间上的变异性。

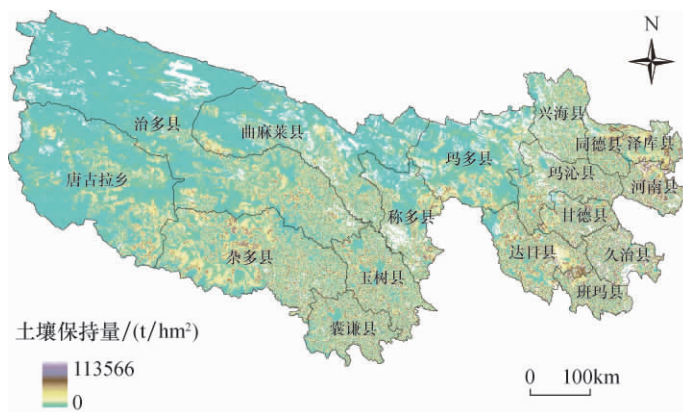


图5 2008年三江源区土壤保持量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of soil conservation in the TRHR in 2008

通过对不同生态系统的土壤保持能力及经济价值进行判断(表2),发现三江源区森林土壤保持能力最强,2008年三江源区森林面积比例仅为3.43%,但土壤保持量高达 4.17×10^8 t,价值 3.73×10^9 元;草地是三江源区的主要生态系统类型,2008年草地面积比例超过69%,在所有生态系统类型中,草地土壤保持总量最高,为 4.40×10^9 t,经济总价值为 3.95×10^{10} 元,占三江源区土壤保持总价值的85.73%;在所有生态系统类型中,荒漠的土壤保持能力最弱,主要原因在于植被覆盖状况较差,2008年三江源荒漠面积比例为14.37%,土壤保持价值却不到三江源区土壤保持总价值的4%。

表 2 2008 年三江源区生态系统的土壤保持经济价值
Table 2 Soil conservation value of different ecosystem types in 2008

生态系统类型	面积/km ²	土壤保持量/10 ⁸ t	经济价值/10 ⁸ 元	单位价值/(10 ⁴ 元/km ²)
农田	1 457. 00	0. 36	3. 71	25. 48
森林	11 924. 00	4. 17	37. 29	31. 27
草地	242 586. 00	43. 98	394. 57	16. 27
水体与湿地	18 139. 00	0. 98	8. 78	4. 84
荒漠	49 903. 00	1. 78	15. 93	3. 19
共计	—	51. 26	460. 27	—

3 结论与讨论

(1) 三江源区地理位置特殊,生态环境独特,在维系全国生态安全及区域可持续发展中发挥着不可替代的作用。本文结合三江源区生态系统的特征、结构和过程,参照千年生态系统评估框架,对三江源区生态系统服务进行了分类,在此基础上,利用经济学方法评价了三江源区生态系统的间接使用价值(包括水源涵养、空气质量调节、气候调节、土壤保持价值)。统计数据表明,2008 年三江源区农田、森林、草地、水体与湿地以及荒漠生态系统产生的间接使用价值共计 1.74×10^{11} 元。从价值构成来看,2008 年三江源区生态系统各项生态服务的价值量排序为:水源涵养 > 土壤保持 > 气候调节 > 空气质量调节,其中水源涵养价值为 1.07×10^{11} 元,占 61.38%,土壤保持价值为 4.60×10^{10} 元,占 26.50%,气候调节价值为 2.01×10^{10} 元,占 11.56%,空气质量调节价值为 9.56×10^8 元,占 0.55%。将评估得到的价值量分配到不同的生态系统类型,发现草地的间接使用价值高达 1.48×10^{11} 元,占三江源区总间接使用价值的 85.09%,由此反映出,草地是三江源区生态系统服务间接使用价值的主要贡献者。

(2) 自然生态系统为人类提供了调节、供给、支持和文化等多种生态产品和生态服务。上述评估结果反映了三江源区巨大的间接使用价值,尤其突出反映了该区作为水源发源地在水量平衡、调节区域水分循环和改善水文状况等方面做出的贡献。然而,由于产生间接使用价值的生态服务属于公共产品,因而其评估结果难以市场化。在现实的经济活动中,人们往往只注重生态系统的直接使用价值(即市场价值),而忽略了生态系统的间接使用价值,不断地对自然生态系统进行掠夺性、粗放性的开发和超负荷索取,损害了生态系统健康。就研究区域而言,草地是三江源区最主要的生态系统类型,持续超载和过度利用是导致该区生态质量下降的直接原因。测算三江源区生态系统服务价值特别是间接使用价值,一方面让人们清楚地认识三江源区在区域生命支持系统中所起的重要作用,另一方面为评价区域生态质量状况、科学管理与合理利用自然资源提供科学依据。

(3) 尽管国内外学者运用不同方法对不同尺度的不同生态系统服务类型进行了广泛探讨,但目前尚未建立一个统一的生态系统服务评价指标体系,没有一套完善的、规范的生态系统服务价值评估方法。受基础资料和估算方法所限,本文关于三江源区生态服务价值的评价内容比较粗略,评价结果可能偏低,例如空气质量调节评估只计算了森林和草地生态系统的经济价值,而未考虑其他生态系统对于该项服务的贡献;气候调节评估只计算了固碳经济价值,而未考虑生态系统改善周围环境小气候如增加湿度、调节温度的作用;水质净化、调控人类疾病、授粉等方面的价值还有待进一步分析和研究。另外,由于评估过程涉及了大量

的数据和参数,其结果可能存在一定的不确定性,因此,本文的研究结果只作为生态系统服务价值的经济参考。

参考文献(References):

- [1] 徐新良,刘纪远,邵全琴. 30 年来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化[J]. 地理研究,2008,27(4): 829-838. [XU Xin-liang, LIU Ji-yuan, SHAO Quan-qin, et al. The dynamic changes of ecosystem spatial pattern and structure in the Three-River Headwaters region in Qinghai Province during recent 30 years. *Geographical Research*, 2008, 27(4): 829-838.]
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: A Framework for Assessment. Report of the Conceptual Framework Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment [M]. Washington D C: Island Press, 2003.
- [3] 王晓学,李叙勇,莫菲,等. 基于元胞自动机的森林水源涵养量模型新方法——概念与理论框架[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5491-5500. [WANG Xiao-xue, LI Xu-yong, MO Fei, et al. Exploration of a new modeling method for forest water conservation based on cellular automata: Concept and theoretical framework. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(20): 5491-5500.]
- [4] 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: 以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 481-484. [XIAO Han, OUYANG Zhi-yun, ZHAO Jing-zhu, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan island. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 481-484.]
- [5] 聂忆黄. 基于地表能量平衡与 SCS 模型的祁连山水源涵养能力研究[J]. 地学前缘, 2010, 17(3): 269-275. [NIE Yi-huang. A study of the water conservation of Qilian Mountains based on surface energy balance and SCS model. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(3): 269-275.]
- [6] 鲁绍伟,毛富玲,靳芳,等. 中国森林生态系统水源涵养功能[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 223-226. [LU Shao-wei, MAO Fu-ling, JIN Fang, et al. The water resource conservation of forest ecosystem in China. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(4): 223-226.]
- [7] 郑淑华,王堃,赵萌莉,等. 北方农牧交错区草地生态系统服务间接价值的初步评估——以太仆寺旗和沽源县境内为例[J]. 草业科学, 2009, 26(9): 18-23. [ZHENG Shu-hua, WANG Kun, ZHAO Meng-li, et al. Primary evaluation of the indirect value on rangeland ecosystem services in Northern agro-pastoral ecotone: A case study in Taipusi banner and Guyuan league. *Pratacultural Science*, 2009, 26(9): 18-23.]
- [8] 余新晓,秦永胜,陈丽华,等. 北京山地森林生态系统服务功能及其价值初步研究[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 783-786. [YU Xin-xiao, QIN Yong-sheng, CHEN Li-hua, et al. The forest ecosystem services and their valuation of Beijing mountain areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(5): 783-786.]
- [9] 薛达元,包浩生,李文华. 长白山自然保护区森林生态系统间接经济价值评估[J]. 中国环境科学, 1999, 19(3): 247-252. [XUE Da-yuan, BAO Hao-sheng, LI Wen-hua. A valuation study on the indirect values of forest ecosystem in Changbaishan Mountain biosphere reserve of China. *China Environmental Science*, 1999, 19(3): 247-252.]
- [10] 鲁春霞,谢高地,肖玉,等. 青藏高原生态系统服务功能的价值评估[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2749-2755. [LU Chun-xia, XIE Gao-di, XIAO Yu, et al. Ecosystem diversity and economic valuation Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecological Sinica*, 2004, 24(12): 2749-2755.]
- [11] 张向辉,王清春,李瀚,等. 青海东峡林区森林生态系统服务功能及经济价值评估[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 85-87. [ZHANG Xiang-hui, WANG Qing-chun, LI Han, et al. Forest ecosystem services and their economic value in Dongxia forest region in Qinghai Province, China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(4): 85-87.]
- [12] 张彪,李文华,谢高地,等. 北京市森林生态系统的水源涵养功能[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5619-5624. [ZHANG Biao, LI Wen-hua, XIE Gao-di, et al. Characteristics of water conservation of forest ecosystem in Beijing. *Acta Ecological Sinica*, 2008, 28(11): 5619-5624.]
- [13] 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. [YU Xin-xiao, LU Shao-wei, JIN Fang, et al. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecological Sinica*, 2005, 25(8): 2096-2102.]

- [14] 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 Shi-mei, XIE Gao-di, ZHANG Cai-xia, et al. Flow process of water conservation service of forest ecosystem. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(4): 585–593.]
- [15] Goldstein J H, Caldarone G, Colvin C, et al. TEEB case: Integrating ecosystem services into land-use planning in Hawaii, USA [EB/OL]. <http://www.teebweb.org/>.
- [16] 周彬, 余新晓, 陈丽华. 基于 InVEST 模型的北京山区土壤侵蚀模拟[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 9–19. [ZHOU Bin, YU Xin-xiao, CHEN Li-hua, et al. Soil erosion simulation in mountain areas of Beijing based on InVEST model. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(6): 9–19.]
- [17] Bai Y, Zhuang C, Ouyang Z, et al. Spatial characteristics between biodiversity and ecosystem services in a human-dominated watershed [J]. *Ecological Complexity*, 2011(8): 177–183.
- [18] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37: 701–708.
- [19] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration—Guidelines For Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.
- [20] 尹云鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971~2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因[J]. 科学通报, 2010, 55(22): 2226–2234. [YIN Yun-he, WU Shao-hong, DAI Er-fu. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971–2008. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(22): 2226–2234.]
- [21] ZHOU Wen-zuo, LIU Gao-huan, PAN Jian-jun, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(1): 3–12.
- [22] 国家林业局. 森林生态系统服务功能评估规范[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [State Forestry Administration. Assessment of Forest Ecological Services in China. Beijing: China Forestry Publishing House, 2008.]
- [23] 张彪. 基于功能分区的森林生态系统服务评估及其在生态补偿中的应用——以北京市为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009. [ZHANG Biao. Evaluation of Forest Ecosystem Services Based on Function Zoning and Its Application in Ecological Compensation: A Case Study in Beijing. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Science, 2009.]
- [24] 王静, 尉元明, 孙旭映. 过牧对草地生态系统服务价值的影响——以甘肃省玛曲县为例[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 109–117. [WANG Jing, WEI Yuan-ming, SUN Xu-ying. Effects of Excessive grazing on grassland ecosystem services valuation. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1): 109–117.]
- [25] 张永利, 杨峰伟, 鲁绍伟. 青海省森林生态系统服务功能价值评估[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(11): 74–76. [ZHANG Yong-li, YANG Feng-wei, LU Shao-wei. Estimation on the economic values of the forest ecosystem service function in Qinghai Province. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35(11): 74–76.]
- [26] 姜立鹏, 覃志豪, 谢雯, 等. 中国草地生态系统服务功能价值遥感估算研究[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 161–170. [JIANG Li-peng, QIN Zhi-hao, XIE Wen. Estimation of grassland ecosystem services value of China using remote sensing data. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(2): 161–170.]
- [27] 赵亮, 古松, 杜明远, 等. 海北高寒草甸辐射能量的收支及植物生物量季节变化[J]. 草地学报, 2004, 12(1): 65–69. [ZHAO Liang, GU Song, DU Ming-yuan, et al. The seasonal variations of radiation budget and of community biomass in the Haibei alpine meadows. *Acta Agrestia Sinica*, 2004, 12(1): 65–69.]
- [28] 罗振堂, 郭连云, 谢卫东. 三江源区高寒草地牧草产量主要影响因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(6): 122–126. [LUO Zhen-tang, GUO Lian-yun, XIE Wei-dong. Major influencing factors for grass crop of high and cold meadow in Three River Source. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(6): 122–126.]
- [29] 裴志永, 周才平, 欧阳华, 等. 青藏高原高寒草原区域碳估测[J]. 地理研究, 2010, 29(1): 102–110. [PEI Zhi-yong, ZHOU Cai-ping, OUYANG Hua, et al. A carbon budget of alpine steppe area in the Tibetan Plateau. *Geographical Research*, 2010, 29(1): 102–110.]
- [30] 王琳. 青藏高原东部贡嘎山地生态系统碳过程研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005. [WANG Lin. Carbon Dynamics in the Alpine Ecosystem on the Eastern Tibetan Plateau. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Science, 2005.]
- [31] 黄麟, 邵全琴, 刘纪远. 近 30 年来青海省三江源区草地的土壤侵蚀时空分析[J]. 地球信息科学学报 2011, 13

- (1): 12–21. [HUANG Lin, SHAO Quan-qin, LIU Ji-yuan. Spatial-temporal analysis of soil erosion in grassland over the past three decades in Sanjiangyuan Region, Qinghai Province, China. *Journal of Geo-information Science*, 2011, 13(1): 12–21.]
- [32] 肖玉, 谢高地, 安凯. 青藏高原生态系统土壤保持功能及其价值[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2367–2378. [XIAO Yu, XIE Gao-di, AN Kai. The function and economic value of soil conservation of ecosystems in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2367–2378.]
- [33] 青海省农业资源区划办公室. 青海土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997. [Office of Agricultural Zoning of Qinghai Province. *Qinghai Soils*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 1997.]
- [35] 石益丹. 呼伦贝尔草地生态系统服务功能价值评价[D]. 天津: 农业部环境保护科研监测所, 2007. [SHI Yi-dan. Evaluation of the Services of Hulunbeier Grassland. Tianjin: Agro-Environmental Protection Institute of Ministry of Agriculture, 2007.]

The Indirect Value of Ecosystem Services in the Three-River Headwaters Region

LAI Min^{1,2}, WU Shao-hong¹, DAI Er-fu¹, YIN Yun-he¹, ZHAO Dong-sheng¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: The Three-River Headwaters Region (TRHR) of China is within the hinterland of the Tibetan Plateau. As the source of the Yangtze, Yellow (Huanghe) and Lancang (Mekong) rivers, the TRHR is of key importance to the ecological security of China and Southeast Asia. This paper quantified the indirect value of ecosystem services in the TRHR by using the replacement cost approach, opportunity cost approach and shadow project approach. The results showed that the indirect value of ecosystem services was some 1.74×10^{11} yuan in 2008, which included water conservation of 1.07×10^{11} yuan accounting for 61.38%, soil conservation of 4.60×10^{10} yuan accounting for 26.50%, carbon sequestration of 2.01×10^{10} yuan accounting for 11.56%, and air quality regulation of 9.56×10^8 yuan accounting for 0.55%. The results highlighted the role of the TRHR as the important birthplace of water sources and its outstanding contribution to water balance, water cycle regulation and regional hydrology improvement. Besides, the results offered good information to policy makers on regional sustainable management and payment for ecosystem service policies.

Key words: ecosystem services; indirect value; the Three-River Headwaters Region