湖州市生态资产遥感测量及其在社会经济中的应用

于德永 潘耀忠* 刘鑫 王艳艳 朱文泉

(北京师范大学资源学院 北京 100875)

摘要 该文利用高空间分辨率 Landsat 7 TM 卫星影像及中空间分辨率 MODIS 卫星影像获取生态系统类型、质量状况等参数,计算湖州市各类生态系统的净第一性生产力(Net primary productivity, *NPP*)结合地理属性数据及统计数据计算出各类生态系统的生态资产,并应用于当地社会、经济活动分析。结果表明:1)4年间湖州市林地、水田、灌丛、裸地4类占有明显优势,占全市的面积比例平均达87%以上,草地、水域/湿地、旱地3类占全市面积的13%左右;2)湖州市生态资产平均为203.33亿元·a⁻¹,森林对生态资产的平均贡献率为73.22%,森林及耕地在全市生态资产构成中占主要地位,各县(区)的生态资产呈波动递减,平均生态资产依次排列为:安吉县(91.76亿元·a⁻¹)>长兴县(41.33亿元·a⁻¹)>吴兴区(29.31亿元·a⁻¹)>德清县(28.27亿元·a⁻¹)>南浔区(12.66亿元·a⁻¹);3)4年中生态资产在国民经济中的比重由大到小排列均为:安吉县>长兴县>德清县>市辖区,但各县(区)生态资产占GDP的比重均逐年下降(市辖区仅在2002年略高于2001年,但4年中总体趋势也在下降);4)年中人均及地均生态资产均按安吉县>德清县>长兴县>市辖区的顺序排列。各县(区)人均及地均生态资产与国民生产总值的变化均呈相反趋势,即经济发展相对较快的地方,其人均及地均占有的生态资产相对低,同时其人均及地均污染水平高,这些都反映出目前当地经济增长特点,即经济高速发展的同时也带来了较为严重的环境问题。

关键词 生态资产 遥感 净第一性生产力 湖州市 社会经济因素

ECOLOGICAL CAPITAL MEASUREMENT BY REMOTELY SENSED DATA FOR HUZHOU AND ITS SOCIO-ECONOMIC APPLICATION

YU De-Yong PAN Yao-Zhong* LIU Xin WANG Yan-Yan and ZHU Wen-Quan

(College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract The paper used TM and MODIS data to acquire ecosystem types and quality condition parameters. The process involved the following steps: 1) TM images were used to classify the land use/land cover of Huzhou; 2) A method was developed to decompose MODIS *NDVI* pixels (500 m × 500 m) into the same resolution scale of classified TM image, and the observed weather data were combined to compute the *NPP* (Net primary productivity) of different ecosystems; 3) According to *NPP* and statistical data, ecological capital of different ecosystems was computed and applied into local socio-economic analysis.

The results showed that 1) the area of woodland, paddy field, shrub and bare land was about 87% of the total area of Huzhou on average in the past four years, and the proportion of grassland, water/wetland and dry land was about 13%. The area of woodland has been continuously decreasing. Bare land, shrub land, grassland and dry land have been steadily increasing, and the paddy land has been increasing in fluctuation. Water/wetland has been decreasing in fluctuation. 2) The average ecological capital of Huzhou in the past four years was 203.33 million RMB·a⁻¹, in which woodland made the main contribution at a rate of 73.22%. Ecological capital of different counties (districts) was ordered as: Anji County (91.76 million RMB·a⁻¹) > Changxing County (41.33 million RMB·a⁻¹) > Wuxing District (29.31 million RMB·a⁻¹) > Deqing County (28.27 million RMB·a⁻¹) > Nanxun District (12.66 million RMB·a⁻¹). 3) The percentages of ecological capital to *GDP* from 2001 to 2004 were ranked as Anji County > Changxing County > Deqing County > Municipal Districts, and such percentages showed a decreasing trend in general (only the percentage in Municipal Districts in 2002 was slightly higher than that in 2001, but it has generally been decreasing in the four years). Ecological capital per capita and per area during the four years were ranked as Anji County > Deqing County > Changxing County > Municipal Districts, and it showed a contrary trend of change compared to that of *GDP*. That is, the regions with higher-speed economic development usually had relatively fewer ecological re-

sources per capita and per area, and relatively low proportion of ecological capital in *GDP*, but the pollution level per capita and per area was relatively high. The regions with relatively lower-speed economic development were just contrary to that of the higher ones. All these observations reflected a pervasive problem of the current mode of economic development in Huzhou, that is, higher-speed development of economics has caused serious environmental problems.

Key words Ecological capital, Remote Sensing, Net primary productivity, Huzhou, Socio-economic factors

各类生态系统不仅提供人类生存所必需的物质产品,同时在生态环境调节中也发挥着重要作用。以生态系统服务功能价值和自然资源价值为核心的生态资产测量与价值评估引起了广泛关注,生态资源也逐渐开始被人们认为是一种国家资产,即生态资产(潘耀忠等,2004),生态资产赋予了生态系统以经济学属性,其价值性、可分性、替代性、可交易性、时空性、权利性等属性已经日益受到重视(Pearce & Atkinson, 1993)。许多学者积极寻求新的经济学理论和方法来计量生态环境及生物资源(黄兴文和陈百明, 1999; 陈仲新和张新时, 2000; 潘耀忠等, 2004; Pearce & Atkinson, 1993; Vitousek *et al.*, 1986; Costanza *et al.*, 1997; Dixon *et al.*, 1998; Wackernagel *et al.*, 1999; Potschin & Haines-Young, 2003), 这些研究试图提高对生态环境的认识水平, 探讨治理与恢复生态环境的途径和方法, 甚至有些学者设法将生态资产的核算纳入到国民经济核算体系之中(Costanza *et al.*, 1997; David, 1997; Daily *et al.*, 2000)。这些研究方法基本可以分为两类, 一类是基于单位面积价值对总量的静态估算, 这类方法无法全面考虑生态系统类型、质量状况的空间和时间差异, 因此估算结果较粗略, 如陈仲新(2000)、欧阳志云等(1999)、Bolund 和 Hunhammar(1999)、Bjorklund 等(1999)、Holmund 和 Hammer(1999)等的研究; 另一类是在考虑生态系统类型、质量状况差异的基础上, 建立生态资产测量模型的核算方法, 如潘耀忠等(2004)利用遥感技术进行中国生态系统生态资产的遥感定量测量, 这类方法具有一定的优越性, 但生态系统参数的选择和获取的精度成为这类方法的关键和难点。以上研究侧重于生态资产的时空动态变化, 并且研究地域尺度较大(省、国家甚至全球), 较少研究中小地理尺度上生态资产与气候、环境、人类经济活动相互之间的关系, 以及如何在现实中将生态资产用于指导区域产业调整与经济布局。本文基于遥感技术获取生态系统参数(如净第一性生产力、植被覆盖度等), 综合考虑生态系统类型、质量、空间分布差异、地形因子等的影响, 探讨中小尺度区域范围内生态资产变化及与人类活动的关系, 并将研究结果应用于社

会经济领域, 为区域生态环境评价、产业结构调整及经济模式的转变提供借鉴。

1 研究地区

湖州市地处浙北, 太湖之滨南岸, 地理坐标为 $119^{\circ}14' \sim 120^{\circ}29' E$, $30^{\circ}22' \sim 31^{\circ}11' N$, 下辖安吉县、长兴县、德清县、吴兴区和南浔区, 处于长江三角洲 15 个城市的中心位置, 经济发达。湖州市的地势总特点是西南向东北倾斜, 西南高峻, 东北低平, 过渡明显, 地貌类型基本可分为平原、丘陵、山地 3 大类, 所占面积的比例大致为 5:3:2, 平原主要位于东部, 丘陵主要位于中部, 山地主要位于西部。湖州市气候特点是: 季风显著、四季分明、雨热同季、降水丰富、日照较多、气候温和、空气湿润; 境内水系发达, 水资源丰富。湖州市由于海拔不高, 加上长期频繁的人为影响, 因而植被的垂直分布和地域差异不明显, 且呈高度的次生状态, 地带性典型植被为常绿、落叶阔叶混交林和针阔混交林、竹林。

2 数据处理与研究方法

2.1 数据及处理

图像数据 2001~2004 年湖州市每年 11 个时间序列、空间分辨率为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的 MODIS *NDVI* 影像数据, 每个时间序列的 *NDVI* 合成日期见表 1; 相应月份的平均温度、降水、辐射量栅格数据(根据气象站点观测数据空间插值而获得); 4 期空间分辨率为 30 m 的 Landsat 7 TM 影像, 其日期分别为 2001 年 5 月 31 日、2002 年 8 月 22 日、2003 年 7 月 24 日和 2004 年 7 月 26 日; 中国科学院南京土壤研究所编制的 1:100 万矢量化土壤属性数据库。TM 影像通过监督分类得到土地利用/覆盖类型, 共分为林地、草地、灌丛、水田、旱地、裸地、水域(湿地) 7 类。由于 MODIS *NDVI* 影像数据的分辨率为 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$, 这对于湖州市的面积范围来说过于粗略, 因此本文采用线性分解的方法, 借助 TM 分类图像对 MODIS *NDVI* 数据进行混合象元分解, 具体为: 将湖州市土地覆盖类型合并为 5 类, 分别为林地、灌木、草地、耕地(包括旱地、水田)和裸地(包括水域), 理

表 1 MODIS *NDVI* 数据时间序列与日历对照表
Table 1 The calendar days and corresponding time serials of each period of MODIS *NDVI* data

时间序列 Time serials	日序数 Calendar serials	日历 Calendar days (Month . day)
1	001 ~ 032	12.27 ~ 02.01
2	033 ~ 064	02.02 ~ 03.05
3	065 ~ 096	03.06 ~ 04.06
4	097 ~ 128	04.07 ~ 05.08
5	129 ~ 160	05.09 ~ 06.09
6	161 ~ 192	06.10 ~ 07.11
7	193 ~ 224	07.12 ~ 08.12
8	225 ~ 256	08.13 ~ 09.13
9	257 ~ 288	09.14 ~ 10.15
10	289 ~ 320	10.16 ~ 11.16
11	321 ~ 360	11.17 ~ 12.26

论上,裸地和水域的 *NDVI* 值应该为 0,因此设裸地的 *NDVI* 值为 0,其它 4 类的 *NDVI* 值的求解则需要 4 个方程,即 4 个 MODIS 象元求解,其中, $NDVI_m$ 为第 m 个 MODIS 象元的 *NDVI* 值, $NDVI_{mn}$ 表示第 m 个象元中的第 n 类植被的 *NDVI* 值, $P_{mn}\%$ 表示第 m 个象元中第 n 类植被所占的面积百分比。每 4 个象元组成一个四元一次方程组,解得这 4 个象元中各个类型的 *NDVI* 值,然后以 2×2 为窗口,依次推移,重叠的部分是以后解得的值代替之前解得的值。整个 *NDVI* 分解过程利用 IDI(交互式数据语言)进行编程来实现,最终分解验证精度提高了 89% 以上,使其分辨率提高到了 TM 即 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的空间尺度上。

统计数据:污染物排放、国民生产总值、人口(这些数据主要取自湖州市统计年鉴)以及各种社会经济数据。如何根据环境染污物排放计算环境污染损失价值作者将另撰文论述。

2.2 基于遥感手段的区域生态资产评估指标

从宏观生态学角度,基于遥感手段的区域生态资产核算的特点,考虑数据获取的可行性和可靠性,以及我国在这方面的研究情况(欧阳志云等,1999;黄兴文和陈百明,1999),最终确定基于遥感技术的生态资产核算,如图 1 所示。与以往同类研究(史培军等,2002;潘耀忠等,2004)相比,本研究改进及创新之处在于:计算植被类型最大光能利用率时根据各植被类型实测净第一性生产力(Net primary productivity, *NPP*)数据进行模拟获得,而不是对各种植被类型在理想条件下的最大光能利用率 $\epsilon_{\max}$ 均取值为 $0.318\text{ g C} \cdot \text{MJ}^{-1}$ (Potter *et al.*, 1993;Field *et al.*,

1998),另外在计算水土保持价值时考虑了地形对生态系统水土保持能力的影响。

生态资产各项价值的计算分别用影子工程法、市场价值法、机会成本法、替代价值法等来计算,生态资产总量(V)可以表示为:

$$V = \sum_{c=1}^n V_c \tag{1}$$

式中: $C = 1, 2, \dots, n$,表示生态系统的类型; V_c 表示第 C 类生态系统的生态资产。

$$V_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_{ci} \times S_{ij} \tag{2}$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$,表示第 C 生态系统的第 i 种生态功能; V_{ci} 表示第 C 生态系统的第 i 种生态功能类型的单位面积价值; $j = 1, 2, \dots, m$ 表示一定区域内 V_{ci} 在空间上分布的斑块数, S_{ij} 表示各个斑块的面积大小。

2.3 生态资产各项价值的核算方法

2.3.1 生产有机物质的价值

净初级生产力是反映有机物质生产的一个重要指标,它是指植物在某一时间段(如一年)所生产的有机物质质量。

$$V_n = \sum V_n(x); V_n(x) = NPP(x) \times T(x) \tag{3}$$

式中: V_n 为区域每年生产有机物质的价值(元); $V_n(x)$ 为象元 x 处每年生产的有机物质价值(元); $NPP(x)$ 为象元 x 处每年生产的有机物质(g C); $T(x)$ 为象元 x 处有机物质的单位质量价值(在此取值为 $2.3718 \times 10^{-4} \text{ 元} \cdot \text{g}^{-1} \text{ C}$)。

本文基于改进的 CASA 模型计算各类植被生态系统的 *NPP*,其公式表述为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t); \epsilon(x, t) = f_1(x, t) \cdot f_2(x, t) \cdot f_w(x, t) \cdot \epsilon_{\max} \tag{4}$$

式中: $NPP(x, t)$ 表示空间位置 x 上的植被在 t 时间内的净第一性生产力; $APAR(x, t)$ 表示空间位置 x 上的植被在 t 时间内所吸收的光合有效辐射(Absorbed photosynthetically active radiation, *APAR*); $\epsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光利用率; $f_1(x, t)$, $f_2(x, t)$ 及 $f_w(x, t)$ 分别是气温和水分胁迫对最大光利用率 $\epsilon_{\max}$ 的影响。Potter 等(1993)和 Field 等(1998)基于 CASA 模型利用遥感手段植被最大光能利用率为 $0.389\text{ g C} \cdot \text{MJ}^{-1}$,显然由于植被类型、生境条件等方面的差异,植被的最大光能利用率不可能是相同的。本文利用不同植被类型的实测 *NPP* 数据,根据实测值与模拟值误差最小的原理得到不同植被类型的 $\epsilon_{\max}$ 。某种植被类型的 *NPP* 实测值与

图 1 基于遥感技术的生态资产核算体系

Fig.1 The calculating system of ecological capital based on remotely sensed data

模拟值的误差可用函数表示为：

$$E(x) = \sum_i (m_i - n_i x)^2 \quad x \in [l, u] \quad (5)$$

式中： i 表示该植被类型的样本数， j 为该植被类型的最大样本数， m 为该植被类型的 NPP 实测数据， n 为 APAR、温度和水胁迫因子的乘积， x 为需模拟的某一植被类型的最大光能利用率， l 和 u 为各植被类型最大光能利用率的极值。上式展开后为：

$$E(x) = \sum_i n_i^2 x^2 - 2 \sum_i m_i n_i x + \sum_i m_i^2 \quad x \in [l, u] \quad (6)$$

该式为一元二次方程，开口向上，在区间 $[l, u]$

必存在最小值，因而模拟得到各植被类型的最大光能利用率。

2.3.2 固定 CO₂ 的价值

在评估生态系统对 CO₂ 的吸收与固定作用时，以生态系统有机物质生产为基础，根据光合作用和呼吸作用的反应方程式推算，每形成 1 g 干物质，需要 1.62 g CO₂。

$$V_r = \sum V_r(x); V_r(x) = 1.62 \times NPP(x) \times R \quad (7)$$

式中： V_r 表示区域每年吸收 CO₂ 的价值（元）； $V_r(x)$ 表示象元 x 处每年吸收 CO₂ 的价值（元）； $NPP(x)$

Building estimate model of Net Primary productivity
NPP 估算模型的建立

Value on ecological capital
生态资产核算

表示象元 x 处每年生产的有机物质(g C); R 表示碳税法中 CO_2 的单位质量价值(在此取值为 3.36×10^{-4} 元 $\cdot$ g CO_2)。

2.3.3 释放 O_2 的价值

在评估生态系统释放 O_2 的价值时 ,以生态系统有机物质生产为基础 ,根据光合作用和呼吸作用的反应方程式推算 ,每形成 1 g 干物质 ,可以释放 1.2 g O_2 。

$$V = \sum V(x); V(x) = 1.2 \times NPP(x) \times R \quad (8)$$

式中 : V 表示区域释放 O_2 的价值(元); $V(x)$ 表示象元 x 处每年释放 O_2 的价值(元); $NPP(x)$ 表示象元 x 处每年生产的有机物质(g C); R 表示工业制氧价格(在此取值为 4.0×10^{-4} 元 $\cdot$ g $^{-1}$ O_2)。

2.3.4 N、P、K 等营养物质循环的价值

在评估生态系统营养物质循环的价值时 ,以生态系统的生物量和净初级生产力为基础 ,根据各生态系统中 N、P、K 的质量分配率来计算。

$$V_a = V_{na} + V_{pa} + V_{ka} \quad (9)$$

式中 : V_a 表示区域每年吸收的营养物质价值(元); V_{na} 表示区域每年吸收的氮元素价值(元); V_{pa} 表示区域每年吸收的磷元素价值(元); V_{ka} 表示区域每年吸收的钾元素价值(元)。其中

$$V_{na} = \sum V_{na}(x); V_{na}(x) = NPP(x) \times r_1 \times r_2 \times M \quad (10)$$

式中 : $V_{na}(x)$ 表示象元 x 处每年吸收的氮元素价值(元); $NPP(x)$ 表示象元 x 处每年生产的有机物质(g C); r_1 表示不同生态系统中氮元素在有机物质中的分配率(g N/g C); r_2 表示纯氮折算成化肥的比例(为 79/14); M 表示氮肥的平均价格(400 元 $\cdot$ t $^{-1}$); V_{na} 表示区域每年吸收的氮元素价值(元)。吸收 P、K 价值计算与该式类似 ,计算吸收 P 价值时 r_2 、 M 分别取值为 506/62 和 350 元 $\cdot$ t $^{-1}$,计算吸收 K 价值

时 r_2 、 M 分别取值为 174/78 和 300 元 $\cdot$ t $^{-1}$ 。不同植被类型 r_1 取值见表 2。

2.3.5 涵养水源的价值

$$V = \sum V(x); V(x) = Q(x) \times p \times S_p \quad (11)$$

式中 : V 表示区域涵养水源的价值(元); $V(x)$ 表示象元 x 处每年涵养水源的价值(元); $Q(x)$ 表示象元 x 处每年单位面积的降水贮水量(m $^3 \cdot$ m $^{-2}$); p 表示每建设 1 m 3 库容的成本花费(0.67 元 $\cdot$ m $^{-3}$); S_p 表示像元面积(m 2)。

2.3.6 水土保持价值

从保护土壤肥力、减少土地废弃和减轻泥沙淤积 3 个方面来评价水土保持的价值。

$$V(x) = V_1(x) + V_2(x) + V_3(x) \quad (12)$$

式中 : $V(x)$ 表示在象元 x 处每年的水土保持价值(元); $V_1(x)$ 表示在象元 x 处每年保护土壤肥力的价值(元); $V_2(x)$ 表示在象元 x 处每年减少土地废弃损失的价值(元); $V_3(x)$ 表示在象元 x 处每年减轻泥沙淤积损失的价值(元)。水土保持价值计算方法作者将另撰文详细讨论。

3 研究结果

3.1 2001 ~ 2004 年湖州市各县(区)土地利用/覆盖变化格局分析

根据表 3 ,吴兴区裸地、水田、灌丛面积较其它地物类型占明显优势 ,并且 4 年间面积不断增加 ,林地面积持续减少 ,这 4 种类型占全区面积的 86% 以上 ,其它地物类型面积呈波动状态 ,除水域外变化幅度不大 ,水域面积在 2003 ~ 2004 年下降相对较快 ;南浔区水田、裸地、草地、水域面积依次较其它地物类型占有明显优势(面积比例达 97% 以上) ,水域面积下降相对较快 ,林地面积持续减少 ,裸地面积持续增加 ,其它地物类型面积呈波动变化 ,变化幅度较小 ,森林仅占全区面积的 1% 左右 ;安吉县林地、灌

表 2 各生态系统营养物质分配率(g $\cdot$ g $^{-1}$)
Table 2 Assigned rate of N、P、K of the ecosystems(g $\cdot$ g $^{-1}$)

项目 Item	林地 Woodland	灌丛 Shrub land	草地 Grassland	水田 Paddy field	旱地 Dry land	裸地 Bare land	水域/湿地 Water/Wetland
氮 N	0.004 180	0.013 294	0.013 289	0.013 288	0.013 203	0.013 273	0.004 204
磷 P	0.000 890	0.000 092	0.000 093	0.000 090	0.000 087	0.000 091	0.000 901
钾 K	0.001 810	0.008 904	0.008 908	0.008 915	0.008 874	0.008 909	0.001 802

各生态系统营养物质分配率根据湖州市土壤统计资料及实验获得 Assigned rate of nutrition matter of different ecosystems by statistical data and experimental means

表 3 2001 ~ 2004 年湖州市各县(级) 土地利用/覆盖变化(公顷)
Table 3 Land use/land cover of the counties(or districts) in Houzhou from 2001 to 2004(hm²)

地区 Region	年份 Year	草地 Grassland	灌丛 Shrub land	裸地 Bare land	旱地 Dry field	水田 Paddy field	水域/湿地 Water/Wetland	林地 Woodland
吴兴 Wuxing	2001	4 952.79	17 565.42	22 269.38	990.80	20 335.34	6 237.54	13 648.74
	2002	4 873.65	17 960.28	22 727.22	979.22	20 098.95	6 247.29	13 113.40
	2003	4 923.84	18 155.42	23 373.14	1 317.83	21 588.58	3 602.05	13 039.15
	2004	4 629.29	18 220.35	23 551.84	1 288.87	21 722.22	3 632.90	12 954.52
南浔 Nanxun	2001	12 716.42	32.56	14 749.10	1 224.23	34 795.04	6 300.88	781.78
	2002	12 519.10	43.66	15 015.62	1 112.12	34 653.78	6 518.66	737.07
	2003	12 752.94	67.16	15 598.44	1 154.89	36 093.09	4 488.79	444.68
	2004	12 554.63	58.60	15 609.23	1 282.26	35 783.66	5 016.26	295.36
安吉 Anji	2001	6 394.90	43 284.16	11 820.60	2 629.89	18 981.35	3 216.26	102 272.84
	2002	6 152.74	43 939.59	13 651.15	2 733.06	20 721.07	3 211.02	98 191.37
	2003	6 189.10	44 012.51	18 574.41	2 769.79	21 141.48	2 703.05	93 209.67
	2004	6 148.93	46 602.97	19 260.91	2 787.44	20 333.09	2 729.62	90 737.04
德清 Deqing	2001	1 364.79	12 997.16	17 388.21	2 126.63	19 365.75	10 686.36	29 671.10
	2002	1 408.51	13 699.42	17 610.40	2 358.11	19 957.52	10 697.55	27 868.49
	2003	1 217.59	13 779.34	19 707.15	2 155.00	20 780.32	11 508.60	24 451.99
	2004	1 134.96	14 186.26	19 607.65	2 139.71	20 453.01	11 842.23	24 236.18
长兴 Changxing	2001	6 924.70	27 991.56	28 486.30	4 424.79	37 435.48	3 093.88	34 643.29
	2002	6 753.45	28 892.15	29 994.50	4 491.07	38 100.22	3 128.95	31 639.67
	2003	6 413.92	30 226.34	30 117.03	4 659.87	38 633.37	1 983.02	30 966.46
	2004	6 798.74	30 361.07	30 466.65	4 740.41	39 052.20	1 909.71	29 671.23
湖州 Huzhou	2001	32 353.60	101 870.86	94 713.59	11 396.34	130 912.95	29 534.92	181 017.74
	2002	31 707.45	104 535.09	98 998.89	11 673.57	133 531.53	29 803.47	171 550.00
	2003	314 97.39	106 240.76	107 370.16	12 057.38	138 236.84	24 285.51	162 111.95
	2004	31 266.54	109 429.25	108 496.29	12 238.70	137 344.17	25 130.72	157 894.33

丛、水田、裸地面积较其它地物类型占有明显优势(面积比例在 84% 以上),林地持续减少,灌丛、裸地、旱地面积持续增加,水田及其它地物类型呈波动变化状态;德清县林地、水田、裸地、灌丛、水域较其它地物类型占有明显优势(面积比例达 96% 以上),林地面积持续减少,水田、裸地、灌丛面积持续增加,其它地物呈波动变化,其中草地和旱地面积在全县的面积构成中所占比重很小(二者合计面积比例为 4% 左右)并且变化幅度较小;南浔区水田、林地、裸地、灌丛面积较其它地物类型占有明显优势(合计面积比例达 90% 左右),林地面积持续减少,水田、裸地灌丛面积持续增加,草地、旱地、水域 3 类占全市面积的 10% 左右,草地、水域面积呈波动变化,旱地面积略有增加;湖州市 4 年间林地、水田、灌丛、裸地 4 类地物较其它类型占有优势(合计面积比例达 87% 以上),其中灌丛、裸地持续增加,林地持续减少,水田呈波动增加状态,草地、水域、旱地 3 类占全市面积的 13% 左右,草地、旱地持续增加,水域面积波动减少。

根据上述分析得知 4 年间湖州市各县(区)林

地面积持续减少,裸地及灌丛均呈明显增加的趋势(其中南浔区灌丛面积呈波动增加,但其面积仅占全区面积的 0.046% ~ 0.095% 左右)。森林覆盖率最高的为安吉县(74.53%),其它县(区)依次为:德清县(42.97%),长兴县(42.73% 左右),吴兴区(36.24%),南浔区(0.87%),安吉县、长兴县、吴兴区森林面积占全市森林的 85% 以上。南浔区、长兴县、吴兴区耕地面积比例较其它县(区)高,分别为 51.73% 29.99% ,25.67%。林地持续减少和裸地持续增加的原因主要是由于当地经济的快速发展(4 年间 GDP 总量增长了近 156%)而带来的建设用地的快速增长和收获林产品种类和数量的增加,此外由于矿山开采的破坏大量林业用地转变为裸地。湖州市水域/湿地面积显著减少的主要原因是围水造田及建设用地的侵占。耕地(旱地和水田)面积虽略有增加,但从 TM 影像上看其空间位置分布也发生了一定变化,主要原因为部分耕地用于建设用地,同时部分水域/湿地、草地、灌丛开垦为耕地。

3.2 2001 ~ 2004 年湖州市各县(区)生态资产核算结果

湖州市各县(区)生态资产见表4。4年间湖州市及各县(区)的生态资产呈波动递减,2002年生态资产为最高,除长兴县外,其它县(区)2003年的生态资产为最低。湖州市、吴兴区、南浔区、安吉县、德清县2002年的生态资产高于2001年,2004年高于2003年,而长兴县2004年的生态资产低于2003年,因此长兴县生态环境恶化速度要高于其它县(区),从遥感监测土地利用/覆盖数据及现实统计数据来看,这与长兴县近年来大力开采石料,采伐森林,电厂及水泥厂向环境中排放的废物较多有直接关系。

各县(区)4年平均生态资产由高到低依次排列为:安吉县($91.76 \text{ 亿元} \cdot \text{a}^{-1}$),长兴县($41.33 \text{ 亿元} \cdot \text{a}^{-1}$),吴兴区($29.31 \text{ 亿元} \cdot \text{a}^{-1}$),德清县($28.27 \text{ 亿元} \cdot \text{a}^{-1}$),南浔区($12.66 \text{ 亿元} \cdot \text{a}^{-1}$),因此各县(区)生态效益也按此顺序由高到低排列,其中安吉县的生态环境最好,湖州市4年平均生态资产为 $203.33 \text{ 亿元} \cdot \text{a}^{-1}$ 。4年间各县(区)生态资产趋势线均呈下降趋势为:长兴县(斜率为 $-30\,252$)>吴兴区(斜率为 $-22\,897$)>德清县(斜率为 $-19\,929$)>安吉县(斜率为 $-17\,807$)>南浔区(斜率为 $-5\,410.3$)。

安吉县森林对其生态资产的贡献率最高,4年平均高达 87.5% ,德清为 72.05% ,吴兴区为 71.82% ,长兴县为 63.78% ,南浔区森林资源很少,森林对全区生态资产的贡献率也最小,比例为 6.15% 。4年间湖州市森林对生态资产的平均贡献率为 73.22% 。4年间各县(区)耕地对其生态资产的平均贡献率为:南浔区 71.44% ,长兴县 27.12% ,德清 20.7% ,吴兴区 20.16% ,安吉县 7.2% ,全市为 19% 。因此对于全市各县(区)而言,森林及耕地是生态资产的主要贡献者,全市其它各类生态系统对生态资产的平均贡献率仅有 7.79% 。

造成湖州市各县(区)生态资产分布格局的原因主要有两方面:一是气候因素,气候变化会影响生态系统的质量状况及生产能力,尤其是对环境依赖性较强的生态系统,如一年生草本植物,它们受温度和降水的影响相当明显,另外温度、光照、水分等气候因子的变化对生态系统的生产力影响也很大;二是人类因素,人类活动主要影响生态系统的质量和面积,从而使各类生态系统的生态资产增加或减小,例如对森林的采伐,使单位面积森林生产力减弱,自然

表4 2001~2004年湖州市各县(区)生态资产(万元)
Table 4 Ecological capital(10⁴ RMB) of countries(or districts) in Huzhou from 2001 to 2004

地区 Region	年份 Year	草地 Grassland	灌丛 Shrub land	裸地 Bare land	旱地 Dry field	水田 Paddy field	林地 Woodland	水域/湿地 Water/Wetland	生态资产合计 Total
吴兴 Wuxing	2001	13 392.08	121 942.24	9 737.50	1 492.37	51 973.78	106 903.16	2 893.53	308 334.66
	2002	13 801.49	136 974.12	11 333.70	1 755.59	62 699.09	118 931.82	3 264.88	348 760.69
	2003	8 490.24	92 785.83	8 723.36	2 280.74	53 204.97	83 310.13	1 823.51	250 618.78
	2004	8 968.55	96 928.87	9 905.51	2 407.48	57 638.57	86 863.11	2 014.44	264 726.53
南浔 Nanxun	2001	22 287.38	1 779.63	4 627.17	1 248.08	87 334.51	6 098.63	2 944.33	126 319.73
	2002	24 086.29	1 891.77	5 695.31	1 098.67	104 820.06	6 436.39	3 430.72	147 459.21
	2003	18 221.01	1 829.80	3 962.98	1 006.61	79 864.74	5 960.67	2 104.74	112 950.55
	2004	19 073.51	1 727.60	4 765.74	1 173.93	85 313.80	5 229.36	2 504.19	119 788.13
安吉 Anji	2001	32 702.31	233 125.80	9 943.81	5 597.03	44 080.22	599 742.83	1 646.73	926 838.73
	2002	34 587.26	265 964.67	11 038.69	6 295.09	54 445.27	605 889.66	1 673.23	979 893.87
	2003	36 746.3	225 176.95	12 685.57	5 118.47	59 284.66	514 036.74	1 297.60	854 346.29
	2004	35 903.78	284 679.55	13 283.01	5 605.98	83 222.31	485 148.88	1 487.49	909 331.00
德清 Deqing	2001	7 220.92	48 216.02	7 317.85	2 821.07	55 003.80	181 665.13	5 271.08	307 515.87
	2002	7 795.51	55 423.45	8 271.69	3 245.15	68 402.07	166 162.41	5 737.31	315 037.59
	2003	7 585.52	40 396.60	6 765.36	2 349.53	48 820.47	132 703.02	4 795.12	243 415.62
	2004	7 379.04	56 271.08	7 679.69	2 704.76	51 004.28	134 524.29	5 396.35	264 959.49
长兴 Changxing	2001	22 765.85	93 765.46	14 204.54	6 762.81	107 638.63	201 338.65	1 540.26	448 016.20
	2002	24 299.11	106 363.25	15 735.22	6 521.03	115 663.84	182 049.30	1 631.98	452 263.73
	2003	16 755.70	97 513.27	13 335.86	8 277.54	103 967.86	141 438.28	1 040.26	382 328.77
	2004	19 774.69	92 369.74	18 043.34	8 073.79	90 180.24	140 961.93	1 083.50	370 487.23
湖州 Huzhou	2001	98 368.55	498 829.15	45 830.86	17 921.37	346 030.94	1 095 748.40	14 295.93	2 117 025.20
	2002	104 569.66	566 617.26	52 074.61	18 915.53	406 030.33	1 079 469.58	15 738.12	2 243 415.09
	2003	87 798.77	457 702.45	45 473.13	19 032.88	345 142.69	877 448.82	11 061.23	1 843 659.97
	2004	91 099.57	531 976.84	53 677.30	19 965.95	367 359.20	852 727.58	12 485.97	1 929 292.41

图2 湖州市各县(区)自然、社会经济指标分析

Fig.2 Natural , social and economical indexes analysis of counties and districts in Huzhou

资源价值及生态服务功能价值减小,因此单位面积森林的生态资产减少。年度各类生态系统的生态资产大小取决于气候因素与人类因素综合作用的结果。如果气候因素和人类因素的联合作用较有利于各类生态系统的生产活动时,则该年度的生态资产相对较高,否则相对较低。目前单独量化人类活动或气候因素对生态资产造成的影响还很困难,但近些年来,由于人类经济活动的加强,人类对生产系统的破坏作用日益增强。

3.3 湖州市各县(区)生态资产核算结果在社会、经济综合分析中的应用

各县(区)社会、经济综合分析指标见图 2。由于吴兴区和南浔区行政建制于 2003 年,其社会、经济统计数据于 2003 年开始记录,所以将吴兴区和南浔合并为市辖区讨论。

根据图 2A,湖州市人口主要集中在市辖区,各年度市辖区人口均占全市人均的 42.9% 左右,其次为长兴县,占 24.1% 左右,安吉县和德清县人口较少,占全市人口比例依次为 17.4% 和 16.5% 左右;根据图 2B 4 年中各县(区)的 GDP 均按市辖区 > 长兴县 > 德清县 > 安吉县的顺序排列,各县(区)的 GDP 逐年增加。根据图 2C、D,人均及单位面积生产的 GDP 排列为:市辖区 > 德清县 > 长兴县 > 安吉县;人均及地均 GDP 也逐年增加。根据图 2E 4 年中生态资产在国民经济中的比重由大到小排列为:安吉县 > 长兴县 > 德清县 > 市辖区,各县(区)生态资产占 GDP 的比重均逐年下降(市辖区仅在 2002 年略高于 2001 年,但 4 年中总体变化趋势在下降),这主要由于湖州市各县(区)的 GDP 增长很快,同时生态资产总量也呈波动下降趋势的缘故。根据图 2F、G 4 年中人均及地均生态资产均以安吉县 > 德清县 > 长兴县 > 市辖区的顺序排列,其中安吉县人均占有的生态资产较德清县、长兴县、市辖区人均占有的总和还要高 1 倍以上,安吉县是湖州市森林资源的主要分布区,发挥的生态效益较湖州市其它区(县)都大,单位人口及单位面积占有的生态资源也具有明显优势,此外德清县的生态环境优于市辖区及长兴县,值得一提的是长兴县生态资产总量在全市居第二位,但人均及地均生态资产却居倒数第二位。根据图 2H、I、J,市辖区、长兴县环境污染总量、人均及单位面积分配的环境污染和环境污染占 GDP 的比例均明显高于安吉县和德清县,市辖区的城市化水平最高,人类对环境改造程度大,工、矿企业众多,各种固体、液体、气体废物排放多,因而对环

境造成的危害也最大,长兴县主要由于点源和面源污染物排放多,图 2H、I 均反映出 2001 ~ 2002 年市辖区环境污染低于长兴县,而 2003 ~ 2004 年高于长兴县,单位人口造成的环境污染总是低于长兴县(图 2J),其中原因之一在于市辖区人口基数高于长兴县,德清县和安吉县造成的环境污染无论总量还是单位污染量均低于市辖区,安吉县的环境污染量最低,对环境的破坏程度最小,环境容纳能力与自净能力明显要高于湖州市其它县(区)。

4 结论与讨论

1) 基于高分辨 Landsat 7 TM 遥感影像可以准确监测研究区土地利用/土地覆盖的动态变化,基于线性分解模型将中分辨 MODIS NDVI 数据分解到 TM 尺度上,将地理属性数据加入生态资产核算之中,这些措施提高了生态系统参数(NPP 、植被覆盖度等)获取的精度和时效性。

2) 4 年中湖州市平均生态资产为 203.33 亿元· a^{-1} ,森林对生产资产的平均贡献率为 73.22%,森林在全市生态效益的发挥中占主要地位,各县(区)的生态资产呈波动递减,下降趋势为:长兴县 > 吴兴区 > 德清县 > 安吉县 > 南浔区,各县(区)4 年平均生态资产及整体生态效益排列为:安吉县 > 长兴县 > 吴兴区 > 德清县 > 南浔区,因此安吉县的整体生态环境最好。

3) 4 年中生态资产在国民经济中的比重由大到小排列均为:安吉县 > 长兴县 > 德清县 > 市辖区,但各县(区)生态资产占 GDP 的比重均逐年下降(市辖区仅在 2002 年略高于 2001 年,4 年中总体变化趋势在下降);4 年中人均及地均生态资产均以安吉县 > 德清县 > 长兴县 > 市辖区的顺序排列。经济发展相对较快的地区(如市辖区、长兴县),其人均及地均生态资产占有量相对低(图 2F、G、B),生态资产占 GDP 的比例也相对低(图 2E),人均及地均污染水平高(图 2H、I、J),反之亦然。因此经济相对落后、生态资产富有的地区(如安吉县),经济增长方式要避免走以资源过度消耗、环境严重污染换取经济发展的陈旧模式,经济发达地区要进一步降低单位 GDP 产值的能耗及污染物排放,使全市的经济结构、产业空间布局、发展速度与国民经济相互适应,协调发展。

4) 生态资产包含的内容是十分丰富的,还包括许多价值,如景观价值、旅游价值、文化科研价值、生物多样性价值等,这些价值有些是与本工作所涉及

的范围相互交叉的,有些是依据现有技术条件和数据储备还难以测量的,因此生态资产测量与评估将是一个长期的,不断完善的过程。

参 考 文 献

- Bjorklund J, Limburg K, Rydberg T (1999). Impact of production intensity on the ability of the agricultural landscape to generate ecosystem services: an example from Sweden. *Ecological Economics*, 29, 269 – 291.
- Bolund P, Hunhammar S (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29, 293 – 301.
- Chen ZX (陈仲新), Zhang XS (张新时) (2000). The benefit value of Chinese ecosystem. *Chinese Science Bulletin (科学通报)*, 45, 17 – 22. (in Chinese with English abstract)
- Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill RV, Paruelo J, Raskin RG, Sutton P, van den Belt M (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253 – 260.
- Daily GC, Söderqvist T, Aniyar S, Arrow K, Dasgupta P, Ehrlich PR, Folke C, Jansson AM, Jansson BO, Kautsky N, Levin S, Lubchenco J, Mäler KG, Simpson P, Starrett D, Tilman D, Walker B (2000). The value of nature and nature of value. *Science*, 289, 395 – 396.
- David P (1997). Ecological accountancy. *Science*, 387, 253 – 260.
- Dixon J, Bakkes J, Hamilton K (translated by Zhang KM (张坤民)) (1998). *Expanding the Measure of Wealth: Indicators of Environmental Sustainable Development*, (扩展衡量财富的手段——环境可持续发展指标). China Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281, 237 – 240.
- Holmud CM, Hammer M (1999). Ecosystem services generated by fish population. *Ecological Economics*, 29, 253 – 268.
- Huang XW (黄兴文), Chen BM (陈百明) (1999). The theory and application about the regionalization of Chinese ecological assets. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 19, 602 – 606. (in Chinese with English abstract)
- Ouyang ZY (欧阳志云), Wang XK (王效科), Miao H (苗鸿) (1999). A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 19, 607 – 612. (in Chinese with English abstract)
- Pan YZ (潘耀忠), Shi PJ (史培军), Zhu WQ (朱文泉), Gu XH (顾晓鹤), Fan YD (范一大), Li J (李京) (2004). Quantitative measured ecological capital on Chinese terrestrial ecosystem based on remote sensed data. *Science in China Ser. D (中国科学 D 辑)*, 34, 375 – 384. (in Chinese with English abstract)
- Pearce D, Atkinson G (1993). Capital theory and the measure of sustainable development: an indicator of weak sustainability. *Ecological Economics*, 8, 103 – 108.
- Potschin MB, Haines-Young RH (2003). Improving the quality of environmental assessments using the concept of natural capital: a case study from southern Germany. *Landscape and Urban Planning*, 63, 93 – 108.
- Potter CS, Randerson JT, Field CB, Matson PA, Vitousek PM, Mooney HA, Klooster SA (1993). Terrestrial ecosystem production: a process model based on global on global satellite and surface data. *Global Biochemical Cycles*, 7, 811 – 841.
- Shi PJ (史培军), Pan YZ (潘耀忠), Chen YH (陈云浩), Li XB (李晓兵), Li J (李京), Jing GF (景贵飞), Xian ZK (鲜祖康), Zhang SY (张淑英) (2002). Technical system of ecological capital integrated measurement using multi-scale remotely sensed data. *Advance in Earth Sciences (地球科学进展)*, 17, 169 – 173. (in Chinese with English abstract)
- Vitousek P, Ehrlich PR, Ehrlich AH, Matson P (1986). Human appropriation of the products of photosynthesis. *BioScience*, 36, 368 – 373.
- Wackernagel M, Lewan L, Hansson CB (1999). Evaluating the use of natural capital with the ecological footprint: application in Sweden and subregions. *AMBIO*, 28, 604 – 612.

责任编辑:周广胜 责任编辑:刘丽娟