

doi: 10.6046/gtzyyg.2013.04.29

引用格式: 许旭, 郜昂, 朱萍萍, 等. 基于多源遥感数据的生态系统服务价值评估——以河北省为例[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(4):180-186. (Xu X, Gao A, Zhu P P, et al. Valuation of ecosystem services based on multi-source remote sensing data: A case study of Hebei Province[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(4):180-186.)

基于多源遥感数据的生态系统服务价值评估 ——以河北省为例

许旭^{1,2}, 郜昂¹, 朱萍萍¹, 周增科¹

(1. 深圳市规划国土发展研究中心, 深圳 518034; 2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘要: 为了对河北省生态服务价值进行评估, 以 TM 数据和 MODIS NDVI 数据为数据源, 建立生态系统服务价值评估体系、物质量评估模型及价值量评估模型, 对河北省 2009 年生态系统服务价值进行了计算。结果显示: 2009 年河北省生态系统总服务价值为 180.38×10^6 万元; 不同的服务种类所占比重由大到小顺序依次为保护土壤肥力价值、释放 O₂ 价值、吸收固定 CO₂ 价值、积累营养物质价值、固定土壤价值、调节水量价值和净化水质价值; 生态系统服务价值呈现出北高南低、山区高平原低等显著的空间分异特征; 不同土地利用类型的生态系统服务价值差异显著, 林地单位面积所提供的服务价值最高, 而农田由于面积广大, 总服务价值最高。

关键词: 生态系统服务价值; 多源遥感数据; TM; MODIS

中图法分类号: TP 79; X 826; S 157 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-070X(2013)04-0180-07

0 引言

生态系统对于人类的生存是不可或缺的, 失去了自然生态系统的服务, 人类将无法生存^[1]。在过去的研究中, 生态系统的服务价值只有极少部分得到了体现, 且仅是一些粗浅的认识和了解, 其中被认为有经济价值的部分微乎其微^[2]。目前, 生态系统服务及其价值评估研究正蓬勃开展, 并取得了丰硕的研究成果, 对提高生态系统认识、加强生态系统保护等方面意义重大。生态系统服务价值评估一直是生态系统服务研究中的重要分支。1997 年, Costanza 等人将生态系统服务划分为 17 种类型, 首次得出全球生态系统每年的服务平均价值为 33×10^{12} 美元^[3], 此后众多学者针对不同地区、不同尺度开展了相关研究^[4-12], 其中静态参数评估法和生态模型评估法是较为常见的两种方法。生态模型评估法因其相对精确且可以充分反映生态系统内部的异质性而成为未来的研究趋势。遥感数据作为研究生态系统的有效手段, 也被引入了生态系统服务价值评估的研究中, 但目前基于多源遥感数据的研究还不充分, 由于不同研究采取的体系和方法不同, 造成了研究结果之间差异巨大, 无法进行比较研究。

本文基于 TM 和 MODIS NDVI 数据, 同时参照

中华人民共和国林业行业标准《森林生态系统服务功能评估规范》^[13], 对河北省 2009 年生态系统服务价值进行了评估, 以期提高评估精度及研究结果的适用范围。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

河北省位于 E 113°27' ~ 119°50', N 36°03' ~ 42°40' 之间, 包括石家庄、保定等 11 个地市, 南北约 750 km, 东西约 650 km, 总面积约 18.77 万 km²。河北省属于温带大陆性季风气候, 四季分明, 年平均气温介于 0 ~ 13℃ 之间, 年平均降水量 300 ~ 800 mm, 年无霜期 110 ~ 220 d, 年日照时数 2 400 ~ 3 100 h。省内地貌复杂多样, 地势西北高东南低, 海拔高度差距显著, 从数十米至两千多米不等。

1.2 遥感数据

针对本文的研究目的, 分别选择了中高空间分辨率的 TM 数据及高时间分辨率的 MODIS NDVI 数据作为研究所需遥感数据。

1) TM 数据。选择了 2007—2009 年植物生长季中某月份完全覆盖研究区的 19 幅 TM 图像, 图像质量良好, 无云或有少量云覆盖, 地表覆盖分异明显。经过几何纠正、辐射校正及拼接裁剪后, 采用人

机交互的监督分类方法对图像进行了分类。采用二级分类法,将地表覆盖类型总体上分为7个一级类型,21个二级类型。根据2008年、2009年对研究区的野外实测GPS点,对分类精度进行评价,整体分类精度为89.05%, $Kappa$ 系数为0.86,达到了研究所需的标准。

2) MODIS NDVI 数据产品。选择了编号为MOD13Q1的MODIS数据产品。此产品为16 d合成的250 m空间分辨率的植被指数。时间跨度为2009年1—12月,为了与气象数据的时间分辨率保持一致,采用了最大值合成法(maximum value composites, MVC)将数据进行两两合成^[14-16],生成研究区逐月的NDVI数据。

1.3 野外实测数据

1) 植被中氮(N),磷(P),钾(K)等营养元素含量。按照不同生态系统类型,在野外共采样156个,其中采样点利用类型为林地的49个、灌丛57个、草地49个、农田12个,涉及多种植被类型,均匀分布于全省。在实验室分析其N,P,K等营养元素含量,用于生态系统积累营养物质价值的计算。

2) 土壤参数。对研究中所需的现有土壤数据库中缺失部分进行补充测定,按照不同类型的土壤类型分别测定了容重、营养元素含量、粒径组成等指标,用于生态系统土壤保持部分的价值计算。

1.4 气象数据

气象数据包括了研究区及其周围区域的27个气象站点的逐月平均温度、降水及太阳日照时数,时间跨度为2009年1—12月,来源于国家气象局网站。按照研究需要,以ArcGIS为平台,对气象数据进行了插值处理,获取了空间上连续分布的气象数据信息,其像元大小及投影类型与MODIS NDVI数据保持一致。

1.5 其他数据

包括河北省DEM数据,为栅格格式,空间分辨率为90 m;河北省1:100万土壤类型图,包括矢量格式及对应的数据库;河北省1:100万行政边界图,矢量格式,包括地级市及区县行政边界;中国河川径流系数图,来源于中华人民共和国自然地理图集,数字化后转为栅格格式。

2 研究方法

一定区域内的生态系统服务的总价值是区域内所有生态系统提供的所有服务功能的价值总和,随

着区域内生态系统的质量、面积以及类型的变化而变化。区域生态系统服务总价值计算公式为

$$V = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_{ij} \quad (1)$$

式中: V 为区域生态系统服务总价值; V_{ij} 为第*i*类生态系统的第*j*种服务功能价值; n, m 分别为生态系统和功能价值的类别数。

考虑到遥感技术的特点和研究区的生态环境特点,本文确定了研究区生态系统服务价值评估的指标体系。此指标体系需要对区域生态系统的净初级生产力(net primary productivity, NPP)、土壤保持量和水源涵养量等物质量进行计算,在计算结果基础上,通过一定的经济学方法和模型,得到区域生态系统服务价值。包括5项服务功能,涉及8项指标,如表1所示。

表1 基于遥感手段的生态资产评估指标

Tab.1 Evaluation indicators of ecosystem services assessment based on remote sensing

序号	功能类别	指标	物质量
1	太阳能的固定	生产有机物质	NPP
2	积累营养物质	营养物质循环与贮存	NPP
3	气体调节	吸纳二氧化碳	NPP
4	气体调节	释放氧气	NPP
5	保育土壤	固土	土壤保持量
6	保育土壤	保肥	土壤保持量
7	涵养水源	调节水量	水源涵养量
8	涵养水源	净化水质	水源涵养量

3 生态系统服务物质量评估模型

3.1 NPP的遥感估算

本文采用了基于光能利用率的NPP估算模型估算研究区内的NPP。该模型认为NPP可以由植物吸收的光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率(ε)两个因子来表示^[17],即

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \varepsilon(x, t), \quad (2)$$

式中: $APAR(x, t)$ 为像元*x*在*t*月吸收的光合有效辐射, $gC \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$; $\varepsilon(x, t)$ 为像元*x*在*t*月的实际光能利用率, $gC \cdot MJ^{-1}$; ε_{max} 为植被在理想条件下具有的最大光能利用率, $gC \cdot MJ^{-1}$ 。在实际情况下,最大光能利用率 ε_{max} 分别受到温度和水分的影响,即低温和高温对光能利用率的胁迫系数 $T_{e1}(x, t)$ 和 $T_{e2}(x, t)$ (无量纲)以及水分胁迫系数(无量纲)的影响,式(2)也可写为

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) T_{e1}(x, t) T_{e2}(x, t) \varepsilon(x, t) \varepsilon_{max} \quad (3)$$

3.2 土壤保持量的遥感估算

选用通用土壤流失方程 (universal soil loss equation, USLE) 来计算研究区生态系统土壤保持量^[18]。该模型认为区域内土壤侵蚀量与降雨、坡度、坡长、地表植被、土壤类型及管理措施等 6 个因素有关,即

$$A_r = RKLSCP, \quad (4)$$

式中: A_r 为现实土壤侵蚀量, $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; R 为降雨侵蚀力因子, $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$; K 为土壤可侵蚀因子, $t \cdot hm^2 \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot hm^{-2}$; L 为坡长因子, 无量纲; S 为坡长坡度因子, 无量纲; C 为地表覆盖因子, 无量纲; P 为土壤保持措施因子, 无量纲。

当不考虑地表植被覆盖以及土壤保持措施因子时, 所得出的侵蚀量为区域潜在侵蚀量, 也就是没有地表植被保护时的最大侵蚀量, 即

$$A_p = RKLS, \quad (5)$$

式中 A_p 为区域潜在土壤侵蚀量, $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。

将式(5)和式(4)相减, 即可得到区域土壤保持量, 即

$$A_c = A_p - A_r, \quad (6)$$

式中 A_c 为土壤保持量, $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ 。土壤保持量反映了地表植被以及土壤保持措施对土壤侵蚀的防治效应。

3.3 水源涵养量的遥感估算

采用水量平衡法计算研究区生态系统涵养水源量。该方法以水量的输入和输出为着眼点, 从水量平衡的角度, 认为降水量与森林蒸散量以及其他消耗的差为水源涵养量^[19], 即

$$Q(x) = P - E - C, \quad (7)$$

式中: P 为降水量, $mm \cdot a^{-1}$; E 为生态系统植被蒸散量, $mm \cdot a^{-1}$; C 为地表径流量, $mm \cdot a^{-1}$ 。

采用孙睿等通过年蒸散量与累积 NDVI 及相对湿润指数之间的关系建立的区域年蒸散量的评估模型^[20], 对研究区年度蒸散进行计算, 即

$$ET = \frac{463RMI}{1 + \exp(-1.79 \sum NDVI - 1.34)} + 150, \quad (8)$$

$$RMI = MI/\overline{MI}, \quad (9)$$

$$MI = P/0.16 \sum T_{(\geq 10)}, \quad (10)$$

式中: ET 为区域年蒸散量, $mm \cdot a^{-1}$; RMI 为相对湿润指数; MI 为本年度区域湿润指数; \overline{MI} 为区域多年平均湿润指数; P 为区域年降水总量, $mm \cdot a^{-1}$;

$T_{(\geq 10)}$ 为区域大于 $10^\circ C$ 积温。当 $NDVI < 0.05$ 时, 地表基本无植被生长, 且当温度小于 $0^\circ C$ 时地表不存在蒸发现象, 因此取温度大于 $0^\circ C$ 且 $NDVI > 0.05$ 的像元值, 用作累积 $NDVI$ 的计算。

4 生态系统服务价值量评估模型

4.1 吸收固定 CO_2 的价值

以 NPP 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 $1g$ 干物质, 需要 $1.63g CO_2$ 。因此这部分价值可通过式(11)求出, 即

$$V_r(x) = 1.63NPP(x)R_{碳}C_{碳}, \quad (11)$$

式中, $V_r(x)$ 为像元 x 处生态系统单位面积每年吸收 CO_2 的价值, $元 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; $NPP(x)$ 为像元 x 处单位面积每年生产的干物质量, $g \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; $R_{碳}$ 为 CO_2 中碳的含量, 为 27.27% ; $C_{碳}$ 为碳税率价格。

4.2 释放 O_2 的价值

以 NPP 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 $1g$ 干物质, 可以释放 $1.19g O_2$, 因此可根据式(12)求出释放 O_2 的价值, 即

$$V_s(x) = 1.19NPP(x)R, \quad (12)$$

式中: $V_s(x)$ 为像元 x 处生态系统单位面积每年释放 O_2 的价值, $元 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; R 为工业制氧价格。

4.3 积累营养物质的价值

以 NPP 为基础, 根据 N, P, K 的质量分配率计算积累营养物质价值, 即

$$V_{ni}(x) = r_{i_i}M \sum NPP(x)/r_{2i}, \quad (13)$$

式中: $V_{ni}(x)$ 为像元 x 处生态系统单位面积每年吸收的 i 元素价值, $元 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; r_{i_i} 为不同生态系统中 i 元素在有机物质中的分配率, $\%$; r_{2i} 为纯 i 元素在化肥中的含量, $\%$; M 为化肥的平均价格, $元 \cdot t^{-1}$; i 分别代表 N, P, K 。

4.4 生产有机质价值

生态系统通过光合作用生产有机质, 根据市场上有机物的价格, 计算出生态系统生产有机质的价值, 即

$$V_y(x) = Y \sum NPP(x), \quad (14)$$

式中: $V_y(x)$ 为像元 x 处生态系统单位面积每年生产有机物的价值, $元 \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$; Y 为有机质的平均价格, $元 \cdot t^{-1}$ 。

4.5 保护土壤肥力价值

土壤中含有 N, P, K 以及有机质等营养物质, 生

态系统保持土壤的作用,减少了大量土壤营养物质的流失,因此可以根据营养物质的市场价值来评估生态系统保护土壤肥力的价值,即

$$V_{肥} = \sum_i A_c(x) (M_i P_i / R_i + QC), \quad (15)$$

式中: $V_{肥}$ 为单位面积生态系统保护土壤肥力的经济效益,元·hm⁻²·a⁻¹; $A_c(x)$ 为像元 x 处每年单位面积的土壤保持量,t·hm⁻²·a⁻¹; M_i (i 表示 N,P,K) 为土壤中 N,P,K 的含量; P_i 为 N 肥、P 肥、K 肥的价格,元·t⁻¹; R_i 为化肥中纯 N,P,K 的含量; Q 为土壤有机质含量; C 为有机质价格,元·t⁻¹。

4.6 固定土壤价值

生态系统固定土壤的价值,可以采用影子工程法,假定挖取和运输同样体积的土方所需的费用进行估算,即

$$V_{固} = A_c(x) C_{\pm} / \rho, \quad (16)$$

式中: $V_{固}$ 为单位面积生态系统年固土价值,元·hm⁻²·a⁻¹; C_{\pm} 为挖取和运输单位体积土方所需费用,元·hm⁻³; ρ 为土壤容重,t·hm⁻³。

4.7 调节水量价值

生态系统调节水量与水库蓄水的本质类似,本研究采用水库工程的蓄水成本来确定生态系统涵养水源的经济价值。因此,根据水库工程的蓄水成本(替代工程法)计算出生态系统每年调节水量的价值,即

$$V_{调} = C_{库} \sum V(x) \quad (17)$$

式中: $V_{调}$ 为像元 x 处每年调节水量的价值,元·hm⁻²·a⁻¹; $V(x)$ 为像元 x 处每年单位面积的水源涵养量,m³·m⁻²; $C_{库}$ 为水库建设单位库容投资,元·hm⁻³。

4.8 净化水质价值

生态系统净化水质与自来水净化原理一致,因此在评估净化水质经济价值时,可以参照居民用水平均价格,计算出生态系统每年净化水质的价值,即

$$V_{水质} = K \sum V(x), \quad (18)$$

式中: $V_{水质}$ 为像元 x 处每年净化水质的价值,元·hm⁻²·a⁻¹; K 为水的净化费用,元·t⁻¹。

以生态系统服务物质为基础,参考中华人民共和国林业行业标准《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721 - 2008)中的价格参数取值标准,按照上述经济学模型,得到 2009 年河北

省各项生态系统服务价值,计算流程如图 1 所示。

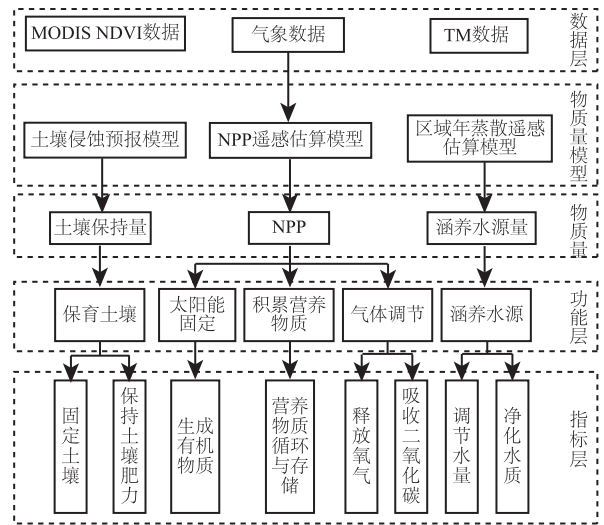


图 1 生态系统服务价值评估流程图

Fig. 1 Flow chart of ecosystem services value assessment

对逐项服务价值进行加和,得到 2009 年河北省生态系统服务总价值,如图 2 所示。

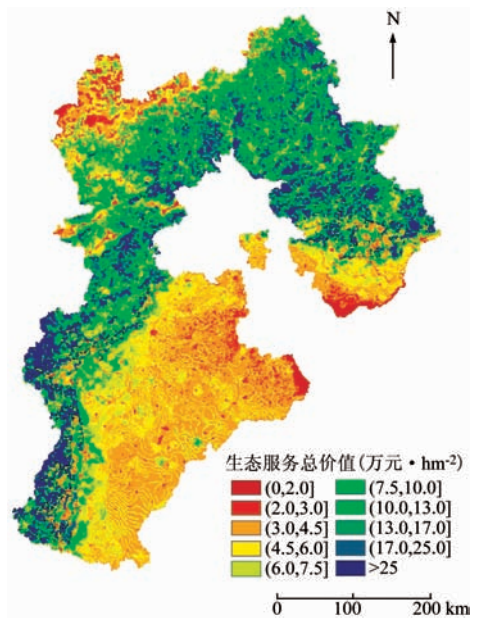


图 2 2009 年河北省生态系统服务总价值平均值空间分布

Fig. 2 Average ecosystem services value distribution map of Hebei Province, 2009

5 结果及分析

5.1 生态系统服务总价值及其构成

计算得出 2009 年河北省生态系统总服务价值为 180.38×10^6 万元,其中各种服务的价值构成如表 2 所示。

表 2 2009 年河北省生态系统服务总价值构成

Tab. 2 Ecosystem services value composition of Hebei Province, 2009

生态系统服务价值类型	生态系统服务价值 / ($\times 10^6$ 万元)	占总价值比例/%
吸收固定 CO ₂	11.50	6.38
释放 O ₂	25.69	14.24
积累营养物质	9.81	5.44
生产有机质	6.94	3.85
保护土壤肥力	106.69	59.15
固定土壤	8.44	4.68
调节水量	8.56	4.75
净化水质	2.75	1.52
合计	180.38	100.00

5.2 生态系统服务总价值空间分布

在空间分布上,2009 年河北省生态系统服务总价值的空间分布呈现以下几个特点:①北高南低,以张家口市和保定市的分界线为界,北部的生态系统服务总价值明显高于南部;②由西北向东南先增加后逐渐减少,西北坝上草原地区生态系统服务总价值较低,向东南方向逐渐增加,到东南部滨海平原及低平原区后,生态系统服务总价值又逐渐减少;③山区大于平原,山地丘陵区的生态系统服务总价值明显高于平原地区,而冀西北山间盆地、燕山山麓平原区等地区的生态系统服务总价值在两者之间。

生态系统服务总价值的极大值出现在太行山山地丘陵区,该地区主要植被类型为林地,具有较高的 NPP 值,因此具有较高的固碳、释氧、积累有机物及营养物质循环价值;同时,由于该区域地势险峻,地表起伏度很高,且地处迎风坡,年降雨量很大,导致其潜在土壤侵蚀量很高,而该地区植被生长状况良好,茂密的植被使得区域土壤保持量巨大,相应地也产生了很高的固定土壤、保持土壤肥力价值;极低值位于滨海沿岸、城市及其周边以及分布广泛未利用地,这些地区几乎没有植被生长,且地势平坦,土壤侵蚀量及保持量均较低,涵养水源能力也较差,生态系统服务总价值很低。

5.3 不同土地利用类型生态系统服务价值

根据 TM 图像解译的河北省土地利用类型图,对不同土地利用类型的生态系统服务总价值进行了统计分析。分析结果如表 3 所示。

表 3 不同土地利用类型的生态系统服务总价值及单位面积价值

Tab. 3 Ecosystem services total value and per hectare value of different land use categories

土地利用类型	总价值 / ($\times 10^6$ 万元)	单位面积价值 / (万元 \cdot hm ⁻²)
林地	41.09	17.32
灌丛	30.46	12.41
草地	37.60	15.80
农田	59.59	6.62
水体	0.77	4.22
建筑用地	8.53	4.56
未利用地	2.18	5.87

在总价值中,生态系统保护土壤肥力的服务功能所产生的价值所占比重最大,为 59.15%;其次为释放 O₂ 价值,为 14.24%;吸收固定 CO₂ 价值、积累营养物质价值、固定土壤价值和调节水量价值所占比重相当,均在 5% 左右;而净化水质价值所占比重较小,为 1.52%。

农田生态系统的价值量最大,为 59.59×10^6 万元,占总价值的 33.04%;林地和草地生态系统所提供的生态系统服务总价值相当,分别为 41.09×10^6 万元和 37.60×10^6 万元,所占比例分别为 22.78% 和 20.84%;在自然植被中,灌丛的生态系统服务总价值较小,为 30.46×10^6 万元,占总价值的 16.89%;城镇建筑用地由于具有硬地表,有着较高的保持土壤的服务功能价值,因此虽然植被生长稀疏,但总价值也达 8.53×10^6 万元,占总价值的 4.72%;水体和未利用地上植被生长很少或无植被生长,与 NPP 相关的服务价值和土壤保持价值均很低,仅提供部分涵养水源服务功能,且面积较少,因此生态系统服务价值很小,分别占到总价值的 0.42% 和 1.21%。

单位面积价值反映了生态系统提供服务功能的能力。林地的单位面积服务价值最高,为 17.32 万元/hm²,林地具有较高的 NPP 和植被覆盖度,且多生长在山地丘陵区,固碳释氧、积累营养物质、防止水土流失的能力很强,同时具有很好的水源涵养功能;灌丛生态系统与草地生态系统的单位面积价值相近,分别为 12.41 万元/hm² 和 15.80 万元/hm²,说明两者所提供的生态系统服务功能相当;农田生态系统单位面积服务价值为 6.67 万元/hm²,比 3 种自然植被的单位面积服务价值均低,一方面是由于农作物的 NPP 一般低于自然植被,另一方面由于农田多位于地势平坦的平原地区,土壤侵蚀量很小,相应的保持土壤肥力和固定土壤价值很低;城镇建设用水体和未利用地的植被生长较少,提供生态系统服务的能力有限,因此生态系统服务价值较小,均在 4 ~

5 万元/hm² 左右。

6 结论和讨论

1) 2009 年河北省生态系统总服务价值为 180.38×10^6 万元; 在计算的 8 项服务功能中, 服务价值大小顺序依次为保护土壤肥力、释放 O₂、吸收固定 CO₂、积累营养物质、调节水量固定土壤、生产有机质和净化水质; 在空间分布上, 生态系统服务价值呈现出北高南低、山区高平原低等显著的空间分异特征; 林地单位面积服务价值最高, 而农田总服务价值最高。本研究在价值计算方面采用了国家标准, 避免了不同研究中价值量无法进行横向比较的弊端, 同时揭示了河北省生态系统服务价值的组成及空间分布规律, 对于指导生态环境保护及建设具有一定的指导意义。

2) 本研究选取了 8 项服务功能进行了评估, 而实际生态系统服务类型是多种多样的, 由于认识水平及技术手段的局限性, 许多服务种类尚未被认识到, 而穷尽所有服务种类的价值评估也很难实现。同时生态系统本身的复杂性和诸多不确定性, 也决定了生态系统服务研究具有较高的难度。未来研究应该集中在拓展服务价值评估种类、小区域精细化实验研究、探索服务价值的长时间序列变化、研究其与人类活动及气候变化的关系层面, 并不断加强生态系统服务价值评估在绿色 GDP 测算、生态补偿、生态区划、生态评估等方面的应用。

参考文献 (References):

[1] 李文华, 刘子刚, 刘向华, 等. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法和应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.
Li W H, Liu Z G, Liu X H, et al. Ecosystem service functions valuation theory, methods and applications[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2008.

[2] 中国 21 世纪议程管理中心可持续发展战略研究组. 生态补偿: 国际经验与中国实践[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2007.
Sustainable Development Research Group of Administrative Center for China's Agenda 21. Ecological compensation: International experiences and Chinese practice[M]. Beijing, Social Sciences Academic Press, 2007.

[3] 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.

[4] Seidl A F, Moraes A S. Global valuation of ecosystem services: Application to the Pantanal da Nhecolandia, Brazil [J]. Ecological Economics, 2000, 33 (1): 1 - 6.

[5] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas [J]. Ecological Economics, 1999, 29 (2): 293 - 301.

[6] 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 (3): 509 - 527.

[7] Bandara R, Tisdell C. The net benefit of saving the Asian elephant: A policy and contingent valuation study [J]. Ecological Economics, 2004, 48 (1): 93 - 107.

[8] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and human well-being: Synthesis [M]. Washington D C: Island Press, 2005.

[9] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta - Michlik L, et al. The vulnerability of ecosystem services to land use change [J]. Agriculture Ecosystem and Environment, 2006, 114 (1): 69 - 85.

[10] Martinez M L, Perez - Maqueo O, Vazquez G, et al. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258 (9): 1856 - 1863.

[11] 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.
Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological - economic value [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19 (5): 607 - 613.

[12] 潘耀忠, 史培军, 朱文泉, 等. 中国陆地生态系统生态资产遥感定量测量 [J]. 中国科学 (D 辑), 2004, 34 (4): 375 - 384.
Pan Y Z, Shi P J, Zhu W Q, et al. Quantitative Measurement of China terrestrial ecology assets based on remote sensing [J]. Science in China: Series D, 2004, 34 (4): 375 - 384.

[13] 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所. LY/T1721 - 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.
Forest Ecological Environment Protection Research Institute of Chinese Academy of Forestry. LY/T1721 - 2008 Specifications for assessment of forest ecosystem services in China [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[14] Town S J, Ju S C, Li W, et al. Global land cover classification by remote sensing: Present capabilities and future possibilities [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35 (2/3): 234 - 255.

[15] Loveland T, Merchant J, Ohlen D, et al. Development of a land - cover characteristics database for the conterminous U. S. [J] Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1991, 57 (11): 143 - 146.

[16] Ehrlich D, Estes J, Singh A. Applications of NOAA - AVHRR 1km data for environmental monitoring [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15 (1): 145 - 161.

[17] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. The Journal of Applied Ecology, 1972, 9 (3): 747 - 766.

[18] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall - erosion losses from cropland east of the rocky mountains [R]. USDA Agricultural Handbook, 1965, No. 282.

[19] 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 H, Ouyang Z Y, Zhao J Z, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan island [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,

2000,11(4):481-484.

Sun R,Liu C M,Li X W. Estimation of evapotranspiration in the Yellow River basin using integrated NDVI[J]. Journal of Natural Resources,2003,18(2):155-160.

[20] 孙 睿,刘昌明,李 小 文. 利用累积 NDVI 估算黄河流域年蒸散量[J]. 自然资源学报,2003,18(2):155-160.

Valuation of ecosystem services based on multi – source remote sensing data : A case study of Hebei Province

XU Xu^{1,2}, GAO Ang¹, ZHU Pingping¹, ZHOU Zengke¹

(1. Shenzhen Urban Planning and Land Resource Research Center, Shenzhen 518034, China;

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

Abstract: In this paper, the ecosystem services valuation system and methods were developed and Landsat TM and MODIS NDVI were used as the main dataset to calculate the ecosystem services value of 2009 in Hebei Province. The total value of ecosystem services of Hebei Province was 180.38 million in 2009. The value of the service that maintained soil fertility accounted for 59.15% of the total value, which was the biggest one of the eight services, followed by the values of released O₂, fixed CO₂, nutrients accumulation, soil conservation, water volume regulation, organic matter production and water purification. The spatiotemporal pattern of ecosystem services values of Hebei Province in 2009 was remarkable, the values were much higher in northern and northwestern parts and mountain areas than the values in southern and southeastern parts and plain areas. The values of ecosystem services of various kinds of land – use categories were different significantly. Forest land offers the highest ecosystem service value per hectare, and farmland, because of its huge area, offers the highest total value.

Key words: ecosystem services value; multi – source remote sensing data; TM; MODIS

第一作者简介: 许旭(1984 –),男,博士研究生,主要研究方向为土地资源管理、生态环境遥感。E – mail: xuxu1021@gmail.com。

(责任编辑: 李 瑜)