

文章编号: 1008-2786-(2008)2-145-09

北方农牧交错带生态系统服务价值测算及变化

刘军会^{1,2}, 高吉喜^{3*}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 中国环境科学研究院生态所, 北京 100012)

摘要: 基于1986年和2000年北方农牧交错带生态系统类型、*NPP*和植被覆盖度的分布, 利用遥感和GIS技术, 结合生态经济学方法, 测算了北方农牧交错带生态系统服务功能的经济价值及动态变化。结果表明: (1)在生态系统服务价值的构成中, 草地、农田和森林的贡献率最大; (2)从单位面积价值看, 森林和灌丛服务功能的单位面积价值最高; (3)在水平分布上, 生态系统服务价值的区域差异明显, 其分布受气候和人类活动影响较大; 在垂直分布上, 地形因子对生态系统服务价值的影响较大, 人类活动影响微弱; (4)1986~2000年间, 各个生态系统服务功能的价值及其总价值都在下降, 单位面积价值的最大值由东北向西南方向移动到交错带的中部。

关键词: 植被覆盖度; *NPP*; 生态系统服务; 经济价值; 北方农牧交错带

中图分类号: Q143

文献标识码: A

陆地表层生态系统除给人类提供实物型生态产品(食物、原材料、药品等外), 同时还以其巨大的生物多样性向人类提供更多类型的非实物型生态服务(净化空气、涵养水源、水土保持、生态屏障等)。这些非实物型的生态服务功能为人类带来了巨大的福利, 有着巨大的经济价值。生态系统服务价值研究是当今生态系统可持续研究的重要内容之一, 因此吸引了大量不同学科(尤其是生态学和经济学)研究者的关注与参与^[1]。对生态系统服务价值进行定量测算不仅可以从经济学角度对生态环境进行定量评价, 而且也是最终将其纳入国民经济核算体系^[2-4]、制定生态环境建设补偿政策的必要前提, 我国在这些方面的研究仍处于初级阶段。目前, 国内外许多学者在不同空间尺度对不同类型的生态系统服务功能进行了研究, 推动了该领域研究的迅速发展^[2-4-8]。1997年, Daily^[4]等第一次比较全面、系统、深入和综合的研究了生态系统服务功能的各个方面, 引起了较为广泛的关注。Costanza^[2]等将全球

划分成16个生态系统类型和17大类生态系统功能对全球生态系统服务功能进行了估算。国内外对生态系统服务功能的测算方法都是在已有的研究成果基础上, 通过计算不同生态系统类型单位面积提供的生态系统服务价值, 然后乘以该生态系统的总面积, 再相加。这类测算方法没有考虑生态因子的空间异质性对生态系统服务功能的影响, 仅是将生态系统作为均质的整体来研究^[9]。潘耀忠等^[10]利用生态参数(植被覆盖度和*NPP*)对生态系统类型内部的差异进行了区分, 能在一定程度上反映生态系统内部的空间异质性; 但在实际计算时, 仍然参照了Costanza的单位面积生态系统服务价值, 导致生态参数的精度成为测算的关键和难点。生态系统服务价值化的方法主要有影子价格法、意愿评估法、市场价值法、机会成本法、造林成本法和替代工程法等, 这些方法在生态经济学已得到一些应用。

北方农牧交错带在我国北方具有重要的生态地位。交错带自东北向西南纵贯中国北部, 阻挡西、北

收稿日期(Received date): 2007-10-20; 改回日期(Accepted): 2008-02-01。

基金项目(Foundation item): 国家环境保护总局重点项目“全国生态脆弱区保护规划”。[Supported by the key project of “Planning on Protection of Eco-fragile Region in China” of state environmental protection administration of China]。

作者简介(Biography): 刘军会, 男, 1976年生, 博士生, 主要从事区域生态学研究。[Liu Junhui (1976-), male, from Shunping in Hebei presently a candidate for Ph. D., major in regional ecology.] E-mail: liujunhui@sohu.com

* 通讯作者(Corresponding Author): E-mail: Gaojixi@caes.org.cn

部沙漠的向东、南的入侵,是中东部地区的重要生态屏障;交错带位于北方许多河流(黄河、海河水系、西辽河水系、锡林郭勒河等)的上游,是重要的水源涵养区;同时交错带降水少、多大风、沙尘活动强烈,是典型的生态脆弱区。为此,本文借鉴已有的研究成果,利用遥感和GIS技术,在对区域植被覆盖度和NPP测算的基础上,应用生态经济学方法,测算交错带1986~2000年生态系统服务价值及其变化。测算结果为评估区域生态环境质量、制定区域间的生态补偿政策和建立绿色GDP核算体系提供了科学数据支持。

1 研究区概况

北方农牧交错带位于我国内蒙古高原东南边缘和黄土高原北部,包括内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、甘肃、宁夏9个省、自治区的154个县(旗、市),南北纵跨10多个纬度,东西横跨20多个经度,面积 $62.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,人口约7千万;本区为典型的温带半干旱大陆性季风气候,风大,干旱少雨,年平均温度 $0 \sim 8^\circ\text{C}$,年平均降水量 $300 \sim 450 \text{ mm}$,年降水变率 $15\% \sim 30\%$;植被,自东向西由森林草原带过渡到典型草原带和荒漠草原带,是典型的干草原植被类型;土壤类型以栗钙土和棕壤为主;大多数地区海拔 $> 1000 \text{ m}$,地貌复杂多样,以内蒙古高原为主体,草原、山地、沙地、河流和湖泊并存。

2 研究方法

2.1 数据及处理

本研究中所用的数据均集成到同一坐标系下,投影方式为双标准纬线等面积圆锥(Abers)投影,采用的椭球体为Krasovsky椭球体,主要参数:中央经线 105° ,原点纬线 0° ,第一标准纬线 $N_1 = 25^\circ$,第二标准纬线 $N_2 = 47^\circ$ 。

2.1.1 气象数据

气象数据来源于中国气象局,时间为1961~2005年,数据内容为年平均月降水量、年平均气温、月总太阳辐射,以及各气象站点的经度、纬度和海拔,共涉及218个气象站点并对数据进行精度验证。计算NPP需要栅格化气象数据,使其从空间上与遥感数据相匹配。利用GIS空间分析的插值工具对气象要素进行Kriging插值,像元大小为 1 km 。

2.1.2 基础数据

NDVI数据来源于全国生态环境调查数据库,图像空间分辨率为 1 km ,时间为1986年和2000年,时间分辨率为月。1:100万《中国植被类型图》^[1]来源于中国科学院植物研究所;1:400万数字化《中国植被类型图》^[12]来源于国家地理信息系统重点实验室;1:400万《中国土壤质地图》^[13]、分辨率为 1 km 的1986年和2000年土地利用数据和分辨率为 1 km 的数字高程模型(DEM)均来源于全国生态环境调查数据库。

2.2 测算指标

Costanza等^[1]把生态系统服务分为17大类,几乎包括了所有的生态系统服务功能。但是由于评价方法、研究机制和数据获取的可靠性等原因,有些功能很难以用遥感技术测算。最终,本文选取的生态系统服务价值评估指标见图1。

2.3 技术体系

从生态系统服务价值的测算技术路线图(图2)看出,模型所用数据主要来源于气象、遥感、地面观测与统计资料。用遥感影像数据进行生态系统类型划分和面积测算,以及NPP、植被覆盖度等生态参数反演。所获得的各项数据量化成生态效益,最后通过影子价格法、市场价值法、机会成本法、造林成本法和替代工程法等转换为生态系统服务功能的经

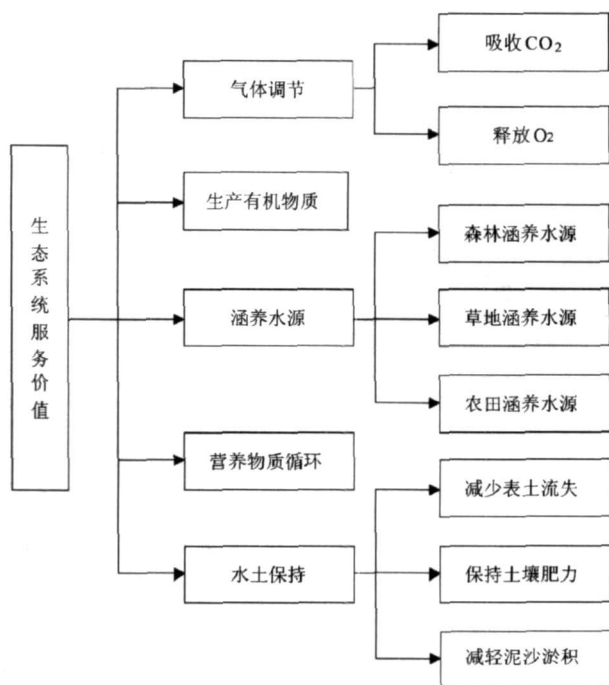


图1 生态系统服务价值测算指标和测算流程

Fig 1 Measurement index and flow of ecosystem services value

济价值。

2.4 生态参数的测算

2.4.1 生态系统分类

在参考 1: 100 万《中国植被类型图》、1: 400 万中国植被分类体系和全国土地利用覆盖分类体系基础上, 将研究区划分为 6 个主要生态系统类型, 分别是农田、森林、灌丛、草地、水域和裸地。

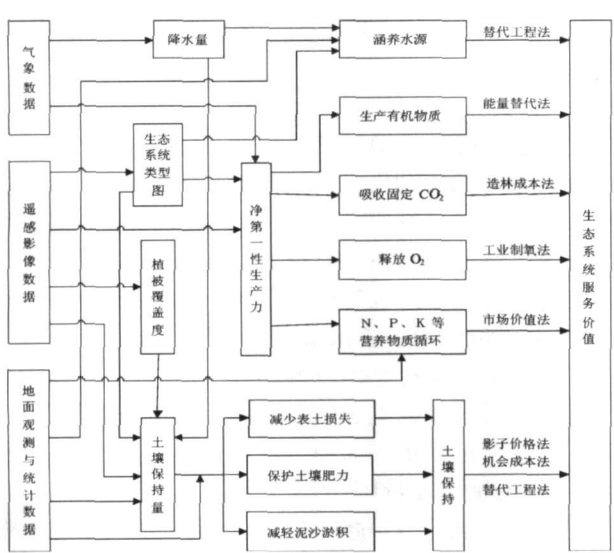


图 2 生态系统服务价值的测算流程图
Fig 2 The flow chart of measurement of ecosystem services value

2.4.2 NPP 的测算

植被净初级生产力的计算采用改进的光能利用率模型^[14]

$$NPP = \varepsilon \times f_1(T) \times f_2(\beta) \times PAR \times FPAR - R \quad (1)$$

式中 NPP , R 分别表示植被净初级生产力和呼吸消耗碳元素量 ($g/(m^2 \cdot 月)$), ε 表示最大光能利用率, $f_1(T)$ 和 $f_2(\beta)$ 分别表示温度和土壤水分对 ε 的影响, PAR 表示到达地表的光合有效辐射, 由气候学方法确定。 $FPAR$ 表示植被所吸收的光合有效辐射比例, 与植被指数相关^[15]

$$FPAR = \frac{(VI - VI_{min})(FPAR_{max} - FPAR_{min})}{(VI_{max} - VI_{min})} + FPAR_{min} \quad (2)$$

式中 VI 表示比值植被指数, $VI = (1 + NDVI)/(1 - NDVI)$, VI_{min} 和 VI_{max} 表示 i 类植被类型 $FPAR$ 达到最大值和最小值时的比值植被指数, $FPAR_{max} = 0.950$ $FPAR_{min} = 0.001$ ^[16]。

2.4.3 植被覆盖度 (f_v) 的测算

植被覆盖度是指植被投影面积在单位面积上所占的比例, 它和叶面积指数可以作为衡量地表植被数量的指标。据 Gutman 等^[17]研究表明, 区域植被覆盖度与植被指数存在以下关系

$$f_v = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (3)$$

式中 $NDVI_{max}$ 和 $NDVI_{min}$ 分别为植被整个生长季 $NDVI$ 的最大值和最小值。

3 测算方法与模型

3.1 有机物质生产价值

植被利用太阳能将无机化合物, 如 CO_2 , H_2O 等合成有机物质, 是植被的最基本也是最重要的功能。为人类提供了最初始的初级有机物质和能量。它的生产量称之为植被初级生产力 (NPP), 是指绿色植物在单位面积、单位时间内所能生产的各种有机物质, 包括了枝、叶和根等生物物质生产量, 它反映了植物类型在一定环境条件下的生产能力。

植被有机物的价值采用能量替代法测算。植被生产的有机物折合成能量以后可以进行相应的替代, 如煤炭、石油、天然气等皆是自然界中存在的能量, 具有一定的市场价格。因此, 可以通过能量这个桥梁将两者联系起来, 就是说植被生产有机物的价值, 可以通过能源的价值加以体现。具体的测算模型为

$$V = \frac{AQ_1}{BQ_2} \times P \quad (4)$$

式中 V 是植被生产有机物的价值 (元); A 是植被生产有机物干重 (t); B 是煤的质量系数, 标煤 $B = 1$; Q_1 是干重生物量折合热量; Q_2 是标煤的折合热量; P 是标煤的市场价格 (元/ t)^[18]。碳的热值为 $0.036 MJ/g$ 标煤的热值为 $0.029 27 MJ/g$ 标煤的价格为 354 元/ t (1990 年不变价)^[19]。

3.2 气候调节价值

植被通过光合作用和呼吸作用与大气物质的交换, 这对维持地球大气中的 CO_2 和 O_2 的动态平衡、减缓温室效应, 以及提供人类生存的最基本条件具有不可替代的作用。本次测算以净初级生产力为基础, 根据光合作用和呼吸作用的反应方程式, 植被生态系统每生产 $1.00 g$ 植物干物质能固定 $1.62 g$ CO_2 , 并释放 O_2 $1.20 g$ 。干物质量可根据植物干物质中碳元素的含量大约占 45% ^[20 21], 由 NPP 计算。

按照造林成本法、工业制氧法和 1990 年不变价计算, 各种植被固定 CO_2 和释放 O_2 的价值分别为 71.15 元 / t CO_2 和 352.93 元 / t O_2 ^[21]。

3.3 涵养水源价值

3.3.1 森林涵养水源价值

物质质量评价采用降水贮存量法^[17], 即用森林生态系统的蓄水效应来衡量其涵养水分的功能

$$Q_f = A_f \times J \times R \quad (5)$$

$$J = J_0 \times K \quad (6)$$

$$R = R_0 - R_f \quad (7)$$

式中 Q_f 为与裸地相比较, 森林生态系统涵养水分的增加量; A_f 为研究区森林面积; J 为研究区多年平均产流降雨量 ($P > 20 \text{ mm}$); J_0 为研究区多年平均降雨总量; K 为研究区产流降雨量占总降雨量的比例 (秦岭—淮河以北取 0.4 以南取 0.6)^[22]; R 为与裸地比较, 森林生态系统减少径流的效益系数; R_0 为产流降雨条件下裸地降雨径流率; R_f 为产流降雨条件下林地降雨径流率。

根据周晓峰^[23]建立的不同流域森林和径流量的回归方程式, 林地降雨径流率 R_f 与林地植被覆盖度 P_f 呈显著负相关关系, 相关系数在 0.463 2~0.63 之间, 本文取 0.55, 即

$$Q_f = 0.55 \times A_f \times J_0 \times K \times P_f \quad (8)$$

3.3.2 草地涵养水源价值

草地涵养水源价值评价方法同森林, 即用草地生态系统的蓄水效应来衡量其涵养水分的功能。

$$Q_g = A_g \times J_0 \times k \times (R_0 - R_g) \quad (9)$$

式中 Q_g 为与裸地相比较, 草地生态系统涵养水分的增加量; A_g 为研究区草地面积; J_0 为研究区多年平均降雨总量; K 为研究区产流降雨量占总降雨量的比例 (秦岭—淮河以北取 0.4 以南取 0.6)^[22]; R_0 为产流降雨条件下裸地降雨径流率; R_g 为产流降雨条件下草地降雨径流率。

草地降雨径流率 R_g 与草地植被覆盖度 P_g 呈显著负相关关系^[24]

$$R = -0.3187P_g + 0.36403 \quad (10)$$

即

$$Q_g = 0.3187 \times A_g \times J_0 \times K \times P_g \quad (11)$$

3.3.3 农田涵养水源价值

土壤中的非毛管孔隙是土壤的快速储水场所, 提供暂时的储水容量, 并可迅速排水和接纳新渗入的雨水, 从而减少了地表径流。我国的林学界和水土保持领域, 通常用非毛管静态蓄水量作为计算森

林土壤蓄水量的基准^[25]

$$W_0 = 10^4 \times h \times P_0 \times R_w \quad (12)$$

式中 W_0 —非毛管蓄水量 (t/hm^2); h —土层深度 (m); P_0 —土壤的非毛管孔隙度 (%); R_w —水容重 (t/m^3)。

土壤非毛管孔隙度借用杨恒山等^[26]在东北农牧交错带对玉米 0~30 cm 土壤的实测值, 本文取 8.5%。计算出涵养水源的增加量后, 其服务价值可由替代工程法计算, 我国 1 m^3 库容的水库工程费用为 0.67 元。

3.4 土壤保持价值

生态系统的土壤保持价值主要通过减少表土损失量、保护土壤肥力、减轻泥沙淤积灾害 3 个生态过程来实现其经济价值。首先计算生态系统的单位面积土壤保持量, 然后利用机会成本法、影子价格法和替代工程法, 计算其经济价值。

3.4.1 单位面积土壤保持量的计算

植被土壤保持量根据各类植被所在区位的潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值进行测算。实际土壤侵蚀量是指当前地表覆盖情形下的土壤侵蚀量, 潜在土壤侵蚀量则是没有地表覆盖因素和土壤管理因素情形下可能产生的土壤侵蚀量。公式为^[27]

$$A_c = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (13)$$

式中 A_c 为土壤保持量 ($\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$); R 为降雨及径流因子; K 为土壤可蚀性因子; L 、 S 为坡长坡度因子; C 为地表植被覆盖因子; P 为土壤保持措施因子。

3.4.2 植被土壤保持价值评估模型

运用影子价格法、机会成本法和替代工程法从减少土地废弃、保持土壤肥力和减轻泥沙淤积灾害 3 个方面来评价生态系统对土壤保持的经济价值。

土壤肥力保持价值测算: 土壤侵蚀大量的土壤营养物质流失, 主要是土壤中 N 、 P 、 K 。不同土壤类型中的 N 、 P 、 K 含量大不相同。采用影子价格法, 由土壤中氮磷钾含量、土壤保持量和化肥平均价格计算, 测算出不同生态系统土壤中 N 、 P 、 K 的平均含量, 我国化肥平均价格为 2 549 元 / t (1990 年不变价)。公式为^[28]

$$E_f = \sum A_c \times C_i \times P_i \quad (i = N, P, K) \quad (14)$$

式中 E_f 为保护土壤肥力经济效益 (元 / $(\text{km}^2 \cdot \text{a})$); 为土壤保持量 ($\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$); C_i 为土壤中氮、磷、钾的纯含量 (%); P_i 为化肥的价格 (元 / t)。

减少土地废弃价值测算: 采用土地的机会成本

法,由土地面积保持量和单位面积林地、草地生产收益估算。土地面积保持量可由土壤保持量、土壤容重和土壤表土平均厚度计算。其公式为^[27]

$$E_i = A_c / (\rho \times 0.5) \times B$$

(15)

式中 E_i 为减少土地废弃的经济效益 (元 / (km² · a)); A_c 为土壤保持量 (t / (km² · a)); ρ 为土壤容量 (t/m³); B 为单位面积林业、牧业年均收益 (元 / (hm² · a))。

减轻泥沙淤积灾害价值测算: 用替代工程法计算。按照中国主要流域的泥沙运动规律全国土壤侵蚀流失的泥沙有 24% 淤积于水库、江河、湖泊, 从而造成需水量的下降^[29]。

我国 1 m³ 库容的水库工程费用为 0.67 元。公式为^[28]

$$E_n = A_c \times 24\% \times C$$

(16)

式中 E_n 为减轻泥沙淤积经济效益 (元 / (km² · a)); A_c 为土壤保持量 (t / (km² · a)); C 为水库工程费用 (元 / m³)。

3.5 营养物质循环价值

生态系统营养物质循环的最主要过程是生物与土壤之间的养分交换过程,也是植物初级生产的基础,对维持生态系统的功能和过程十分重要^[30]。营养物质通过复杂的食物网而循环再生,并成为个球生物地化循环不可或缺的环节^[28]。以 NPP 为基础,估算其重要营养物质 N、P、K 在生态系统中的年吸收量。按 1990 年不变价,在 1985 ~ 1990 年间我国化肥平均价格为 2 549 元 / t。按市场价值法,以化肥的平均价格估算生态系统的重要营养物质循环的经济价值。

4 结果与分析

4.1 生态系统服务价值的构成与分布

4.1.1 价值构成

从北方农牧交错带生态系统服务价值及价值变化状况(表 1、图 3)可看出, 1986 年和 2000 年生态系统服务功能的总价值分别为 4 062.0 亿元和 3 106.1 亿元,平均价值为 3 584.0 亿元。其中,草地服务价值占总价值的 42.5%,其次为农田(35.5%)和森林(10.0%),这三类共占研究区生态系统服务功能总价值的 88%。从单位面积价值来看,森林的平均单位面积价值最高,其次为灌丛、农田和草地,这说明森林和灌丛的生态系统服务价值的贡献率最大;农田的土壤非毛管孔隙度较大,涵养水源功能较强,使其单位面积价值较大;草地受人为破坏严重、质量下降,单位面积价值较小。

4.1.2 价值的水平分布

从生态系统服务价值水平分布图(图 4)来看,北方农牧交错带总体空间分布由东南向西北递减,这与 NPP 和降水的梯度分布基本一致。生态系统服务价值的最低值区主要分布在西北干旱、半干旱地区,该区荒漠广布,降水少且多大风,植被以荒漠草原为主,覆盖度很低,生态环境极其脆弱,生态系统服务功能单位面积价值在 3 000 元 / (km² · a) 以下。生态系统服务价值另一个低值区位于内蒙古与黑、吉、辽的交界区,这些地区近 20 a 经济发展较快,人类过渡开发损害了自然生态系统原有的功能,人为活动强度大是导致生态系统服务价值较低的主

表 1 生态系统服务价值及其变化

Table 1 Ecosystem services value and its changes

类型	面积 (km ²)		单位面积价值 (元 / (km ² · a))			生态系统服务总价值 (亿元)					
	1986 年	2000 年	1986 年	2000 年	平均值	1986 年	%	2000 年	%	平均值	%
农田	207 146	204 534	695 828	538 063	616 945	1 441.4	35.5	1 100.5	35.4	1 271.0	35.5
森林	52 541	53 181	76 4551	59 6510	68 0531	401.7	9.9	317.2	10.2	359.5	10.0
灌丛	34 321	27 156	711 580	585 937	648 758	244.2	6.0	159.1	5.1	201.7	5.6
草地	264 214	252 288	665 649	509 691	587 670	1 758.7	43.3	1 285.9	41.4	1 522.3	42.5
水域	12 271	22 680	491 854	327 036	409 445	60.4	1.5	74.2	2.4	67.3	1.9
裸地	40 279	50 933	386 230	332 142	359 186	155.6	3.8	169.2	5.4	162.4	4.5
合计	610 772	610 772	665 054	508 553	586 804	4 062.0	100	3 106.1	100	3 584.0	100

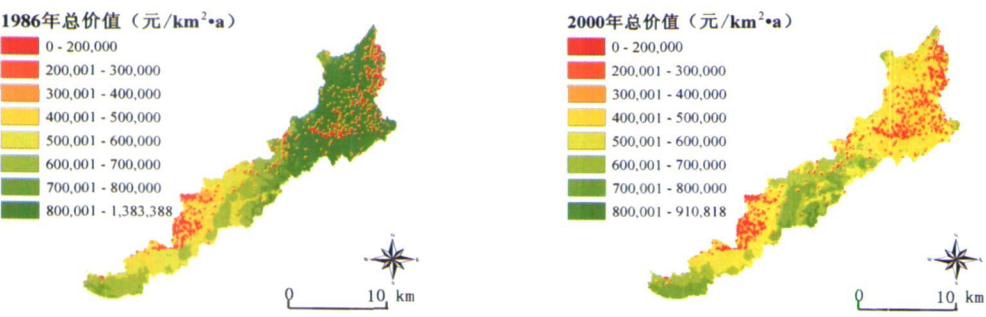


图 3 1986年 (a) 与 2000年 (b)生态系统服务价值分布
Fig 3 Distribution of ecosystem services value in 1986(a) and in 2000(b)

要原因。生态系统服务价值较高地区位于交错带中部,这些地区降水较多,热量充分,植被类型以典型草原和灌丛为主,植被覆盖度较高,其生态系统服务功能单位面积价值大多在 6 000元 / (km² · a) 以上,该区东南的部分地区生态系统服务功能单位面积价值可达 10 000元 / (km² · a)。

4 1 3 价值的垂直分布

基于 DEM 的高程、坡度、坡向分级和生态系统类型,构建了生态系统服务价值的垂直分布状况(表 2)。从高程分级来看:海拔低于 500 m 的区域,农田占主导地位;高于 500 m 的区域,草地占主导地位。海拔 1 000~ 1 500 m 的区域,土地面积最大,生态系统服务价值也最大; > 2 000 m 的区域土地面积最小,生态系统服务价值也最小。从坡度分级来看:坡度 < 15° 的区域,草地占主导地位; 15° 以上的区域,森林占主导地位。坡度 < 5° 的区域,土地面积和生态系统服务价值占绝对优势; > 5° 的区域,生态系统服务价值总和都不足 10%。从坡向分级来看:无论是在无坡向的平地上,还是在其他任何坡向上,草地所占比例最大 (40% 以上),其次是耕地 (30% ~ 35%);无坡向的平地面积占全部土地面积的比例最大,其生态系统服务价值也最大。从不同海拔、坡度和坡向的分布来看,土地面积比例与生态系统服务价值比例的差值在 ±3% 范围内。这反映出生态系统服务价值大小与土地面积呈极强的正相关,也说明生态系统服务价值在垂直方向上主要受自然因素影响,人类活动影响微弱。

4.2 生态系统服务价值的变化

在气候变化和不合理的人类活动影响下,北方农牧交错带生态系统服务价值呈明显的下降趋势。研究区生态系统服务功能总价值 1986年和 2000年分别为 4 062.0亿元和 3 106.1亿元,总价值降低了

23.5%。从不同的生态系统类型来看,所有的生态系统的服务价值都在降低,其中森林的单位面积价值减少的最多。

生态系统服务价值降低有两方面原因: 1. 在全球变暖的大环境下,在半干旱地区,降水是影响植被生物量和覆盖度的关键因素; 2. 20世纪后期,在人口增加、广种薄收的耕作方式和“以粮为纲”的政策鼓励下,耕地不断向北扩张,导致草地面积迅速减少;加之森林滥砍滥伐和大范围土地荒漠化的影响,北方农牧交错带生态环境遭受了严重破坏,生态系统服务功能也迅速降低。

从图 5看出, 1986~ 2000年,生态系统服务价值的最大值的空间分布自东北向西南方向移动, 1986年生态系统服务价值的最大值分布在内蒙古东部及其与黑、吉、辽的交界区,到 2000年最大值已移到内蒙古中部及其与陕、晋、冀的交界地区。最小值基本上保持在内蒙古的西部荒漠地区。

从生态系统服务价值的差值分布图(见图 4)看出,北方农牧交错带约有 2/3 的地区的生态系统服务功能在降低。其中,单位面积价值减少 400 000 元以上的地区主要位于内蒙古与黑、吉、辽的交界地区;单位面积价值减少 400 000 元以下的地区分布在内蒙古与冀、陕的交界区;单位面积价值增加的区域位于内蒙古与山西的交界区及研究区的西南部。

5 结论与讨论

5.1 结论

1. 目前,区域生态系统服务功能的经济价值测算方面的研究还处于初级阶段,利用遥感技术测算生态系统服务功能的经济价值克服了传统的生态统计方法以点带面的缺点。在测算生态系统服务价值

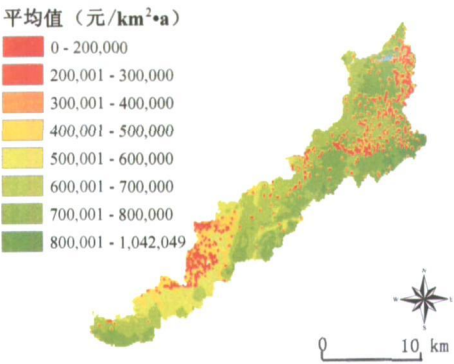


图 4 生态系统服务平均价值分布

Fig 4 Distribution of ecosystem services mean value

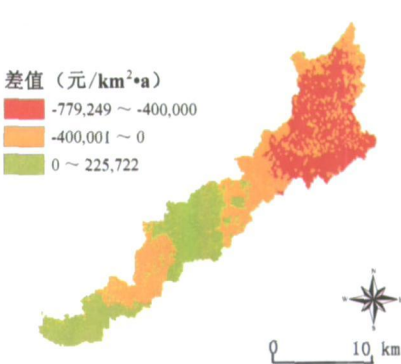


图 5 生态系统服务价值变化

Fig 5 Distribution of ecosystem services value changes

表 2 不同地形条件下的生态系统服务价值分布状况

Table 2 The distributing status of ecosystem services value in different land form

地形条件		生态系统类型面积百分比 (%)						土地面积 比例 (%)	服务价值 比例 (%)
		农田	森林	灌丛	草地	水域	裸地		
高程 (m)	< 500	40.8	4.4	1.9	30.8	9.1	12.9	26.6	26.6
	500~ 1 000	28.9	13.5	8.2	41.5	2.4	5.5	15.5	16.8
	1 000~ 1 500	28.9	10.3	4.4	44.7	2.1	9.5	37.5	34.8
	1 500~ 2 000	35.9	8.8	4.7	47.3	0.8	2.5	16.1	16.9
	> 2 000	33.6	5.2	6.0	52.9	0.6	1.9	4.3	4.9
坡度 (°)	< 5	34.1	8.0	3.9	41.4	3.9	8.7	94.1	93.2
	5~ 10	23.6	20.7	12.5	39.9	1.2	2.2	5.4	6.2
	10~ 15	16.2	26.0	16.2	38.7	1.1	1.8	0.5	0.6
	15~ 20	8.1	45.7	12.2	31.2	0.9	1.8	0.1	0.1
	> 20	0.0	70.0	0.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
坡向 (°)	无坡向 (- 1)	33.8	7.7	3.9	41.0	4.2	9.4	83.4	81.8
	阳坡 (157.5~ 202.5, 202.5~ 247.5)	32.5	13.6	7.1	42.4	1.5	2.9	4.3	4.7
	半阳坡 (247.5~ 292.5, 112.5~ 157.5)	31.1	14.6	7.4	42.4	1.6	3.0	4.4	4.9
	半阴坡 (67.5~ 112.5, 292.5~ 337.5)	30.4	14.8	7.8	43.0	1.3	2.8	4.6	5.0
	阴坡 (337.5~ 22.5, 22.5~ 67.5)	31.3	13.5	7.0	43.6	1.5	3.2	3.3	3.6

过程中考虑了 *NPP* 和植被覆盖度的空间分布差异, 区分了同一生态系统服务功能的内部差异, 使得测算结果更能反映区域实际情况。

2. 北方农牧交错带生态系统服务功能总价值在 1986 年和 2000 年分别为 4 062. 0 亿元和 3 106. 1 亿元。在不同年份, 草地、农田和森林的服务价值所占比例都最大。从单位面积价值看, 森林和灌丛服务功能的价值最高。从空间分布来看, 在水平方向上, 生态系统服务价值由东南向西北递减, 区域差异明显, 其分布受气候变化和人类活动影响较大; 在垂

直方向上, 生态系统服务价值大小与土地面积呈较强的正相关, 其分布主要受自然因素影响, 人类活动影响微弱。

3. 受区域降水减少和人类活动的影响, 20 世纪末北方农牧交错带各类生态系统服务功能的价值及其总价值都呈明显降低趋势, 且价值降低区域的面积较大 (约占总面积 2/3)。其降低的原因在于气候变化和人类破坏的共同影响。生态系统服务功能单位面积价值的最大值由东北向西南移动到交错带的中部。

5.2 讨论

1. 受测算方法、遥感数据特性及对总价值贡献率等影响,本文只选取了5种影响较大的服务功能(有机物生产、气候调节、涵养水源、土壤保持及营养物质循环)的价值进行了测算,特别是对涵养水源价值的测算只考虑了森林、草地和农田生态系统,使得生态系统服务功能的单位面积价值和总价值远小于其实际价值,其测算体系有待进一步的发展和完善。

2. 遥感测算的精度问题,例如遥感数据的获取及预处理、生态系统的分类精度及面积统计、NPP和植被覆盖度的测算的误差,这都会使最终结果产生一定的偏差。

3. 目前,我国对生态系统服务价值测算的研究增长很快,但研究内容大多局限于不同区域和不同类型的生态系统服务功能的价值化评估,今后需加强对生态系统服务功能退化现状、退化原因及预警方面的研究。

参考文献 (References)

- [1] Yue Shuping, Zhang Shuwen, Yan Yechao. Impacts of land use change on ecosystem services value in the northeast China transect (NECT)[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(8): 879~886 [岳书平, 张树文, 闫业超. 东北样带土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. *地理学报*, 2007, 62(8): 879~886]
- [2] Robert Costanza, Ralph d'Arge, Rudolf de Groot, *et al*. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253~260
- [3] David P. Ecological accountancy [J]. *Science*, 1997, 277(5333): 1783~1785
- [4] Daily G. C., Tore S. derqvist, Sara Aniyar, *et al*. The value of nature and nature of value[J]. *Science*, 2000, 289(5478): 395~396
- [5] Ehrlich P. R., Ehrlich A. H., Holhen J. P. *Ecoscience: Population Resources Environment* [M]. San Francisco: Freeman and Co., 1997
- [6] Ewel K. Water quality improvement: evaluation of an ecosystem services [A]. In: G. Daily. *Nature's Services* [C]. Washington D. C.: Island Press, 1997: 329~344
- [7] Grief F., Rosenthal J. *Biodiversity and Human Health* [M]. Washington, D. C.: Island Press, 1997: 131~163
- [8] Zhao Jingzhu, Xiao Han, Wu Gang. Comparison analysis on physical and value assessment methods for ecosystem services [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 11(2): 290~292 [赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质质量与价值量评价方法的比较分析[J]. *应用生态学报*, 2002, 11(2): 290~292]
- [9] Guo Zhongwei, Gan Yaling. Some scientific questions for ecosystem services[J]. *Biodiversity*, 2003, 11(1): 63~69 [郭中伟, 甘雅玲. 关于生态系统服务功能的几个科学问题[J]. *生物多样性*, 2003, 11(1): 63~69]
- [10] Pan Yaoshong, Shi Peijun, Zhu Wenquan, *et al*. Measurement of ecological capital of Chinese terrestrial ecosystem based on remote sensing[J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(4): 375~384 [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]
- [11] Hou Xuyu, *et al*. *Vegetation Map of China* (1:1,000,000) [M]. Beijing: Science Press, 2001. [侯学煜, 等. 1:100万中国植被图集[M]. 北京: 科学出版社, 2001]
- [12] Hou Xuyu, *et al*. *Vegetation Map of People's Republic of China* (1:400 million) [M]. Beijing: Map Press, 1982 [侯学煜, 等. 1:400万中华人民共和国植被图[M]. 北京: 地图出版社, 1982]
- [13] Deng Shiqin. Map of soil texture of China. In: *Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. Soil of China* [M]. Nanjing: Sinomaps Press, 1986: 23~24 [邓时琴. 中国土壤质地图[M]. 见: 中国科学院南京土壤研究所编. 中国土壤图集[M]. 北京: 地图出版社, 1986: 23~24]
- [14] Sun Rui, Zhu Qijiang. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China from April 1992 to March 1993[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 36~45 [孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[J]. *地理学报*, 2000, 55(1): 36~45]
- [15] Sellers P.J., Tucker C.J., Collatz G.J., *et al*. A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(17): 3519~3545
- [16] Zhu Wenquan, Pan Yaoshong, He Haq, *et al*. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(6): 700~706 [朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光能利用率模拟[J]. *科学通报*, 2006, 51(6): 700~706]
- [17] Gutman G., Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA /AVHRR data for use in numerical weather prediction models[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1533~1543
- [18] Li Jinchang. *Ecological Value Theory* [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1999: 107~120 [李金昌. 生态价值论[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1999: 107~120]
- [19] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China [Z]. *China Statistical Yearbook 1992*. Beijing: China Statistical Press, 1992 [中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[Z]. 北京: 中国统计出版社, 1992]
- [20] Chen Runzheng, Huang Shangsong, Song Songquan, *et al*. *Plant Physiology* [M]. Guangzhou: Zhongshan University Press, 1998 [陈润政, 黄上志, 宋松泉, 等. 植物生理学[M]. 广州: 中山大学出版社, 1998]
- [21] Jiang Lipeng, Qin Zhihao, Xie Wen, *et al*. Estimation of grassland ecosystem services value of China using remote sensing data [J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(2): 161~170 [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]
- [22] Zhao Tongqian, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua *et al*. Forest ecosystem services and their valuation in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(4): 480~ 491 [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] Zhang Qingfei, Zhou Xiaofeng. Evaluation of the Benefits of Forest on the Water Storage and Sediment Reduction in Hulan River and Tangwang River Basins [J]. *Ecologiae Economy*, 1994, (6): 21~ 24 [张庆费, 周晓峰. 呼兰河和汤旺河流域森林涵养水源和减沙效益的评价 [J]. 生态经济, 1994, (6): 21~ 24]
- [24] Zhu Lianqi, Xu Shuming, Chen Peiyun. Study on the impact of land use/land cover change on soil erosion in mountainous areas [J]. *Geographical Research*, 2003, 22(4): 432~ 438 [朱连奇, 许叔明, 陈沛云. 山区土地利用 覆被变化对土壤侵蚀的影响 [J]. 地理研究, 2003, 22(4): 432~ 438]
- [25] Ma Xuehua. Forest Hydrology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993: 123~ 128 [马雪华. 森林水文学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1993: 123~ 128]
- [26] Yang Hengshan, Cao Minjian, Fan Fu. Comparison of comprehensive benefits between alfalfa and corn in agriculture-pasture ecotone in the Northeast China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(4): 107~ 109 [杨恒山, 曹敏建, 范富. 东北农牧交错带种植苜蓿与玉米综合效益研究 [J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 107~ 109]
- [27] Zhou Zixiang, Ren Zhiyuan, Li Jing. Study on the ecological value of soil conservation of vegetation in the Qinling-Daba Mountains [J]. *Arid Zone Research*, 2006, 23(1): 144~ 148 [周自翔, 任志远, 李晶. 秦巴山区植被土壤保持生态价值研究 [J]. 干旱区研究, 2006, 23(1): 144~ 148]
- [28] Ren Zhiyuan, Li Jing. The value of ecological Services from the vegetation ecosystems in the Qinling-Daba Mountains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 503~ 511 [任志远, 李晶. 陕南秦巴山区植被生态功能的价值测评 [J]. 地理学报, 2003, 58(4): 503~ 511]
- [29] Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological economic values [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607~ 613 [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]
- [30] Zhao Tongqian, Ouyang Zhiyun, Jia Liangqing *et al*. Ecosystem services and their valuation of China grassland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1101~ 1110 [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]

Measurement and Dynamic Change of Ecosystem Services Value in the Farming-pastoral Ecotone of Northern China

LIU Junhui^{1, 2}, GAO Jixi³

(1 Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

2 China Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Institute of Ecology, CRAES, Beijing 100012, China)

Abstract Based on the characteristics of ecosystem types, *NPP* and vegetation coverage in the farming-pastoral ecotone of northern China, by adopting RS and GIS technology, integrating with methods of ecology-economics, this paper measured the value of ecosystem services and its dynamic change. The results showed that: (1) the value of grassland, farmland and forestland is the most important in all the ecosystem services; (2) the per-pixel value of forest and shrub is higher than that of other ecosystems; (3) in horizontal distribution, the value of ecosystem services has obvious regional difference, and its distribution was greatly impacted by climate and human activities; in vertical distribution, the topographic factors affect the value of ecosystem services more evidently than human activities; (4) the value of every ecosystem service and the total value are decreasing, and the maximum value of per-pixel ecosystem services changed from northeast to southwest, at last reaching the central section of the ecotone during 1986~ 2000.

Key words vegetation coverage; *NPP*; ecosystem services; economic value; the farming-pastoral ecotone of northern China