

曹东, 於方, 朱文泉, 等. 2011. 遥感技术支持下的草地生态系统破坏经济损失评价[J]. 环境科学学报, 31(8): 1799-1807

Cao D, Yu F, Zhu W Q, et al. 2011. Valuation of economic losses from grassland ecosystem degradation using remote sensing data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(8): 1799-1807

遥感技术支持下的草地生态系统破坏经济损失评价

曹东^{1,2}, 於方^{2,*}, 朱文泉³, 谢光轩², 宋存义¹

1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083

2. 环境保护部环境规划院, 北京 100012

3. 北京师范大学资源学院, 北京 100875

收稿日期: 2010-09-03

修回日期: 2010-12-13

录用日期: 2011-01-13

摘要: 通过遥感数据分析反演, 测算草地净初级生产力、草地植被覆盖度、土壤侵蚀量等重要生态系统参数, 进而计算草地生态系统有机物质生产、营养物质循环、固碳释氧及水源涵养、土壤侵蚀损失量, 再通过影子工程法、市场价值法等环境价值评估方法从以上 5 个方面评价草地生态系统破坏的经济损失。研究结果表明, 2006 年中国草地生态系统生态破坏损失为 1446.8 亿元, 占 2006 年中国 GDP 的 0.69%; 在草地生态破坏造成的各项损失中, 水土保持的贡献率最大, 占总经济损失的 52.00%; 过度放牧是造成中国草地生态系统破坏的重要原因。

关键词: 草地; 生态系统; 破坏; 经济损失; 遥感

文章编号: 0253-2468(2011)08-1799-09

中图分类号: X196

文献标识码: A

Valuation of economic losses from grassland ecosystem degradation using remote sensing data

CAO Dong^{1,2}, YU Fang^{2,*}, ZHU Wenquan³, XIE Guangxuan², SONG Cunyi¹

1. College of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

2. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012

3. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875

Received 3 September 2010;

received in revised form 13 December 2010;

accepted 13 January 2011

Abstract: Using remote sensing data and the retro-extrapolation method, we evaluated the grassland ecosystem degradation in China by the following three major indicators: grassland net primary productivity (NPP), vegetation coverage rate, and soil erosion. Its ecological implications were then evaluated along the following five dimensions: organic substance production, nutrient circulation, oxygen release and carbon sequestration, water conservation, and soil erosion. Furthermore, the associated economic losses with grassland degradation were calculated by using shadow engineering and market valuation approaches. It was estimated that the economic losses from grassland degradation amounted to ¥144.68 billion RMB, accounting for 0.69 percent of China's gross domestic product (GDP) in 2006. And about 52.00 percent of the total loss, which is the biggest share, could be attributed to the failure of soil and water conservation. Overgrazing was found to be another important contributing factor in grassland degradation in China.

Keywords: grassland; ecosystem; deterioration; economic cost; remote sensing technique

1 引言 (Introduction)

草原是中国重要的战略资源, 根据《全国草原监测报告(2007)》, 中国有天然草原近 4 亿 hm^2 , 占国土面积 41.7%, 具有水土保持、固碳释氧、涵养水源、生产有机质和防风固沙等重要生态功能。正确认识草地生态价值, 客观评价草地生态破坏经济损失, 对推进草地合理利用, 维护国家生态安全, 促进经济社会全面协调可持续发展, 具有重要意义。

草地生态破坏损失指草地生态系统因人因因素导致生态质量退化, 影响其正常生态服务功能发挥带来的各项生态服务功能损失。国内外对草地生态价值的研究已取得一定进展, 如阐述草地维持大气成分、基因库、改善小气候和土壤保持等功能, 并评价了部分生态功能经济价值 (Sala 和 Paruelo, 1997)。在全球生态系统服务价值评价中, 得出了基于全球尺度的各功能类型的单位面积平均价值 (Costanza 等, 1997)。根据 Costanza (Costanza 等,

作者简介: 曹东 (1968—), 男, 研究员, E-mail: caodong@caep.org.cn; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: CAO Dong (1968—), male, professor, E-mail: caodong@caep.org.cn; * Corresponding author

1997) 的研究成果对中国的生态系统服务功能进行核算,获得中国草地生态服务价值(陈仲新等, 2000; 谢高地等 2001; 潘耀忠等 2004). 以上这些研究多集中于草地生态系统服务功能价值的研究,关于如何获得草地破坏的实物量数据以及如何评价人为因素对生态系统破坏的贡献的研究较少见到,本文尝试结合生态与遥感技术获取草地破坏的实物量数据,对人为因素对草地生态系统的破坏贡献率进行了探索性的研究,计算获得了全国的草地生

态破坏经济损失.

2 数据与方法(Data and methodologies)

2.1 数据来源及预处理

本研究主要利用以下 6 类数据——气象数据、遥感数据、土壤数据和 DEM 数据等地面观测资料、行政区划图以及其他经济统计数据,6 类数据的数据来源、预处理以及数据的用途见表 1.

表 1 数据源及预处理

Table 1 Data sources and pre-processing

数据类型	数据来源	数据描述	数据预处理	数据用途
气象数据	国家气象局	全国 674 个气象站点 2006 年的月平均温度、月降水量和月日照时数	数据重排及汇总、数据插值、数据切割等	生态参数(净初级生产力、植被覆盖度)、涵养水源、水土保持计算
遥感数据	中国农业科学院	包括覆盖全国的 2006 年每旬的 1 km × 1 km 分辨率 MODIS/NDVI 数据	去条带、去云、时间序列滤波和图像切割等	生态系统类型的解译和面积估算; 生态系统净初级生产力、植被覆盖度等生态参数计算
土壤数据	中国第二次土壤普查、《中国土壤志》	1:100 万的土壤类型图, 全国 2743 个土壤剖面数据	矢量栅格转换、土壤属性数据二次整理计算及空间插值	水土保持实物量计算
数字高程模型(DEM)数据	NASA	分辨率 1 km, 分块提供	分块数据合并、坡度计算	温度插值、土壤侵蚀量计算
行政边界数据		全国 1:400 万省级边界数据	投影变换	遥感制图、分区统计
经济统计调查数据	国家价格监测中心、市场调查	具体描述见 2.3.5 ~ 2.3.9 节	数据整理和统计分析	生态破坏损失价值量核算

2.2 评价内容

草地生态破坏经济损失的评价包括两部分: 草地生态破坏实物量计算和草地生态破坏价值量计算. 草地生态系统的价值主要表现在自然资源价值(生产有机物质的价值)、气候调节价值、涵养水源价值、水土保持价值和营养物质循环价值 5 个方面, 草地生态系统破坏造成的经济损失也主要体现在这 5 个方面. 与这 5 项生态破坏损失相对应的实物量损失项分别是有机物质生产量、CO₂ 吸收和 O₂ 释放量、涵养水源量、表土损失量、土壤肥力损失量和泥沙淤积增加量、以及氮、磷、钾等营养物质的循环量.

本研究针对全国 31 个省、自治区、直辖市(不包括台湾、香港和澳门)的草地生态破坏损失进行分析,评价基准年为 2006 年,评价的草地类型包括高山草甸、高山草地、草甸、高原草地、坡面草地和荒漠草地等 6 种.

2.3 评价方法

2.3.1 技术路线及方法 首先利用遥感分析技术识别出草地覆盖类型的空间分布图; 其次,根据遥感数据、气象数据和地面观测与统计数据,计算出草地生态系统的服务功能实物量; 然后根据草地监测数据中的过度放牧率计算出人为破坏系数; 再将人为破坏系数与草地的生态服务功能实物量相乘,得到草地生态破坏实物量; 最后将草地的生态破坏实物量与其单位价值量相乘,得到草地生态破坏经济损失价值(图 1).

遵循上述思路,形成核算方法如下: 首先,计算草地生态破坏实物量: 生态系统有机物质生产、营养物质循环、CO₂ 吸收和 O₂ 释放这 4 项生态破坏实物量的评估基于净初级生产力计算获得; 生态系统涵养水源损失量包括两种情况,当下垫面为土壤时(如林地、灌丛、草地等)根据破坏前后草地植被覆盖下的土壤储水能力来计算涵养水源损失量; 当下垫面为水时(如水域、水稻田、沼泽等)则根据降水

转换率(降水贮存量占总降水量的百分比)来计算; 草地水土保持损失包括水蚀和风蚀两部分,水蚀损

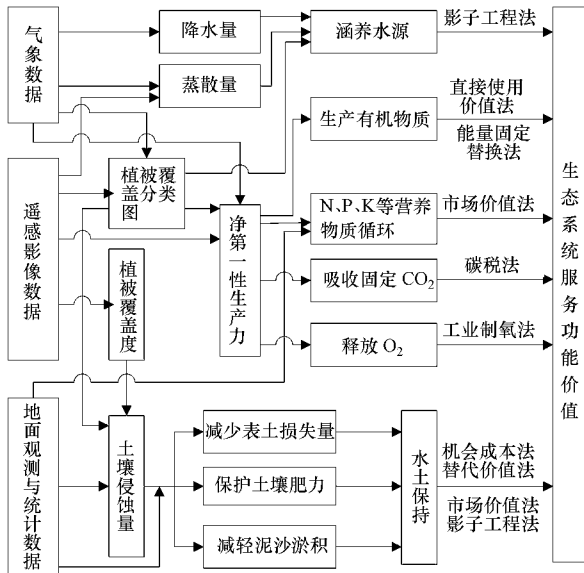


图1 草地生态破坏经济损失技术路线图

Fig. 1 Flowchart for evaluation of ecological deterioration loss of grassland

失主要包含表土损失、土壤肥力损失、增加泥沙淤积量3部分,风蚀损失主要包含表土损失、土壤肥力损失两部分,其中表土损失量由国内外广泛使用的USLE模型计算,风蚀量根据国家标准(SL190—96)转换得到,泥沙淤积量通过泥沙淤积率计算获得;营养物质循环实物损失量以草地净初级生产力为基础,根据干草中的氮、磷、钾的质量分配率来计算,然后通过影子工程法、市场价值法、机会成本法、替代价值法等方法将草地生态破坏实物量转换成草地生态破坏价值量。

2.3.2 草地覆盖的空间分布 由于不同的植被覆盖类型所具有的生态服务功能完全不同,因而首先需要将不同的植被覆盖类型在空间上体现出来. 研究中采用的草地类型空间分布图参考中国2000年1:100万植被类型图和中国2000年1 km × 1 km分辨率SPOT/NDVI数据植被覆盖分类图,根据2006年1 km × 1 km分辨率的MODIS/NDVI遥感数据时间序列解译得到我国的草地空间分布图(图2,图审字[2001]第508号).

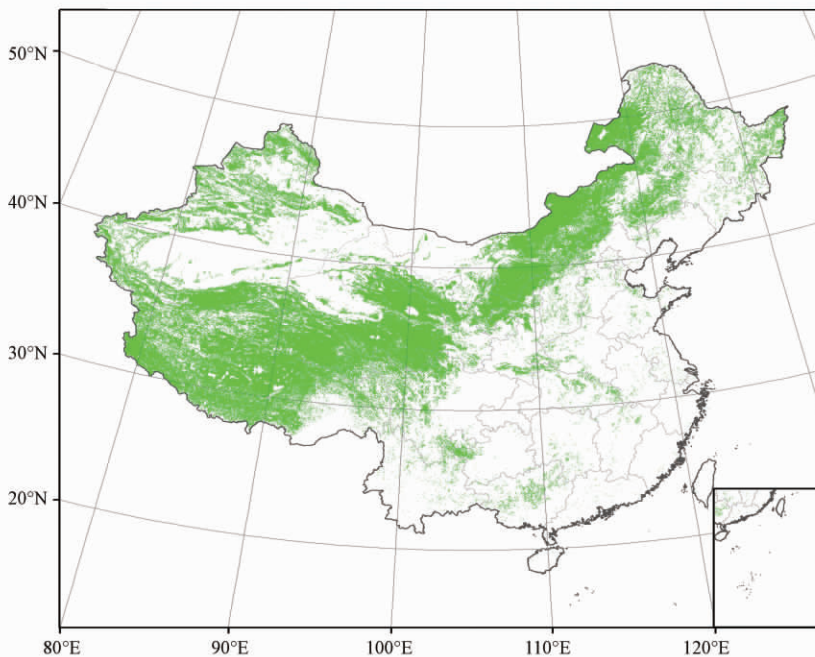


图2 2006年中国草地分布图

Fig. 2 Chinese grassland distribution in 2006

2.3.3 草地生态破坏损失计算模型 对于草地生态破坏损失的核算,首先计算草地生态系统所产生的年度总服务功能价值,然后计算人为破坏率,将二者相乘并汇总即得到草地生态破坏损失量,即:

$$L = \sum V_c \times r \quad (1)$$

式中 L 为草地生态破坏损失价值; V_c 表示草地的各种生态服务功能价值,如气候调节、水土保持等, $c = 1, 2, \dots, n$; r 为人为破坏率。

$$V_c = \sum_{i=1}^n R_i \times V_i \times S_i \quad (2)$$

式中, V_i 表示草地生态系统的第 i 种生态服务功能类型的单位面积价值; S_i 表示草地的面积大小, R_i 表示质量调整系数, 它是由草地生态系统的质量状况决定的。

影响草地生态系统生态退化的人为因素主要是不合理的草地利用, 包括过度放牧、违法征占用草地、乱采滥挖草原野生植被资源等。相对于过度放牧, 其余因素所占比重较小, 同时考虑到数据资料的可得性, 研究中所采用的人为破坏率根据过度放牧率确定。2006 年全国各省过度放牧率根据中华人民共和国农业行业标准《天然草地合理载畜量的计算》(NY/T 635—2002) 的计算方法, 依据中华人民共和国农业部的《全国草原监测报告 2006》数据、中国农业资源数据库 (<http://www.data.ac.cn/ny/index.asp>) 1994 年的全国各省合理载畜量的结构以及 2006 年《中国农村统计年鉴》的牲畜饲养情况数据计算得到。草原牲畜超载率与草地植被退化之间表现为 Logistic 生长曲线, 根据王亚军等 (2005) 研究结果, 在假定牲畜超载率大于等于 300% 时, 会对草原产生不可逆转的极重度退化 (即人为破坏率为 1.0)。研究构建了牲畜超载率与人为破坏率之间的 Logistic 关系模型。

$$r = \frac{1.0}{1.0 + 29.875 \times 0.143^x} \quad x > 0$$

$$r = 0 \quad x = 0 \quad (3)$$

式中 r 为人为破坏率, x 为牲畜超载率。根据计算结果, 过度放牧率地区高的四川、甘肃、西藏、内蒙古、新疆和青海等省区的草地人为破坏率较高, 约在 6.8% ~ 4.9% 之间。

2.3.4 实物量相关参数的计算

(1) 草地净初级生产力 (NPP)

NPP 的研究方法很多, 有关学者从不同角度及学科对 NPP 的估算进行了深入细致的研究, 从空间尺度上来说, 可分为 NPP 定位观测、区域 NPP 模拟估算和全球 NPP 模拟估算 3 种尺度。目前, 在区域及全球尺度的 NPP 估算模型中, 以 CASA 模型为代表的光能利用率模型得到广泛应用, 本文采用改进的 CASA 模型进行草地 NPP 估算 (朱文泉, 2005; 朱文泉, 2006; 朱文泉, 2007)。

① NPP 计算

$$NPP(x) = \sum_{i=1}^{12} NPP(x, t) \times S_p \quad (4)$$

式中, $NPP(x)$ 表示像元 x 处全年净初级生产力 (g , 以 C 计); $NPP(x, t)$ 表示 t 月份在像元 x 处的单位面积净初级生产力 ($g \cdot m^{-2} \cdot mon^{-1}$); S_p 表示像元面积 (m^2)。模型中所估算的 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:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (5)$$

式中, $APAR(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月份吸收的光合有效辐射 (单位: $MJ \cdot m^{-2}$); $\varepsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月份的实际光能利用率 (单位: $g \cdot MJ^{-1}$)。

② APAR 的算法

利用遥感数据估算光合作用有效辐射 (PAR) 中被植物叶子吸收的部分 (APAR) 是根据植被对红外和近红外波段的反射特征实现的。光合有效辐射 (PAR 0.4 ~ 0.7 μm) 是植物光合作用的驱动力。植被吸收的光合有效辐射取决于太阳总辐射和植物本身的特征, 可用公式计算:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (6)$$

式中, $SOL(x, t)$ 表示 t 月份在像元 x 处的太阳总辐射量 ($MJ \cdot m^{-2}$); $FPAR(x, t)$ 为 t 月份在像元 x 处植被层对入射光合有效辐射的吸收比例 (无单位); 常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射 (波长为 0.38 ~ 0.71 μm) 占太阳总辐射的比例。

③ 光能利用率 $\varepsilon(x, t)$ 的算法

光能利用率是在一定时期单位面积上生产的干物质中所包含的化学潜能与同一时间投射到该面积上的光合有效辐射能之比。环境因子如气温、土壤水分状况以及大气水汽压差等会通过影响植物的光合能力而调节植被的 NPP, 在遥感模型中这些因子对 NPP 的调控是通过最大光能利用率加以订正而实现的。

在理想条件下植被具有最大光能利用率, 而在现实条件下的最大光能利用率主要受温度和水分的影响:

$$\varepsilon(x, t) = T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_e(x, t) \times \varepsilon_{max} \quad (7)$$

式中, $T_{e1}(x, t)$ 和 $T_{e2}(x, t)$ 表示低温和高温对光能利用率的胁迫作用 (无单位), $W_e(x, t)$ 为水分胁迫影响系数 (无单位), 反映水分条件的影响, ε_{max} 是理想条件下的最大光能利用率 (单位: $g(C) \cdot MJ^{-1}$)。

(2) 草地植被覆盖度

测量草地植被覆盖度的手段分为地表实测和

遥感测量两大类(张云霞等 2003)。本研究中,草地覆盖度根据亚像元分解法(Gutman, 1998)计算,公式如下:

$$f_c = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (8)$$

式中 f_c 为草地覆盖度, $NDVI$ 为草地的归一化植被指数, $NDVI_{min}$ 为草地的 $NDVI$ 最小值, $NDVI_{max}$ 为草地的 $NDVI$ 最大值。

(3) 土壤侵蚀量

针对不同的时空尺度,目前已建立了一系列的土壤侵蚀模型,其中主要的模型有 USLE、RUSLE、CREAMS/GLEAMS、WEPP/GeoWEPP、SEMWE、LISEM 等(王德等, 2007; 褚英敏等, 2007)。本项研究选用 USLE 模型(Merritt *et al.*, 2005; Perrin *et al.*, 2001; Nachtergaele *et al.*, 2001) 进行土壤保持量的计算,包括现实土壤侵蚀量和潜在土壤侵蚀量,潜在土壤侵蚀量不考虑地表覆盖类型和土地管理因素,USLE 的形式为:

$$A_p = R \times K \times LS \quad (9)$$

现实土壤侵蚀量考虑了地表覆盖类型和土地管理因素,其计算式为:

$$A_r = R \times K \times LS \times C \times P \quad (10)$$

由上两式可得到土壤保持量:

$$A_c = A_p - A_r \quad (11)$$

式中 A_p 为潜在土壤侵蚀量 ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); A_r 为现实土壤侵蚀量 ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); A_c 为土壤保持量 ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); R 为降雨侵蚀力指标; K 为土壤可侵蚀因子; LS 为坡长坡度因子; C 为地表覆盖因子; P 为土壤保持措施因子。

(4) 土壤风蚀量

土壤风蚀是指一定风速的气流作用于土壤或土壤母质,土壤颗粒发生位移造成土壤结构破坏、土壤物质损失的过程(李玉宝, 2000)。风蚀区土壤风蚀量主要受植被覆盖率的影响,其风蚀土壤保持量的确定方法与水蚀区类似,这里根据国家标准(SL190—96)制定了风蚀土壤保持量的确定方法(表2)(姜立鹏等, 2007)。

表2 不同草地覆盖度条件下风蚀区土壤保持量的确定

Table 2 Soil preservation in wind erosion areas

土壤保持量/($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)				
<10%	10%~30%	30%~50%	50%~70%	>70%
0	50.0	77.5	101.5	114.0

2.3.5 草地生产有机物质损失的计算方法 草地生产有机物质的量一般有两种方法进行估算:一是采用生态学上的抽样反推法,二是结合生态学参数和遥感数据,通过构建生态机理模型来估算区域的草地生产量。本核算采用生态遥感估算法,草地生产有机物质损失的实物量按公式(12)计算:

$$O_m = NPP \times r \quad (12)$$

式中 O_m 为草地生产有机物质损失的实物量(碳单位),其他符号意义同前。草地生产有机物质损失的价值量按公式(13)计算:

$$O_v = O_m \times V_1 \quad (13)$$

式中 O_v 为草地生产有机物质损失的价值量, V_1 为碳的单价。有机物质损失采用替代价值法计算,即以碳作为有机物质的替代品,以单位碳的价值替代单位有机质的价值(元 $\cdot t^{-1}$)。本研究以标煤的市场价值计。碳的热值为 $0.036 MJ \cdot g^{-1}$,标煤的热值为 $0.02927 MJ \cdot g^{-1}$,因此 1 g 碳相当于 1.23 g 标煤。根据国家发改委价格监测中心提供的 2006 年全国动力煤重点合同车板价,折算得到碳的单位质量价值为 $330.0 元 \cdot t^{-1}$ 。

2.3.6 草地气候调节损失的计算方法 气候调节包括草地吸收固定 CO_2 和释放 O_2 两部分, CO_2 和 O_2 的实物量根据光合作用方程式计算,每生产 1 g 干物质可吸收固定 CO_2 1.62 g、释放 1.2 g 的 O_2 。草地吸收固定 CO_2 和释放 O_2 的损失实物量按如下公式计算:

$$M_{O_2} = NPP \times 1.2 \times r \quad M_{CO_2} = NPP \times 1.62 \times r \quad (14)$$

式中 M_{O_2} 为释放 O_2 的损失量, M_{CO_2} 为吸收 CO_2 的损失量,其他符号意义同前。草地吸收固定 CO_2 和释放 O_2 的损失价值量按碳税法和工业制氧法计算:

$$V_{O_2} = M_{O_2} \times V_2 \quad V_{CO_2} = M_{CO_2} \times V_3 \quad (15)$$

式中 V_{O_2} 为 O_2 的损失价值; V_{CO_2} 为 CO_2 的损失价值; V_2 为工业制氧价格,根据市场调查,2006 年工业氧气批发价约为 $500 元 \cdot t^{-1}$; V_3 为 CO_2 的单位质量市场价值(元 $\cdot g^{-1}$),根据目前全球最大的 CO_2 交易所—芝加哥气候交易所—2006 年的季度平均成交价和成交量(Paula DiPerna, 2007),计算得到 2006 年国际市场 CO_2 的平均交易价格为 $4.3 美元 \cdot t^{-1}$,按汇率 $8.0 元人民币/美元$ 计算, CO_2 的单位质量价值为 $34.4 元 \cdot t^{-1}$ 。

2.3.7 草地涵养水源损失的计算方法 采用贮水转换量的方法来计算涵养水源损失量及其价值(李

金昌等, 1999):

$$M_w = P_r \times R \times f_c \times r \quad V_w = M_w \times V_4 \quad (16)$$

M_w 为涵养水源损失量, P_r 为降水量, R 为 100% 覆盖下草地降水贮存量占草地降水量的百分比, 全国平均取值为 40% (中国生物多样性国情研究报告, 1998); f_c 为草地覆盖度, V_w 为涵养水源损失价值; V_4 为涵养水源的单位价值. 利用影子工程法计算草地生态破坏造成的涵养水源价值损失, 涵养水源价值的计量就转化为寻找恰当的工程造价的计量, 将通过调查获得的 19 个水利工程的平均造价作为建设 1m^3 水库库容所需的投资成本费, 2006 年全国取均值 $3.5 \text{元} \cdot \text{m}^{-3}$.

2.3.8 草地水土保持损失的计算方法

(1) 实物量计算

① 表土损失量:

$$M_{\text{ssl}} = A_c \div D_s \div H_s \times r \quad (17)$$

式中 M_{ssl} 为表土损失量 (面积单位), A_c 为土壤保持量 (重量单位), D_s 为土壤密度, H_s 为土壤深度; r 为人为破坏系数.

② 土壤肥力损失量 (氮、磷、钾、有机质):

$$M_{fi} = A_c \times R_{fi} \times J_i \times r \quad (18)$$

式中 M_{fi} 为氮、磷、钾肥 (换算成尿素、过磷酸钙和氯化钾) 和土壤有机质 (换算成碳) 损失量, A_c 为土壤保持量 (重量单位), R_{fi} 为土壤氮、磷、钾和有机质的百分含量, J_i 为氮、磷、钾元素和有机质转换成相应肥料 (尿素、过磷酸钙和氯化钾) 及碳的比率, 分别为: 2.17、8.33、2.22、0.58; 其它符号意义同前.

③ 增加的泥沙淤积量:

$$M_s = A_c \div D_s \times R_s \times r \quad (19)$$

式中 M_s 为增加的泥沙淤积量 (体积单位), A_c 为土壤保持量 (重量单位), D_s 为土壤密度, R_s 为泥沙淤积率, 全国平均取值 24% (中国生物多样性国情研究报告, 1998); 其它符号意义同前.

(2) 价值量计算

① 表土损失价值量

表土流失造成的损失利用机会成本法计算, 在本项研究中, 由于草地生态破坏造成表土流失, 相当于草地生产力的丧失, 也就意味着草地生产收益的丧失. 表土损失价值量用如下公式计算:

$$V_{\text{ssl}} = M_{\text{ssl}} \times V_c \quad (20)$$

式中 V_{ssl} 为表土损失的价值, M_{ssl} 为表土损失量, V_c 为草地的土壤生产机会成本, 由草地的平均收益计算. 根据农业部草原监理中心《2006 年全国草原监

测报告》和《中国农产品价格调查年鉴 2007》, 估算单位草地面积的平均收益约为每公顷 200 元.

② 土壤肥力 (氮、磷、钾、有机质) 损失的价值量

土壤肥力降低造成的价值损失采用替代价值法计算, 即以化肥和碳的价值替代土壤肥力和有机质的价值. 计算公式如下:

$$V_{fi} = M_{fi} \times V_i \quad (21)$$

式中 V_{fi} 为土壤肥力损失价值, M_{fi} 为氮、磷、钾肥 (换算成尿素、过磷酸钙和氯化钾) 和土壤有机质 (换算成碳) 损失量, V_i 为氮、磷、钾肥的平均价值以及碳的价值. 根据国家发改委价格监测中心提供的 2006 年尿素、过磷酸钙和氯化钾 3 种肥料的全国平均零售价以及零售和批发价之间的差价, 核算时 3 种肥料批发价分别取 $1750 \text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 、 $500 \text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $1830 \text{元} \cdot \text{t}^{-1}$, 碳的价格根据标煤换算, 为 $330.0 \text{元} \cdot \text{t}^{-1}$.

③ 增加泥沙淤积的价值量

$$V_s = M_s \times V_4 \quad (22)$$

式中 V_s 为增加泥沙淤积的价值量; M_s 为增加的泥沙淤积量; V_4 为涵养水源的单位价值. 根据影子工程法, 即每建设 1m^3 的水库库容所需的成本费计算, 2006 年全国取均值 $3.5 \text{元} \cdot \text{m}^{-3}$.

2.3.9 营养物质循环损失的计算方法 以草地净初级生产力为基础, 根据干草中的氮、磷、钾的质量分配率来计算, 即

$$M_{ni} = \text{NPP} \times R_{ni} \times J_i \times r \quad (23)$$

式中 M_{ni} 为干草的氮、磷、钾肥损失量; R_{ni} 为干草中氮、磷、钾元素的含量. 根据段飞舟 (2000) 提供的草原植物种群营养元素生殖分配表, 可推算草地生态系统每固定 1g 碳, 可积累 0.0358384g 氮、 0.002934g 磷和 0.010135g 钾; J_i 为氮、磷、钾元素转换成相应肥料 (尿素、过磷酸钙和氯化钾) 的比率, 分别为: 2.17、8.33、2.22; 其它符号意义同前.

损失根据干草的氮、磷、钾肥损失量及相应的肥料平均价值计算, 即

$$V_{ni} = M_{ni} \times V_i \quad (24)$$

式中 V_{ni} 为营养物质循环损失价值, M_{ni} 为干草氮、磷、钾肥损失量, V_i 为氮、磷、钾肥的平均价值, 三种肥料的价格同前.

3 结果 (Results)

1) 核算结果表明 2006 年度全国草地生态系统生态破坏损失价值量为 1446.8 亿元, 占 2006 年中国 GDP (21.087 万亿元) 的 0.69%. 其中, 草地生产

有机物质损失 135.8 亿元,气候调节损失 269.9 亿元,涵养水源价值损失 217.9 亿元,草地水土保持损失 699.8 亿元,草地营养物质循环损失 77.7 亿元.

2) 由于中国草地主要集中在西部地区,而且西部地区的牲畜超载率也普遍较高,因此,从全国 2006 年草地生态破坏经济损失的空间分布情况来看(图 3,图审字[2011]第 508 号),西部地区草地生

态破坏损失(1259.3 亿元)远大于东、中部地区,其中尤以青海省为最,其草地生态破坏损失高达 347.0 亿元.此外,内蒙、西藏、四川、新疆和黑龙江等省份草地生态破坏损失亦相当严重,均超过百亿;相较而言,东部及中部诸省草地、草原地面积小,也基本不存在过度放牧问题,其生态破坏经济损失近似为零.

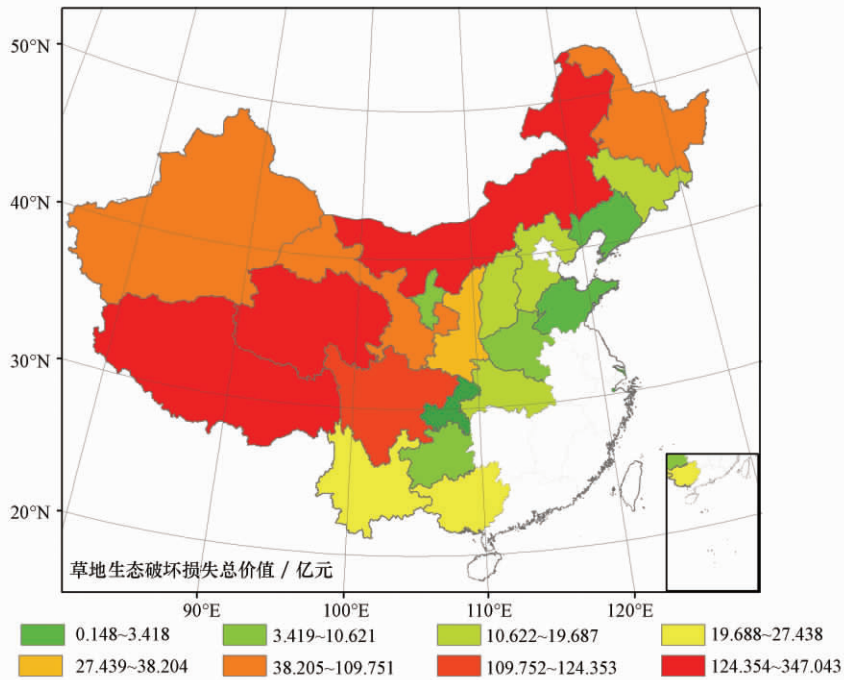


图 3 中国 2006 年草地损失空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of China's grassland ecological losses in 2006

(3) 在草地生态破坏造成的各项损失中,水土保持的贡献率最大,占总经济损失的 52% (图 4),在水土保持的各项经济损失中,由于土壤中钾的含量远高于氮磷,因此,钾肥损失占较大比重 82.8%,氮肥、磷肥和有机质减少造成的损失仅分别占水土保持经济损失的 7.5%、3.6%和 6.1%,减少表土和增加泥沙淤积的损失各占 0.02%和 0.07%.是调节

气候损失列损失第二位的,计 269.9 亿元,占总损失的 18.7%;接下来依次为涵养水源 217.9 亿元、生产有机质 135.8 亿元、营养物质循环 77.8 亿元.

4 结论(Conclusions)

1) 从草地生态系统破坏的原因看,过度放牧是造成中国现在草地生态系统破坏的重要原因.2006 年,全国天然草原平均超载牲畜 34%,六大牧区中西藏超载 38%、内蒙古超载 22%、新疆和青海超载 39%,四川和甘肃超载 40%.草原畜牧业是牧区经济发展的支柱产业,是农牧民收入的主要来源.但长期以来,草原牧区生产方式粗放落后,畜牧业经济增长完全依赖牲畜数量的增加,造成超载放牧日益严重,草地生态系统遭到严重破坏.为此有必要大力推进畜牧制度改革,促进畜牧业生产方式转变,合理利用草地资源,让草地生态系统休养生息.

2) 研究基于遥感技术核算草地生态系统服务

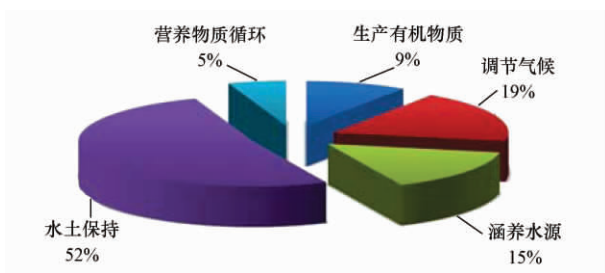


图 4 各项草地生态破坏损失的比例

Fig. 4 Share of Each Ecological Loss

功能实物量,并利用过度放牧率界定草地人为破坏率,得到草地生态破坏实物量和价值量,在生态破坏经济损失评价技术方法上具有可操作性,对森林、湿地等具有类似生态特征的生态系统破坏经济损失评估研究具有推广价值。

3) 由于基础数据不足以及部分基础研究的不充分,最终的计算结果还存在一定的不确定,具体表现在三个方面:第一,模型的适应性有待验证,本文在计算中所采用的土壤水蚀风蚀量、营养物质循环量采用的是其他研究者在某个具体的地区建立的经验公式。这些公式应用到全国草地生态系统损失计算时,存在较大的不确定性;第二,基础研究不充分,比如,由于风蚀过程特有的复杂性、随意性和无边界性,目前还很难对其进行精确的测定和科学的评估,课题中所采用的土壤风蚀模数估算方法还比较粗糙;第三,基础数据精度不够,本文在做草地植被类型解析时采用的是 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 分辨率 MODIS/NDVI 数据,由于数据精度不高可能导致植被类型或面积存在一定偏差,此外,价值量核算中的部分参数也需要开展专项调查更新和修订。

参考文献(References):

- 北京林业大学. 1981. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社
Beijing Forestry University. 1981. Pedology [M]. Beijing: Chinese Forestry Press (in Chinese)
- 陈明华, 周伏建. 1995. 土壤可蚀性因子研究[J]. 水土保持学报, 9(1): 19-24
- Chen M H, Zhou F J. 1995. The research on soil erosion factors [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 9(1): 19-24 (in Chinese)
- 陈仲新, 张新时. 2000. 中国生态系统效益的价值[J]. 科学通报, 45(1): 17-22
- Chen Z X, Zhang X S. 2000. The benefit value of Chinese ecosystem [J]. Chinese Science Bulletin, 45(1): 17-22 (in Chinese)
- 褚英敏, 方海燕, 袁再健. 2007. GIS 空间分析技术在土壤侵蚀评价中的应用[J]. 水土保持研究, 14(3): 239-242
- Chu Y M, Fang H Y, Yuan Z J. 2007. Use of GIS-based spatial analysis in soil erosion assessment [J]. Research of Soil and Water Conservation, 14(3): 239-242 (in Chinese)
- 中国生物多样性国情研究报告编写组编. 1998. 中国生物多样性国情研究报告[R]. 北京: 中国环境科学出版社. 191-210
- Compiling Committee for China National Situation Report on Biodiversity. 1998. China National Situation Report on Biodiversity [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press. 191-210 (in Chinese)
- Costanza R, d'Arge R, Groot R, et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 387: 253-260
- CSAR. 1995. Erosion hazard assessment [A] Second Land Resource Evaluation and Planning Project Part C [C]. Bogor, Indonesia: CSAR. 7-12
- 农业部草原监理中心草原保护与监测处. 2007. 全国草原监测报告 2007 [R]. 北京: 中国农业部. 2-3; 12-20
- Division of Grassland Protection and Monitoring, Grassland Monitoring Centre, Ministry of Agriculture. 2007. National Grassland Monitoring Report 2007 [R]. Beijing: Ministry of Agricultural of China. 2-3; 12-20 (in Chinese)
- 段飞舟, 陈玲, 阿里穆斯, 等. 2000. 草原植物种群营养元素生殖分配规律研究(II) [J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 31(2): 193-197
- Duan F Z, Chen L, A Limusi, et al. 2000. The study on reproductive allocation of nutrient elements of the steppe plant populations (II) [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol, 31(2): 193-197 (in Chinese)
- Gutman G, Ignatov A. 1998. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. International Journal of Remote Sensing, 19(8): 1533-1543
- 黄炎和, 卢程隆, 郑添发, 等. 1992. 闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究[J]. 水土保持学报, 6(4): 1-5
- Huang Y H, Lu C L, Zheng T F, et al. 1992. Study on rainfall erosivity index in Southeastern Fujian. [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 6(4): 1-5 (in Chinese)
- 姜立鹏, 覃志豪, 谢雯, 等. 2007. 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, 22(2): 161-170
- Jiang L P, Qin Z H, Xie W, et al. 2007. Estimation of grassland ecosystem services value of China using remote sensing data [J]. Journal of Natural Resources, 22(2): 161-170 (in Chinese)
- 李金昌, 姜文来, 靳乐山, 等. 1999. 生态价值论[M]. 重庆: 重庆大学出版社. 112-114
- Li J C, Jiang W L, Jin L S, et al. 1999. Ecological Value [M]. Chongqing: Chongqing University Press. 112-114 (in Chinese)
- 李玉宝. 2000. 干旱半干旱区土壤风蚀评价方法[J]. 干旱区资源与环境, 14(2): 49-52
- Li Y B. 2000. Soil erosion assessment for arid and semiarid areas [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 14(2): 49-52 (in Chinese)
- Merritt W S, Croke B F W, Jakeman A J. 2005. Sensitivity testing of a model for exploring water resources utilization and management options [J]. Environmental Modelling & Software, 20: 1013-1030
- 中华人民共和国农业部. 2006. 天然草地合理载畜量的计算(中华人民共和国农业行业标准 NY/T 635—2002)
- Ministry of Agriculture. 2006. Calculation of proper carrying capacity of rangelands. (Agriculture Industry Standard of the People's Republic of China NY/T 635—2002) (in Chinese)
- 中华人民共和国水利部. 1997. SL190—96 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 1997. SL190—96 Soil Erosion Classification and Grading Standard [S]. Beijing: China Waterpower Press (in Chinese)
- Nachtergaele J, Poesen J, Steegen A, et al. 2001. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils [J]. Geomorphology, 40: 237-252
- 国家统计局. 2007. 中国农产品价格调查年鉴 2007 [M]. 北京: 中国统计出版社

- National Bureau of Statistic. 2007. Chinese Agricultural Goods Product Price Investigation Yearbook 2007 [M]. Beijing: Chinese Statistic Press (in Chinese)
- 潘耀忠, 史培军, 朱文泉, 等. 2004. 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), 34(4): 374-384
- Pan Y Z, Shi P J, Zhu W Q. *et al.* 2004. Measurement of ecological capital of Chinese terrestrial ecosystem based on remote sensing [J]. Chinese Sciences (Series D), 34(4): 374-384 (in Chinese)
- Perrin C, Michel C, Andreassian V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments [J]. Journal of Hydrology, 242: 275-301
- Sala O E, Paruelo J M. 1997. Ecosystem services in grassland//. Daily G C, ed. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington D C: Island Press. 237-254
- Thornthwaite C W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate [J]. Geogr Rev, 38(1): 55-94
- 王德, 傅伯杰, 赵文武, 等. 2007. 土壤侵蚀模型研究中的几个问题 [J]. 干旱区地理, 30(3): 406-413
- Wang D, Fu B J, Zhao W W, *et al.* 2007. Some important issues in the modeling of water erosion: A review [J]. Arid Land Geography, 30(3): 406-413 (in Chinese)
- 王亚军, 魏兴琥, 杨萍. 2005. 超载放牧对那曲地区高山嵩草草甸植被退化的影响 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 41(1): 32-38
- Wang Y J, Wei X H, Yang P, *et al.* 2005. Effects of over-grazing on vegetation degradation of Kobresia Pygmaea meadow in Nagqu, Tibet [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 41(1): 32-38 (in Chinese)
- 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 2001. 全球生态系统服务价值评估研究进展 [J]. 资源科学, 23(6): 5-9
- Xie G D, Lu C X, Cheng S K. 2001. Progress in evaluating the global ecosystem service value [J]. Resources Science, 23(6): 5-9 (in Chinese)
- 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 等. 2001. 中国自然草地生态系统服务价值 [J]. 自然资源学报, (1): 47-53
- Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, *et al.* 2001. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China [J]. Journal of Natural Resources, (1): 47-53 (in Chinese)
- 游松财, 李文卿. 1999. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例 [J]. 自然资源学报, 14(1): 62-67
- You S C, Li W Q. 1999. Estimation of soil erosion supported by GIS: A case study in Guanji Township, Taihe, Jiangxi [J]. Journal of Natural Resources, 14(1): 62-67 (in Chinese)
- 张新时. 1989. 植被的 PEP(可能蒸散)指标与植被-气候分类(二)——几种主要方法与 PEP 程序介绍 [J]. 植物生态学与地植物学报, 13(3): 197-207
- Zhang X S. 1989. The potential evapotranspiration (PE) index of vegetation and vegetation-climatic classification (2)—an major introduction of methods and PEP program [J]. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 13(3): 197-207 (in Chinese)
- 张云霞, 李晓兵, 陈云浩. 2003. 草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述 [J]. 地球科学进展, 18(1): 85-93
- Zhang Y X, Li X B, Chen Y H. 2003. Overview of field and multi-scale remote sensing measurement approaches to grassland vegetation coverage [J]. Advances in Earth Science, 18(1): 85-93 (in Chinese)
- 张志明. 1990. 计算蒸发量的原理与方法 [M]. 成都: 成都科技大学出版社. 216-223
- Zhang Z M. 1990. Theory and Methods about Computing Evapotranspiration [M]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press. 216-223 (in Chinese)
- 周伏建, 陈明华, 林福兴, 等. 1995. 福建省土壤流失预报研究 [J]. 水土保持学报, 9(1): 25-30
- Zhou F J, Chen M H, Lin F X, *et al.* 1995. Study on the soil loss prediction in Fujian. [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 9(1): 25-30 (in Chinese)
- 周伏建, 黄炎和, 林福兴, 等. 1995. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值 [J]. 水土保持学报, 9(1): 14-18
- Zhou F J, Huan Y H, Lin F X, *et al.* 1995. Indicator of rainfall erosivity in Fujian. [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 9(1): 14-18 (in Chinese)
- 周广胜, 王玉辉. 1999. 全球变化与气候——植被分类研究展望 [J]. 科学通报, 44(24): 2587-2592
- Zhou G S, Wang Y H. 1999. Global change and climate-outlook of research of vegetation typology and research [J]. Chinese Science Bulletin, 44(24): 2587-2592 (in Chinese)
- 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 2005. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展 [J]. 生态学杂志, 24(3): 296-300
- Zhu W Q, Chen Y H, Xu D, *et al.* 2005. Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models [J]. Chinese Journal of Ecology, 24(3): 296-300 (in Chinese)
- 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 2006. 中国典型植被最大光利用率模拟 [J]. 科学通报, 51(6): 700-706
- Zhu W Q, Pan Y Z, He H, *et al.* 2006. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China [J]. Chinese Science Bulletin, 51(6): 700-706 (in Chinese)
- 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 2005. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例 [J]. 遥感学报, 9(3): 300-307
- Zhu W Q, Pan Y Z, Long Z H, *et al.* 2005. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: A case study in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Remote Sensing, 9(3): 300-307 (in Chinese)
- 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 2007. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. 植物生态学报, 31(3): 413-424
- Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S. 2007. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. Journal of Plant Ecology, 31(3): 413-424 (in Chinese)
- 朱文泉, 张锦水, 潘耀忠, 等. 2007. 中国陆地生态系统生态资产测量及其动态变化分析 [J]. 应用生态学报, 18(3): 586-594
- Zhu W Q, Zhang J S, Pan Y Z, *et al.* 2007. Measurement and dynamic analysis of ecological capital of terrestrial ecosystem in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 18(3): 586-594 (in Chinese)