

喀斯特生态系统服务功能遥感定量评估与分析

张明阳^{1,3,4}, 王克林^{1,3,*}, 陈洪松^{1,3}, 章春华^{1,3}, 刘会玉², 岳跃民^{1,3,4}, 凡非得^{1,3,4}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046;
3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 生态系统服务功能评估是人类对自然与生态系统认识成果应用于经济决策的桥梁。西南喀斯特区面临环境恶化和经济社会贫困的双重压力, 揭示其生态系统服务功能时空变化特征是实现生态恢复和可持续发展过程中亟待解决的问题。本研究通过多年遥感影像及气象和统计资料等, 对喀斯特典型区域桂西北 1985 ~ 1990 ~ 2000 ~ 2005 年的生态系统服务功能进行了定量评估与分析。其分析结果表明: (1) 生态服务功能呈先降后升、总体减少趋势, 4 个年份分别是 1096.52 亿元、887.89 亿元、1033.84 亿元和 1062.57 亿元。大致呈由西向东、由山区向峰丛洼地减少的空间分布特征。高值区(西部)是减弱区, 低值区(东部)是增强区; (2) 营养物循环、调节气体和有机质生产等单项生态服务功能较高, 总和分别占各自年份 72.69%、64.57%、70.18% 和 72.10%; 涵养水源、土壤保持和娱乐文化相对较低, 都远低于 100 亿元。(3) 林地和灌木是优势景观类型, 也是生态服务功能的主要贡献景观类型, 二者总贡献率在各自年份分别为 71.22%、70.10%、73.66%、67.03%; 居民用地和石漠化地生态服务功能少, 总贡献率分别仅为 0.90%、0.63%、0.77%、1.14%; (4) 各行政区单位面积的生态服务功能变化幅度比较大, 分别由 23549.70 元/hm²、173.5.10 元/hm²、22705.1 元/hm²、19062.3 元/hm² 低至 9764.71 元/hm²、7689.61 元/hm²、9537.01 元/hm²、7540.79 元/hm²。典型喀斯特区单位面积生态服务功能显著增加, 非喀斯特区单位面积生态服务功能明显减少。研究表明, 喀斯特区域生态环境移民和退耕还林等石漠化控制措施效果显著, 有利于生态系统服务的充分发挥。

关键词: 喀斯特; 桂西北; 生态服务功能; 遥感评估; 时空变化

文章编号: 1000-0933(2009)11-5891-11 中图分类号: X826; X196; F301.24 文献标识码: A

Quantified evaluation and analysis of ecosystem services in Karst areas based on remote sensing

ZHANG Ming-Yang^{1,3,4}, WANG Ke-Lin^{1,3,*}, CHEN Hong-Song^{1,3}, ZHANG Chun-Hun^{1,3}, LIU Hui-Yu², YUE Yue-Min^{1,3,4}, FAN Fei-De^{1,3,4}

1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, 410125, China

2 College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

3 Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China

4 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5891 ~ 5901.

Abstract: Study on the service values of ecosystem is the bridge of understanding ecosystem and helping economic decision-making. Karst ecosystem faces the problem of eco-comeback and rebuilding in the Southwest of China. Revealing the spatio-temporal variations of its ecosystem service is urgent requirement in the process of ecological restoration and sustainable development. Through the remote images, meteorological and statistic data of many years, the spatial distributions and variations of ecosystem service were evaluated and analyzed for the typical karst area in the Northwest of Guangxi Province in 1985, 1990, 2000 and 2005. The result shows that: (1) from 1985 to 2005, total ecosystem services decreased firstly and then increased, but the value in 2005 was less than that in 1985 in general. The estimated values of the ecosystem services

基金项目: 中国科学院西部行动计划资助项目(KZCX2-XB2-08); 国家 973 计划资助项目(2006CB403208); 国家自然科学基金资助项目(40501034)

收稿日期: 2009-02-28; 修订日期: 2009-04-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kelin@isa.ac.cn

in above years are 1096.52 million Yuan, 887.89 million Yuan, 133.84 million Yuan, and 1062.57 million Yuan, respectively. The trend of spatial distribution is declined from west to east, from mountain to peak-cluster depression areas. The ecosystem services in high-value areas (the western part of the region) are decreased, while those in low-value areas (the eastern part of the region) are increased; (2) The ecosystem services of nutrient cycling, organic production and gas regulation are high, the corresponding total ratios are 72.69%, 64.57%, 70.18% and 72.10%, respectively. While the ecosystem service values of water conservation, soil reservation and recreation and culture are low (below 100 million Yuan each); (3) Woodland and shrub are the dominated landscape types, and they are the first two large landscape types contributed to total ecosystem services. The total ratios of them in the four year are 71.22%, 70.10%, 73.66%, 67.03%, respectively. The ecosystem services of residence and rocky land are very low and their total ratios are only 0.90%, 0.63%, 0.77%, 1.14% respectively; (4) The change of ecosystem services per unit in every county is distinct, falling from 23549.70, 173.5.10, 22705.10, 19062.30 Yuan/hm² to 9764.71, 7689.61, 9537.01, 7540.79 Yuan/hm². The ecosystem service values have been obviously increasing in typical karst areas, but distinctly decreasing in non-karst areas. Our study indicates that ecosystem conditions are improving because of the application of policies regarding of rocky desertification control, such as ecological migration and returning farmland to forest.

Key Words: Karst; Northwest; Guangxi; ecosystem services; evaluation of remote sensing

生态系统服务功能是指生态系统形成和所维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用^[1],是人类赖以生存和发展的基础^[2,3]。生态系统服务功能评估是人类对自然与生态系统认识成果应用于经济决策的桥梁^[4,5]。20 世纪 90 年代以来,由于环境问题的日益严重,以及相关学科的发展,生态系统服务功能的研究备受人们的关注,国内外围绕生态系统服务功能内涵^[6-8]、类型划分^[9-11]及其评估方法^[12-15]等方面进行了积极探索,以及对森林^[16,17]、草地^[18-20]、农田^[21]、湿地^[22-24]、河流^[25]、城市^[26]以及区域^[27-29]等生态系统服务功能进行了大量评估研究。美国生态学会 2004 年将生态系统服务科学作为首个生态学重点问题^[30],英国生态学会 2006 年将生态系统服务功能研究列为与政策制订相关的 100 个生态学问题的 14 个主题之首^[31],美国环境保护局(USEPA)于 2008 年提议了有关生态服务功能的生态研究计划^[32]。总之,生态系统服务功能评估研究逐渐成为生态学研究的前沿和热点。

联合国“千年生态系统评估”项目的研究结果认为:四大类 24 项生态系统服务功能中有 15 项生态服务功能正不断退化,人类赖以生存的生态系统有 60% 正处于不断退化状态,且强烈人类干扰和气候变化等越来越大的外部压力将导致全球范围荒漠化的发生和发展^[33]。石漠化代表了世界上一种独特的荒漠类型^[34],其本质是生态系统功能的降低或丧失。西南喀斯特区是石漠化最为严重的地区之一,面临环境恶化和经济社会贫困的双重压力,是西部大开发的难点^[35,36]。揭示其生态系统服务功能对空间异质性因素的时空响应特征是实现生态恢复和可持续发展过程中亟待解决的问题。然而,喀斯特生态系统服务功能评估研究鲜有涉猎,成为一个亟待加强的薄弱环节。目前仅有极少数学者进行了相关研究^[37-41],大多数是根据 Costanza 等^[11]或谢高地等^[10]的研究成果通过调整系数来研究。本文拟利用 3S 技术,对喀斯特典型区域桂西北 1985~2005 年的生态服务功能进行定量评估与分析,揭示其时空分异特征,从而为石漠化控制和生态系统可持续管理提供科学依据。

1 研究区概况

桂西北地处广西西北边陲、云贵高原南麓,介于 104°29'~109°09'E,23°41'~25°37'N 之间(地理位置见图 1)。总面积约为 71992km²,包括广西河池市 11 个县(市)和百色市 12 个县市,总人口约 750.44 万(2004 年)。属于中亚热带南缘季风气候,年平均气温在 19.5℃ 以上,年均降水在 1000mm 以上,时空分布不均。以山地、峰丛洼地为主,山区面积比例大。海拔从 2000 多米降至 100 多米,呈西北向东南降低的空间分布趋势。成土母岩与母质主要有石灰岩、紫色岩、硅质岩等。喀斯特地貌广为发育,是我国喀斯特地貌发育最典型、分

布最广的地区之一,是广西石漠化分布面积最广的地区,也是全国 18 个连片贫困的地区之一,有 19 个国家级重点扶持贫困县(百色 10 个,河池 9 个)。

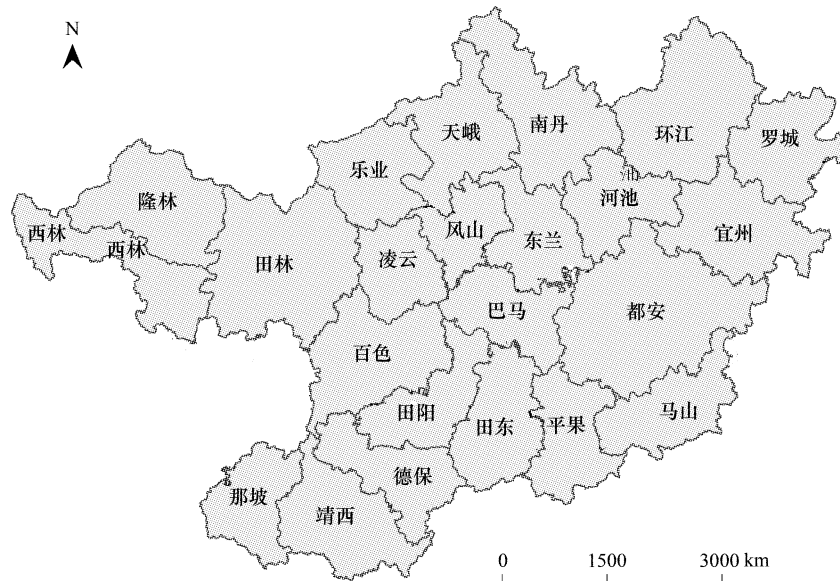


图 1 桂西北地理位置示意图

Fig. 1 The location sketch of Northwest, Guangxi province

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

(1) 遥感影像 1985/1990/2000/2005 年的 TM (ETM/TM+) 遥感影像单波段影像共 80 景(轨道号是 125-42/43/44, 126-42/43/44, 127-42/43/44 和 128-43, 7 个波段/景, 影像时间集中于 10 ~ 12 月份。1990/2000 年来源国家科学数据共享工程-地球系统科学数据共享网 www.geodata.cn)。首先将单波段影像合成假彩色影像, 然后进行直方图匹配等预处理和图像拼接, 最后通过行政矢量层裁剪得各年份的遥感影像。并且统一采用如下投影及其参数: 选用 Albers 圆锥等积投影方式, 参考 Krasovsky 椭球体, 基准经线 105°, 基准纬线为 25° 和 47°, 坐标系统为 Beijing1954。

(2) 气象数据 来源于国家气象信息中心, 数据内容为广西及其相连的贵州、云南、湖南和广东省共 105 个气象站点(剔除错误和无数据站点, 实际 97 个站点)的降水量、平均气温、总太阳辐射和净太阳辐射等数据, 以及站点的经度、纬度和海拔高度。利用 GIS 插值工具, 获取像元大小和投影方式等与归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)一致的气象栅格数据。

(3) 基础地理数据 数字高程模型(digital elevation model, DEM) 栅格数据、全国行政矢量数据(1:25 万, 来源于国家科学数据共享工程-地球系统科学数据共享网(www.geodata.cn)), 土壤(1:100 万, shp 格式矢量, 来源中国地质科学研究院)和岩性数据(1:50 万, shp 格式矢量, 来源中国地质科学研究院)。经格式转换和投影变换等处理后, 得到与 NDVI 像元大小和投影方式相同的栅格数据。

2.2 评估方法

(1) 评估指标

喀斯特生态系统土壤薄, 水土流失严重, 不少区域具有典型的石漠化特征。考虑利用遥感技术的评价方法和各单项生态服务功能对总服务价值的贡献程度, 采用欧阳志云对生态系统服务功能的四大类型分类体系(支持功能/调节功能/产品功能/文化功能), 形成 8 项评估指标(水源涵养、土壤形成、生物多样性保护、气体调节、水土保持、营养物循环、有机质生产、娱乐文化), 分为 13 个二级指标(水源涵养、土壤形成、生物多样性保护、吸收 CO₂、释放 O₂、表土保持、肥力保持、泥沙淤积减少、N 吸收、P 吸收、K 吸收、有机质生产、娱乐文

化)。

(2) 生态参数

① 景观类型:根据喀斯特区地表覆盖特点,利用遥感影像、DEM 数据以及其它资料,将地表覆盖类型分为林地、灌木、疏林地、草地、水田、旱地、水域、居民地、石漠化地九大类。其中石漠化地主要包括岩石裸露率高($\geq 70\%$)、植被覆盖度低($\leq 5\%$)的区域。在 ERDAS9.0 中随机抽取 450 个样点,到野外实际核查 260 个,在 ERDAS 中进行精度验证,总分类精度达 81%。

② 植被覆盖度:植被覆盖度(f)为植被投影面积在单位面积上所占比例,据其与植被指数存在关系,由 NDVI 求得。

③ 净初级生产力:植被净第一性生产力(NPP)是指绿色植物在单位面积、单位时间内所累积的有机物数量,表现为光合作用固定的有机碳中扣除本身呼吸消耗的部分。将遥感和地理信息系统技术结合,利用基于资源平衡的观点的光能利用率概念模型,由植物吸收的光合有效辐射 APAR 以及光能利用率求得^[20]。

(3) 单项生态服务功能

① 气体调节 植物干物质中碳元素的含量大约占 45%^[42]。根据光合作用反应方程式推算每形成 1g 干物质,需要 1.62g CO₂,释放 O₂ 1.2gO₂。CO₂的单位质量价值借用瑞典碳税率 0.15 美元/kg(C),换算成吸收 CO₂为 4.094×10^{-5} 美元/g(按 7 元人民币/美元汇率计算)。O₂单位质量价值按工业制氧价 (4×10^{-4} 元/g)。因此,单位面积 CO₂服务功能价值: $20.89168 \times 10^{-5} \times Npp(\times) (\text{元}/\text{m}^2)$ 即 $2.089168 \times Npp(\times) (\text{元}/\text{hm}^2)$; 单位面积 O₂服务功能价值: $2.16 \times 10^{-4} \times Npp(\times) (\text{元}/\text{m}^2)$ 即 $2.16 \times Npp(\times) (\text{元}/\text{hm}^2)$ 。

② 水源涵养 结合李金昌等^[13]研究方法和和结论来评价生态系统对涵养水源的间接经济价值。 $P_w(x)$ 为库容成本(我国为 0.67 元), $f(x)$ 为植被覆盖度, $P(x)$ 为降水量, k 为产流降雨量占总降雨量的比例(秦岭-淮河以南取 0.6)^[18]。故水源涵养功能单位面积价值为 $1.281174 \times P \times f(x)$ 。

③ 水土保持 水土保持功能分为减少表土损失、保护土壤肥力和减少泥沙淤积,通过土壤保持量估算。土壤保持量由潜在和实际土壤侵蚀量估算,实际土壤侵蚀量由植被覆盖度和坡度来估计,而潜在土壤侵蚀量则取植被覆盖率为 5% 的土侵蚀量。根据植被覆盖率和坡度、以及土壤侵蚀标准 SL190-96 确定年土壤保持量 $Er(x)$ 。减少表土损失功能单位面积价值为 $1.48 \times 10^{-6} \times Er(x) \times OC(x) (\text{元}/\text{hm}^2)$ 。保持土壤肥力包括减少 N、P 和 K 损失,由土壤中氮磷钾含量^[43]、土壤保持量 E 和化肥平均价格(2549 元/t,1990 年不变价)计算,保护土壤肥力单位面积价值为 $34.99777 \times 10^{-6} E(x) \text{元}/\text{m}^2 = 0.3499777 E(x) \text{元}/\text{hm}^2$ 。减少泥沙淤积功能用替代工程法计算,侵蚀流失泥沙有 24% 淤积^[4],库容成本为 0.67 元/m³,泥沙淤积单位面积价值为 $E_r(x) \times 0.001608 (\text{元}/\text{hm}^2)$ 。

④ 有机质生产 采用能量替代法由 $NPP(\text{gC}/\text{m}^2)$ 估算,把碳转化为相等能量标煤,由标煤价格间接估算有机质生产的价值。碳热值 0.036MJ/g,标煤热值 0.02927MJ/g,标煤价格 354 元/t(1990 年不变价),有机质生产单位面积价值: $NPP(x) \times (0.036/0.02927) \times 354 \times 10^{-6} \text{元}/\text{m}^2 = 4.353946 \times NPP(x) \text{元}/\text{hm}^2$ 。

⑤ 营养物循环 生态系统中的营养物质通过复杂的食物网而循环再生,并成为全球生物地球化学循环不可或缺的环节。其重要营养物质氮、磷、钾吸收量单位面积折算为 $NPP(x) \times R_{n1} \times R_{n2} \times P_n + NPP(x) \times R_{p1} \times R_{p2} \times P_p + NPP(x) \times R_{k1} \times R_{k2} \times P_k$ 。其中 R_{n1} 为喀斯特生态系统营养物质分配率^[44~47], R_{n2}, R_{p2}, R_{k2} 分别为纯氮/磷/钾折算为氮肥/磷肥/钾肥的比例, P_n, P_p, P_k 分别氮肥/磷肥/钾肥的均价为 2549 元/t(1990 年均价),纯氮/磷/钾元素折算率分别为 79/14,506/62 和 174/78。

⑥ 其它生态服务功能 土壤形成/生物多样性/娱乐文化三项生态服务功能由于量化比较困难,这里结合谢高地^[10]和 Costanza^[11]研究成果估算各景观类型的这三项生态服务功能。

(4) 区域生态服务功能

区域生态系统服务功能价值总量是指所有生态系统类型生态服务功能的总和,其单个生态系统服务功能的求算可表示为:

$$V_C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij} \times V_{Ci} \times S_{ij}$$

(1)

其中, $i=1,2,\cdots,n$,表示第 C 类生态系统的第 i 种生态服务功能; V_{Ci} 表示第 C 类生态系统的第 i 种生态服务功能类型的单位面积价值; $j=1,2,\cdots,m$ 表示第 C 类生态系统的像元数; S_{ij} 表示像元面积大小(本文 $30\text{m} \times 30\text{m}$); R_{ij} 表示像元的调整系数,由生态系统的质量状况决定的。选取植被覆盖度 f_j 和植被净第一性生产(NPP)作为表征生态系统质量的参数,对于任一像元调整系数表示为:

$$R_{ij} = \left(\frac{NPP_j}{NPP_{\text{mean}}} + \frac{f_j}{f_{\text{mean}}} \right)$$

(2)

式中, NPP_{mean} 和 f_{mean} 分别为第 C 类生态系统植被净第一性生产力和植被覆盖度的均值, NPP_j 和 f_j 为 j 象元的第一性生产力和植被覆盖度。

3 评估结果与分析

3.1 生态服务功能及其变化

区域总生态服务功能先降后升,总体减少,1985、1990、2000 和 2005 年分别为 1096.52 亿元、887.89 亿元、1033.84 亿元和 1062.57 亿元(表 1),变化率分别是 19.03%、16.44% 和 2.78%,1985~2005 年总体变化率为 3.10%。潘耀忠等^[28]研究表明,广西的生态服务功能 1995 年为 4767.083 亿元,居全国第 10,而 2000 年生态服务功能价值为 6015.505 亿元,居全国第 7。从这可以看出,虽然桂西北的面积占整个广西的面积比例超过 1/3,但生态服务功能却仅占广西的 17.19%。也就是说,广西在全国的生态服务功能排名靠前,而桂西北生态服务功能偏低。

林地和灌木等自然景观类型不仅是桂西北的主要景观类型,也是生态服务功能总量的主要贡献景观类型(表 1)。4 个年份林地和灌木的生态服务功能及百分比分别是 437.93 亿元(39.94%)、342.94 亿元(31.28%)、334.33 亿元(37.65%)、288.09 亿元(32.45%)、455.69 亿元(44.08%)、305.78 亿元(29.58%)、347.06 亿元(32.66%)、365.18 亿元(34.37%),二者总贡献率在各自年份分别是 71.22%、70.10%、73.66%、67.03%。居民用地和石漠化地总面积少,以及单位面积生态服务功能低而使其总的生态服务功能非常低,所占比值非常小,其总贡献率在各自年份分别是 0.90%、0.63%、0.77%、1.14%。生态系统服务价值这种类型构成及变化,与其处以自然覆被类型地理地貌背景及各景观类型相互转换而面积增减紧密相关,比如随着景观类型的转换,林地和灌木面积比例分别是 54.23%、52.24%、54.12%、51.70%。居民用地和石漠化地所占比例虽然小(不到 2%),但二者面积持续增加,其值变化分别为 $262.39\text{km}^2 \rightarrow$

表 1 桂西北 1985~2005 年各景观类型生态服务功能统计表
Table 1 The statistics of ecosystem services based on landscape types in Northwest, Guangxi province in 1985-2005

景观类型 Landscape types	1985		1990		2000		2005	
	面积 Area	服务功能	面积 Area	服务功能	面积 Area	服务功能	面积 Area	服务功能
	(km ²)	Ecosystem services (×10 ⁸ Yuan)	(km ²)	Ecosystem services (×10 ⁸ Yuan)	(km ²)	Ecosystem services (×10 ⁸ Yuan)	(km ²)	Ecosystem services (×10 ⁸ Yuan)
水田 Paddy	5246.17	85.38	5514.51	70.42	5210.53	67.93	4945.5	83.96
旱地 Dry land	5296.07	56.89	4167.18	32.83	5328.72	44.01	5328.77	55.79
林地 Woodland	18065.8	437.93	16607.7	334.33	17996.3	455.69	16538.7	347.06
灌木 Shrub	20810.3	342.94	20833	288.09	20783.9	305.78	20470.6	365.18
疏林地 Scattered woodland	13971	93.3	15721.2	94.35	13944	89.27	14619.4	110.27
草地 Grassland	6954.04	67.85	7525.4	59.76	6927.07	62.93	8196.54	84.74
水域 Water	385.65	5.44	381.61	3.43	437.93	2.81	438.76	7.49
居民地 Residential	262.39	2.36	268.21	1.52	294.71	1.54	357.79	3.44
石漠化地 Rocky land	678.37	4.42	655.05	3.16	685.99	3.88	687.63	4.65
合计 Total		1096.52		887.89		1033.84		1062.57

268.21 km²→294.1 km²→357.79 km²和 678.37km²→655.05km²→685.99 km²→687.63 km²。单位面积生态系统服务价值林地位居首位,石漠化地位居末位。因此,我们要保护林地与控制石漠化,从而增强区域生态系统服务价值更好地为生命系统提供支持功能。

各行政区生态服务功能总量与面积存在很大的关系,而单位面积生态服务功能主要与其地表覆盖等环境状况紧密相关,故分析其单位面积生态服务功能的意义更大。桂西北各行政区单位面积的生态服务功能存在比较大的变化幅度(表 2),1985 年由 23549.70 元/hm²(西林)低至 9764.71 元/hm²(南丹),1990 由 173.5.10 元/hm²(西林)低至 7689.61 元/hm²(南丹),2000 年由 22705.1 元/hm²(田林)低至 9537.01 元/hm²(南丹),2005 年由 19062.3 元/hm²(百色)低至 7540.79 元/hm²(南丹)。

各行政区单位面积的生态服务功能排名中,虽然南丹一直是居最后一位,但总体排序情况依然存在比较大的变化,尤其是喀斯特区与非喀斯特区、石漠化明显与几乎无石漠化区域对比明显。如地处典型喀斯特区、石漠化显著的平果和东兰,单位面积生态服务功能显著增加,其排名变化分别是:9→7→12→3 和 16→16→11→12;而地处非喀斯特区、几乎无石漠化的那坡和田林,单位面积生态服务功能明显减少,排名变化分别是:4→3→8→14 和 2→2→1→7。

表 2 桂西北 1985 ~ 2005 年各行政区单位面积生态服务功能及其排序

Table 2 The ecosystem service per unit and rank of every county in Northwest, Guangxi province in 1985 – 2005

行政区 County	1985		1990		2000		2005	
	单位面积服务功能	排序 Rank	单位面积服务功能	排序 Rank	单位面积服务功能	排序 Rank	单位面积服务功能	排序 Rank
	Ecosystem Services Per Unit (Yuan/hm ²)		Ecosystem Services Per Unit (Yuan/hm ²)		Ecosystem Services Per Unit (Yuan/hm ²)		Ecosystem Services Per Unit (Yuan/hm ²)	
都安 Du'an	15372.2	13	12854.5	11	13171.9	14	18251.4	2
田林 Tianlin	22919.2	2	16911.2	2	22705.1	1	17099.4	7
百色 Baise	19198.6	3	15218.7	4	19869.9	2	19062.3	1
环江 Huanjiang	9074.99	22	8808.93	20	12787.3	16	13615.5	15
靖西 Jingxi	17521.4	7	13169.7	10	12010	18	15327	13
田东 Tiandong	17420	8	14349	6	15226	6	16757.4	9
宜州 Yizhou	9644.56	20	7721.22	22	10317	22	13463.8	16
德保 Debao	18216.2	5	14842.6	5	14364.3	10	17747.5	4
罗城 Luocheng	9146.14	21	8906.96	19	14592.7	7	17288.5	5
马山 Mashan	15369.3	14	13412.4	9	12810.5	15	16747.2	10
平果 Pingguo	17018.2	9	13851.8	7	13851.8	12	17764	3
田阳 Tianyang	17720.9	6	13734.3	8	14476.9	9	17189.6	6
巴马 Bama	16323.8	11	12163.3	14	13721.8	13	16540.4	11
东兰 Donglan	14061.4	16	11976.7	16	14222.8	11	15409	12
西林 Xilin	23549.7	1	17305.1	1	18785.3	3	12513.2	18
凌云 Lingyun	16803.6	10	12525.1	12	18656.4	4	17062.8	8
天峨 Tian'e	11046.4	18	9450.64	18	11699.6	19	10422.8	21
乐业 Leye	15059.4	15	12456.3	13	16309.2	5	12671.2	17
隆林 Longlin	16085.5	12	12043	15	12208.4	17	9106.54	22
那坡 Napo	18874.6	4	15438.5	3	14583.4	8	14069.6	14
南丹 Nandan	7927.66	23	7689.61	23	9537.01	23	7540.79	23
河池 Hechi	9764.71	19	8506.9	21	11082.3	21	12144.1	19
凤山 Fengshan	11848.7	17	10538.1	17	11465.2	20	11943.7	20

桂西北单项生态服务功能中营养物循环、调节气体和有机质生产生态服务功能较高,而涵养水源、土壤保持和娱乐文化相对较低(表 3)。以 2005 年为例,营养物循环为 240.77 亿元(22.66%),气体调节功能为 173.12 亿元(12.29%),有机质生产为 177.39 亿元(16.69%),都超过 150 亿元,总贡献率达 72.10%;而涵养

水源仅 70.01 亿元(6.59%),土壤保持 69.34 亿元(13.11%),娱乐文化 53.76 亿元(5.06%),都远低于 100 亿元,其总贡献率仅为 24.76%;尤其是土壤保持中的减少表土损失、减少泥沙淤积损失和吸收磷分别仅为 0.11、0.32 和 9.08 亿元,分别仅占 0.01%、0.03% 和 0.85%。说明区域水土保持功能较差,我们应该加大对区域环境的保护力度,尤其是林地和灌木等自然植被。

虽然区域总生态服务功能经历了由减少→增加→缓慢增加的变化过程,但各单项生态服务功能变化趋势却各具特点(表 3),分别经历了不同方向的变化趋势或变化幅度。调节气体、有机质生产和营养物循环经历了与总生态服务功能相同的变化趋势,都是减少→增加→缓慢增加的变化过程。而涵养水源、水土保持-减少表土损失、水土保持-保持土壤肥力、水土保持-减少泥沙淤积和娱乐文化 5 个单项生态服务功能的变化趋势与总的生态服务功能变化趋势并不一致。涵养水源先增后减然后回到原有水平(70.01→77.34→68.32→70.01 亿元);土壤保持先剧增后减然后剧减(70.01→85.55→81.42→69.34 亿元);土壤形成是先减后回到原有水平然后保持不变(174.95→168.91→174.95→174.95 亿元);生物多样性先减后增然后又减的起伏(108.00→103.05→109.25→103.24 亿元);娱乐文化先减然后持续增加的变化趋势(51.34→48.61→49.29→53.76 亿元)。

虽然各单项生态服务功能经历了不同程度的变化过程,但其总体排序情况变化不大,其中气体调节(3→4→4→4)和土壤保持(6→6→6→7)的排序下降,水源涵养(7→7→7→6)和土壤形成(4→2→2→3)排序提前,营养物质循环一直位居首位(约 20%),娱乐文化一直名列最后(约 5%)。

表 3 桂西北单项生态服务功能
Table 3 Rank of single ecosystem service values in Northwest Guangxi, China

功能类型 Service types	1985			1990			2000			2005			总排序 Overall Rank	趋势 Tendency
	服务功能 Ecosystem services (×10 ⁸ Yuan)	百分比 (%)	排序 Rank	服务功能 Ecosystem services (×10 ⁸ Yuan)	百分比 (%)	排序 Rank	服务功能 Ecosystem services (×10 ⁸ Yuan)	百分比 (%)	排序 Rank	服务功能 Ecosystem services (×10 ⁸ Yuan)	百分比 (%)	排序 Rank		
气体调节 Gas regulation	180.40	16.45	3	114.70	12.92	4	153.49	14.85	4	173.12	16.29	4	4	↓
水源涵养 Water conservation	70.01	6.38	7	77.34	8.71	7	68.32	6.61	7	70.01	6.59	6	6	↑
土壤保持 Soil reservation	70.01	6.38	6	85.55	9.64	6	81.42	7.88	6	69.34	13.11	7	7	↓
有机质生产 Organic production	184.85	16.86	2	117.53	13.24	3	163.66	15.83	3	177.39	16.69	2	2	-
营养物循环 Nutrient cycling	256.96	23.43	1	172.20	19.39	1	233.46	22.58	1	240.77	22.66	1	1	-
土壤形成 Soil formation	174.95	15.95	4	168.91	19.02	2	174.95	16.92	2	174.95	16.46	3	3	↑
生物多样性 Biodiversity	108.00	9.85	5	103.05	11.61	5	109.25	10.57	5	103.24	9.72	5	5	-
休闲娱乐 Recreation / culture	51.34	4.68	8	48.61	5.47	8	49.29	4.77	8	53.76	5.06	8	8	-
合计 Total	1096.52	100	-	887.89	100	-	1033.84	100	-	1062.57	100	-	-	-

3.2 生态服务功能空间分异

生态服务功能空间分异特征基本呈现由西南向东北递减、由中山向峰丛洼地递减的趋势(图 2)。就 2000 年而言,峰丛洼地、低山区和中山区生态服务功能单位面积价值分别是 12528.80、1556.10 和 16639.50 元/hm²,而生态服务功能价值总和分别是 352.98(3.14%)、544.10(52.63%)、136.77(13.23%)亿元。这说明,桂西北峰丛洼地单位面积生态服务功能低,但由于分布面积广而生态服务功能比例大。这种分布趋势,基本上与植被净第一性生产力和植被覆盖度的空间分布相近。如 2005 年,西部植被覆盖度均值超过 60%,净

第一性生产力(NPP)均值超过 $1000\text{g}/\text{m}^2$, 生态系统服务功能均值超过 $15000\text{元}/\text{hm}^2$; 中部地区植被覆盖率年平均均值约 40%, NPP 约 $500\text{g}/\text{m}^2$, 生态系统服务功能均值约 $10000\text{元}/\text{hm}^2$; 北部和东部部分区域植被覆盖率小于 30%, 植被净第一性生产力部分区域平均值在 $100\text{g}/\text{m}^2$ 以下, 部分区域生态系统服务功能低于 $10000\text{元}/\text{hm}^2$ 。

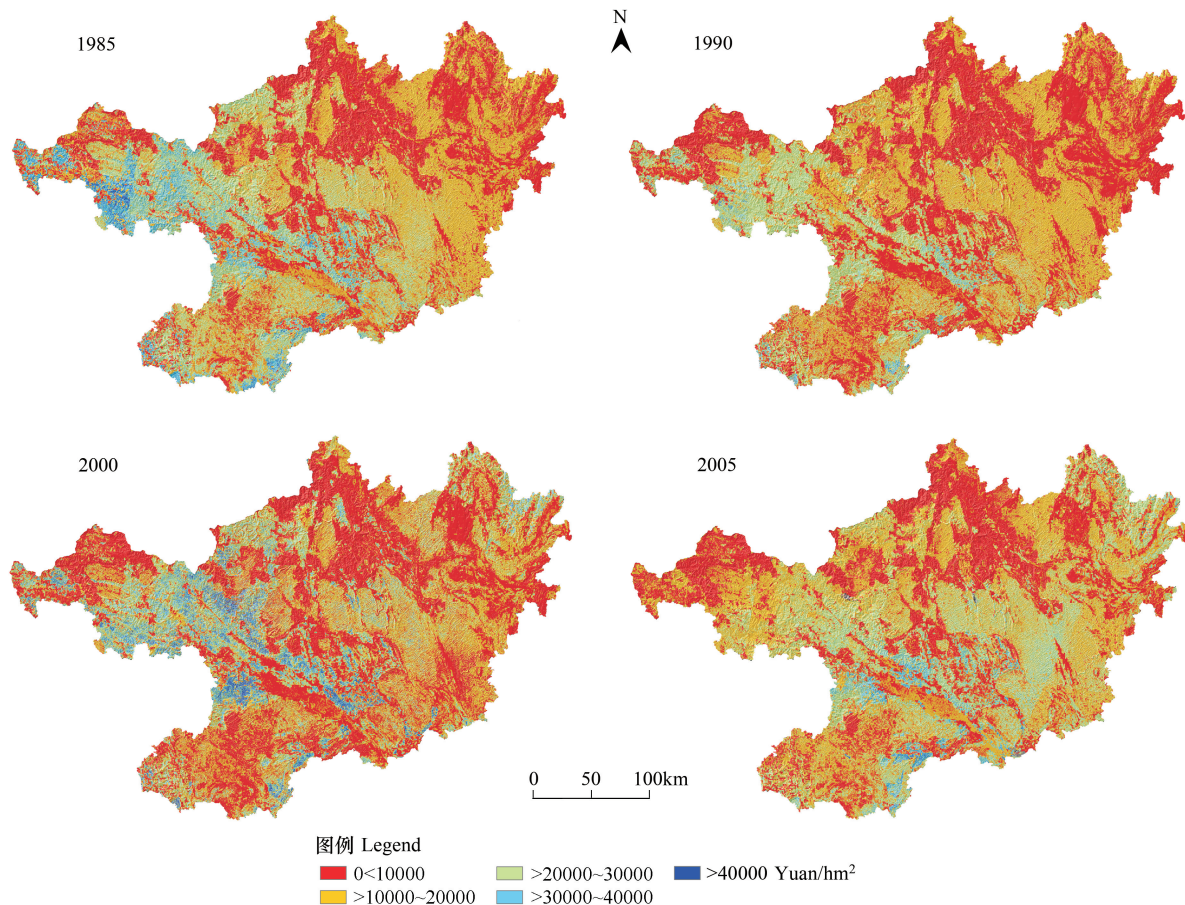


图2 生态服务功能分布

Fig. 2 The distribution of ecosystem services

生态系统服务功能变化在空间上的表现与总体服务功能空间分异特征并不相同(图3)。在各个阶段表现出显著的特征,1985~1990期间,除了北部极少数区域生态系统服务功能增加外,其它绝大部分区域都在减少;1990~2000年期间,除了南部、东南部生态系统服务功能减弱外,其它绝大部分区域都是增强趋势;2000~2005年期间,西部与西北部减弱,东部、东南部和南部等区域生态服务功能增强;从1985年到2005长时期来看,减弱区主要在生态系统服务功能较高的西部区,增强区主要在生态服务功能较低的东部。研究区域喀斯特与非喀斯特区面积比例为 52.02% 和 47.98%, 其生态服务功能比例在各年份分别是 45.95% 和 56.43%、47.46% 和 53.12%、41.51% 和 67.60%、50.43% 和 47.16%。岩石类型地质条件影响生态系统服务价值,典型喀斯特区生态系统服务价值较低但有增长趋势,非喀斯特区生态系统服务价值相对较高但有降低趋势。分析说明,生态服务功能增减与强弱本身没有正相关关系。

4 结论与讨论

本文利用遥感和地理信息系统技术,在对生态参数反演的基础上,建立生态服务功能生态遥感评估模型,对桂西北 1985~2005 年的生态服务功能进行了评估与分析,主要得到以下结论:

(1) 生态服务功能呈先降后升,总体下降的变化趋势,4 个年份分别为 1096.52 亿元、887.89 亿元、

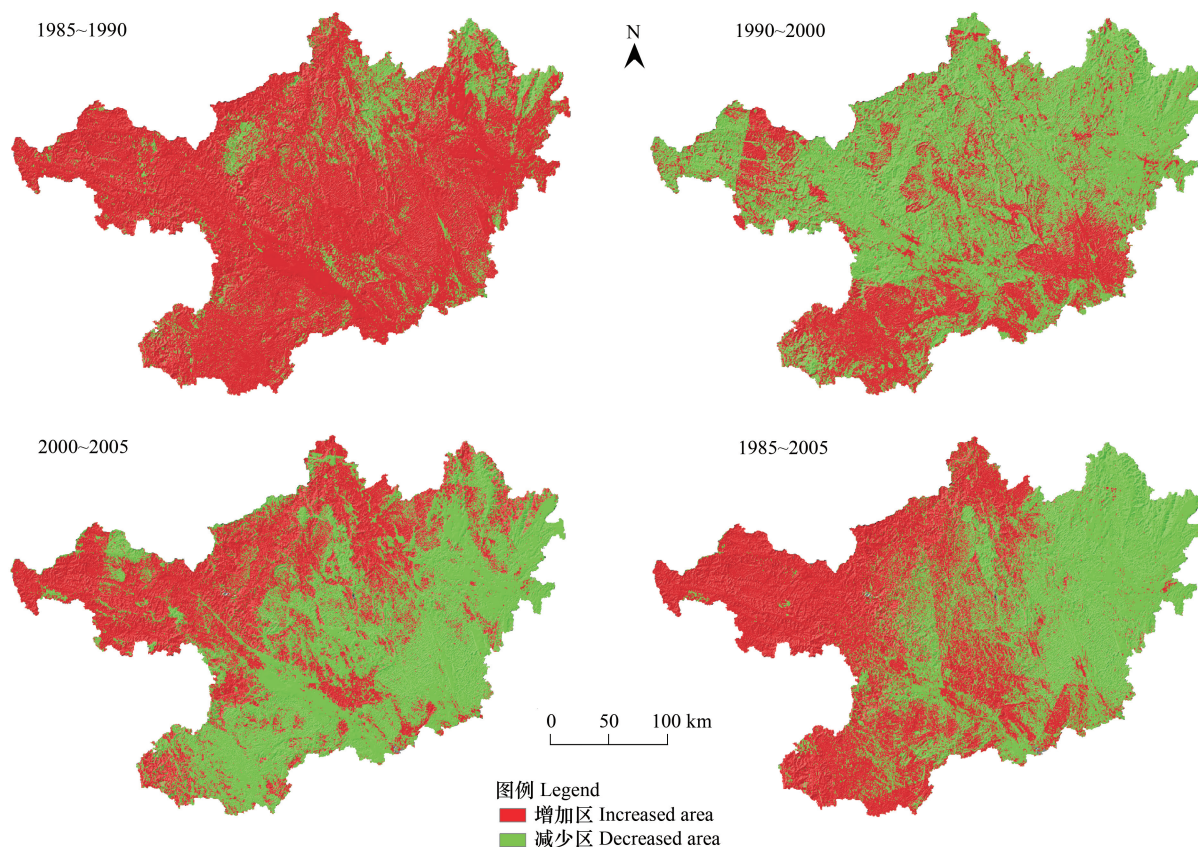


图3 生态系统服务功能变化的空间分异

Fig. 3 The distribution of ecosystem services variation

1033.84 亿元和 1062.57 亿元。单位面积生态服务功能在全国偏低。林地和灌木自然景观类型不仅是区域的主要景观类型,也是生态服务功能总量的主要贡献者。各行政区单位面积的生态服务功能最高与最低值差别较大,喀斯特区与非喀斯特区对比明显。单项生态服务功能中营养物循环、调节气体、有机质生产和土壤形成等生态服务功能较高,而涵养水源、土壤保持和娱乐文化相对较低。研究表明,在自然和任务因素综合作用下,生态系统服务功能经历了一定的增减起伏变化,但总体格局未发生明显变化。

(2)生态服务功能空间分异特征基本呈现由西向东、由山区向峰丛洼地递减的变化趋势。其空间分布与水热、植被以及地形等自然条件紧密相关。生态系统服务功能变化在空间上的表现与总体服务功能空间分异特征不相同,并在四个年份表现出显著的特征。从 1985 年到 2005 整个长时期来看,生态系统服务功能减弱区主要分布于生态服务功能较强的西部,而生态服务功能增强区主要分布于生态服务功能较弱的东部。典型喀斯特区生态服务功能显著增加,非喀斯特区生态服务功能明显减少。这主要是由于西部的林地和灌木等自然植被覆盖区日益受到人类活动的干扰结构发生改变,从而生态服务功能发生紊乱;东部的峰丛洼地地区,由于退耕还林与生态环境移民等人工调控措施发生作用,使生态系统结构朝着优化结构发展,从而生态系统服务功能增强。在 20 世纪 90 年代,尤其是 1993 ~ 2002 年,在广西进行了大规模的生态环境移民(约有 49133 户和 232705 人),又如百色在 2001 ~ 2004 年期间退耕还林达 1278.67km²(包括 605.33km²退耕还林和 673.33km²荒山造林)。但往往由于系统结构一旦破坏便难以回到原来起点,因而区域整体生态系统服务功能依然处于减少的变化趋势。研究表明,由于人类活动不当的干扰生态系统服务功能有下降趋势;喀斯特区域生态环境移民和退耕还林等石漠化控制措施效果显著,有利于生态系统服务的充分发挥。

本文较为系统地通过遥感评估模型评估了喀斯特区域桂西北的生态系统服务功能,但依然存在暂时无法解决的问题。首先,评估生态系统服务功能价值评估的指标体系还不够完善,尤其是尚缺乏适用于喀斯特生

态系统服务功能评估指标体系,本文通过九项比较常见且影响较大的指标,事实上生态系统服务功能还远不止这些,同时有些指标还有可能有所重合。其次,遥感数据、气象数据、其他地理底图和统计数据的获取与处理过程中不可避免存在误差,比如遥感数据处理、气象数据插值、地理底图数字化和生态参数反演等。最后,涉及的经济参数本身也是随时间而变动,比如人民币和美元汇率、工业制氧价格和标煤价格,以及时间价值和贴现率。

References:

- [1] Daily G C ed. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington D C: Island Press, 1997.
- [2] Ehrlich P R, Ehrlich A H. The value of biodiversity. *Ambio*, 1992, 21: 219—226.
- [3] Le Maitre D C, Milton S J, Jarman C, Colvin C A, Saayman I, Vlok J H J. Linking ecosystem services and water resources: landscape-scale hydrology of the Little Karoo. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(5): 261—270.
- [4] Ouyang Z Y, Wang R S, Zhao J Z. Ecosystem services and their economic valuation. *Chines Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(5): 635—640.
- [5] Maeler K G, Aniyar S, Jansson A. Accounting for ecosystem services as a way to understand the requirements for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008: 9501—9506.
- [6] Daily G C, Soderqvist T, Aniyar S, *et al.* Ecology: the value of nature and the nature of value. *Science*, 2000, 289:395—396.
- [7] Mitsch W J, Lu J J, Yuan X Z, *et al.* Optimizing ecosystem services in China. *Science*, 2008, 322: 528—528.
- [8] Daniel O, Ecosystem services-Does only count what costs? *Agrarforschung*, 2008, 15(9): 427—427.
- [9] Turner R, Valuing nature: lessons learned and future research directions. *Ecological Economics*, 2003, 46: 493—510.
- [10] Xie G D, Xiao Y, Lu C X. Study on ecosystem services: progress, limitation. *Journal of Plant Ecology (formerly Acta Phytoecologica Sinica)*, 2006,30(2): 191—199.
- [11] Constanza R, d'Arge R, de Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253—260.
- [12] Li W H, Ouyang Z Y, Zhao J Z. Study on ecosystem services function. Beijing: Meteorological Press, 2002.
- [13] Li J C, Jiang W L, Jin L S, *et al.* Ecological Value. Chongqing: Chongqing University Press, 1999. 112—114.
- [14] Chazdon R L, Beyond deforestation: Restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 2008, 320: 1458—1460.
- [15] Daily G C, Matson P A. Ecosystem services: From theory to implementation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105: 9455—9456.
- [16] Wang Y T, Guo W H, Liu J, *et al.* Value of ecosystem services of Kunyu Mountain Natural Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1):523—531.
- [17] Yu X X, Lu S W, Jin F, *et al.* The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2096—2102.
- [18] Zhao T Q, Ouyang Z Y, Jia L Q, *et al.* Ecosystem services and their valuation of China grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1101—1110.
- [19] Yu G, Lu C X, Xie G D, *et al.* Seasonal dynamics of ecosystem services of grassland in Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 47—51.
- [20] Jiang L P, Qin Z H, Xie W, *et al.* Estimation of grassland ecosystem services values of China using remote sensing data. *Journal of Natural of Natural Resources*, 2007,22(2):161—170.
- [21] Sun X Z, Zhou H L, Xie G D. Ecological Services and Their Values of Chinese Agroecosystem. *China population, Resources and Environment*, 2007, 17(4):55—60.
- [22] Cui L J, Zhao X S. Researches on the emergy analysis of Poyanghu wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7):1480—1485.
- [23] Yang W, Chang J, Xu B, *et al.* Ecosystem service value assessment for constructed wetlands: A case study in Hangzhou, China. *Ecological Economics*, 2008, 68: 116—125.
- [24] Liu X H, Lu X G, Jiang M, *et al.* Research on the valuation of wetland ecosystem services. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11):5625—5631.
- [25] Quan W M, Zhang J P, Ping X Y, *et al.* Purification function and ecological services value of *Crassostrea* sp. in Yangtze River estuary. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 871—876.
- [26] Li W K, Li T H, Qian Z H. Impact of Land Use Change on Ecosystem Service Values in Shenzhen. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 23(3):440—446.
- [27] Chen, Z X, Zhang X S. The value of ecosystem service in China. *Sci. Bull.*, 2000, 45(1): 17—22.
- [28] Pan Y Z, Shi P J, Zhu W Q, *et al.* Quantified evaluation of terrestrial ecosystem eco-capital China by remote sensing. *Science In China Ser D Earth Sciences*, 2004, 34(4): 375—384.
- [29] Bai X, Ma K M, Yang L, *et al.* Ecological function differences inside and outside the wetland nature reserves in Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 620—626.
- [30] Palmer M A, Morse J, Bernhardt E, *et al.* Ecology for a crowded planet. *Science*, 2004, 304: 1251—1252.

- [31] Sutherland W J, Armstrong-Brown S, Armsworth P R, *et al.* The identification of 100 ecological questions of high policy relevance in the UK. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43, 617—627.
- [32] Chapman P M. Ecosystem services — assessment endpoints for scientific investigations. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56: 1237—1238.
- [33] Millennium Ecosystem Assessment: Frameworks. Washington D C: World Resources Institute, 2005.
- [34] Li Y B, Hou J J, Xie D T. The Recent Development of Research on Karst Ecology in Southwest China. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22 (3): 365—370.
- [35] Chinese Academy Department. Some suggestions of carrying forward the comprehensive harnessing desertification in Southwest karst region. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 489—492.
- [36] Cao J H, Yuan D X, Pei J G, *et al.* Karst ecosystem constrained by geological conditions in Southwest China. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [37] Li Y B, Wang S J, Zhou D Q. Research on the ecosystem service evaluation of Maolan karst forest. *Earth and Environment*, 2005, 33(2): 39—44.
- [38] Yang A X, Peng Y. Summary of Study on the Ecohydrological Functions of Karst Forest Ecosystems in Guizhou. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2007, 35 (36): 11995—11997, 12037.
- [39] Luo J, Wang K L, Chen H S. Economic Response of Ecosystem Service Functions to Landuse Changes in Karst Region. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(1): 19—24.
- [40] Wu K Y, Jiang Z C, Deng X H, *et al.* Ecosystem service value of restored secondary forest in the Karstic-rocky hills-A case study of Nongla National Medicine Nature Reserve, Guangxi Zhuang Autonomous Region. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16 (4): 1011—1014.
- [41] Xiong Y, Xie G X, Zeng G M, *et al.* Influence of Karst emigration region land use change on ecosystem service value-using Guangxi Huanjiang County as example. *China Environmental Science*, 2008, 28(3): 210—214.
- [42] Chen R Z, Huang S Z, Song S Q, *et al.* Plant Physiology. Guangzhou: Sun Yat-Sen University Press, 1998.
- [43] Zhang W, Chen H S, Wang K L, *et al.* Spatial variability of soil nutrients on hillslope in typical karst peak-cluster depression areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(1): 68—73.

参考文献:

- [4] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635~640.
- [10] 谢高地, 肖玉, 鲁春霞. 生态系统服务研究: 进展、局限和基本范式. *植物生态学报*, 2006, 30(2): 191~199.
- [12] 李文华, 欧阳志云, 赵景柱. 生态系统服务功能研究. 北京: 气象出版社, 2002.
- [13] 李金昌, 姜文来, 靳乐山, 等. 生态价值论. 重庆: 重庆大学出版社, 1999.
- [16] 王玉涛, 郭卫华, 刘建, 等. 昆崙山自然保护区生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2009, 29(1): 523~531.
- [17] 于新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 等. 中国森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2005, 25 (8): 2096~2102.
- [18] 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经济价值评价. *生态学报*, 2004, 24(6): 1101~1110.
- [19] 于格, 鲁春霞, 谢高地, 等. 青藏高原草地生态系统服务功能的季节动态变化. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 47~51.
- [20] 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. *自然资源学报*, 2007, 22(2): 161~170.
- [21] 孙新章, 周海林, 谢高地. 中国农田生态系统的的服务功能及其经济价值. *中国人口资源与环境*, 2007, 17(4): 55~60.
- [22] 崔丽娟, 赵欣胜. 鄱阳湖湿地生态价值分析研究. *生态学报*, 2004, 24(7): 1480~1485.
- [24] 刘晓辉, 吕亮国, 姜明, 等. 湿地生态系统服务功能的价值评估. *生态学报*, 2008, 28(11): 5625~5631.
- [25] 全为民, 张锦平, 平仙隐, 等. 巨牡蛎对长江口环境的净化功能及其生态服务价值. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 871~876.
- [26] 李文楷, 李天宏, 钱征寒. 深圳市土地利用变化对生态服务功能的影响. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 440~446.
- [27] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. *科学通报*, 2000, 45(1): 17~22.
- [28] 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. *中国科学(D 辑)*, 2004, 34(4): 375~384.
- [29] 白雪, 马克明, 杨柳, 等. 三江平原湿地保护区内外的生态功能差异. *生态学报*, 2008, 28(2): 620~626.
- [34] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展. *地理科学*, 2002, 22(3): 365~370.
- [35] 中国科学院学部. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 489~492.
- [36] 曹建华, 袁道先, 裴建国, 等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 北京: 地质出版社, 2005.
- [37] 李阳兵, 王世杰, 周德全. 茂兰岩溶森林的生态服务研究. *地球与环境*, 2005, 33(2): 39~44.
- [38] 杨安学, 彭云. 贵州喀斯特森林生态系统水文生态功能的研究. *安徽农业科学*, 2007, 35 (36): 11995~11997, 12037.
- [39] 罗俊, 王克林, 陈洪松. 喀斯特地区土地利用变化的生态服务功能价值响应. *水土保持通报*, 2008, 28(1): 19~24.
- [40] 吴孔运, 蒋忠诚, 邓新辉, 等. 喀斯特石山区次生林恢复后生态服务价值评估——以广西壮族自治区马山县弄拉国家药物自然保护区为例. *中国生态农业学报*, 2008, 16 (4): 1011~1014.
- [41] 熊鹰, 谢更新, 曾光明, 等. 喀斯特区土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以广西环江县为例. *中国环境科学*, 2008, 28(3): 210~214.
- [42] 陈润政, 黄上志, 宋松泉, 等. 植物生理学. 广州: 中山大学出版社, 1998.
- [43] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究. *农业工程学报*, 2008, 24(1): 68~73.