

DOI: 10.5846/stxb201312263032

严恩萍, 林辉, 王广兴, 夏朝宗. 1990—2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力. 生态学报, 2014, 34(20): 5962-5973.

Yan E P, Lin H, Wang G X, Xia C Z. Analysis of evolution and driving force of ecosystem service values in the Three Gorges Reservoir region during 1990—2011. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5962-5973.

1990—2011 年三峡库区生态系统 服务价值演变及驱动力

严恩萍¹, 林辉^{1,*}, 王广兴^{1,2}, 夏朝宗³

(1. 中南林业科技大学 林业遥感信息工程研究中心, 长沙 410004;

2. 南伊利诺伊大学地理系, 美国 卡本代尔 629012; 3. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714)

摘要: 作为我国西南部重要的生态屏障和生态走廊, 三峡库区具有重要的战略意义, 其生态问题非常值得关注。研究以覆盖三峡库区的 4 期 Landsat TM 遥感影像为数据源, 通过人机交互解译分别获得 1990、1998、2006、2011 年的土地利用/覆盖, 参照中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表, 采用研究区单位面积产量与全国农田粮食单位面积产量的比值作为地区修订系数, 计算库区生态系统单位面积生态服务价值当量表, 同时利用生物量对林地的生态系统服务价值作进一步的修订。然后结合土地利用结构和生态敏感性指数, 定量分析土地利用变化引起的生态系统服务价值变化及其驱动因子。结果显示: 1990—2011 年间, 三峡库区生态系统服务价值主要由林地支撑 (占 76.75%), 其次是水域、耕地 (共 23.19%), 草地的贡献率最小 (0.22%), 总生态系统服务价值从 1990 年的 479.55 亿元增加到 2011 年的 680.83 亿元; 各项服务功能价值中, 食物生产功能价值下降, 其他各项功能价值上升, 以土壤形成与保护功能上升幅度最大, 达 36.61 亿元, 其次是气体调节 (33.10 亿元); 驱动力分析表明, 库区生态系统服务价值变化的主要原因是人类活动, 特别是自 1998 年实施退耕还林工程以来, 各自然生态系统的面积发生较大变化, 同时, 自然生态系统的健康程度和社会政策对生态系统服务价值变化的影响也不不可忽视。研究表明, 加强林地、草地和水域等生态系统服务价值高的土地利用/覆盖类型保护, 是维持库区生态系统稳定性的有效措施。

关键词: 生态服务价值; 土地利用结构; 驱动力; Landsat TM; 三峡库区

Analysis of evolution and driving force of ecosystem service values in the Three Gorges Reservoir region during 1990—2011

YAN Enping¹, LIN Hui^{1,*}, WANG Guangxing^{1,2}, XIA Chaozong³

1 Research Center of Forest Remote Sensing & Information Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China

2 Department of Geography, Southern Illinois University, Carbondale 629012, USA

3 Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China

Abstract: As the most important ecological barrier and ecological corridor in Southwestern China, the Three Gorges Reservoir region was strategically important and significant. Since the 1990s, in company with the accomplishment of the Three Gorges hydro-junction project, a series of key national ecological and forestry projects have been initiated, including the protective forests along the Yangtze River, the natural forests and Resources conservation, the conversion of cropland to forest, the afforestation of the reservoir surrounding area and the afforestation of both banks of the Yangtze River. These have led to significant changes of land use and land cover (LULC) types and their spatial distribution. More than twenty years has been gone. However, it is unknown that how the accomplishment of the ecological projects affected the change of

基金项目: “十二五”国家高技术研究发展计划课题(2012AA102001)资助

收稿日期: 2013-12-26; 修订日期: 2014-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1053460198@qq.com

ecosystem service values and what were the effects of these projects on the protection of the Three Gorges Reservoir region. There is a strong need to assess the effectiveness of the projects, including the dynamics of LULC types and the induced changes of ecological service values. The objective of this study was to analyze the spatiotemporal characteristics of ecological service changes and investigate the factors that have driven the dynamics in the Three Gorges Reservoir region. In this study, the Landsat Thematic Mapper™ images that cover the Three Gorges Reservoir region were acquired for years of 1990, 1998, 2006 and 2011, respectively, and visually interpreted for LULC types. The per unit ecosystem service equivalent value of the ecosystems within the region was calculated by using the corresponding value of the terrestrial ecosystems for the whole country as a reference and the ratio of the per unit grain productivity of the study area to the corresponding value of the country as a revised coefficient. The obtained per unit ecosystem service equivalent value was further modified based on the value of biomass from forested land related to ecological service value. The changes of ecological service values induced by LULC dynamics and corresponding driving factors were quantitatively analyzed by combining land use structure index and ecological sensitivity index. The results showed that (1) during the past twenty one years, the ecological service values of the Three Gorges Reservoir region were mainly supported by the forested land with a percentage of 76.75%, followed by the water and cropland land (23.19%), and the contribution of the grassland was the least (0.22%). The total ecological service value increased from 47.96 billion yuan in 1990 to 68.08 billion yuan in 2011; (2) All the ecological service values increased except food production. The value from soil formation and protection had the greatest increase with an increment of 3.66 billion yuan, followed by the gas regulation (3.31 billion yuan); (3) The analysis of driving factors showed that the changes of the ecological service values were mainly due to human activities, especially the great change of the area for each of the natural ecosystems since the conversion of cropland to forest started in 1998. Moreover, the effects of both the health of the nature ecological systems and the social policy on the changes of the ecological service values could not be ignored. The findings implied that enhancing the protection of LULC types that have higher ecosystem service values, including forested land, grassland, water bodies and so on, is an effective way to stabilize the ecosystems of the Three Gorges Reservoir region.

Key Words: ecosystem service value; land use structure; driving force; Landsat TM; Three Gorges Reservoir region.

生态系统服务是生态系统与生态过程所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[1],通过生态系统结构、过程和功能得到的生命支持产品和服务^[2]。近年来,在全球环境变化的背景下,人类不合理的土地利用加剧了生态环境的破坏,导致生态系统服务功能退化,给自身发展造成极大的威胁。作为人类实践的基本活动,土地利用是人与自然交叉最密切的环节,对维持区域生态系统服务功能起着决定性作用^[3]。研究土地利用/覆盖变化对生态系统服务价值的影响,对促进区域生态建设与可持续发展具有重要的意义^[4]。

随着环境问题的恶化,利用生态系统服务价值定量评估土地利用引起的生态效应已成为研究热点^[5-7],国外学者从生态资本、生物多样性、自然资本等角度对生态系统服务价值进行了探讨,其中 Costanza 和国际相关组织贡献显著^[8-9];国内学者评

估了森林、湿地、河流、草地等不同生态系统的服务价值^[10-13]。伴随生态系统服务价值和功能研究的不断深入,生态系统服务价值定量评估的方法日趋成熟^[14-15],归纳起来主要有市场价值法、机会成本法、影子价格法、资产价值法、条件价值法等。近年来,相关学者围绕土地利用变化对区域生态服务价值的影响开展了大量研究^[16-17],特别是三峡库区这样的生态敏感区域^[18-19],如李月臣等采用生态服务功能重要性模型,定量揭示了生物多样性保护、土壤保持、水源涵养和营养物质四种生态服务功能的重要性程度和空间分布规律;张宝雷等研究了三峡库区大宁河流域近 30 年的生态服务价值变化。但这些研究多单纯涉及区域生态系统服务价值的估算及其动态变化分析,然而结合驱动因子,从时间和空间上分析生态系统服务价值动态变化的研究较少。

三峡库区作为我国西南部重要的生态屏障和生

区不同生态系统单位面积生态服务价值进行修正:(1)空间上,采用研究区农田粮食单位面积产量与全国农田粮食单位面积产量的比值作为地区修订系数,将“中国生态系统单位面积生态服务价值当量表”修订为“三峡库区生态系统单位面积生态服务价值当量表”^[24];(2)不同生态系统类型价值当量方面,参考谢高地等提出的中国生态系统单位面积生态服务价值体系^[25],结合重庆、湖北地区生态系统生物量因子系数,以县为单位进行修正,得到三峡库区不同生态系统单位面积服务价值;(3)时间上,收集相应年份的粮食单产数据逐年修正,进而更好地分析生态系统服务价值的动态变化。

$$E_i = \frac{Q}{Q_0} E_{0i} \quad (4)$$

$$E_{ji} = (b_i/B) E_j \quad (5)$$

其中, Q 、 Q_0 分别为区域和全国的农田单位面积粮食产量; E_i 为第 i 类生态系统经地区修订后的生态服务价值当量; E_{0i} 为第 i 类生态系统全国平均的生态服务价值当量,其中 $i = 1, 2, \dots, 6$, 分别代表林地、耕地、草地、水域、建设用地和其他用地六种不同的生态系统类型; E_{ji} 为修正后区域生态系统价值当量; $j = 1, 2, \dots, 9$, 分别代表气体调节、气候调节、水源涵养、土壤形成与保护等九种不同类型的生态系统服务; b_i 为 i 类生态系统的生物量; B 为国家一级生态系统单位面积平均生物量; E_j 为不同生态系统生态服务价值基准单价。

本文根据重庆市统计年鉴^[26]和湖北省统计年鉴^[27]提供的数据,收集库区各区县的农田粮食单位面积产量,分别计算库区 1990 年、1998 年、2006 年、2011 年生态系统服务当量的地区修订系数。在地区修订的基础上,依据中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表^[3]和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》^[28],以 2011 年的全国粮食平均收购价格(1.40 元/kg)为标准,计算库区不同土地利用类型的生态系统服务价值以及同一土地利用类型的单项生态功能服务价值,其中建设用地和其他用地的生态服务价值参考袁兴中等^[29]的研究结果予以赋值。具体计算公式如下:

$$ESV = \sum (A_k \times VC_k) \quad (6)$$

$$ESV_f = \sum (A_k \times VC_{fk}) \quad (7)$$

式中, ESV_f 和 ESV 分别为第 f 项和总的服务价值

(元); A_k 为研究区第 k 类型的土地利用面积(hm^2); VC_k 为第 k 类型土地利用单位面积的服务价值系数($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); VC_{fk} 为第 k 类型土地利用对应的第 f 项生态功能的单位面积服务价值系数($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

1.3.3 生态系统服务价值动态

生态系统服务价值动态描述一定时期内某种土地利用类型生态系统服务价值的变化速度^[30]。具体公式:

$$k = \frac{ESV_b - ESV_a}{ESV_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (8)$$

式中, ESV_a 和 ESV_b 分别为研究初期和末期某一土地利用类型的生态系统服务价值; T 为研究时段。若 $k > 0$, 生态系统服务价值呈增加趋势; $k < 0$, 生态系统服务价值呈减少趋势; $k = 0$, 生态系统服务价值不变。

1.3.4 人为影响综合指数

国内学者围绕人类干扰影响方面开展了大量研究,归纳起来主要有干扰强度对环境变化和土地利用类型的影响、人类影响强度在景观生态分类中的应用等^[31-33]。人类活动在景观格局变化中起着重要作用,使景观类型的原始自然特性不断降低,且不同的景观类型代表着不同的人类开发利用强度。因此,论文采用人为影响综合指数来描述一定区域内景观总体受人类干扰的强度,具体公式为^[34]:

$$HAI = \sum_{i=1}^N A_i P_i / TA \quad (9)$$

式中, HAI 代表人为影响综合指数; N 为景观类型的数量,本文为 6; A_i 为第 i 种景观的面积; P_i 为第 i 种景观所反映的人为影响强度系数; TA 为景观总面积。本文利用 Lohani 清单法和 Leopold 矩阵法,同时结合 Delphi 法确定人为影响强度系数 P_i 。为减小误差,最终确定三者的平均值(表 1)。

HAI 值在 0 到 1 之间变化,数值越大表示人类活动对景观组分干扰越大;反之表示人类干扰越小。在 Arcgis10.0 中进行聚类分析 Natural Breaks (Jenks) 将人为影响综合指数(HAI)分为五类:高($HAI > 0.80$)、较高($0.60 < HAI \leq 0.80$)、中($0.40 < HAI \leq 0.60$)、较低($0.20 < HAI \leq 0.40$)和低($0 < HAI \leq 0.20$),以此为基础分析三峡库区 1990—2011 年人为干扰强度的空间变化。

表 1 三峡库区不同景观组分为人为影响强度系数

Table 1 Strength indices of human impact for different landscape elements in the Three Gorges Reservoir region

计算方法 Compute methods	景观组分 Landscape component					
	林地 Forested land	耕地 Cropland	草地 Grassland	水域 Water body	建设用地 Built land	其他用地 Other land
Lohani	0.12	0.57	0.09	0.10	0.96	0.11
Leopold	0.11	0.59	0.08	0.14	0.94	0.06
Delphi	0.13	0.67	0.10	0.12	0.91	0.07
平均值 Mean value	0.12	0.61	0.09	0.12	0.94	0.08

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征

2.1.1 结构特征

作为描述景观单元的重要参数,斑块面积是计算其他空间特征指标的基础^[35]。为便于分析,利用

地理信息系统软件 Arcgis10.0 将输出结果转换为 grid 格式(最小栅格单元 30 m × 30 m),分别生成三峡库区 1990 年、1998 年、2006 年、2011 年的土地利用/覆盖(Land use and land cover, LULC)分布(图 2)。

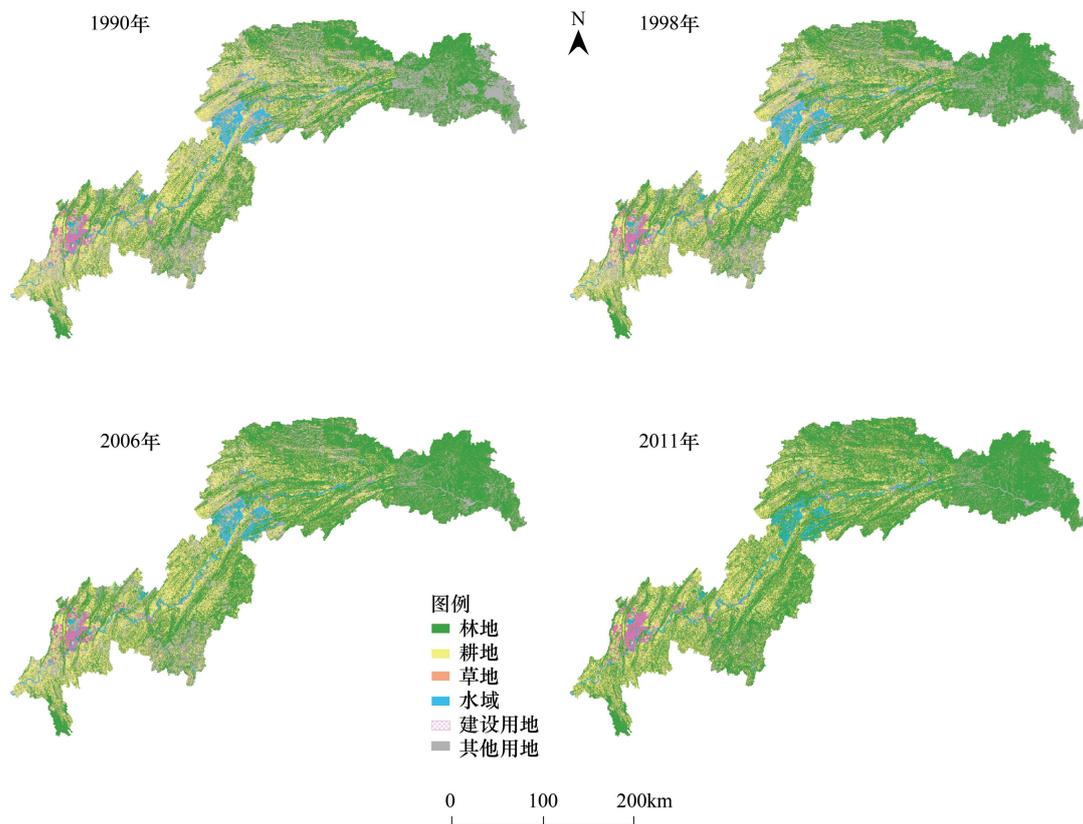


图 2 研究区四期土地利用分布图

Fig.2 The LULC distribution in study area for years of 1990, 1998, 2006 and 2011

表 2 列出了 1990—2011 年三峡库区不同土地利用/覆盖类型的面积变化。分析可知,1990—2011 年间,三峡库区土地利用类型以林地为主,占研究区总面积的 35% 以上,具有景观基底性质,其次是耕

地、水域、建设用地,草地面积贡献率最小。空间分布上表现为由 1990 年的零星分布发展到 2011 年的连续、成片分布,景观破碎化状况明显改善。前期(1990—1998 年间),库区耕地面积出现少量减少,

年变化率为-1.17%;林地和建设用地面积增加,年变化率分别为 1.42%、2.62%;水域、草地面积波动不大,基本保持不变。后期(1998—2011 年间),耕地面积大量减少,年变化率达-4.42%,约为前期年变化率的 4 倍;林地面积大量增加,年变化率为 2.89%,约为前期的 2 倍;建设用地和水域面积保持增长趋势,其中建设用地面积变化最大,年变化率达 5.91%,水域面积增加的主要原因是库区大坝建成

后开始蓄水,导致水域面积增加了 $1.91 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。总体而言,1990—2011 年间,库区土地利用/覆盖变化表现为:耕地面积减少,林地、水域、建设用地面积均有不同程度的增加。特别是上世纪末实施退耕还林工程以来,库区土地利用/覆盖变化最为明显,其中耕地面积减少 $6.25 \times 10^5 \text{ hm}^2$,林地面积增加 $6.10 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。

表 2 1990—2011 年三峡库区不同土地利用/覆盖类型面积变化

Table 2 Area changes of different LULC types in the Three Gorges Reservoir region from 1990 to 2011

LULC types	面积比例/% Percentage			面积变化/(10^4 hm^2) Change area			年变化率/% Annual change rate		
	1990	1998	2011	1990—1998	1998—2011	1990—2011	1990—1998	1998—2011	1990—2011
林地 Forested land	35.88	39.96	50.87	22.86	61.01	83.87	1.42	2.89	1.99
耕地 Cropland	26.13	23.69	12.52	-13.63	-62.45	-76.08	-1.17	-4.42	-2.48
草地 Grassland	0.33	0.33	0.46	0.00	0.70	0.70	0.00	2.90	1.79
水域 Water body	3.36	3.36	3.45	0.00	0.50	0.50	0.00	0.21	0.13
建设用地 Built land	1.53	1.86	2.96	1.80	6.17	7.97	2.62	5.91	4.42
其他用地 Other land	32.77	30.80	29.74	-11.03	-5.93	-16.96	-0.75	-0.76	-0.44

LULC:土地利用/覆盖 Land use and land cover

2.1.2 景观特征

人类活动对土地的干扰程度可用多样性指数、优势度指数和均匀度指数三个指标来描述,图 3 反映了近 22 年间库区土地利用格局随时间的变化特征。多样性方面, H 值介于 1.21—1.28 之间,呈逐渐递减趋势;优势度方面, D 值介于 0.51—0.58 之间,逐步递增,2011 年达最大值 0.58,说明存在优势景观支配着整个库区;均匀度方面, E 值介于 0.68—0.71 之间,普遍较低,且波动幅度不大。3 个指数共同表

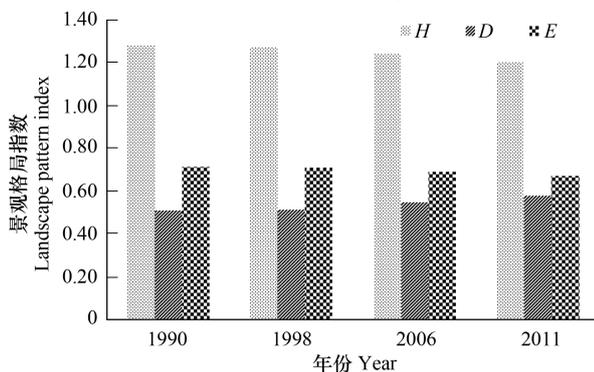


图 3 1990—2011 年三峡库区土地利用结构指数

Fig.3 Land use structure indexes of the Three Gorges Reservoir region from 1990 to 2011

H :景观多样性指数; D :土地利用优势度指数; E :土地利用均匀度指数

明,1990—1998 年间,景观异质性较高,景观类型分布均匀且无明显优势类型;1998—2011 期间,随着国家退耕还林工程的实施,林地面积逐渐增加,优势度逐渐增强,居于主导地位。

2.2 生态系统服务价值动态

2.2.1 不同生态系统类型价值变化

结构决定功能,分析土地利用结构水平上的价值变化,对深入研究区域生态服务价值的变化成因具有重要意义。利用公式(4)、(5)计算库区 1990、1998、2006、2011 年不同土地利用/覆盖类型的生态系统服务价值(表 3)。

从历年生态系统的构成看,林地生态系统的服务价值最大,约占总价值的 76.75%,其次是水域(12.55%)、耕地(10.64%),草地、建设用地和其他用地所占比重偏低。1990—2011 年间,生态系统服务价值总体呈上升趋势,具体表现为前期增长较缓慢,后期增长较快。其中林地增量最大,高达 225.13 亿元,远远高于其他土地利用类型;其次是水域 13.98 亿元,草地和未利用地共计增加 1.06 亿元;耕地、建设用地的生态系统服务价值合计降低 38.88 亿元。增长率方面,建设用地增幅最高,达 127.69%,林地、草地、水域和其他用地分别为 67.39%、

62.54%、21.20% 和 7.12%，耕地为负值，下降 43.42%，林地变化面积虽然较大，但因其本身所占面积较大，所以增长率相对较低。

2.2.2 不同服务功能类型价值变化

从生态系统服务价值的功能构成看(表 4)，1990—2011 年库区总生态系统服务价值增加 201.28 亿元，各项功能的构成比例变化不大，其中土壤形成与保护、气体调节、生物多样性保护、水源涵养、原材料五项对总生态系统服务价值的贡献最大，合计贡献率为 76.07%—78.99%；其次是气候调节、废物处理和娱乐文化三项，合计贡献率达 23.48%—24.67%；食物生产的贡献率很小，在 -0.74% 到 -

2.47% 之间。1990—1998 年库区总生态系统服务价值波动较小，仅增加 52.66 亿元，除土壤形成与保护、水源涵养、气体调节、生物多样性保护、原材料的服务价值明显增加外，其他功能的生态系统服务价值虽有增加但增幅不明显。1998—2011 年间，土壤形成与保护的价值变化最大，增加 26.97 亿元，其次是水源涵养、气候调节和生物多样性保护，分别增加 24.72 亿元、23.51 亿元、22.35 亿元；食物生产呈负增长，减少 3.67 亿元。1990—2011 年间库区总生态系统服务价值呈上升趋势，其中原材料、气体调节、娱乐文化的变化最大，年变化率分别达 3.06%、2.68% 和 2.65%。

表 3 1990—2011 年三峡库区不同生态系统类型的价值变化(亿元)

Table 3 Value changes of different ecosystem types in the Three Gorges Reservoir region from 1990 to 2011

年份(年) Year	林地 Forested land	耕地 Cropland	草地 Grassland	水域 Water body	建设用地 Built land	其他用地 Other land	合计 Total
1990	334.05	76.94	1.02	65.97	-4.30	5.86	479.55
1998	388.94	72.92	1.07	68.95	-5.43	5.76	532.21
2006	468.30	49.27	1.32	71.26	-7.77	5.78	588.15
2011	559.18	43.53	1.66	79.95	-9.78	6.28	680.83
平均比重 Average share/%	76.75	10.64	0.22	12.55	-1.20	1.04	100.00
ESV 增量 ESV increment	225.13	-33.40	0.64	13.98	-5.48	0.42	201.28
增长率 Increase rate/%	67.39	-43.42	62.54	21.20	127.69	7.12	242.53

ESV: 生态系统服务价值 Ecosystem Service Value

表 4 1990—2011 年三峡库区不同服务功能的价值变化(亿元)

Table 4 Value changes of different service functions in the Three Gorges Reservoir region from 1990 to 2011

生态系统服务功能 Ecosystem service function	所占比例 Percentage/%			ESV 增量(亿元) ESV increment			年变化率/% Increment percentage		
	1990	1998	2011	1990—1998	1998—2011	1990—2011	1990—1998	1998—2011	1990—2011
气体调节 Gas regulation	12.24	12.61	13.49	8.38	24.72	33.10	1.78	2.83	2.68
气候调节 Climatic regulation	10.84	10.95	11.12	6.30	17.44	23.74	1.52	2.30	2.17
水源涵养 Water conservation	16.76	16.55	16.22	7.70	22.35	30.05	1.20	1.95	1.78
土壤形成与保护 Soil formation and protection	16.48	16.66	16.98	9.64	26.97	36.61	1.52	2.34	2.21
废物处理 Waste disposal	13.23	12.52	10.74	3.20	6.47	9.67	0.63	0.75	0.73
生物多样性保护 Biodiversity conservation	13.84	13.95	14.36	7.87	23.51	31.38	1.48	2.44	2.25
食物生产 Food production	2.66	2.32	1.27	-0.39	-3.67	-4.06	-0.38	-2.29	-1.52
原材料 Raw material	8.53	8.90	9.87	6.47	19.84	26.31	1.98	3.22	3.06
娱乐文化 Entertainment and culture	5.43	5.55	5.95	3.49	10.99	14.48	1.68	2.86	2.65
合计 Total	100.00	100.00	100.00	52.66	148.63	201.28	1.37	2.15	2.00

ESV: 生态系统服务价值 Ecosystem Service Value

2.2.3 生态系统服务价值空间变化

以县为单位，分别统计各时期解译后的土地利用现状数据，计算相应年份的生态系统服务价值以

及单位面积的生态系统服务价值。因对各县(市、区)的价值总量开展比较意义不大，本文主要从单位面积生态系统服务价值变化量(地均 ESV)以及变化

率两个方面分析 1990—2011 年间三峡库区生态系统服务价值的空间分异规律(图 4)。

由图 4 可知,1990—2011 年间,三峡库区生态系统服务价值存在明显的空间差异,且地均 ESV 和 ESV 变化率的空间分布规律基本一致,具体表现为:ESV 变化最大的是东部的夷陵区、中部的万州区和以及西南部的武隆县三县,地均 ESV 依次为 0.62、

0.55、0.54 万元/hm²,增幅为 49.36%、39.35%、52.04%;其次是九龙坡区、忠县、奉节县、江津区和秭归县等 11 个县(市、区),地均 ESV 均在 0.30 万元/hm²以上,增幅超过 30%;其他县(市、区)增幅不明显,均在 0.20 万元/hm²以下。值得注意的是库区西南部的渝中区 and 渝北区,ESV 呈现明显的负增长。

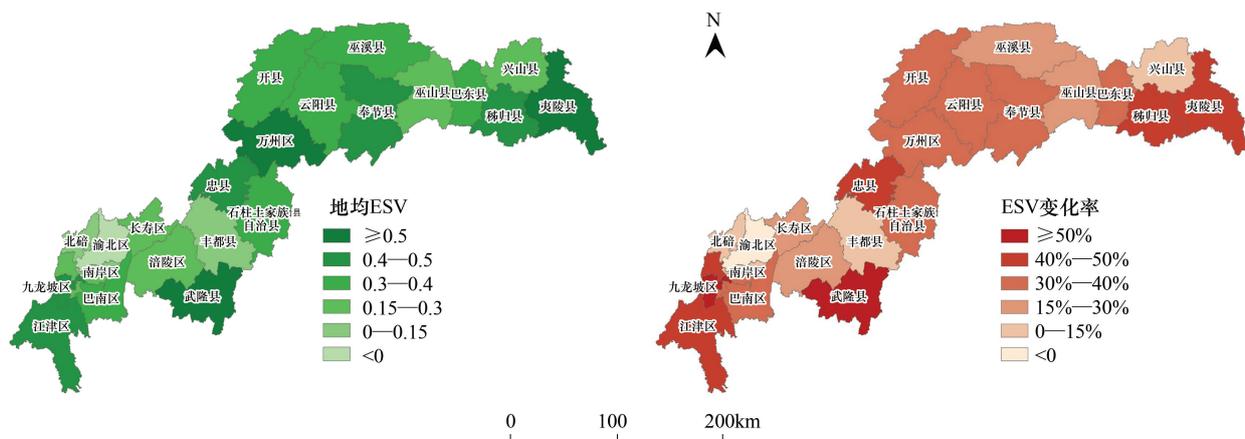


图 4 三峡库区各县(市、区)地均 ESV 和 ESV 变化率分布图

Fig.4 The spatial distribution of per unit area ESV and ESV change rate in the Three Gorges Reservoir region

ESV: 生态系统服务价值 Ecosystem Service Value

分析发现,三峡库区生态系统服务价值升高的区域主要集中在三峡库区中东部的传统林区,即位于湖北境内的秭归县、夷陵区以及渝中地区的万州区、长阳县、奉节县等人类活动干扰较少的地区;生态系统服务价值降低(或变化不大)的区域集中分布在西南部的少林区,即渝北、渝中、北碚、江北以及丰都等低山丘陵区,主要是因为区域内林木采伐等导致林地退化为草地,以及城镇用地的扩张导致耕地转化为建设用地,进而引起区域生态服务价值的降低。

2.3 驱动力分析

从前面的分析结果看,1990—2011 年间三峡库区生态系统服务价值逐步增加,特别是自 1998 年退耕还林工程实施以来,库区 ESV 增加幅度明显。已有研究表明,自然干扰和人类活动会影响物种正常的生长和演替,从而改变系统的物种组成和结构^[36],为进一步探求库区生态系统服务价值演变的根本原因,论文从人类活动、政策驱动和自然因素三个方面分析生态系统服务价值变化的驱动因素。

2.3.1 人类活动

随着社会生产力水平的提高,人类活动对生态

系统格局产生重要的影响,为定量分析人为干扰对三峡库区生态服务价值变化的影响,论文采用 1 km×1 km 格网,将库区划分成一系列子单元,分别计算各单元的人为影响强度,并将其作为每个网格中心点的值,在趋势分析和正态检验的基础上,利用 Kriging 空间插值方法得到三峡库区 1990 年、1998 年、2006 年、2011 年四期人为影响强度的空间分布图(图 5)。

观察上图可知,三峡库区人为综合干扰强度在空间上的分布特征表现为:低影响强度占主导地位,中低影响强度呈蔓延状态分布,中高和高影响强度呈零星、小块状分布,主要分布在库区的西南部、中部和东部地区,规律性不明显;分析库区 1990 年、1998 年、2006 年和 2011 年人为综合干扰强度的变化趋势发现:中影响强度基本保持不变,中低影响强度呈蔓延式扩展,中高影响强度区域范围在扩大。研究显示:干扰强度高的区域主要位于城镇等生态服务价值较低的区域,其变化规律与城镇扩张方向基本一致;此外,值得注意的是,干扰强度最大的区域主要分布在国家生态工程实施的重点区域,特别

是 1998 年以来实施的退耕还林工程,大量耕地(草地)转为林地,生态服务价值呈明显上升趋势,这与

前面的分析结果一致,符合三峡库区生态服务价值变化的实际规律。

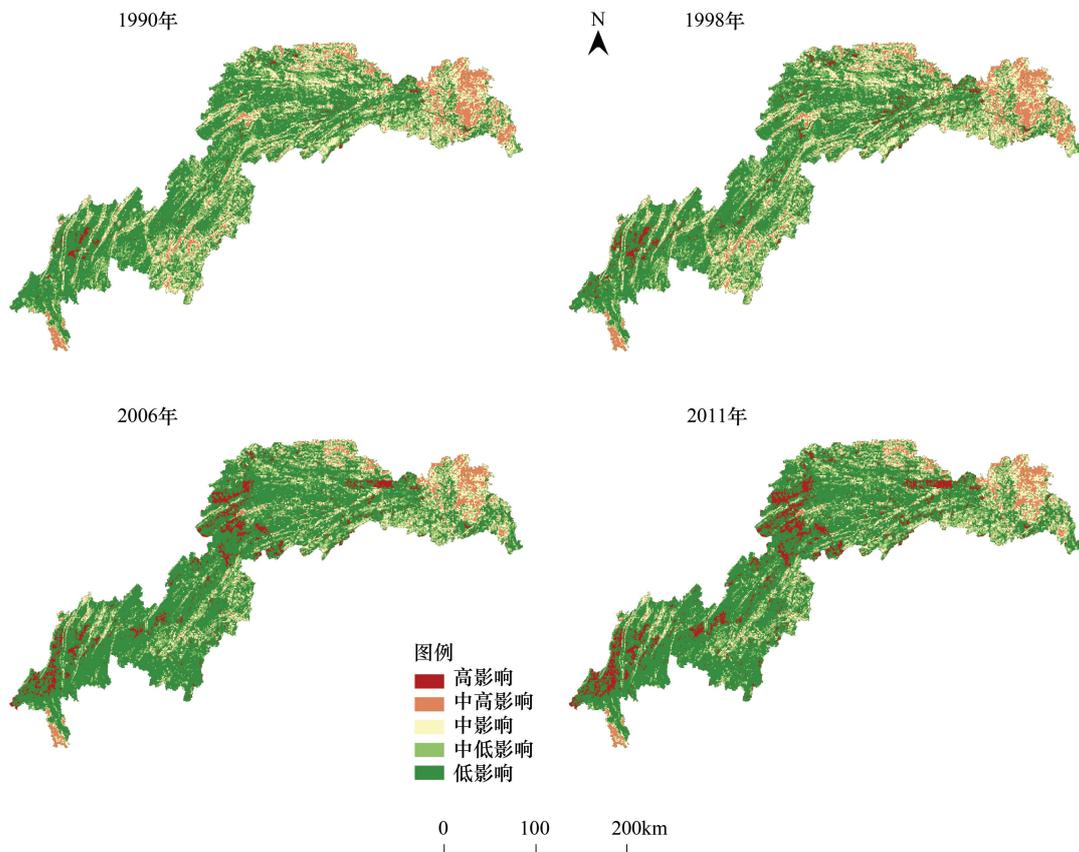


图 5 研究区四期人为干扰综合强度分布图

Fig.5 Integrated intensity of human disturbance in study area for years of 1990, 1998, 2006 and 2011

2.3.2 政策驱动

相关研究显示,社会政策是土地利用/覆盖变化的主要驱动力、甚至决定因素^[37]。随着社会生产力和人类生活水平的不断提高,群众的生态环境意识不断加强,为了美化环境,相关部门采取了诸多措施。根据《长江三峡工程生态与环境监测公报(2011)》显示,2011年三峡库区森林面积 250.86 万 hm^2 ,森林覆盖率达 43.50%。由于国家对三峡库区生态环境的重视,特别是 2000 年以来生态防护林、库周造林绿化等生态工程的相继实施,以及全民义务植树造林活动的推进,当地群众的环境保护意识大为加强,人为活动逐渐由破坏转向治理,大量非林地转为林地,使得土地利用结构发生较大变化,生态环境明显改善,这说明社会政策的导向作用可以降低人为活动对土地利用格局的干扰作用,增加区域生态服务价值。

2.3.3 自然因素

气温和降水作为最直接的自然因素,必然影响生态系统的自然演替,且存在一定的累积和滞后效应^[38]。为进一步探讨引起生态系统服务价值变化的自然驱动因素,笔者利用研究区降水及气温与年份之间的相关性进行回归分析(图 6)。

分析上图可知,近 55 年来库区降水量呈下降趋势,年均下降率为 3.02 $\text{mm}/10\text{a}$;而年均气温却呈缓慢的上升趋势,气候变化呈现一种暖干化发展趋势,表现为:土壤含水量下降,植被存活率降低,地表土质更加疏松,导致区域生态环境趋于恶化^[39]。从自然属性来看,气温和降水的这种交替变化,非常不利于库区植被的自然演替和发展。但是近 20 多年来,库区森林面积和覆盖率逐步提高,生态环境明显改善,稳定性增强,因此可以认为非气候因素是库区生态系统服务价值增加的主要原因,这与李登科等^[39]研究结论相同。由于 1998—2011 年时间序列较短,

地形因素的变化往往需要几十乃至上百年的时间,由此可以确定人类活动是库区生态服务价值上升的主要原因,特别是 1998 年以来的大规模退耕还林、

天然林保护以及生态移民等生态工程的实施,是三峡库区生态环境逐步变好的主要驱动力。

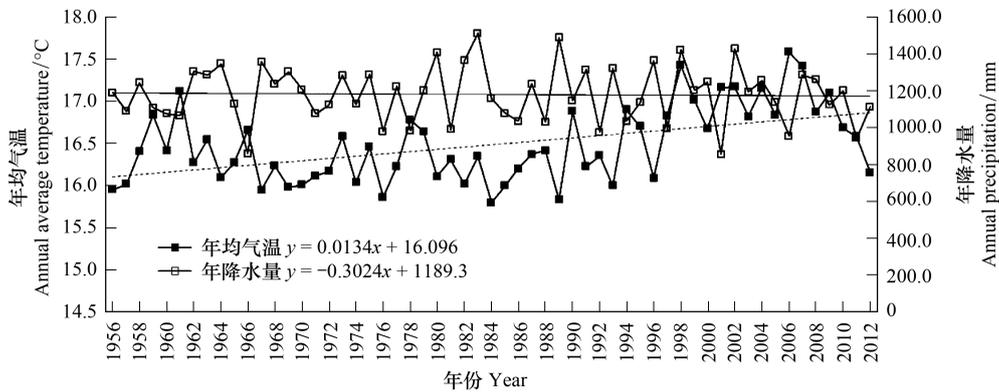


图 6 1956—2012 年三峡库区气候变化特征

Fig.6 The climate changes of the Three Gorges Reservoir region from 1956 to 2012

3 结论与讨论

生态系统服务价值是生态服务功能强弱的一种量化和评价办法。研究以 4 期 Landsat TM 遥感数据为信息源,结合土地利用结构指数和敏感度指数,定量分析土地利用背景下的生态系统服务价值变化及其驱动因子,以期对三峡地区土地资源的合理配置和生态环境保护提供科学依据。研究结果表明:

(1) 1990—2011 年间,三峡库区土地利用的优势度指数 D 呈上升趋势,均匀度指数 E 值变化不大,而多样性指数 H 呈下降趋势,说明随着人口增长、经济发展和国家退耕还林、天然林保护工程的实施,库区土地利用/覆盖结构正在发生转变:由以林地、耕地为主逐渐向以林地为主、耕地为辅的结构转变,林地的优势地位逐步增强,特别是 1998—2011 年间森林面积快速增加,年均增长率高达 4%,相比于我国西北、黄河流域和中部等地区,具有良好的生长状况,这与袁兴中等对成渝经济区 2000 年以来的土地利用变化研究结果一致^[29]。总体来说,退耕还林还草和转变为建设用地是耕地减少的主要原因;林地的变化主要在于其与耕地、草地间的转变;建设用地的增加主要来自耕地和其它用地。

(2) 分析 ESV 的系统构成可知,三峡库区生态系统服务价值主要由林地支撑(占 76.75%),其次是水域和耕地(共 23.19%),草地的贡献率较小(仅 0.22%);虽然建设用地的贡献率仅为-1.20%,但其在整个生态系统中的负向作用不容忽视。总体来

说,林地作为库区的基底景观,在面积和单位生态服务价值方面占有绝对优势,对整个库区生态服务价值起着决定性作用;此外考虑到建设用地扩张的负面效应,因此在城市化建设中,应严格控制建设用地的无序扩张,努力寻求土地利用优化与生态服务价值提升的协同共生。

(3) 1990—2011 年间库区生态服务价值增幅较大,由前期(1990—1998 年)的 52.66 亿元增加到后期(1998—2011 年)的 148.62 亿元,说明 1998 年以来启动的天然林保护和退耕还林工程,库区大量耕地、未成林地、宜林地以及无立木林地转为林地,加速了生态服务价值的提升;分析 ESV 的功能构成可知,土壤形成与保护对总生态系统服务价值的贡献最大,其次是水源涵养,食物生产的贡献最小。随着退耕还林工程的推进,库区食物生产能力下降,其他各项生态服务功能均呈不同程度的上升,说明退耕还林工程有助于生态系统的改善,对粮食生产具有一定的负面效应。

(4) 已有研究表明,生态系统的形成、发展是各种自然干扰和人为活动共同作用的结果,论文采用 Costanza 生态系统服务价值计算公式^[3],参照谢高地等提出的中国单位面积生态服务价值当量表,分析三峡库区生态服务价值的动态演变及其驱动因素,结果表明人为活动是三峡库区生态服务价值变化的主要驱动因素,特别是 1998 年实施的退耕还林工程,各自然生态系统的面积发生较大变化;同时,自然生态系统的健康程度和社会政策对生态系统服务

价值的变化也会产生一定的影响。

土地利用是人类有目的的开发利用土地资源,将自然生态系统转变为人工生态系统的过程,反映了一个地区的自然资源和社会经济发展水平^[21]。本文主要侧重从不同土地利用/覆盖类型角度分析区域生态系统服务价值的动态演变及其驱动因素,关于生态服务价值变化的其他潜在驱动力以及对生态系统稳定性的影响涉足不多。如何将诸多因子综合考虑,量化气候变化和人类活动对生态系统服务价值的影响,解译三峡库区生态环境正向(逆向)演变的内在驱动机制,是未来进一步研究的工作重点。

References:

- [1] Daily G C. Nature's Service: Societal Development on Natural Ecosystems. Washington DC: Island Press, 1997.
- [2] Chen S, Ju W M, Li X F. Effects of land use change on ecological service value in Changshu city. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(5): 93-97.
- [3] Costanza R, d'Agree R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'neill R V, Paruelo J, Raskin R J, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [4] Liu J Y, Kong F H, Yin H W, Yan W J, Sun C F, Xu F. Land use and its effects on ecosystem services value in Ji-nan city of Shandong province, East China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5): 1231-1236.
- [5] Sherrouse B C, Clement J M, Semments D J. A GIS application for assessing, mapping and quantifying the social values of ecosystem services. *Applied Geography*, 2011, 31(2): 748-760.
- [6] Brander L, Brouwer R, Wagtenonk A. Economic valuation of regulating services provided by wetlands in agricultural landscapes: A meta-analysis. *Ecological Engineering*, 2013, 56(7): 89-96.
- [7] Lorange-Rall E, Haase D. Creative intervention in a dynamic city: A sustainability assessment of an interim use strategy for brownfields in Leipzig, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(3): 189-201.
- [8] Yu B T, Cao Y K. Elementary research on ecological value capitalization and multiple trade market's construction. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 41(1): 143-152.
- [9] Sawut M, Eziz M, Tiyip T. The effects of land-use change on ecosystem service value of desert oasis: a case study in Ugan-Kuqa River Delta Oasis, China. *Canadian Journal of Soil Science*, 2013, 93(1): 99-108.
- [10] Zhang X L, Yu X X, Zhang Z H, Xu Z J, Xu S J, Xu B. Ecosystem service values of wetlands of the National Wetland Park of Wu River, northern China. *The Forestry Chronicle*, 2013, 89(2): 147-152.
- [11] Li J B, Dai Y, Yin R X, Yang Y, Li Y D, Wang K Y. Effects of Three Gorges Reservoir impoundment on the wetland ecosystem service value of Dongting Lake, South-central China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 809-817.
- [12] Zhou D C, Luo G P, Xu W Q, Feng Y X. Dynamics of ecosystem services value in Aksu River watershed in 1960-2008. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2): 399-408.
- [13] Li F, Ye Y P, Song B W, Wang R S. Spatial structure of urban ecological land and its dynamic development of ecosystem services: a cause study in Changzhou city, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5623-5631.
- [14] Di Sabatino A, Coscieme L, Vignini P, Cicolani B. Scale and ecological dependence of ecosystem services evaluation: Spatial extension and economic value of freshwater ecosystems in Italy. *Ecological Indicators*, 2013, 32(9): 259-263.
- [15] Mäler K G, Aniyar S, Jansson A. Accounting for the value of ecosystem assets and their services. *Implementing Environmental Accounts*, 2013, 28: 187-205.
- [16] Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, Chen H S, Zhang C H, Yue Y M. The response of ecosystem service values to ambient environment and its spatial scales in typical karst areas of northwest Guangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 3947-3955.
- [17] Yan E P, Lin H, Hong Y F, Zha D P. Research on response of ecosystem service values to land use dynamics in Honghu County. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(5): 1039-1045.
- [18] Li Y C, Liu C X, Min J, Wang C J, Zhang H, Wang Y. RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 168-178.
- [19] Zhang B L, Zhang S M, Zhou Q G, Zhou W C. Dynamics in land use and Ecosystem service—A case of Daning River watershed in Three Geoges Reservoir area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(2): 181-185.
- [20] Zhang Y X, Yan E P, Xia C Z, Dang Y F. Study on evolution of forest landscape fragmentation of Three Gorges Reservoir Area based on multi-remote sensing images. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 33(7): 1-7.
- [21] Zhou S L, Zhu Q, Zhao Q G. Variation of land-use structure in Nanjing over the last decade. *Soils*, 2005, 37(4): 394-399.
- [22] Chen X G, Zhang X Q, Zhang Y P, Wan C B. Carbon sequestration potential of the stands under the Grain for Green Program in Yunnan Province, China. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(3): 199-206.
- [23] Sun H L, Li W H, Chen Y P, Xu C C. Response of ecological services value to land use change in the Ili River Basin, Xinjiang, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 887-894.
- [24] Xu L F, Xu X G, Luo T, Zhu G R, Ma Z W. Services based on land use: A case study of Bohai Rim. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1775-1784.
- [25] Xie G D, Lu C X, Leng Y F, Zheng D, Li S C. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196.
- [26] Chongqing Bureau of Statistics. *Chongqing Statistical Yearbook from 1990 to 2011*. Beijing: China Statistics Press, 1990-2011.

- [27] Hubei Bureau of Statistics. Hubei Statistical Yearbook from 1990 to 2011. Beijing: China Statistics Press, 1990-2011.
- [28] LY/T 1721-2008. Specification for assessment of forest ecosystem services in China..
- [29] Yuan X Z, Xiao H Y, Yan W T, Li B. Dynamic analysis of land use and ecosystem services value in Cheng-Yu Economic Zone, Southwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(1): 180-186.
- [30] Wang B, Ren X X, Hu W. Assessment of forest ecosystem services value in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(2): 145-153.
- [31] Ji H H, Ye S F, Liu X. Eutrophication evaluation in Changjiang river estuary based on ASSETS—trend analysis on overall human influence from 2002. *Marine Environment Science*, 2008, 27(S1): 12-14.
- [32] Li Y F, Zhu X L, Sun X, Wang X H. Methodology of regional environmental impact assessment based on landscape spatio-temporal analysis for rapid urbanization. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(12): 2060-2066.
- [33] Chen Z Q, Chen J F. Geostatistical analysis on human impact indexes for land use/cover in Fujian and Taiwan. *Tropical Geography*, 2008, 28(6): 518-522.
- [34] Chen F, Ge X P, Chen G, Peng B Z. Spatial different analysis of landscape change and Hunan impact in urban fringe. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(3): 210-216.
- [35] You C, Zhou Y B, Yu L F. An introduction of quantitative methods in landscape pattern fragmentation. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2006, 22(5): 146-151.
- [36] Yang Z P, Gao J X, Zhou C P, Shi P L, Zhao L, Shen W S, Ouyang H. Spatio-temporal changes of NDVI and its relation with climatic variables in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(6): 979-993.
- [37] Li Y H, Chang Y, Hu Y M, Li X Z, Xiao D N. Research advance in effects of anthropogenic activity on forest landscape. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(9): 119-126.
- [38] He B F, Feng Y, Wu W Y, Fan W. Recent ten years spatiotemporal variation characteristics of vegetation index in Anhui Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(10): 1912-1918.
- [39] Li D K, Guo N, He H J. Vegetation change and its relationship with climate in the region along the Great Wall in northern Shaanxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4620-4629.
- [13] 李峰, 叶亚平, 宋博文, 王如松. 城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变—以常州市为例. *生态学报*, 2011, 31(19): 5623-5631.
- [16] 张明阳, 王克林, 刘会玉, 陈洪松, 章春华, 岳跃民. 桂西北典型喀斯特区生态服务价值的环境响应及其空间尺度特征. *生态学报*, 2011, 31(14): 3947-3955.
- [17] 严恩萍, 林辉, 洪奕丰, 查东平. 洪湖市土地利用动态及生态系统服务价值响应研究. *土壤通报*, 2013, 44(5): 1039-1045.
- [18] 李月臣, 刘春霞, 闵婕, 王才军, 张虹, 汪洋. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价. *生态学报*, 2013, 33(1): 168-178.
- [19] 张宝雷, 张淑敏, 周启刚, 周万村. 土地利用和生态系统服务功能变化研究—以三峡库区大宁河流域为例. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(2): 181-185.
- [20] 张煜星, 严恩萍, 夏朝宗, 党永锋. 基于多期遥感的三峡库区森林景观破碎化演变研究. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(7): 1-7.
- [21] 周生路, 朱青, 赵其国. 近十几年来南京市土地利用结构变化特征研究. *土壤*, 2005, 37(4): 394-399.
- [23] 孙慧兰, 李卫红, 陈亚鹏, 徐长春. 新疆伊犁河流域生态系统服务价值对土地利用变化的响应. *生态学报*, 2010, 30(4): 887-894.
- [24] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 朱高儒, 马宗文. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法—以渤海湾沿岸为例. *地理研究*, 2012, 31(10): 1775-1784.
- [25] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [26] 重庆市统计局. 重庆市统计年鉴(1990-2011). 北京: 中国统计出版社, 1990-2011.
- [27] 湖北省统计局. 湖北省统计年鉴(1990-2011). 北京: 中国统计出版社, 1990-2011.
- [28] LY/T 1721-2008. 森林生态系统服务功能评估规范.
- [29] 袁兴中, 肖红艳, 颜文涛, 李波. 成渝经济区土地利用与生态系统服务价值动态分析. *生态学杂志*, 2012, 31(1): 180-186.
- [30] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. *林业科学*, 2011, 47(2): 145-153.
- [31] 纪焕红, 叶属峰, 流星. 基于 ASSETS 的长江口海域富营养化评价—2002 年以来人为影响压力趋势分析. *海洋环境科学*, 2008, 27(S1): 12-14.
- [32] 李杨帆, 朱晓东, 孙翔, 王向华. 快速城市化对区域生态环境影响的时空过程及评价. *环境科学学报*, 2007, 27(12): 2060-2066.
- [33] 陈志强, 陈建飞. 闽台土地利用/覆被人为影响指数的地统计分析. *热带地理*, 2008, 28(6): 518-522.
- [34] 陈浮, 葛小平, 陈刚, 彭补拙. 城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究. *地理科学*, 2001, 21(3): 210-216.
- [35] 由畅, 周永斌, 于丽芬. 景观破碎化数量分析方法概述. *中国农学通报*, 2006, 22(5): 146-151.
- [37] 李月辉, 常禹, 胡远满, 李秀珍, 肖笃宁. 人类活动对森林景观影响研究进展. *林业科学*, 2006, 42(9): 119-126.
- [38] 何彬方, 冯妍, 吴文玉, 范伟. 安徽省近十年植被指数时空变化特征. *生态学杂志*, 2010, 29(10): 1912-1918.
- [39] 李登科, 郭锐, 何慧娟. 陕北长城沿线风沙区植被指数变化及其与气候的关系. *生态学报*, 2007, 27(11): 4620-4629.

参考文献:

- [2] 陈殊, 局为民, 李显凤. 常熟市土地利用变化对生态服务价值的影响. *水土保持研究*, 2009, 16(5): 93-97.
- [4] 刘金勇, 孔繁花, 尹海伟, 闫伟姣, 孙常峰, 许峰. 济南市土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1231-1236.
- [8] 于波涛, 曹玉昆. 森林生态服务资产化与多级交易市场体系初探. *林业科学*, 2011, 41(1): 143-152.
- [12] 周德成, 罗格平, 许文强, 冯异星. 1960-2008 年阿克苏河流域生态系统服务价值动态. *应用生态学报*, 2010, 21(2):