

三峡库区自然资本与生态功能动态变化研究

李桂媛^{1,2}, 杨凡星², 程丽媛², 凌志常^{2*1}

(1. 鄂西山地城镇建设与发展三峡大学协同创新中心, 湖北宜昌 443000;

2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443000)

【摘要】:应用生态足迹模型测算三峡库区整体及各区县生态足迹及生态效率,利用人均生态足迹、人均生态承载力、人均生态盈余/赤字、生态效率等四个指标从时间演变和空间差异两个层面,基于2003—2015年三峡库区自然资本状态数据,对比分析了该区域自然资本与生态功能的演变特征及空间格局。结果显示:①基于时间序列分析,2003—2015年库区自然资源消耗逐年增长,人均增幅为21.4%,且耕地和化石能源地需求尤为明显,约占总足迹的95%左右,库区一直处于生态赤字状态,且呈逐渐恶化的趋势。库区生态效率提高近5.76倍,2013年后增速放缓,表明随着三峡库区作为长江流域生态涵养功能区,其核心任务是以生态保护促进生态建设,以生态建设促进转型发展。②基于空间序列分析,三个时段的库区各区县自然资本生态足迹和生态效率存在明显差异。各区县生态承载力和生态盈余/赤字呈现“沿江低—内陆高”,生态足迹和生态效率呈现“首尾高、中部低”的空间格局,表明随着长江经济带、成渝城市群、长江中游城市群的建设,三峡库区的区域枢纽作用及区域间的生态涵养效应进一步凸显。基于此,三峡库区应构建以“宜昌、万州和重庆”经济增长极和以“巫溪、武隆”为生态涵养的“沿江—内陆”区县空间体系,推动区域经济发展联动、生态保护联动、人居环境建设联动;有效依托长江黄金水道战略,促进三峡库区经济—生态协同发展。

【关键词】:三峡库区;自然资本;生态功能;生态足迹;生态效率

【中图分类号】:X37 **【文献标志码】**:A **【文章编号】**:1005-8141(2016)11-1323-06

1 引言

自然资本是指能提供产品流或服务流的自然资源贮藏和环境服务,如森林、草原、沼泽等生态系统及其生物多样性等为人类所利用的资源。自然资本的生态服务功能包括人类生态生存、环境修复和生态存储等^[1]。生态服务功能与自然资本的存量、使用方式及其效率有直接的关联,自然资本核算是有效管理和合理利用自然资源的必要前提,也是可持续发展量化研究的重要课题^[2,3]。自然资本分为生物资料和能源两部分,其量化方法众多,近年来不断发展完善的生态足迹模型被广泛应用于定量地评价自然资本的利用状况^[4]。生态足迹表征一定经济或人口规模下的自然资本需求。近年来,随着研究的深入,生态足迹模型被专家学者不断地

¹ 收稿日期:2016-09-17;修订日期:2016-10-25

基金项目:教育部人文社会科学基金项目(编号:12YJA760029);三峡大学科研创新基金项目(编号:2015CX027)。

第一作者及通讯作者简介:李桂媛(1969-),女,天津人,博士,教授,硕士生导师,主要从事生态城市和绿色建筑方面研究。

修正与优化^[5-7]。

生态足迹最早由 Willian E Rees^[8]提出,目前对生态足迹的研究包括时间尺度^[9,10]和空间尺度^[11-13]两个方面,研究模型包括传统模型^[14]、改进能值模型^[15]、生态服务价值模型^[16,17]和最小净初生产力^[18]等。能值模型适应较大范围的区域系统能值分析^[19]:净初生产力模型所需的实时更新的高精度遥感影像较难获取,且不利于小范围的时空对比研究^[20]。顾晓薇等证明了以“国家公顷”为计量单位,对市、县域尺度的生态足迹测算值误差较小^[21]。基于研究区域尺度的特点,本文用传统生态足迹模型,选取“国家公顷”的计量单位,利用生态足迹、生态承载力、生态盈余等基础指标分别表征自然资本的生态生存、生态修复、生态储存等生态服务功能,对2003—2015年三峡库区(汇水区域的3区12县)自然资本的生态足迹与生态效率等两方面进行了时间演变和空间差异分析。

2 研究方法

2.1 生态足迹模型

生态足迹的计算公式表示为:

$$EF = N \times ef = N \times \sum_{j=1}^6 (r_j \times \sum_i c_i / gp_i) \dots\dots\dots (1)$$

$$ef = \sum_{j=1}^6 (r_j \times \sum_i c_i / gp_i) \dots\dots\dots (2)$$

式中,EF代表总的生态足迹,N代表总人口,ef代表人均生态足迹, c_i 为第*i*种消费项目的年人均消费量,*i*为交换商品和投入的类型, gp_i 为第*i*种消费项目的全国年平均产量^[14]:

生态承载力计算公式表示为:

$$BC = N \times bc = N \times \sum_{J=1} r_i \times (\sum_j ny_i / gp_i) \dots\dots\dots (3)$$

$$bc = \sum_{J=1} r_i \times (\sum_j ny_i / gp_i) \dots\dots\dots (4)$$

式中,BC为区域总的生态承载力,N为总人口,bc为人均生态承载力, r_j 为第*j*类土地的均衡因子^[14],*j*为生产性空间类型, ny_i 为第*i*种消费项目的区域年平均产量, gp_i 为第*i*种消费项目的全国年平均产量。

生态效率计算公式表示为:

$$WEF_{gdp} = EF / GDP \dots\dots\dots (5)$$

WEFgdp 又称万元 GDP 生态足迹, 其值越大, 表示生态资源的利用效益越低; 反之, WEFgdp 越小, 表示生态资源的利用效益越高^[22]

2.2 GIS 分析

为了进行三峡库区生态足迹及生态效率的空间对比分析, 本文选取库区搬迁初期(2003 年)、搬迁完成期(2009 年)和移民新城快速城镇化发展期(2015 年)三个时期, 利用 ArcGIS 将数值进行自然分等定级, 通过使用不同的颜色深度的可视化, 生成可对照的生态足迹与生态效率空间变化分布图。

3 研究区概况及数据来源

三峡库区地处四川盆地与长江中下游平原的结合

部, 位于 $28^{\circ} 28' - 31^{\circ} 44' N, 105^{\circ} 49' - 110^{\circ} 12' E$ 之间, 以山地、丘陵地形为主, 山地和丘陵分别占本区面积的 74% 和 21.7%, 平均海拔 453—974m, 森林资源丰富。该区农业用地面积 4.51 万 km^2 , 占 77.8%。其中, 耕地和林地分别占农地面积的 26.2% 和 56.32%。人口密度为 359 人/ km^2 , 是同类型地区的 4 倍以上, 人均耕地仅为 0.036 hm^2 。此外, 库区地质灾害频发、水土流失严重, 城镇建设用地紧张。本文以三峡工程主要汇水区域为研究对象(图 1), 总面积为 4.26 万 km^2 , 包括重庆市 3 区(万州、涪陵、长寿)、9 县(巫山、巫溪、奉节、开县、云阳、丰都、石柱、忠县、武隆)与湖北省 3 县(秭归、兴山、巴东)等 15 个区县城镇。

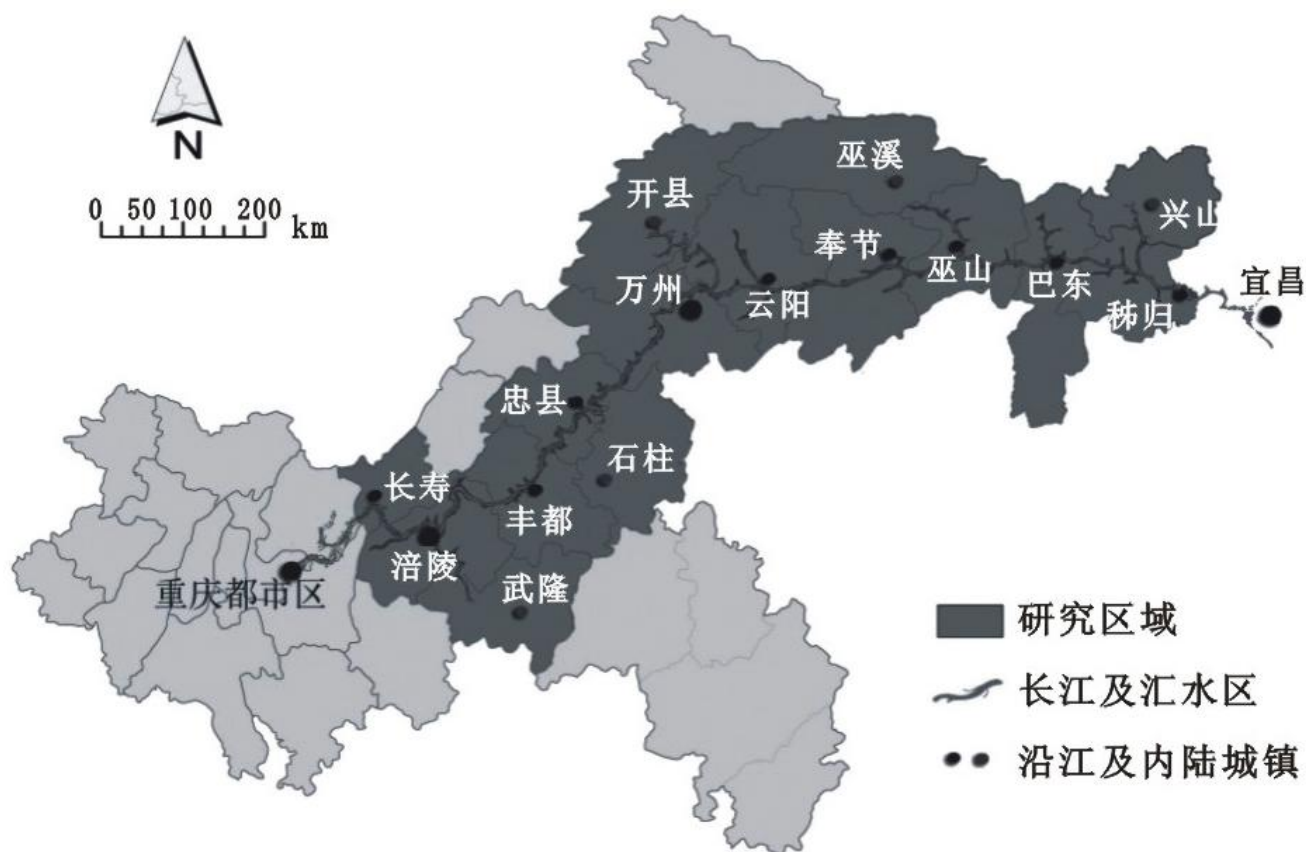


图 1 研究区域

研究数据来源于 2003—2015 年的《重庆市统计年鉴》、《宜昌市统计年鉴》、《恩施州统计年鉴》，各区县土地面积来源于《三峡库区移民统计资料汇编(1992—2009 年)》、各区县城市总体规划和土地利用总体规划及三峡库区各城镇国民经济与政府发展报告。

4 结果分析

4.1 时间序列分析

基于生态足迹模型,利用式(1)—(3)对库区自然资本进行量化计算,得出 2003—2015 年三峡库区整体生态足迹及其构成和生态效率值(表 1)与自然资本演变趋势(图 1—4)。

生态足迹及其构成:数据结果显示(图 2),2003—2015 年库区人均生态足迹基本呈逐年增长趋势,数值由 0.44352 增长到 0.53861,增幅为 21.4%。除 2006 年和 2008 年库区因多地发生山体滑坡,部分生物资源锐减,导致该时段内生态足迹值降低外,库区生态承载力初期快速提高,中后期趋于平稳。其中,2003—2005 年以人均值 0.34 缓慢增长,2006 年因库区大力开荒植林,人均值急速上升到 0.43 左右,之后人均值基本稳定在 0.43。人均生态盈余/赤字则一直处于生态赤字状态,2015 年人均生态赤字达到 0.1 以上,且具有缓慢增长趋势,说明受库区经济快速发展和城镇建设提速的影响,库区自然资本消耗逐渐加速,加之粗放式的发展加剧与地质灾害的发生,仅提倡开垦荒地所提高的资源承载力已不足以支撑三峡库区的快速发展。

表 1 三峡库区 2003—2015 年生态足迹计算汇总

年份	生态足迹 (hm^2/cap)	生态承载力 (hm^2/cap)	生态盈余/赤字 (hm^2/cap)	生态效率 ($\text{hm}^2/\text{万元}$)	总人口 (万人)
2003	0.4435	0.3349	-0.1086	1.1014	1179.04
2004	0.4508	0.3342	-0.1166	0.9971	1180.28
2005	0.4639	0.3542	-0.1097	0.8915	1234.28
2006	0.4832	0.4390	-0.0442	0.8017	1241.63
2007	0.4458	0.4324	-0.0133	0.6624	1251.99
2008	0.4913	0.4321	-0.0592	0.5988	1264.99
2009	0.4782	0.4309	-0.0473	0.4673	1271.89
2010	0.5012	0.4306	-0.0706	0.3842	1279.34
2011	0.5140	0.4259	-0.0881	0.3188	1283.44
2012	0.5195	0.4300	-0.0895	0.2542	1299.72
2013	0.5278	0.4274	-0.1004	0.2326	1292.88
2014	0.5320	0.4322	-0.0998	0.2125	1296.45
2015	0.5386	0.4274	-0.1112	0.1914	1250.58

注：各年份数据由次年的统计年鉴计算得出（由于 2003 年和 2015 年巴东数据缺失，因此未纳入整体计算）。

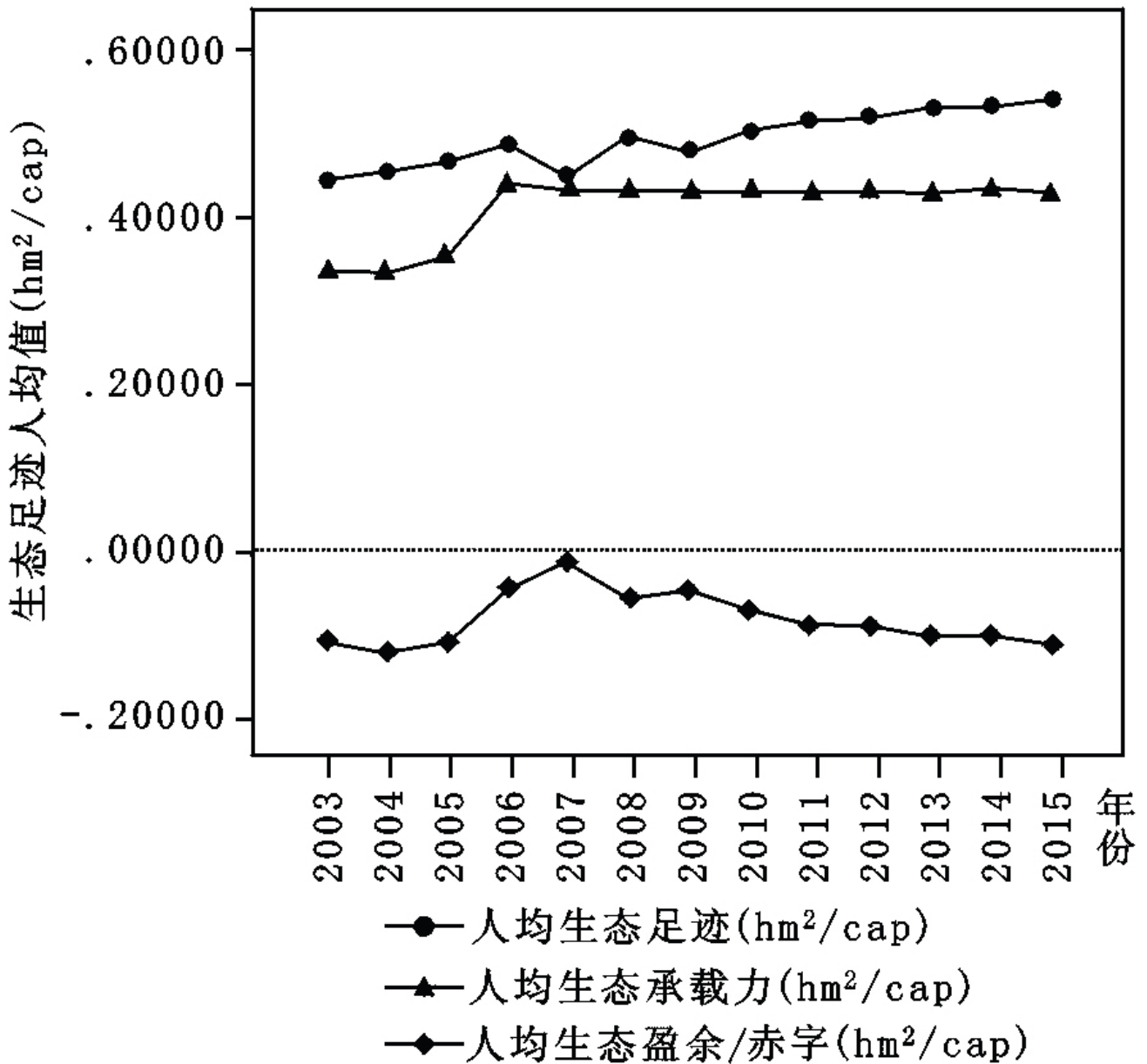


图2 三峡库区 2003—2015 年生态足迹时间序列变化

从库区生态足迹和盈余构成(图 3、图 4, 见封四)可知, 库区自然资本消耗主要为耕地和化石能源地, 约占总生态足迹的 90%以上。其中, 耕地人均生态足迹最大, 2003—2015 年耕地占库区生态足迹的总量由 87. 1%下降到 81. 3%, 化石能源地、林地和建设用地的生态足迹均有所增加, 水域与草地的生态足迹较少, 且基本保持不变。2003—2015 年耕地、草地和化石能源地均处于生态赤字状态, 林地、水域和建设用地则一直处于生态盈余。这表明三峡库区各城镇建设与发展扩大了农业生产的同时, 加强了对工业产业的投入。

此外, 随着移民新城搬迁完成, 各城镇加强了对物质空间建设的投入, 居民生活水平得到逐年提升。

生态效率: 2003—2015 年三峡库区万元 GDP 生态足迹值呈直线下降趋势(图 5), 由 1. 101 下降到 0. 191, 2003—2012 年的降幅

为 4.3 倍, 2013—2015 年降幅仅为 1.3 倍, 人均 GDP 增长 7 倍, 人均生态足迹值增长约 1.2 倍。其中, 以工业 GDP 增长最为明显, 2003—2013 年平均增速达 20%, 而 2013—2015 年则相对放缓, 平均增速达 18.1%; 人均生态足迹值的构成以林地和建设用地增长最快, 增长了约 4 倍, 化石能源增长了约 1.5 倍。这说明随着库区经济发展方式和资源利用技术的不断改进和优化, 经济产出超过了物质消费, 提高了对生态资源利用的效率, 使库区生态效率逐步提升。2013 年后因库区 GDP 稳步上升, 人均生态足迹增速放缓, 导致生态效率增速放缓。主要归因于近年来库区加强了长江黄金水道的经济串联, 逐步由原始粗放型工业生产逐步转向生态集约的发展方式转变, 使工业产值乃至总 GDP 增速放缓, 而基数较小的林地和建设用地增速对生态足迹的增速影响相对较小, 导致生态效率增速放缓。说明受长江黄金水道和主体功能区划的三峡库区正以生态保护促进生态建设, 逐步发挥其长江流域生态涵养功能区的作用。

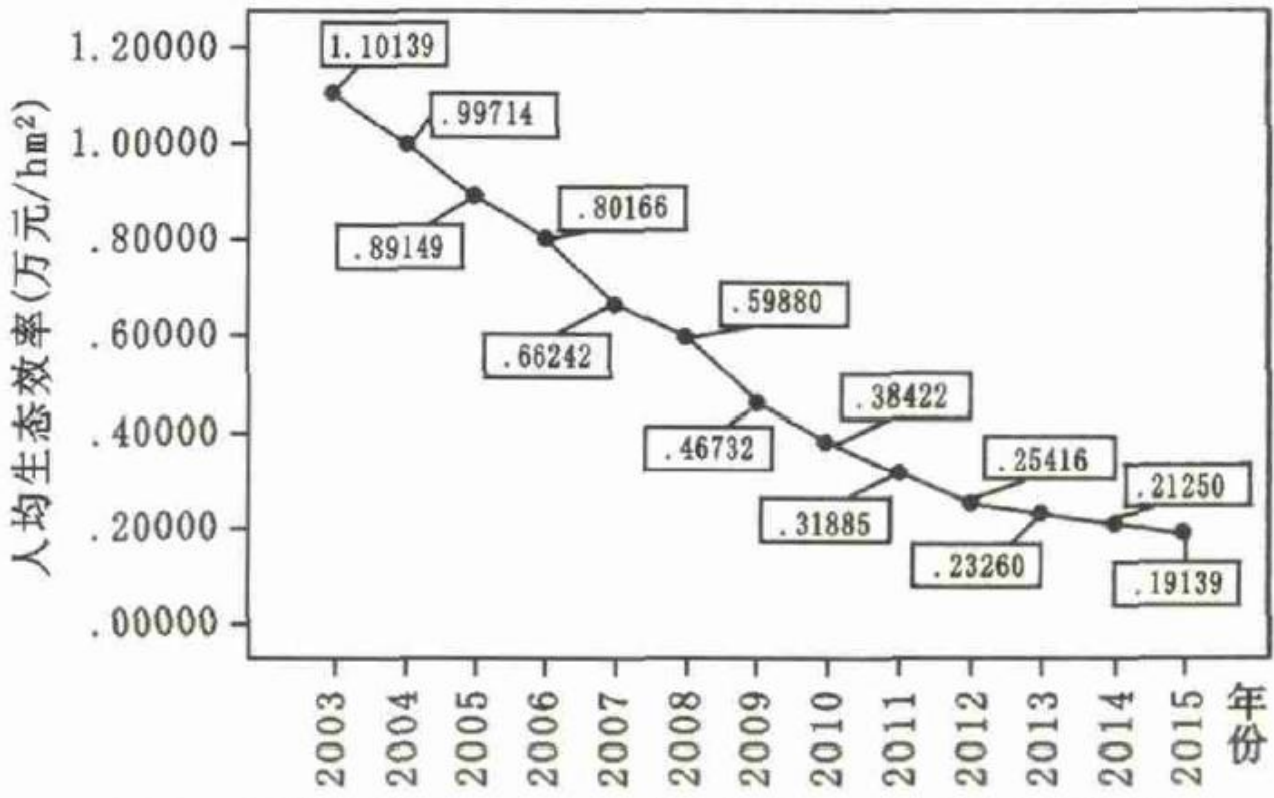


图 5 三峡库区 2003—2015 年万元 GDP 生态足迹变化

基于式(1—3)计算得到三峡库区各区县生态足迹和生态效率值(表 2), 利用 SPSS 软件绘制其空间差异对比图(图 6 和图 7, 图 6 见封四), 再结合 GIS 软件对数据进行可视化处理, 得出三峡库区自然资本空间格局图(图 8 和图 9, 图 8 见封四)。

自然资本空间格局: 库区各区县人均生态足迹存在差异化, 空间分布上呈现“首尾高、中部低”的格局(图 6, 见封四)。2003 年, 库区人均生态足迹最高为兴山、巴东、涪陵、长寿, 万州、云阳最低; 2009 年, 各区县人均生态足迹结构保持不变, 到 2015 年秭归人均生态足迹上升至与涪陵、长寿等城镇同一水平。三峡库区连贯成渝城市群和长江中游城市群, “库首”是湖北省域副中心城市宜昌, “库尾”是重庆市, 基于两大城市经济增长极的吸引, 在其交通、人口、产业等方面的集聚效应显著, 导致该区域资源消耗高于中部城镇。

表 2 3 区 12 县历年人均生态足迹、生态承载力与生态效率

项目	2003 年			2009 年			2015 年		
	生态足迹	生态承载力	生态效率	生态足迹	生态承载力	生态效率	生态足迹	生态承载力	生态效率
秭归	0.4029	0.4354	0.8042	0.5253	0.5248	0.5477	0.7256	0.5712	0.2744
兴山	0.5325	1.0297	0.7715	0.7873	1.0159	0.4497	1.1370	1.0627	0.2259
巴东	0.4962	0.7955	1.2090	0.6659	0.6771	0.8031	0.7328	0.5344	0.4478
巫山	0.4337	0.4972	1.6778	0.4226	0.5036	0.7816	0.4725	0.4898	0.3758
巫溪	0.3995	0.4874	2.0821	0.4440	0.5621	1.0088	0.5209	0.5664	0.4283
奉节	0.4092	0.3484	1.4692	0.4462	0.4165	0.6206	0.4714	0.4077	0.2794
云阳	0.3729	0.2418	1.6916	0.3564	0.2785	0.7161	0.3896	0.2628	0.3113
开县	0.4184	0.2741	1.3688	0.4134	0.3067	0.5965	0.4358	0.3401	0.2450
万州	0.3528	0.2472	0.7301	0.3792	0.3167	0.2555	0.4215	0.3039	0.0961
忠县	0.4363	0.2977	1.5205	0.4501	0.4051	0.5741	0.4887	0.3893	0.2367
石柱	0.4711	0.4555	1.6315	0.4849	0.5787	0.5885	0.5973	0.6135	0.2740
丰都	0.4533	0.2971	1.3339	0.4763	0.4722	0.6833	0.5546	0.6394	0.3415
涪陵	0.4864	0.3102	0.6358	0.5436	0.4801	0.2440	0.7165	0.4379	0.1104
武隆	0.4729	0.5160	1.0118	0.5360	0.8426	0.4413	0.6755	0.8887	0.2339
长寿	0.7510	0.2851	1.0592	0.7953	0.3459	0.4970	0.8404	0.2998	0.1808

注：由于恩施州 2003 年和 2015 年的统计数据缺失，未计入。

2003—2015 年，库区各区县人均生态承载力在空间上呈“首尾高、中部低，内陆高、沿江低”格局。最高值为兴山和武隆，石柱、巫溪、秭归、涪陵等次之，最低为万州和云阳。究其原因，主要是该时段库区倡导开垦荒地、退耕还林，“库首”的兴山，“库尾”的巫溪、武隆等森林覆盖率高，生态功能优越。同时，沿江城镇经济发展与建设规模普遍高于内陆城镇，且内陆的森林覆盖率普遍高于沿江。三峡库区人均生态盈余空间格局随着发展进程而产生变化，逐渐呈现“内陆高、沿江低”的态势，即以沿江区县向内陆区县升高的空间格局(图 7)。2003 年，兴山、秭归、巫山、巫溪、武隆处于盈余状态；2009 年，兴山、秭归、巴东、巫山、巫溪等库首城镇与武隆、石柱等内陆县城保持生态盈余状态，而长寿作为重庆市工业新区，大规模工业园区建设及其运转，导致生态赤字严重。2015 年，除巫山和丰都外，库区沿江县城均为生态赤字状态，涪陵、长寿等城镇生态赤字进一步加剧，兴山、巫溪、石柱、武隆等内陆县城仍处于生态盈余状态。

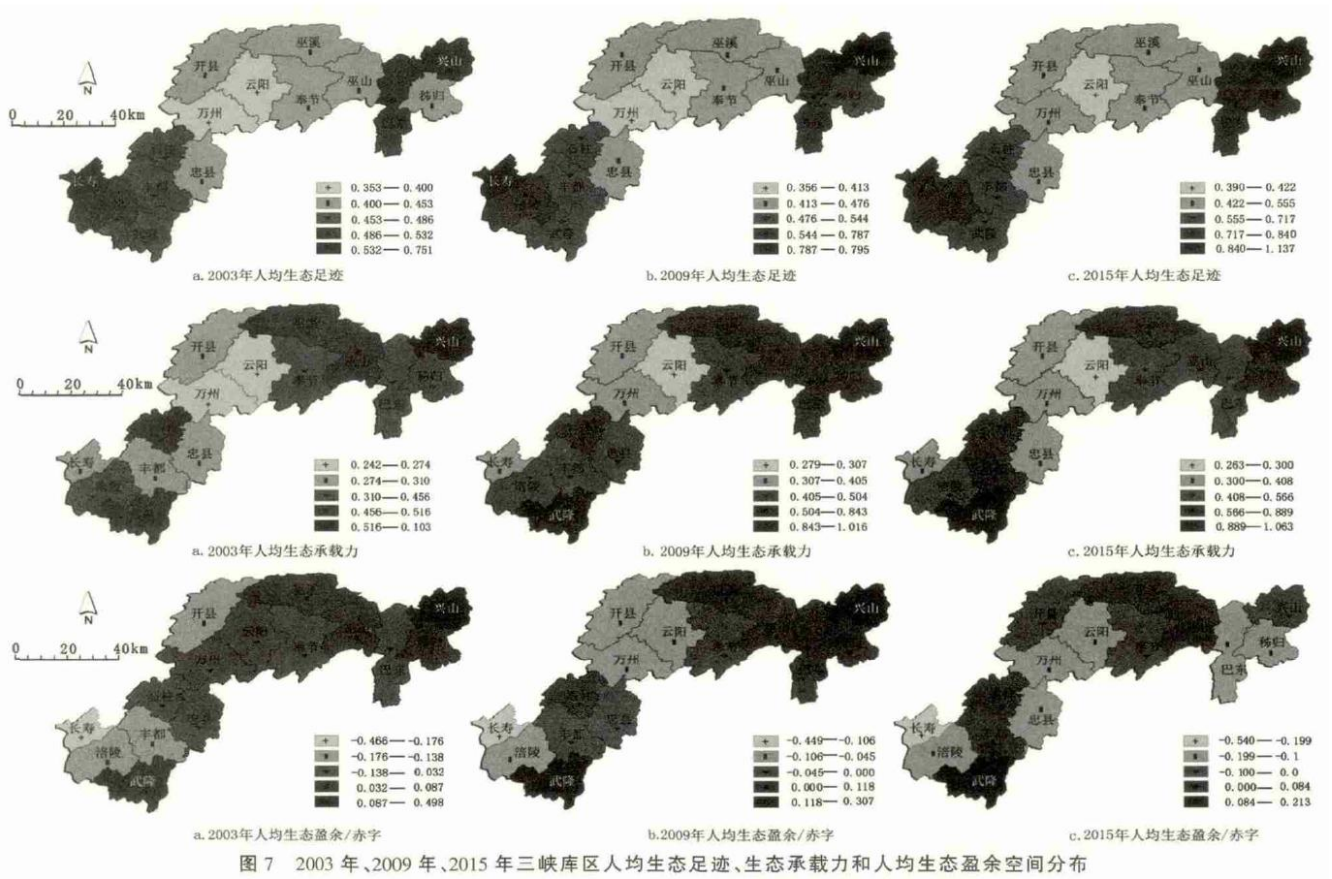
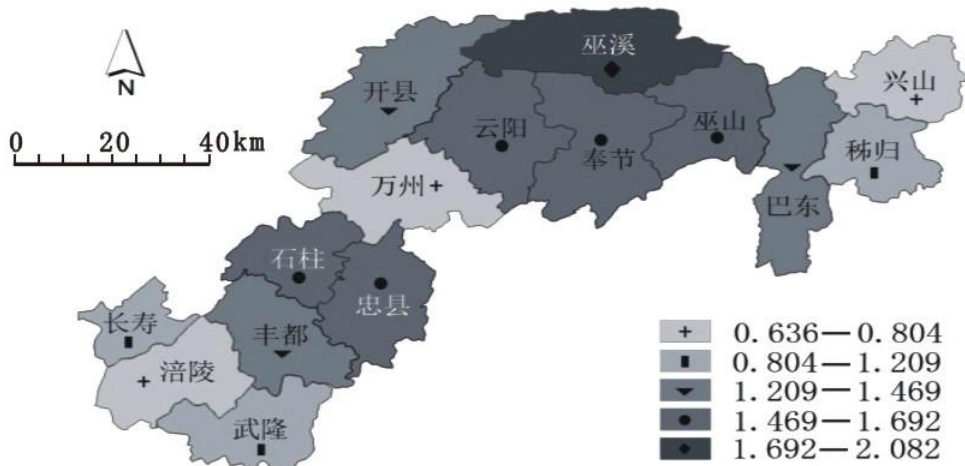
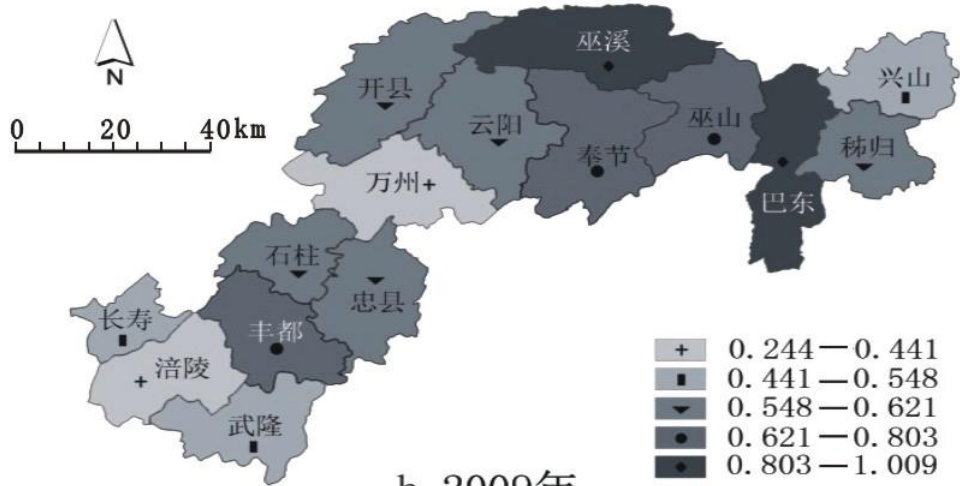


图7 2003年、2009年、2015年三峡库区人均生态足迹、生态承载力和人均生态盈余空间分布

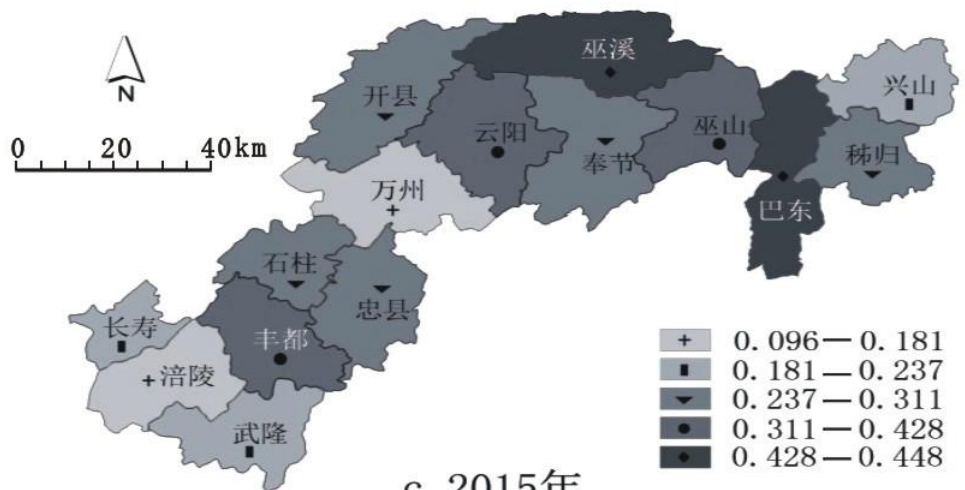
生态效率:三峡库区各区县生态效率值(万元GDP生态足迹)(图8,见封四)均处于下降的趋势,说明库区各区县的生态效率逐渐提高,但在空间上存在较大差异(图9)。其中,2003年,巫山、奉节、巫溪和云阳四县生态效率最低,而万州、涪陵两县的生态效率最高;2009年,巴东和秭归两县的生态效率增长相对较慢;2015年各区县生态效率差距进一步缩减,万州、涪陵与长寿区三县的生态效率仍处于最高。三个年份三峡库区各区县生态效率的空间特征呈现“首尾高、中部低”的态势(除经济发展快的万州区外),且沿江和内陆县城未存在明显差异。说明经济实力雄厚的区级城镇在高素质劳动力、高科技及优势政策的促进下,大大提升了区县城镇的生态效率。



a. 2003年



b. 2009年



c. 2015年

图9 2003年、2009年、2015年三峡库区万元GDP生态足迹空间分布

5 结论与讨论

自然资本作为人类生存和发展的保障,其使用方式、现有存量与使用效率直接影响区域生态服务功能,制约着社会经济可持续发展。本文基于生态足迹模型对三峡库区自然资本时空动态分析,得出以下结论:①基于时间序列分析,2003年库区移民新城搬迁完成,因急于脱贫,库区各城镇致力于经济的快速发展和居民生活水平的改善,而高速粗放的发展方式严重影响了库区自然资本存量状态。城镇物质空间的扩展和环境品质建设,也影响到该区域的生态涵养功能。具体表现为2003—2015年库区自然资源消耗逐年增长,人均值由0.44352增长到0.53861,增幅为21.4%,且耕地和化石能源地需求尤为明显,约占总足迹的95%左右。尽管大力鼓励开荒植林,提升生态承载力,但人地矛盾突出、地质灾害严重的库区生态功能受到威胁,2015年库区人均生态赤字达到0.1以上,且具有缓慢增长的趋势。随着库区经济发展方式、资源利用技术、人力资源、区域交通条件及产业的不断改进和优化,库区整体生态效率也逐渐提高,由2003年的1.101下降到2012年的0.191,效率提高了约5.76倍。2013—2015年库区的整体生态效率增速放缓,三年仅增长了1.3倍,说明长江黄金水道在库区经济建设和生态保护方面的积极作用正逐步显现。②在空间上库区城镇自然资本消耗及盈余状况存在明显差异。库区的人均生态足迹基本呈现“首尾高、中部低,内陆高、沿江低”的态势,而人均生态承载力及生态盈余呈现“沿江低—内陆高”的空间格局,生态效率则呈现“首尾高、中间低”的格局,这说明库区的区域城镇(宜昌、重庆)增长极及长江经济带对库中城镇(如万州、云阳)及内陆城镇(如兴山、巫溪、武隆)等的联动作用日益明显。随着“全国主体功能区划”及“三峡工程后续工作规划”的实施,三峡库区发展重点转向以生态保护促进生态建设,以生态建设带动发展转型,以此来推动区域经济和谐、健康、有序发展。

区域社会经济健康、和谐、有序发展涉及产业结构、工农业生产方式及城镇建设模式、自然资源状态以及利用方式等。因此,提出库区城镇建设与生态功能协调发展建议:①打破行政壁垒,探索区域协同发展机制。协调三峡库区、长江经济带、成渝城市群、长中游城市群等各大区域的合作共赢发展机制,促进湖北—重庆、沿江—内陆等区域城镇间的合作共生与共赢。②构建三峡库区城镇群空间体系。重点从城镇主导产业和经济发展,构建统筹经济和生态等双重核心的区域城镇空间体系,构建以“宜昌、万州和重庆”为重点经济增长极的沿江城镇和以“兴山、巫溪、武隆”为重点生态涵养的内陆城镇的“沿江—内陆(经济—生态)”空间体系,促进库区经济—生态协同发展。③倡导区域间差异化发展,有效落实生态补偿措施,首先将巫山、奉节、忠县等沿江县城日益萎缩的工业产业向万州、涪陵及长寿等工业产业城镇转移。同时,创新科技改变宜昌、万州、涪陵和长寿等经济增长极粗放的经济生产方式,依托长江黄金水道的生态物流产业对沿江县城进行经济串联。同时,以生态基础良好的内陆县城(兴山、巫溪及开县及武隆)作为库区生态涵养补偿,经济增长极(宜昌、万州、涪陵和长寿)通过区域基础设施及旅游产业投资、农业产品回收等方式对生态涵养功能的县城进行产业带动、经济补偿,并引导区域人口向兴山、武隆县等城镇转移,协调区域城镇社会经济生态的整体格局。

参考文献:

- [1] 张志强, 徐中民, 程国栋. 生态系统服务与自然资本价值评估[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1919-1926.
- [2] Costanza R, Daly H E. Natural Capital and Sustainable Development[J]. Conservation Biology, 1992, 6(1): 37-38.
- [3] Farley J, Daly H E. Natural Capital: The Limiting Factor: A Reply to Aroso, Blignaut, Milton and Clewell[J]. Ecological Engineering, 2006, 28(1): 6-10.
- [4] Wackemagel M, Reen W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriola Island, Canada: New Society Publishers, 1996: 61-83.
- [5] 王云平, 别雪艳. 生态足迹模型测度可持续发展的缺陷分析[J]. 地理科学进展, 2009, 28(3): 424-428.

-
- [6]徐中民,程国栋,张志强.生态足迹方法的理论解析[J].中国人口·资源与环境,2006,16(6):69-78.
- [7]卢小丽.基于生态系统服务功能理论的生态足迹模型研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(12):115-120.
- [8]Rees W E.Ecological Footprint and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves out[J].Environment and Urbanization,1992,4(2):121-130.
- [9]Wackernagel M,Monferda C,Schulz N B,et al.Calculating National and Global Ecological Footprint Time Series Resolving Conceptual Challenges[J].Land Use Policy,2003,21(3):271-278.
- [10]张志强,徐中民,程国栋,等.中国西部12省(区市)的生态足迹[J].地理学报,2001,56(5):599-610.
- [11]冯芳.基于能值分析的徐州市生态足迹计算[J].国土与自然资源研究,2009,(1):8-10.
- [12]张宇钰.基于能值—生态足迹的安康市可持续发展评价[J].西北林学院学报,2013,28(1):67-72.
- [13]张伟.基于能值理论的衡东县生态足迹研究[J].中南林业科技大学学报,2008,(2):57-62.
- [14]何爱红.中国中西部地区生态足迹与可持续发展[M].北京:中国社会科学出版社,2013:69-82.
- [15]Zhao S,Li Z Z,Li W L.A Modified Method of Ecological Footprint Calculation and Its Application[J].Ecological Modelling,2005,(185):65-75.
- [16]焦雯堵,阎庆文,李文华,等.基于生态系统服务的生态足迹模型构建与应用[J].资源科学,2014,36(11):2392-2400.
- [17]卢小丽.基于生态系统服务功能理论的生态足迹模型研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(12):115-120.
- [18]刘某承,李文华.基于净初级生产力的中国生态足迹均衡因子测算[J].自然资源学报,2009,24(9):1550-1558.
- [19]刘晶.基于“能值—生态足迹”模型的吉林省生态安全研究[D].吉林:吉林大学硕士学位论文,2005:1-109.
- [20]杜加强,舒俗民,张林波.基于净初级生产力的生态足迹模型及其与传统模型的对比分析[J].生态环境学报,2010,19(1):191-196.
- [21]顾晓薇.国家环境压力指标体系及减量化研究[D].沈阳:东北大学硕士学位论文,2005:1-153.
- [22]季丹.中国区域生态效率评价——基于生态足迹方法[J].当代经济管理,2013,35(2):57-62.