

闽三角城市群自然资本损失评估

范冰冰¹, 税伟^{1,2}, 杨海峰², 王亚楠¹, 杜勇²,
祁新华³, 张小洪⁴, 简小枚¹, 郭平平¹

(1. 福州大学环境与资源学院, 福州 350116; 2. 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福州 350116;

3. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350100; 4. 四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘要: 在快速城镇化进程中, 城市群发展在促进区域经济竞争与合作的同时, 也在一定程度上造成人地关系矛盾的加剧, 生态系统服务水平下降。为了量化城镇化对自然资本产生的变动, 揭示人类资源消耗过程对区域生态系统服务的影响机制, 以快速城镇化的典型区域——闽三角城市群为例, 运用能值分析方法与GIS技术, 分析了2000-2015年闽三角城市群可更新资源时空演变特征, 城镇化进程中生态环境价值演变规律以及土地转化过程中的自然资本损失。研究表明: (1) 闽三角城市群可更新资源在时间上呈波动减小趋势, 空间上自沿海区域向内陆区域逐渐升高; (2) 高环境质量等级中城镇用地面积占比呈显著增加趋势, 由0增加到10.63%, 人类活动导致区域生态环境价值的损失逐渐上升; (3) 城镇化过程中由于城市空间扩张, 使部分自然用地与农业用地转化为城镇用地, 转化过程造成的自然资本损失总量为 1.27×10^{22} seJ, 货币价值超过 6.30×10^9 元。研究有助于完善城镇化影响下的生态环境效应研究, 为城市群或区域生态环境管理与修复提供决策参考。

关键词: 能值分析; GIS; 城镇化; 闽三角城市群; 自然资本

伴随全球城镇化进程的加快, 城镇化作为城市或城市群发展的一种重要形式, 对周围生态环境造成现实或潜在的威胁^[1]。如何协调城镇化与生态环境的关系问题是目前学术界和政府决策部门普遍关注亟待解决的一大难点问题, 并逐渐上升为世界性的战略问题^[2-3]。早在1991年世界卫生组织就指出: “世界正面临着自然环境的严重恶化和生活在城市环境中人们生活质量的加速下降这两大问题, 城镇化对威胁未来生存的全球环境变化有着重要影响”^[4]。2012年联合国发布未来地球计划(Future Earth, FE), 其中特别强调城镇化作为地球表层最剧烈的人类活动过程的阈值、风险、临界点是生态环境研究的前沿领域^[5]。从国际研究前沿分析, 开展城镇化与生态环境效应的研究, 已经成为国际上未来可持续性科学研究的热点与前沿领域。

城市群作为全国或区域社会经济发展的战略核心区和新型城镇化的主体区, 应当率先开展城镇化与区域生态环境效应的研究, 保障城市群经济发展与环境保护协调发展, 为其他区域或城市提供可持续发展思路与技术参考。综观国内外城镇化与生态环境效应的研究可知, 目前对于城市群的研究还主要聚焦于城市群的空间扩展、经济发展与空间

收稿日期: 2018-06-12; 修订日期: 2018-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502905); 国家重点研发计划“典型脆弱生态修复与保护研究”专项

作者简介: 范冰冰(1991-), 男, 福建宁化人, 硕士, 主要从事环境地理学、环境科学研究。

E-mail: fan563241529@163.com

通讯作者: 税伟(1974-), 男, 四川射洪人, 博士, 教授, 主要从事土地利用/覆被变化与生态效应、生态系统服务、遥感与地理信息技术应用研究。E-mail: shuiwei@fzu.edu.cn

结构和形态上^[6-7], 近几年开始逐渐关注城市群高密度集聚诱发的资源与生态环境问题的研究^[8-10], 探讨城市群土地利用变化与资源环境之间相互作用关系的理论研究^[11-12], 但是从研究动态与现实分析, 缺乏对城市群地区城镇化与生态环境效应及其耦合机理的量化研究, 研究深度还不足。土地利用变化作为城镇化的一个重要表现, 尤其是自然用地和农业用地转化为城镇用地, 能够通过改变景观代谢影响气候条件、土壤养分和水分。无序蔓延式的城镇化会导致景观和生态系统破碎化, 引起生态系统破坏与环境污染, 最终导致自然资本(可更新资源和不可更新资源)和相关生态系统服务的丧失^[13]。因此, 基于研究的薄弱环节, 结合分析城镇化导致的生态环境效应主要为自然资本和相关生态系统服务的丧失, 可以通过量化城镇化进程中自然资本和生态系统服务的损失来刻画城镇化与生态环境效应的耦合关系。

闽三角城市群地区是福建省经济发展的战略核心区和新型城镇化的主体区, 担当着中国经济重心转移承载地的历史重任。然而, 快速城镇化使城市群面临着日益严重的资源与生态环境的胁迫压力, 造成关键生态服务功能受损、安全保障空间萎缩与自然资本损失等重大生态环境问题。本研究以快速城镇化典型区域——闽三角城市群为研究区, 运用能值分析方法和地理空间技术, 对该区域城镇化进程中自然资本、生态系统服务和环境价值损失进行核算与分析, 旨在为闽三角城市群或类似城市群的生态环境管理、开发规划以及可持续发展提供参考与理论支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

闽三角城市群位于福建省东南沿海, 简称为闽南金三角, 指福建省厦门、泉州和漳州3个地级市及所辖县区, 东隔台湾海峡与台湾省相望, 南接广东省, 介于珠三角和长三角两大经济区之间, 区位条件优越(图1)。研究区土地面积约为25314 km², 占福建省土地总面积的20%, 常住人口接近2×10⁷人, 经济生产总量占福建省的40%。地处亚热带海洋性季风性气候, 全年降水主要集中在春夏两季, 降水量大且日照时间长。地貌类型以低山、丘陵、冲积和海积平原为主, 适合城镇、交通运输、工业的布局和发展。

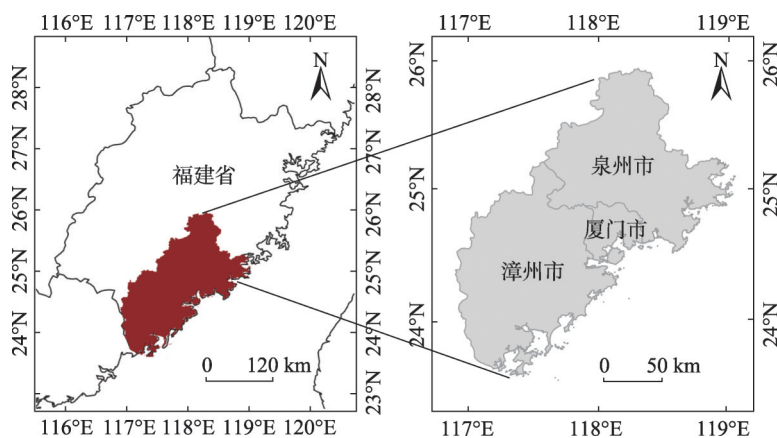
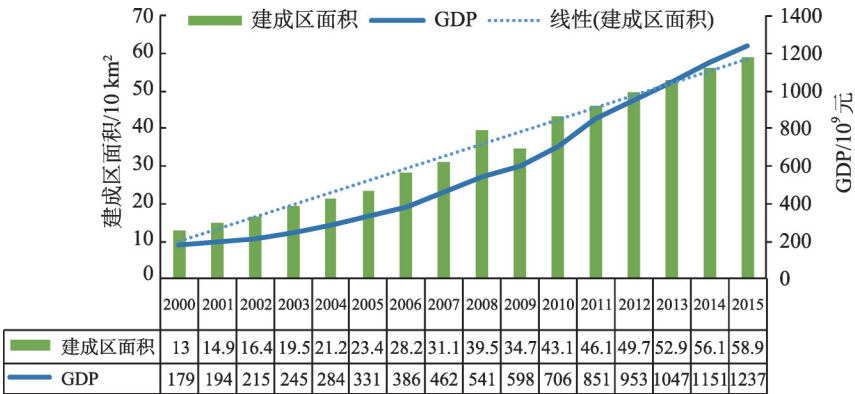


图1 闽三角城市群区位

Fig. 1 Location of Southern Fujian Urban Agglomeration (Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou)

闽三角地处海上丝绸之路起点、国家生态文明实验区和海峡西岸经济区，是福建省经济输出的主要地区，其中厦门市作为经济特区，漳州市、泉州市作为其经济发展衍射区域。进入21世纪以来，该区域城镇化发展迅速，土地利用变化与城镇用地蔓延趋势明显，2000-2015年城镇用地面积增加459 km²。2000年城镇化率为48.17%，至2015年，GDP为1.24×10¹²元，人口密度为676.95 人/km²，建成区面积为589 km²，城镇化率已经达到65.06%，城镇化率上升了15.89个百分点（图2）。



注：数据来源于2001-2016年厦门市、泉州市和漳州市统计年鉴。

图2 2000-2015年闽三角城市群建成区面积与GDP变化情况

Fig. 2 The change of built-up area and GDP in Southern Fujian Urban Agglomeration from 2000 to 2015

1.2 数据来源

本研究数据时间跨度大，涉及类型多元，包括2000年、2005年、2010年、2015年遥感数据、社会经济统计数据 and 气象站点数据，其中遥感数据有 Landsat 8 OLI_TIRS 卫星数字产品（地理空间数据云 <http://www.gscloud.cn/>）、土地利用类型数据（中国科学院资源环境科学数据中心 <http://www.resdc.cn/>）、MODIS 系列数据（NASA LAADS DAAC <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>）、DEM 数字高程数据（地理空间数据云）；社会经济统计数据有人口、GDP（2001年、2006年、2011年、2016年厦门市、泉州市、漳州市统计年鉴）；气象站点数据包括光照时间、气温、降雨量等基本气象要素（中国气象数据网 <http://data.cma.cn/>）。

1.3 研究方法

1.3.1 可更新资源能值核算

能值分析是以能值为基准，通过能值转换率这一度量标准，将生态系统或生态系统内流动和储存的各种不同类别的能量转换为能值这一量纲，进行定量分析研究^[14]。一般来说，地球生态系统中存在许多的可更新能流，包括太阳辐射能、风能、雨能、地热能、潮汐能、波浪能等，但是在各种能流之间又存在相互包含与转化的过程。为了避免在能值核算过程中出现二次计算，一般只考虑当地存储最大的几种可更新能源，基于闽三角城市群的地理环境条件，选取太阳辐射能、风能、雨能（化学能与位势能）、地热能和潮汐能，以12.0E+24 seJ/a 能值基线为准^[15]，对闽三角地区可更新资源进行能值核算，具体计算公式见表1。

表1 可更新资源能值计算公式与相关参数说明

Table 1 The formula of renewable resource emery accounting and the explanation of related parameters			
可更新能流	能量方程式	参数说明	参数处理
太阳辐射能	$E_s = T_s \times S \times AREA \times (1 - \alpha) \times 0.93 \times T_R$ (引自文献[16])	T_s 为光照时间(秒); S 为太阳辐照度(1360.8 W/m ²); α 为太阳反照率; T_R 为太阳辐射能值转换率(1seJ/J) ^[17]	(1) 光照时间: 克里金插值得到 (2) 太阳反照率: 土地利用数据重分类得到
地热能	$E_{geo} = A \times \eta \times En_{geo}$ $\eta = 1 - \frac{T_e}{T_s}$	A 为面积(m ²); T_e 为年平均地表温度(℃); T_s 为地表1000 m以下温度(℃); En_{geo} 为热流单位面积(J/m ²)	En_{geo} : 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二、三、四版) ^[18-20] 利用克里金插值得到
风能	$E_w = A \times \rho \times C_D \times v^3 \times t \times T_R$	ρ 为空气密度(1.3 kg/m ³); C_D 为阻力系数; V 为风速; t 为刮风时间; T_R 为风能能值转化率(1578 seJ/J) ^[21]	(1) C_D : 基于不同地表类型分别取值为0.01、0.02、0.03 (2) 风速: 克里金插值得到
降雨化学能	$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2/L^2}}$ $E_{rc} = A \times \rho_{water} \times G \times ET \times T_R$	ET 为土壤水分蒸发量(m/a ⁻¹); P 为降雨量(mm/a ⁻¹); L 为300+25 T^e +0.05 T^s (T 为年平均温度); ρ 为水密度(1000 kg/m ⁻³); G 为吉布斯自由能值; T_R 为能值转换率(6360 seJ/J) ^[16]	(1) 降雨量: 克里金插值得到 (2) 气温: 克里金插值得到
降雨位势能	$E_{rg} = A \times \rho_{water} \times R \times g \times h \times T_R$	ρ 为水密度(1000 kg/m ⁻³); R 为径流量; g 为重力加速度; h 为海拔; T_R 为降水重力势能能值转换率(10909 seJ/J) ^[16]	径流量(R)及海拔高度(h): 基于DEM在ArcGIS通过空间分析模块进行提取
潮汐能 ^①	$E_t = A \times \rho_{sea} \times F_t \times h^2 \times g \times T_r$	A 为大陆架及海面100 m内面积; ρ 为海水密度(1.025E+06 g/m ³); F_t 为每年发生潮汐次数(730次); h 为平均潮汐高差; g 为重力加速度(9.8 m/s ²); T_r 为潮汐能能值转化率(1.68E+04 seJ/J) ^[22]	由于数据格式与制图难度等问题, 研究对潮汐能仅进行能值核算
可更新能值	$E = E_s + E_{geo} + E_w + E_{rc} + E_{rg} + E_t$	E_s 为太阳辐射能量; E_{geo} 为地热能能值; E_w 为风能能值; E_{rc} 为降雨化学能能值; E_{rg} 为降雨位势能能值; E_t 为潮汐能能值	降雨化学能、位势能与潮汐能能值进行叠加, 然后利用最大合成法(MVC)得到可更新能值图

注: ① 2000年潮汐能: 大陆架及海面100 m内面积为1294 km²; 平均潮汐高差为4.2 m (引自文献[23])
能值=(1.294 E+09 m²) × (1.025 E+03 kg/m³) × (730次) × (4.2 m)² × (9.8 m/s²) × (1.68 E+04 seJ/J)=2.81 E+21 seJ/a;
2005年潮汐能: 大陆架及海面100 m内面积为1305 km²; 平均潮汐高差为3.9 m (引自潮汐表: 2007^[24])
能值=(1.305 E+09 m²) × (1.025 E+03 kg/m³) × (730次) × (3.9 m)² × (9.8 m/s²) × (1.68 E+04 seJ/J)=2.44 E+21 seJ/a;
2010年潮汐能: 大陆架及海面100 m内面积为1346 km²; 平均潮汐高差为4.5 m (引自潮汐表: 2010^[25])
能值=(1.346 E+09 m²) × (1.025 E+03 kg/m³) × (730次) × (4.5 m)² × (9.8 m/s²) × (1.68 E+04 seJ/J)=3.35 E+21 seJ/a;
2015年潮汐能: 大陆架及海面100 m内面积为1350 km²; 平均潮汐高差为4.8 m (引自潮汐表: 2015^[26])
能值=(1.350 E+09 m²) × (1.025 E+03 kg/m³) × (730次) × (4.8 m)² × (9.8 m/s²) × (1.68 E+04 seJ/J)=3.83 E+21 seJ/a。

1.3.2 能值与GIS分析框架

Mellino等将能值方法与GIS进行集成, 形成区域层面框架以便量化主要的可更新能流(太阳辐射、地热、风、蒸散和径流), 评估区域环境保护价值^[16]。土地环境质量下降是城镇化直接导致的结果, 进而导致了区域生态环境价值的损失, 因此如何刻画城镇化导致的生态环境价值损失成为关键问题。市场价值受影响的因素与土地环境质量无关,

通常是交通基础设施建设、距离市中心的距离为土地提供了市场价值而不是生态系统服务的能力。而土地环境质量的维持一定程度上得益于可更新能源质量, 用能值表达可更新能流的空间分布和储存, 使其可以赋予土地一个不同于市场价值的环境价值, 能够有效刻画土地环境质量变化。制作一幅远离市场偏见的环境价值图需要以下步骤 (图3):

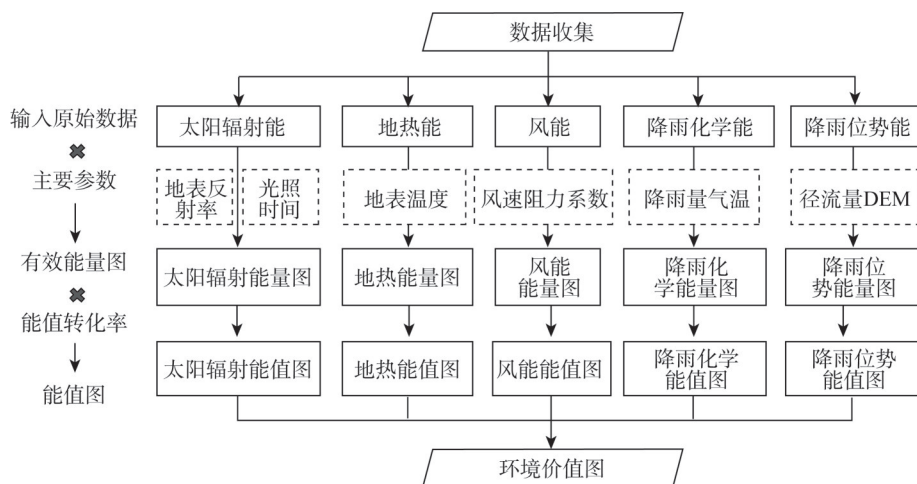


图3 环境价值能值核算的技术路线

Fig. 3 The technical route of environmental value by energy accounting

(1) 收集支持闽三角城市群地区的主要自然能流（太阳辐射、地热、风能、降水、潮汐）的原始数据，并将每一种能流制作成图层（除潮汐能外）。

(2) 通过结合之前的能流图和适当的物理参数（反射率、海拔、温度、风速）以及特定的外能因子，制作每一种能流的能量分布图层。

(3) 利用环境质量因素对可用的能值图进行描述，即能值转化率（UEV）。在这个步骤中，基于有效能流的考虑，每一种能流的能量图层都会乘上一个适当的能值转化率。

(4) 生成可更新能源能值图，包含所有可更新能流的能值，以能值功率密度来表达。为了避免重复计算，在ArcGIS 10.0软件中，首先利用栅格计算器对降雨化学能与位势能进行简单叠加，然后采用最大值合成法（MVC）将太阳辐射能、地热能、风能、降雨能（化学能和位势能）进行叠置得到可更新能源能值图，最后对其进行等级划分，得到环境价值图。

1.3.3 净初级生产力计算

净初级生产力（NPP）是从光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分，是人类生活所需食物、原料及燃料的重要来源^[27]。植被作为初级生产者对人类社会至关重要，同时也是生态系统4种服务（供给、调节、支持和文化）的根源^[28]。NPP作为地表碳循环的重要组成部分，不仅直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力，而且表征了陆地生态系统的质量状况和服务功能^[29]。因此，NPP已经成为衡量生态系统生产力与服务能力的关键性指标。

本研究采用朱文泉等^[30]基于CASA模型改进的遥感估算模型分别对闽三角城市群2000年、2005年、2010年和2015年的NPP进行估算，并且通过叠加城镇用地变化图层

评价2000-2015年城镇化进程对NPP的影响。NPP遥感模型所估算的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,其估算公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

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

2 结果分析

2.1 2000-2015年可更新资源的时空演变

在处理可持续发展问题时,资源的储量与地理分布是最重要的。为明确维持闽三角区域多样性和社会经济结构的生态环境资源的数量、质量和空间分布,对闽三角区域主要的可更新资源(太阳辐射能、风能、地热能、降雨化学能和位势能)进行能值核算与分析,并且进行可更新资源的时空演化分析。根据所获得的资源能值分布图可以反映时间序列上可更新资源的空间异质性,揭示闽三角区域生态环境价值演变趋势,确定具有较高生态环境价值的区域,为区域空间规划和决策提供有力支撑。

通过能值公式与ArcGIS的空间分析模块,得到2015年闽三角区域主要的可更新资源能值密度图(图4)。图4a反映了太阳辐射能分布情况,呈现沿海高于内陆区域的特征,这是由于闽三角区域沿海地区地势较为平坦、开阔,接受太阳辐射能力较强,而内陆区域山体广布,地势曲折,接受太阳辐射能力较弱;图4b显示了地热能流的分布情况,主要集中于漳州市九龙江流域及周边,这与当地温泉资源丰富趋于一致;图4c反映了风能的分布情况,总体呈现以厦门海湾和九龙湾为中心向外逐渐减少的特征,这是由于风力受山体阻隔的消减作用导致的;图4d和4e分别显示了降雨化学能与位势能(重力势能)的分布情况,降雨位势能是闽三角区域数量最大的可更新能流,并且从数值范围反映了其空间异质性最大,呈现内陆区域高于沿海区域的特征;图4f反映了闽三角城市群可更新能源总能流的分布情况,总体呈现内陆自然区域高于沿海人工区域的特征,值得注意的是九龙江流域及周边由于大量的水资源与地热资源,具有较高的生态环境价值。

进一步分析2000-2015年闽三角城市群区域可更新资源能值的时空演变趋势(图5),结合表2可以看出,在时间上,闽三角城市群可更新资源呈现先减少后增加的趋势,2000-2005年可更新资源减少程度最大,2005年后逐渐增加。这一变化趋势可以从一些主要的气象、气候因子的变化中得到解释:除年均降雨量在2000-2015年呈逐渐减少的趋势外,其他因子(年均风速、年均光照时间、年均气温)均呈现先减少后增加的趋势(图6)。在空间上,闽三角城市群可更新资源总体呈现减少趋势,尤其是内陆的自然与农业区域,部分区域呈现增加的趋势,如2010-2015年九龙江流域及周边可更新资源能值明显增加,这与近几年该流域水源管治和周边区域地热能勘探开发密切相关。

NPP作为世界碳循环的重要组成部分,是表征陆地生态系统支持、调节、供给服务的多样性关键指标。本研究分别计算2000年、2005年、2010年和2015年闽三角城市群区域的NPP,揭示该区域生态系统服务功能的变化过程。通过空间对比和数值统计(表2)可以看出,在时间上,2000-2015年闽三角城市群区域NPP总体呈现先减少后增加的趋势,这与可更新资源能值变化趋势相一致,反映了可更新能源与NPP具有较大的线性耦合关系,这是自然资本与生态系统服务之间相互作用所决定的。

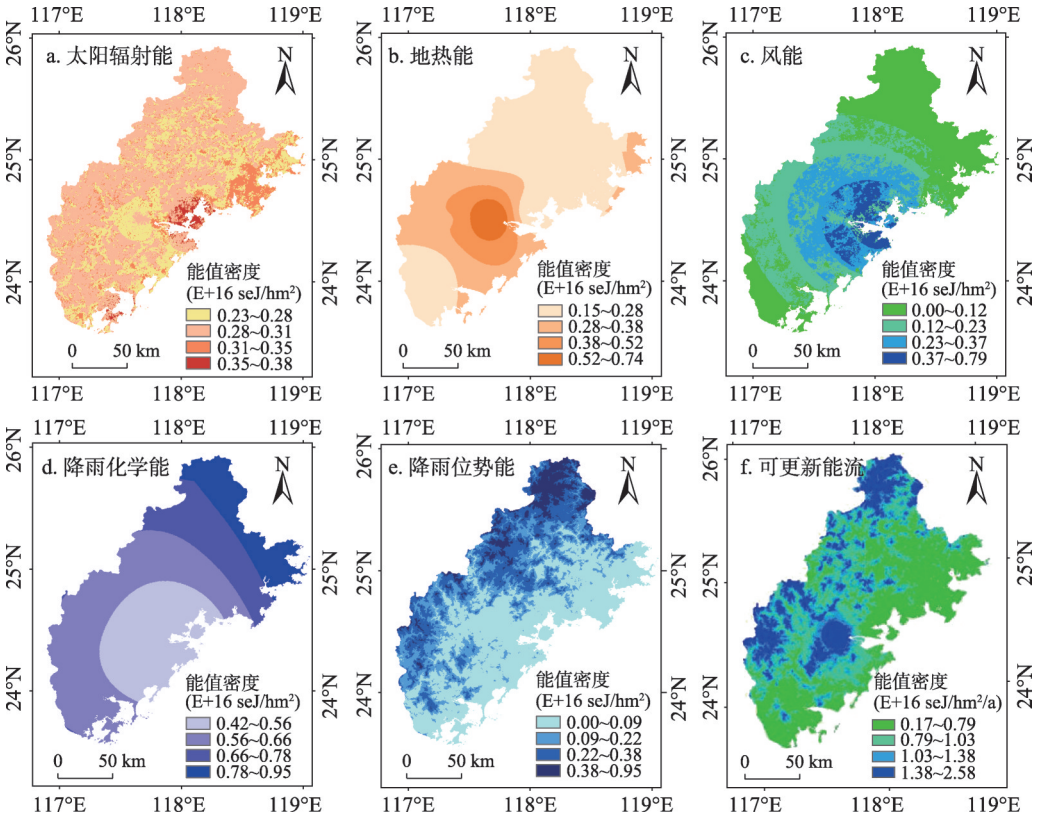


图4 2015年闽三角城市群可更新资源的能值密度

Fig. 4 The emergy density of renewable resources in Southern Fujian Urban Agglomeration in 2015

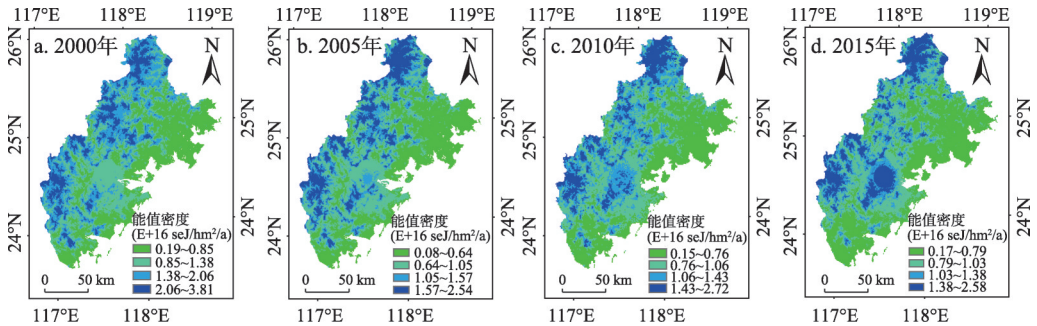


图5 2000年、2005年、2010年和2015年可更新能源能值密度

Fig. 5 The emergy density of renewable energy in 2000, 2005, 2010 and 2015

2.2 2000-2015年城镇化进程对生态环境价值的影响分析

随着城镇化进程的不断加快，城镇用地和不透水表面不断增加，导致生态用地减少，生态系统服务功能下降，生态环境价值减弱。目前，在自然资源管理与保护方面，城镇用地面积和不透水表面已经成为表征环境风险性的重要指标，有效强调了人类主导的土地利用改变新陈代谢功能和自然生态系统的复杂性^[31]。对于一个地区而言，流入区域内的可更新能源越多，该区域生态环境内在价值就越高，生态系统服务能力就越强。

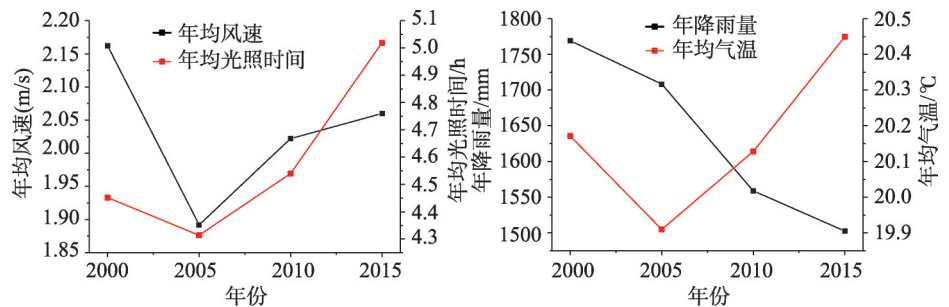


图6 20002015年年均风速、年均光照时间、年降雨量和年均气温变化趋势

Fig. 6 The trend of annual average wind speed, average sunshine time, average rainfall and average temperature from 2000 to 2015

表2 2000-2015年闽三角城市群可更新资源能值与NPP的统计结果

Table 2 The statistical results of renewable resources emery and NPP in Southern Fujian Urban Agglomeration from 2000 to 2015

年份		Avg	Min	Max	SD	Sum(seJ/a)
2000	R(seJ/hm ² /a)	1.22E+16	1.92E+15	3.81E+16	6.13E+15	4.03E+21
	NPP(gC/hm ² /a)	9.58E+05	0	2.19E+06	5.15E+05	2.35E+11
2005	R(seJ/hm ² /a)	8.73E+15	8.64E+14	2.54E+16	4.49E+15	3.33E+21
	NPP(gC/hm ² /a)	9.08E+05	0	1.92E+06	4.44E+05	2.23E+11
2010	R(seJ/hm ² /a)	8.54E+15	1.52E+15	2.72E+16	2.96E+15	3.52E+21
	NPP(gC/hm ² /a)	9.20E+05	0	1.99E+06	4.82E+05	2.26E+11
2015	R(seJ/hm ² /a)	8.91E+15	1.08E+15	2.58E+16	2.48E+15	4.72E+21

值得注意的是，衡量一个地区提供环境服务的能力取决于该区域能够支持当地和周边地区的人类经济和社会的能力^[32]。因此，本研究根据闽三角城市群社会经济发展水平与生态环境状况，采用自然断点法对可更新能值进行分级，确定生态环境价值等级（1~4），数值越大代表生态环境价值越大，并且通过耦合城镇化指标评估城镇化与当地生态环境价值之间的联系。

为了评估城镇化对闽三角城市群生态环境价值的影响，分别叠加2000年、2005年、2010年和2015年可更新能源能值分布图层与城镇用地图层，得到建成区内可更新能流的分布情况。从图7可以看出，可更新能源能值主要分为4个等级，数值越大代表生态环境价值越大，而城镇用地主要集中在低值区域，表明低环境质量与人工建筑空间存在对应关系。人工建筑空间是表征环境变化与自然资源健康状况的重要指标。表3能够清楚地显示从2000-2015年不同环境价值等级中城镇用地占比的变化情况，在低环境质量等级中城镇用地面积占了绝大部分，并且在时间上呈逐渐递增的趋势；高环境质量等级中城镇用地面积虽然只占较小部分，分别为0、2.72%、10.63%，但是在变化趋势上其增加幅度最显著。值得注意的是，随着高环境质量区域人工建筑覆盖不断增加，对区域生态系统与自然资源会造成毁灭性的影响，降低区域环境价值与生态系统服务能力。在城市发展规划与生态环境管理方面，建议政府部门应当注意对高环境质量（价值）区域严格限制开发，部分区域禁止开发，维持区域生态系统良好的服务能力。

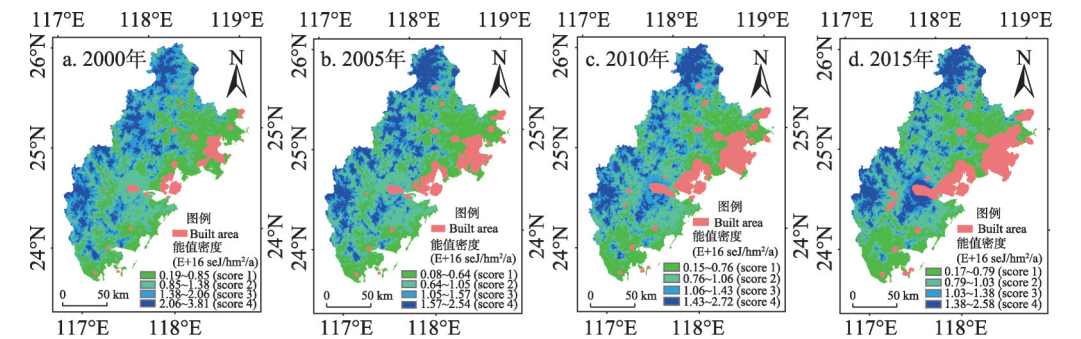


图7 2000年、2005年、2010年和2015年环境价值与城镇用地分布情况

Fig. 7 The distribution of environmental value and urban land in 2000, 2005, 2010 and 2015

2.3 2000-2015 年城镇化进程中自然资本的损失分析

在加速推进城镇化过程中，农业用地与自然用地转变为城镇用地影响了区域系统的环境功能，加速了具有高环境价值的自然区域的损失和退化。由此导致的自然资本和生态系统产品服务的减少，将会对人类经济和福祉产生负面影响^[33]。基于此，本研究针对闽三角城市群在2000-2015年城镇化进程中城镇用地扩张范围内，分别核算了由于自然用地与农业用地转化为城镇用地所损失的自然资本量（植物生物量、有机碳），进一步深入刻画城镇化导致生态环境价值损失的具体方面。

闽三角城市群集金融商贸业、文化旅游业、工业制造业及先进的农业基础于一体，伴随着工业化与城镇化进程的快速推进，人口与城镇用地剧

烈扩张。2000-2015年福建省东北部及中东部（闽三角地区）城镇用地面积有明显扩张趋势。2000年城镇用地面积为 $1.17\times10^5\text{ hm}^2$ ，2000-2015年城镇用地增加面积为 $2.45\times10^5\text{ hm}^2$ ，增加面积为2000年城镇用地面积的2.09倍（表4）。基于城镇化进程中城镇用地变化情况，对2000-2015年城镇用地扩张范围内的自然资本损失量进行了能值核算（表4）。在农业用地与自然用地转化为城市用地的过程中，农业用地与自然用地损失面积总体呈下降趋势，2000-2005年损失面积最大为 $1.13\times10^4\text{ hm}^2$ ，2010-2015年损失面积最小为 $2.00\times10^3\text{ hm}^2$ ；在2000-2015年间，关键的自然资本（生物量和有机碳）损失总量为 $1.27\times10^{22}\text{ seJ}$ 。从发展阶段上看，自然资本损失量从 $4.92\times10^{21}\text{ seJ}$ 上升到 $5.66\times10^{21}\text{ seJ}$ ，再下降

表3 2000-2015年不同环境质量等级中城镇用地占比统计

Table 3 The proportion of urban land in different environmental quality levels from 2000 to 2015

年份	环境质量等级	面积 /10 ⁴ hm ²	城镇用地 /10 ⁴ hm ²	城镇用地 占比/%
2000	1	55.31	6.83	12.34
	2	56.53	1.06	1.87
	3	44.37	0.02	0.05
	4	22.86	0	0
2005	1	52.05	13.45	24.47
	2	60.03	2.05	3.41
	3	52.44	1.16	2.21
	4	25.55	0	0
2010	1	51.22	15.88	30.68
	2	41.54	1.35	2.41
	3	41.43	1.62	3.91
	4	24.44	0.66	2.72
2015	1	58.09	18.59	32.31
	2	56.16	2.97	5.28
	3	50.94	1.79	3.51
	4	27.88	3.06	10.63

表 4 2000-2015 年城镇化进程中自然资本损失

Table 4 The natural capital loss in the process of urbanization from 2000 to 2015

年份	项目	农业用地转城市用地	自然用地转城市用地	总计
2000-2005	损失面积/hm ²	1.11E+04	2.00E+02	1.13E+04
	植物生物量损失/seJ	2.77E+21	8.58E+20	3.63E+21
	有机碳损失/seJ	1.25E+21	4.49E+19	1.29E+21
	自然资本损失/seJ	4.01E+21	9.03E+20	4.92E+21
2005-2010	损失面积/hm ²	3.60E+03	1.00E+03	4.60E+03
	植物生物量损失/seJ	8.99E+20	4.14E+21	5.04E+21
	有机碳损失/seJ	4.04E+20	2.24E+20	6.28E+20
	自然资本损失/seJ	1.30E+21	4.36E+21	5.66E+21
2010-2015	损失面积/hm ²	1.60E+03	4.00E+02	2.00E+03
	植物生物量损失/seJ	3.99E+20	1.46E+21	1.86E+21
	有机碳损失/seJ	1.79E+20	8.97E+19	2.69E+20
	自然资本损失/seJ	5.79E+20	1.55E+21	2.13E+21

注:

自然用地转化为城市用地 (2010-2015 年)

1、植物生物量损失			
自然用地损失面积	4.00E+02	hm ²	表5
每公顷自然用地生物量	446.4	t/hm ²	IPCC ^[35]
自然用地转化损失的生物总量	1.79E+05	t	
UEV (R/NPP) ^[32]	8.17E+09	seJ/g	表3
Emergy	1.46E+21	seJ	
2、有机碳损失			
自然用地损失面积 4.00E+02	4.00E+02	hm ²	表5
每公顷自然用地有机碳	3.6	Kg/m ²	IPCC ^[35]
自然用地转化损失的有机碳	1.44E+10	g	
UEV	6.23E+09	seJ/g	Odum ^[21]
Emergy	8.97E+19	seJ	

农业用地转化为城市用地 (2010-2015 年)

1、植物生物量损失			
农业用地损失面积	1.60E+03	hm ²	表5
每公顷农业用地生物量	148.8	t/hm ²	IPCC ^[35]
农业用地转化损失的生物总量	2.38E+05	t	
UEV	1.68E+09	seJ/g	Jiang ^[36]
Emergy	3.99E+20	seJ	
2、有机碳损失			
农业用地损失面积	1.60E+03	hm ²	表5
每公顷农业用地有机碳	1.8	kg/m ²	IPCC ^[35]
农业用地转化损失的有机碳	2.88E+10	g	
UEV	6.23E+09	seJ/g	Odum ^[21]
Emergy	1.79E+20	seJ	

到 2.13×10^{21} seJ, 呈现先上升后下降的趋势, 其中农业用地转城市用地中损失较多的是有机碳, 而自然用地转城市用地中损失较多的是植物生物量。2000-2010年闽三角地区大力发展工业, 外来务工人员大量涌入, 导致农业用地与自然用地损失面积与自然资本损失量在不断增加。2010-2015年自然资本损失呈现下降趋势, 这与闽三角区域把注重生态安全、改善人居环境、提升环境服务价值作为经济发展的重要环节密切相关。城镇化进程中自然资本损失的能值核算可以为当地政府进行生态修复与环境规划提供数据支撑。以2000-2005年为例, 由于城镇化导致的自然资本损失量为 4.92×10^{21} seJ, 2005年厦门市能值货币比为 4.47×10^{12} seJ/\$^[34], 损失的自然资本量折算成货币价值为 1.10×10^9 元。虽然这并不是真实的金钱, 但如果要通过人工手段对损坏的生态环境进行修复, 维持生态资本储量, 这些货币价值可以作为投资与消费的参考。

3 讨论

快速城镇化发展在一定程度上影响区域生态环境质量、生态系统服务价值与功能^[37-38]。余兆武^[39]等人对当前城镇化发展及其生态环境效应的研究进行了论述, 发现现有研究着重在对城镇化压力及驱动机制探讨, 而对内在机理分析不足, 长时间序列、多因素、多尺度耦合研究相当缺乏。本研究从城镇化引起的生态环境效应的内在机理出发, 多方面、多尺度地揭示了城镇化进程下的生态效应, 可以恰当地弥补目前研究的缺陷。一般来说, 城镇化水平上升, 生态环境质量、生态系统服务价值与功能下降^[40-41]。本研究在前人研究理论的基础上, 通过城镇化进程中区域可更新资源、NPP演变过程和自然资本(植物生物量、有机碳)的损失更加深入地刻画了快速城镇化发展对区域生态系统服务价值与功能影响的具体方面, 并且运用能值分析方法与空间分析技术, 可以有效量化区域生态系统服务价值的数量、质量变化。城镇化进程中可更新资源与NPP的时空演变可以为当地政府在环境管理与规划上提供空间参考和指导, 自然资本损失量的能值核算反映了城镇化发展导致的生态系统服务下降的经济价值损失, 可以为当地正确处理城镇化发展与生态环境保护的耦合关系提供数据支撑。

2000-2015年城镇化过程中闽三角城市群高环境价值区域内的城镇用地在迅速增加, 自然用地与农业用地损失总面积达 1.79×10^4 hm², 自然资本总损失量达 1.19×10^{22} seJ。张虹等^[42]和龚仁华等^[43]的研究发现, 2000-2005年福建省能值货币比率在逐渐下降, 2008年下降到 2.00×10^{12} seJ/\$。而福建省近年来社会经济发展呈上升趋势, 由此推断2015年福建省能值货币比率小于 2.00×10^{12} seJ/\$, 损失的自然资本的货币价值超过 6.30×10^9 元。由此表明, 闽三角城市群城镇化以向外扩张为主, 蔓延趋势极其显著, 而城镇化发展与生态环境保护的协调度较弱, 城镇化对自然资本的破坏较为严重, 引发的生态系统紊乱与生态环境滞后效应较为严重。闽三角城市群必须全面贯彻城镇化与生态环境协调发展, 适度引导和控制区域城市空间扩张速度和规模, 坚持城市内部土地利用集约化; 严格控制生态红线, 保护高环境价值的生态空间, 保障闽三角城市群生态安全; 大力推进生态城市群建设, 基于资源环境条件及城市群生态安全需求, 走以特色生态城镇为引领的集中式生态城镇化道路。

4 结论

在全球城镇化进程不断加快的背景下,高强度的城镇开发日益影响着区域生态环境,严重威胁区域生态安全。本研究以城镇化进程迅速、生态环境问题复杂的典型区域——闽三角城市群为例,运用能值分析方法和GIS技术分析了2000-2015年闽三角城市群可更新资源与NPP的演变特征,以及城镇化对闽三角城市群区域的自然资本破坏和生态环境效应,研究发现:

(1) 受气候变化影响,闽三角城市群可更新资源能值呈现先减少后增加的趋势,内陆区域相较于沿海减少趋势明显;由于潜在的地热能源不断被发掘,2010-2015年九龙江流域及周边区域可更新资源能值增加趋势明显。

(2) 在生态系统能值分析中, R 与NPP分别代表一种投入与产出关系,两者具有较强的线性关系。闽三角城市群NPP总体呈现先减少后增加的趋势,与可更新资源能值变化趋势一致,两者同样存在良好的线性耦合关系。

(3) 可更新资源开发利用逐渐成为区域经济发展战略的有力支撑,日益强化的可更新能源开发导致闽三角城市群高环境价值区域内的城镇用地面积不断增加,且增加幅度大于其他环境价值区域的城镇用地面积。

(4) 快速城镇化过程中,不合理的城市空间扩张导致闽三角城市群自然用地与农业用地损失总面积为 $1.79 \times 10^4 \text{ hm}^2$,关键的自然资本(生物量与有机碳)总损失量为 $1.19 \times 10^{22} \text{ seJ}$,损失的自然资本货币价值超过 6.30×10^9 元。

基于上述研究发现,建议闽三角城市群区域适度引导和控制区域城市空间扩张速度和规模,坚持城市内部土地利用集约化;严格控制开发区项目建设对耕地农田的占用规模;严格控制生态红线,保护高环境价值的生态空间,保障闽三角城市群生态安全。

参考文献(References):

- [1] 方创琳,周成虎,顾朝林,等.特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径.地理学报,2016,71(4): 531-550. [FANG C L, ZHOU C H, GU C L, et al. Theoretical analysis of interactive coupled effects between urbanization and eco-environment in mega-urban agglomerations. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(4): 531-550.]
- [2] FANG C L, BAO C, QIAO B, et al. The Process of Urbanization and Ecological Environment Effect. Beijing: Science Press, 2008: 57-66.
- [3] FRENKEL A, ASHKENAZI M. Measuring urban sprawl: How can we deal with it?. Environment & Planning B Planning & Design, 2008, 35(1): 56-79.
- [4] ORGANIZATION W H. The hospital in rural and urban districts. Report of a WHO study group on the functions of hospitals at the first referral level. World Health Organization technical report series, 1992: 38-46.
- [5] GARSCHAGEN M, ROMERO-LANKAO P. Exploring the relationships between urbanization trends and climate change vulnerability. Climatic Change, 2015, 133(1): 37-52.
- [6] MELO P C, GRAHAM D J, NOLAND R B. A meta-analysis of estimates of urban agglomeration economies. Regional Science & Urban Economics, 2009, 39(3): 332-342.
- [7] KUMAR A, PANDEY A C, HODA N, et al. Evaluating the long-term urban expansion of ranchi urban agglomeration, India using geospatial technology. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2011, 39(2): 213-224.
- [8] FANG C L, BAO C, HUANG J C. Management implications to water resources constraint force on socio-economic system in rapid urbanization: A case study of the Hexi Corridor, NW China. Water Resources Management, 2007, 21(9): 1613-1633.

- [9] BRADLEY C A, ALTIZER S. Urbanization and the ecology of wildlife diseases. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, 22(2): 95-102.
- [10] COLES J F, MCMAHON G, BELL A H, et al. Effects of urban development on stream ecosystems in nine metropolitan study areas across the United States. Center for Integrated Data Analytics Wisconsin Science Center, 2012: 46-49.
- [11] MARSHALL, E P, SHORTLE, J S. Urban development impacts on ecosystems. Chapter 7. Land use problems and conflicts: Causes, consequences and solutions. Routledge Publishing (Taylor & Francis Group), New York, 2005: 61-72.
- [12] ZHANG H, UWASU M, HARA K, et al. Sustainable urban development and land use change: A case study of the Yangtze River Delta in China. *Sustainability*, 2011, 3(7): 1074-1089.
- [13] EIGENBROD F, BELL V A, DAVIES H N, et al. The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services. *Proceedings Biological Sciences*, 2011, 278(1722): 3201-3208.
- [14] 窦睿音, 刘学敏, 张昱. 基于能值分析的陕西省榆林市绿色 GDP 动态研究. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 994-1003. [DOU R Y, LIU X M, ZHANG Y. Study on the green GDP of chinese resource based cities: A case study of Yulin city in Shaanxi province. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6): 994-1003.]
- [15] BROWN M T, CAMPBELL D E, VILBISS C D, et al. The geobiosphere emergy baseline: A synthesis. *Ecological Modelling*, 2016, 339: 92-95.
- [16] MELLINO S, RIPA M, ZUCARO A, et al. An emergy-GIS approach to the evaluation of renewable resource flows: A case study of Campania Region, Italy. *Ecological Modelling*, 2014, 271(3): 103-112.
- [17] BROWN M T, ULGIATI S. Updated evaluation of exergy and emergy driving the geobiosphere: A review and refinement of the emergy baseline. *Ecological Modelling*, 2010, 221(20): 2501-2508.
- [18] 汪集颢, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版). *地震地质*, 1990, 12(4): 351-366. [WANG J Y, HUANG S P. Compilation of heat flow data in the China continental area (The 2nd edition). *Seismology and Geology*, 1990, 12(4): 351-366.]
- [19] 胡圣标, 何丽娟, 汪集颢. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版). *地球物理学报*, 2001, 44(5): 611-626. [HU S B, HE L J, WANG J Y. Compilation of heat flow data in the China continental area (The 3rd edition). *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(5): 611-626.]
- [20] 姜光政, 高棚, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版). *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2892-2910. [JIANG G Z, GAO B, RAO S, et al. Compilation of heat flow data in the China continental area (The 4th edition). *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2892-2910.]
- [21] ODUM H T. *Environment, Power, and Society for the Twenty-First Century: The Hierarchy of Energy*. Columbia University Press, 2007: 12-14.
- [22] CAMPBELL D E. Emergy analysis of human carrying capacity and regional sustainability: An example using the state of maine. *Environmental Monitoring & Assessment*, 1998, 51(1): 531-569.
- [23] 杨志英. 福建潮汐能资源开发利用研究. *水利科技*, 2002, (4): 1-3. [YANG Z Y. Study on development and utilization of tidal energy resources in Fujian province. *Water Conservancy Technology*, 2002, (4): 1-3.]
- [24] 国家海洋信息中心. 潮汐表 2, 2007. 济南: 山东省地图出版社, 2006: 43-46. [National Oceanographic Information Center. Tide Table 2 in 2007. Jinan: Shandong Province Map Press, 2006: 43-46.]
- [25] 国家海洋信息中心. 2011 潮汐表. 海洋出版社, 2010: 58-60. [National Oceanographic Information Center. Tide table in 2011. Ocean Press, 2010: 58-60.]
- [26] 佚名. 2016 潮汐表. 第 3 册, 台湾海峡至北部湾. 北京: 海洋出版社, 2015: 23-25. [YI M. Tide Table in 2016. Volume 3, Taiwan Strait to North Bay. Beijing: China Ocean Press, 2015: 23-25.]
- [27] NEMANI R R, KEELING C D, HASHIMOTO H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [28] ALLRED B W, SMITH W K, TWIDWELL D, et al. Sustainability. Ecosystem services lost to oil and gas in North America. *Science*, 2015, 348(6233): 401-402.
- [29] COSTANZA R, FISHER B, MULDER K, et al. Biodiversity and ecosystem services: A multi-scale empirical study of the relationship between species richness and net primary production. *Ecological Economics*, 2007, 61(2): 478-491.
- [30] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424. [ZHU W Q,

- PAN Y Z, ZHANG J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413-424.]
- [31] HATT B E, FLETCHER T D, WALSH C J, et al. The influence of urban density and drainage infrastructure on the concentrations and loads of pollutants in Small Streams. *Environmental Management*, 2004, 34(1): 112-124.
- [32] MELLINO S, ULGIATI S. Mapping the evolution of impervious surfaces to investigate landscape metabolism: An emergy-GIS monitoring application. *Ecological Informatics*, 2015, 26: 50-59.
- [33] 方恺, 吴次芳, 董亮. 城市化进程中的土地自然资本利用动态分析. *自然资源学报*, 2018, 33(1): 1-13. [FANG K, WU C F, DONG L. The use of land natural capital in the context of urbanization. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 1-13.]
- [34] 胡晓辉, 黄民生. 基于能值分析的福州与厦门城市生态系统比较研究. *生态科学*, 2007, 26(6): 553-558. [HU X H, HUANG M S. A comparative study of Fuzhou and Xiamen urban ecosystem based on emergy analysis. *Ecological Science*, 2007, 26(6): 553-558.
- [35] IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories, agriculture, forestry and other land use, 4. 4; 2006. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. (Accessed on 06 March 2016).
- [36] JIANG M M, CHEN B, ZHOU J B, et al. Emergy account for biomass resource exploitation by agriculture in China. *Emergy Policy*, 2007, 35(9): 4704-4719.
- [37] MOHAN M, PATHAN S K, NARENDRA REDDY K, et al. Dynamics of urbanization and its impact on land-use/ land-cover: A case study of Mega city Delhi. *Journal of Environmental Protection*, 2011, 2(9): 1274-1283.
- [38] CLEMENT M T, CHI G, HO H C. Urbanization and land-use change: A human ecology of deforestation across the United States, 2001-2006. *Sociological Inquiry*, 2015, 85(4): 628-653.
- [39] 余兆武, 郭青海, 曾瑜哲, 等. 城镇化过程土地利用变化及效应研究进展. *生态科学*, 2015, 34(6): 193-200. [YU Z W, GUO Q H, ZENG Y X, et al. Research progress on urban land use/cover change and its eco-environmental effects in urbanization process. *Ecological Science*, 2015, 34(6): 193-200.]
- [40] 王士君, 王雪微, 范大龙, 等. 吉林中部城市群域城镇化的生态效应评估. *人文地理*, 2017, 32(1): 90-98. [WANG S J, WANG X W, FAN D L, et al. Ecological effects assessment of urbanization in Jilin central urban agglomeration area. *Human Geography*, 2017, 32(1): 90-98.]
- [41] MACDONALD K, RUDEL T K. Sprawl and forest cover: What is the relationship?. *Applied Geography*, 2005, 25(1): 67-79.
- [42] 张虹, 黄民生, 胡晓辉. 基于能值分析的福建省绿色 GDP 核算. *地理学报*, 2010, 65(11): 1421-1428. [ZHANG H, HUANG M S, HU X H. Green GDP calculation of Fujian province based on energy analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(11): 1421-1428.]
- [43] 龚任华. 能值分析方法视角下的福建省绿色 GDP 核算的研究. 福州: 福建农林大学, 2011. [GONG R H. Green GDP Accounting research in Fujian province under angle of view with the emergy analysis method. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.]

Evaluation on natural capital loss in Southern Fujian Urban Agglomeration

FAN Bing-xiong¹, SHUI Wei^{1,2}, YANG Hai-feng², WANG Ya-nan¹, DU Yong²,
QI Xin-hua³, ZHANG Xiao-hong⁴, JIAN Xiao-mei¹, GUO Ping-ping¹

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. Key Lab of Spatial Data Mining & Information Sharing, Ministry of Education of China, Fuzhou 350116, China; 3. College of Geographic Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350100, China; 4. College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: In the process of rapid urbanization, urban agglomeration development was promoting regional economic competition and cooperation, but also causing the intensification of contradictions between human and land, decline of ecosystem services level to a certain extent. In order to quantify the impact of urbanization on natural capital and reveal the influence mechanism of ecosystem service in human resource consumption process. In this study, Southern Fujian Urban Agglomeration (SFUA) is taken as an example, which is the typical rapidly urbanized area, emergy analysis method and GIS technology are used to analyze the spatial and temporal evolutions of renewable resources in the SFUA from 2000 to 2015, the evolution of eco-environment value and natural capital loss in the process of urbanization and land conversion. The results show that: (1) The renewable resources of SFUA presented a fluctuant decreasing trend in time, and gradually increasing trend in space; (2) The area proportion of urban land presented a significant increase trend in high environmental quality level, increased from 0 to 10.63%, the loss of regional eco-environment value caused by human activities was gradually rising; (3) Due to urbanization in the process of urban expansion, part of the natural land and agricultural land was converted to urban land, the total loss of natural capital caused by the conversion was $1.27\text{E}+22$ seJ, and the currency value was more than 6.3 billion yuan. This study can help improve the research of eco-environmental effects due to urbanization, and provide decision-making reference for the urban agglomeration or regional eco-environment management and restoration.

Keywords: emergy analysis; GIS; urbanization; Southern Fujian Urban Agglomeration; natural capital