

DOI: 10.5846/stxb201712042185

王亚楠, 税伟, 杨海峰, 祁新华, 范冰冰, 简小枚, 陈毅萍, 杜勇. 21 世纪以来闽三角城市群人类景观开发强度的时空演变——基于能值-GIS 方法. 生态学报, 2019, 39(5): - .

Wang Y N, Shui W, Yang H F, Qi X H, Fan B X, Jian X M, Chen Y P, Du Y. Temporal and spatial evolution of human landscape development in the Fujian delta urban agglomeration in the 21<sup>st</sup> Century: Based on emergy-GIS approach. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): - .

# 21 世纪以来闽三角城市群人类景观开发强度的时空演变

——基于能值-GIS 方法

王亚楠<sup>1</sup>, 税伟<sup>1,2,\*</sup>, 杨海峰<sup>2</sup>, 祁新华<sup>3</sup>, 范冰冰<sup>1</sup>, 简小枚<sup>1</sup>, 陈毅萍<sup>1</sup>, 杜勇<sup>2</sup>

1 福州大学环境与资源学院, 福州 350116

2 福建省空间信息工程研究中心, 福州 350116

3 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

**摘要:**在快速的城市化进程中,城市群作为城市发展到成熟阶段的高级空间组织形式,其在推进城市群区域社会经济一体化的同时,也在一定程度上加剧了城市群的人地关系矛盾和景观开发强度。为量化城市群的人类景观开发强度,揭示自然环境对人类资源消耗过程的压力响应机制,选取闽三角城市群在 2000、2005 和 2013 年的夜间灯光数据(DMSP/OLS)作为刻画人类经济活动范围的基础数据,通过能值分析理论,耦合可更新能源(太阳能、风能、地热能和降雨化学能等)与基于统计数据的不可更新能源进行能值核算,并进一步描述人类景观开发强度(Landscape development intensity, LDI)的时空演变特征,基于人类活动对自然生态系统的干扰程度划分为 5 级进行空间展示与分析。结果表明:(1)在时间尺度上,闽三角城市群的年可更新能值密度均值在 2000、2005 和 2013 年,分别为  $9.42 \times 10^{16}$  sej/hm<sup>2</sup>、 $7.25 \times 10^{16}$  sej/hm<sup>2</sup> 和  $7.88 \times 10^{16}$  sej/hm<sup>2</sup>,呈现出先减后增的趋势,在空间尺度上,闽三角城市群可更新资源由环海湾地带向内陆地区呈环形逐层增加,其中在 2000 年表现尤为明显;(2)在不可更新资源的利用上,闽三角城市群的本地不可更新能源能值投入在 2000、2005 和 2013 年,分别为  $4.64 \times 10^{24}$  sej、 $4.63 \times 10^{24}$  sej 和  $4.66 \times 10^{24}$  sej,只出现轻微浮动,而外部输入能源的能值投入则在 2000、2005 和 2013 年,分别为  $1.41 \times 10^{24}$  sej、 $3.18 \times 10^{24}$  sej 和  $5.71 \times 10^{24}$  sej 呈现逐年上升趋势,且其中对原煤的需求表现最高,占比高达 90%;(3)LDI 在空间分布上,自内陆至沿海干扰等级逐渐上升,其中,强度干扰与剧烈干扰主要覆盖厦门市、龙海市、晋江市和石狮市;在时间分布上,呈现出强度干扰和剧烈干扰逐渐增大的趋势。研究有助于政府对不同干扰等级区域的城乡建设与规划管理提供决策依据,为实现城市群可持续发展提供数据参考。

**关键词:**景观开发强度;能值;夜间灯光数据;城市群

## Temporal and spatial evolution of human landscape development in the Fujian delta urban agglomeration in the 21<sup>st</sup> Century: Based on emergy-GIS approach

WANG Ya' nan<sup>1</sup>, SHUI Wei<sup>1,2,\*</sup>, YANG Haifeng<sup>2</sup>, QI Xinhua<sup>3</sup>, FAN Bingxiong<sup>1</sup>, JIAN Xiaomei<sup>1</sup>, CHEN Yiping<sup>1</sup>, DU Yong<sup>2</sup>

1 College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

2 Fujian Spatial Information Research Center, Fuzhou 350116, China

3 College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502905)

收稿日期:2017-12-04; 网络出版日期:2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shuiweiman@163.com; shuiwei@fzu.edu.cn

**Abstract:** In the rapid urbanization processes, urban agglomerations as a senior spatial organization of urban development at a mature stage. Urban agglomerations promote regional societies and economic integration, but can result in conflicts between the natural environment and human activities, particularly because of landscape development intensity. In order to quantify the collisions and reveal the pressure response mechanisms between the natural environment and human resource utilization, this study first opted the Fujian delta urban agglomeration night light data (DMSP/OLS) from 2000, 2005, and 2013 as the fundamental data for an analysis of the realm of human economic activities. And emergy analysis theory was used to account for renewable emergy (solar, wind, geothermal, rainfall chemical emergy, etc.), and non-renewable emergy which were based on statistics in the same year. Integrate renewable and non-renewable emergy to further describe the human landscape development intensity (LDI) at spatio-temporal scales. Accordance with the otherness of human activities intensity with the natural ecological system, the LDI values were divided into 5 levels. The results showed: (1) Over the time scale, the mean values for renewable emergy density in 2000, 2005, and 2013 were  $9.42 \times 10^{16}$  sej/hm<sup>2</sup>,  $7.25 \times 10^{16}$  sej/hm<sup>2</sup> and  $7.88 \times 10^{16}$  sej/hm<sup>2</sup>, respectively, represented a decreasing trend before increasing again. On the spatial scale, renewable resources demonstrated a increase from the gulf zone to the inland area of annularity in the Fujian delta urban agglomeration, which was particularly evident in 2000; (2) As for the use of non-renewable resources, the investments of local non-renewable emergy value were  $4.64 \times 10^{24}$  sej,  $4.63 \times 10^{24}$  sej, and  $4.66 \times 10^{24}$  sej, respectively in 2000, 2005, and 2013 which was change lightly, while the inflows from the outside emergy were  $1.41 \times 10^{24}$  sej,  $3.18 \times 10^{24}$  sej and  $5.71 \times 10^{24}$  sej in 2000, 2005 and 2013, showing a growing tendency, among which the demand for raw coal was the highest, accounting for 90%; (3) In the spatial distribution of LDI, from the inland area to the ring bay area, LDI levels increased, and disturbances with severe interference were mainly observed in Xiamen, Longhai, Jinjiang, and Shishi. In terms of the temporal distribution, the scope of strength intensity and severe interference gradually increased. This research findings of different disturbance levels will help the government provide of a decision-making foundation for urban construction and planning. Meanwhile, provide a datum reference for the sustainable development of urban agglomerations.

**Key Words:** landscape development intensity; emergy; night light data; urban agglomeration

21 世纪以来,中国城市化进程不断加快,由大中型城市带动中小城市,按自身区位条件和发展契机,寻找各自发展定位,在经济发展中协同合作最终形成城市群区域。城市群区域作为城市发展到成熟阶段的高级空间组织形式,是当下中国经济最具有活力的地区,同样也是各类生态环境问题高度集中敏感区域<sup>[1]</sup>,主要表现为植被景观破碎化波动<sup>[2-3]</sup>,景观异质性较低<sup>[4-5]</sup>和生境生物多样性较低<sup>[6-7]</sup>等生态问题。

描述城市扩张过程中的人类活动与自然景观间的相互作用程度,揭示人类活动对自然环境资源消耗程度,定量刻画自然生态资源的损耗状态,可为区域城乡规划与自然资源可持续发展提供数据参考<sup>[8-9]</sup>。为实现这一目标,前人或采用景观格局指数描述景观生态风险<sup>[10-11]</sup>、景观的破碎程度<sup>[12-13]</sup>,或采用生态安全评价指标<sup>[14-15]</sup>、生态健康评价指标<sup>[16-18]</sup>等评价指标描述城市群生态环境状态,但上述方法均未能体现出城市群生态环境的空间分布特征,为克服上述研究指标在数据源单一,空间展示不充分等方面的短板,本文引入景观开发强度(Landscape development intensity, LDI)指标<sup>[19]</sup>,该指标基于压力-状态-响应框架,最初通过核算不同土地利用类型的能值差异获取人类对于环境的干扰程度的评价依据,将结果标准化后,获得景观开发强度参照表。LDI 指标多数研究集中于探讨湿地范围内,人类活动与湿地状况、湿地生态系统健康程度间的相关性,如张森<sup>[20]</sup>利用该指标对黄旗海湿地生态系统健康受人类干扰程度进行评估, Bonzongo<sup>[21]</sup>运用该指标探讨湿地边界,不同缓冲区距离范围内的各土地利用类型对河流沉积物 Hg 元素的富集作用差异等。本文在上述研究的基础上,基于 LDI 指数的核心思想,引入能值-GIS 方法,尝试将该指标推广运用于城市群区域,尝试探讨在城市群进程中人类活动对自然景观的影响程度。

自 21 世纪以来,中国经济迅猛发展,城市建设用地面积急剧扩展,年平均 GDP 增长率为 39.27%、城市建

设用地面积平均增长率为 8.81%,而闽三角城市群作为中国东南部城市发展的代表,其年平均 GDP 增长率为 39.44%,城市建设用地面积平均增长率为 23.58%,两者呈现出显著性的相关关系( $\alpha=0.05$ )。因此,本研究以闽三角城市群为研究对象,利用夜间灯光数据(DMSP/OLS)刻画人类经济活动的范围,通过能值核算(Emergy accounting)方法<sup>[22]</sup>,将输入该地区的可更新能源(Renewable energy)供给和城市化进程对于不可更新能源(Non-renewable energy)的需求进行组合,通过 LDI 指标描述 2000、2005 和 2013 年研究区内人类活动对于当地自然环境的干扰程度,系统分析该时段内人类活动干扰下 LDI 时空格局演变情况,揭示城市群城市化过程对景观生态系统的干扰程度,为城市群区域的规划建设与区域可持续发展提供参考依据。

## 1 研究区域、数据来源与方法

### 1.1 区域概况

闽三角是闽南金三角地区的简称,指中国福建省(简称“闽”)的厦门(经济特区)、泉州和漳州三个地级市及所辖县区(图 1),处于 116°53'21"—119°01'38"E,23°33'20"—25°56'45"N,位于中国东南沿海,与台湾隔海相望<sup>[23]</sup>。土地利用面积约为 25314 km<sup>2</sup>,占福建省土地总面积的 20%。研究区内常住人口约 1500 万人,经济生产量约占福建省的 40%,是中国经济改革开放后经济较发达的地区之一。

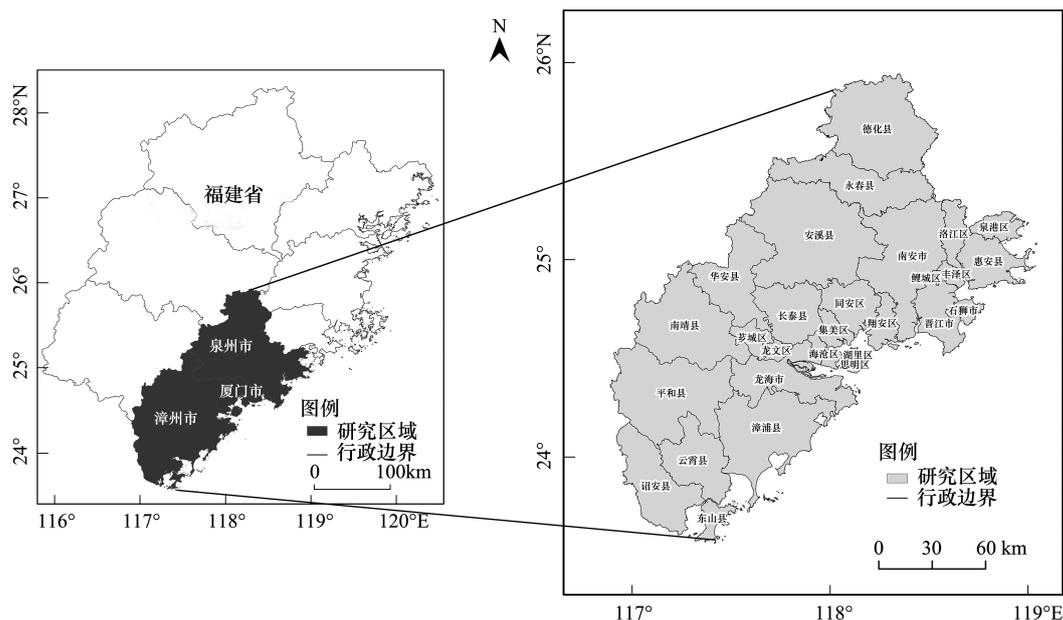


图 1 闽三角城市群区位

Fig.1 The location of Fujian delta urban agglomeration

### 1.2 数据来源及预处理

通过文献阅读及资料获取,本研究主要选取 2000、2005 和 2013 年的 DMSP/OLS 夜间灯光数据(图 2),相对应年份的社会经济统计数据、气象站点数据以及全国 1:400 万县级行政图。其中,DMSP/OLS 数据来源于美国国家地球物理数据中心(<http://www.ngdc.noaa.gov>),是获取城市空间动态信息、进行人类活动监测的有效数据源<sup>[24]</sup>。目前,国内外关于 DMSP/OLS 数据的研究主要集中在城市面积提取<sup>[25]</sup>、区域城市化时空变化分析<sup>[26-27]</sup>、评估城镇人口的动态变化<sup>[28]</sup>、社会经济背景分析<sup>[29]</sup>、以及区域城市化对自然资源环境影响<sup>[30-31]</sup>等方面,这些研究都展现出夜间灯光数据具有广泛应用性与数据处理友好性等特征。

另外,闽三角城市群的社会经济统计数据中的输入能源数据来自研究区的《统计年鉴》中“规模以上工业企业能源购进量”的相加值,该数据相较于闽三角城市群区域的实际输入能源量偏小,主要未考虑 3 个地级市之间能量流动情况。对于本地不可更新资源统计数据,主要来源于《中国统计年鉴》和《中国环境统计年

鉴》中的“各地区有色金属、非金属矿产基础储量”、“各地区主要能源黑色金属矿产基础储量”与“各地区自然资源储量”等条目,因该数据主要描述区域资源储备量,故较于经济活动实际所需的能量量偏大。最后,相关气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。

在 ENVI 5.3 和 ArcGIS 10.2 的支持下,将遥感数据和矢量数据重投影为 UTM/WGS84,利用闽三角城市群各地级市边界,与夜间灯光数据进行叠加裁剪,获取研究区各年份 DMSP/OLS 夜间灯光数据(图 2)。从气象站点数据中获得温度、风速、降雨量等数据信息,通过空间插值的方法获取闽三角城市群的气象数据分布地图。

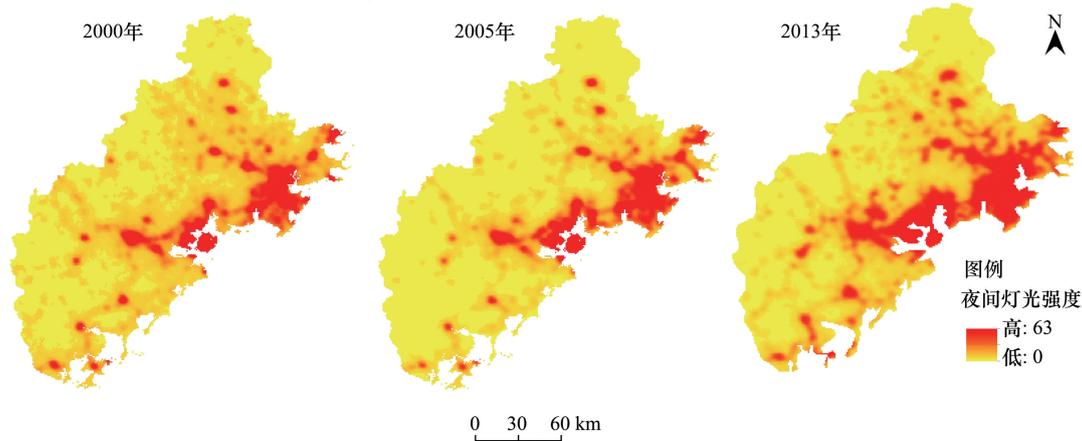


图 2 闽三角城市群 2000—2013 年夜间灯光影像

Fig.2 The night light image of Fujian delta urban agglomeration in 2000—2013

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 可更新能源能值核算

根据前人对于可更新能源的研究,选取太阳辐射能、风能、降雨化学能、降雨位势能和地热能作为可更新能源的核算对象<sup>[32]</sup>(表 1)。全文参照全球能值基准线将各输入能源转化为统一的能值单位—太阳能能值(sej/a)<sup>[33]</sup>。

#### 1.3.2 景观开发强度评估

本研究采用 Brown<sup>[19]</sup>提出的景观开发强度(LDI)指数,对城市群城市化进程中因人类活动对能源的使用所迫使自然景观生态环境资源承受的人类干扰强度进行量化。LDI 指标主要通过人类活动对自然生态系统的能量输入情况刻画该行为对自然环境的干扰,主要表现为输入能量越大,干扰程度越强,自然生态系统的自我修复能力更低,人地关系更加紧张。本研究首先利用夜间灯光数据和统计结果的 N、F 值,在像元水平上计算不可更新资源能值密度,其公式为<sup>[34]</sup>:

$$\text{NonREmD}_i = \frac{(N + F) \times \text{DN}_i}{\sum_{i=1}^n \text{DN}_i} \quad (1)$$

式中, $n$  代表研究区内夜间灯光数据的像元个数之和; $\text{DN}_i$  代表第  $i$  个像元的夜间灯光亮度值; $N$  和  $F$  分别表示闽三角城市群本地和外部输入的不可更新能源; $\text{NonREmD}_i$  (sej/hm<sup>2</sup>) 表示第  $i$  个像元的不可更新能源能值密度。

在夜间灯光数据的基础上,将基于图形可视化的可更新能值和基于统计数据的不可更新能值,进行空间化展示,进一步计算得到 LDI 系数,其表达式为:

$$\text{LDI}_i = 10 \times \log_{10} \left( \frac{\text{NonREmD}_i - \text{REmD}_i}{\text{REmD}_i} \right) \quad (2)$$

式中,  $REmD_i$  ( $sej/hm^2$ ) 表示第  $i$  个像元的可更新能源能值;  $LDI_i$  表示第  $i$  个像元的景观开发强度, 取值范围为  $LDI_i \geq 0$ 。当  $LDI_i = 0$  时, 表示该景观单元未受到人类活动干扰。

表 1 可更新资源能值计算公式与相关参数说明

可更新能流 Renewable flow	能量方程式 Energy equation	参数说明 Parameter declaration	数据来源 Data sources
太阳辐射能 Solar radiation energy	$E_S = T_S \times S \times A \times (1 - \alpha) \times 0.93 \times T_R$	$E_s$ 为太阳辐射能量; $T_s$ 为光照时间 (s); $S$ 为太阳辐射度 ( $1360.8 W/m^2$ ); $A$ 为面积 ( $m^2$ ); $\alpha$ 为太阳辐射能值转换率 ( $sej/J$ ); $T_R$ 为太阳反照率;	①光照时间: 气象站点数据插值得到; ②太阳反照率: 土地利用数据;
地热能 Geothermal heat flow	$E_{geo} = A \times \left(1 - \frac{T_c}{T_s}\right) \times En_{geo}$	$E_{geo}$ 为地热能能值; $A$ 为面积 ( $m^2$ ); $En_{geo}$ 为热流单位面积 ( $J/m^2$ ); $T_c$ 为年平均地表温度 ( $^{\circ}C$ ); $T_s$ 为地表 1000m 以下温度 ( $^{\circ}C$ );	中国大陆地区大地热流数据汇编 (第二、三、四版)
风能 Wind energy	$E_w = A \times \rho \times C_D \times v^3 \times t \times T_R$	$E_w$ 为风能能值; $\rho$ 为空气密度 ( $1.3 kg/m^3$ ); $C_D$ 为阻力系数; $v$ 为风速; $t$ 为时间; $T_R$ 为风能能值转化率 ( $157.8 sej/J$ );	① $C_D$ 基于不同地表类型分别取值为 0.01、0.02 和 0.03; ② 风速: 气象站点插值得到;
降雨化学能 Rainfall chemical energy	$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2/L^2}}$ $E_{rc} = A \times \beta_{water} \times G \times ET \times T_R$	$ET$ 为土壤水分蒸发量 (m); $P$ 为降水量 (mm); $L$ 为 $300 + 25T^2 + 0.05T^3$ , $T$ 为年平均温度; $E_{rc}$ 为降雨化学能; $A$ 为面积 ( $m^2$ ); $\rho$ 为水密度 ( $1000 kg/m^3$ ); $G$ 为吉布斯自由能值; $T_R$ 为降水化学能能值转换率 ( $6360 sej/J$ );	① 降雨量: 气象站点插值得到; ② 气温: 气象站点插值得到;
降雨位势能 Rainfall geo- potential energy	$E_{rg} = A \times \beta_{water} \times R \times g \times h \times T_R$	$E_{rg}$ 为降雨位势能; $A$ 为面积 ( $m^2$ ); $\rho$ 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 ( $10909 sej/J$ );	① 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

## 2 结果与分析

### 2.1 可更新资源消耗时空变化

在区域资源耗损中, 可更新能源的转化利用程度与该区域的可持续发展能力紧密相关。为明确闽三角城市群区域内自然生态环境资源空间分布情况, 故对闽三角城市群城市化进程中主要的输入能流进行能值核算。

以 2013 年的各类可更新能值密度图为例 (图 3)。结果分析如下: a 图为闽三角城市群地热能能值密度分布, 均值为  $1.66 \times 10^{14} sej/hm^2$ , 在漳州市出现高值区, 依次向周围递减; b 图为闽三角城市群风能能值密度分布, 均值为  $0.89 \times 10^{14} sej/hm^2$ , 因山体对风力的消减作用, 整体表现为从沿海至内陆区域逐渐递减; c 图为闽三角城市群降雨化学能能值密度分布, 均值为  $2.04 \times 10^{14} sej/hm^2$ , 呈现自海湾至内陆依次增高的空间分布特征;

d 图为闽三角城市群降雨位势能值密度分布,均值为  $0.22 \times 10^{14}$  sej/hm<sup>2</sup>,该能值与降雨量、地形等因素相关,呈现出自东南沿海区域至内陆依次增大;e 图为闽三角城市群太阳能能值分布,均值为  $2.02 \times 10^{14}$  sej/hm<sup>2</sup>,该能值与太阳辐射强度相关,高值区出现在低纬度区域。在各单项可更新能值中,所占可更新能值总值比重由强至弱依次为降雨化学能能值、太阳能能值、地热能能值、风能能值和降雨位势能能值。

将各类可更新能值叠加后(图 4),在时间尺度上,可更新能值密度均值自 2000、2005 和 2013 年,分别为  $9.42 \times 10^{16}$  sej/hm<sup>2</sup>、 $7.25 \times 10^{16}$  sej/hm<sup>2</sup> 和  $7.88 \times 10^{16}$  sej/hm<sup>2</sup>,表现为先减后增。这一变化趋势可以从一些主要的地形、气象、气候因子的变化中得到解释,如除年均降雨量在 2000—2013 年存在逐渐减少的趋势外,其它气候因子,如年均风速、年均光照时间和年均气温等,均呈现先减后增的趋势。在空间尺度上,闽三角城市群可更新资源由环海湾地带向内陆地区呈现环形逐层增加的趋势,在 2000 年表现尤为明显。

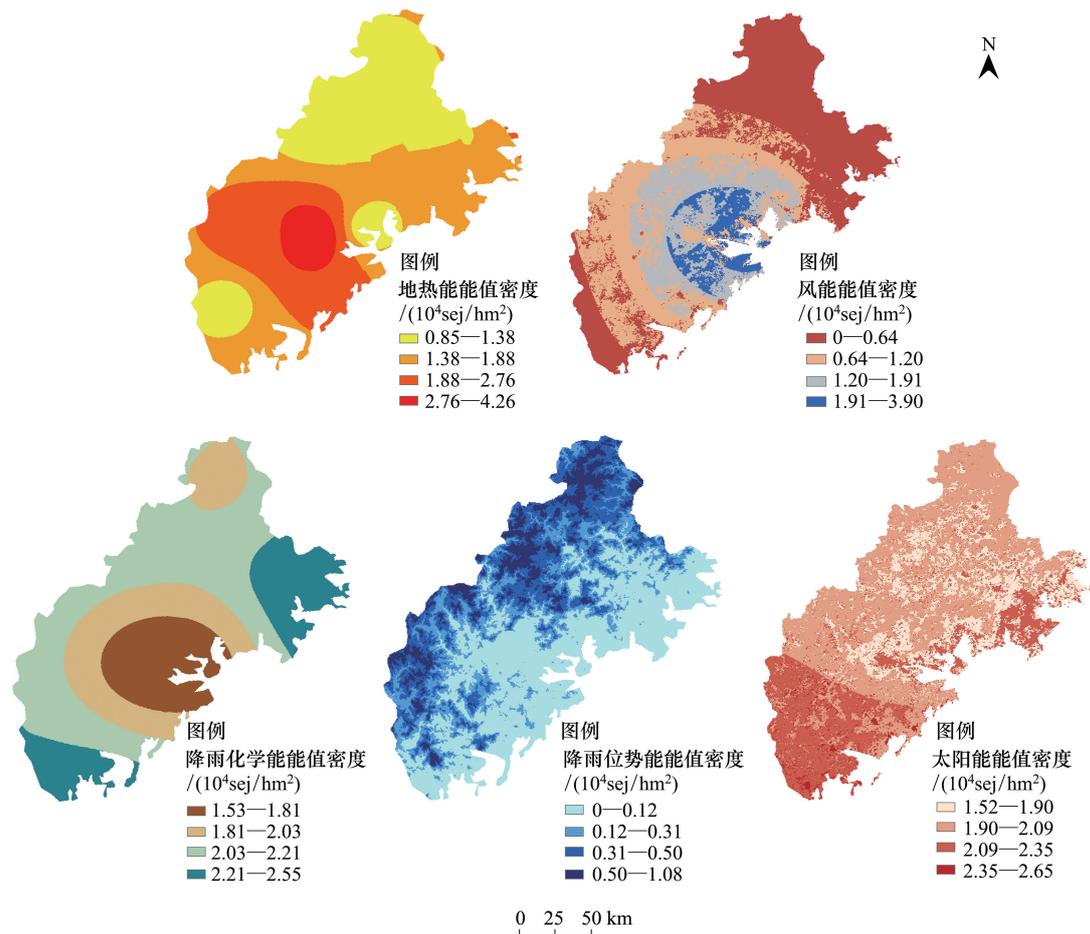


图 3 2013 年闽三角城市群可更新能源能值分布

Fig.3 The distribute of renewable emery of Fujian delta urban agglomeration in 2013

## 2.2 不可更新资源消耗时间变化

较之可更新能源的转化利用尚未普及,在推进城市化进程中对于不可更新能源需求表现更为突出。闽三角城市群内不可更新能源划分为当地不可更新能源(如地下水资源、煤矿和铁矿石等)与外部输入不可更新能源(如原煤、天然气和汽油等)两部分。通过对闽三角城市群不可更新能源能值投入的核算(表 2),可发现区域内输入的当地不可更新能源能值在 2000—2013 年间出现轻微浮动。其中,煤矿的输入在不可更新能值的输入总值中占比高达 90%,相比较于其它金属矿物储备与地下水储量等所占比重略重。

根据闽三角城市群外部输入能源的能值投入分布情况,观察 2000—2013 年间的投入总值呈逐年上升趋势

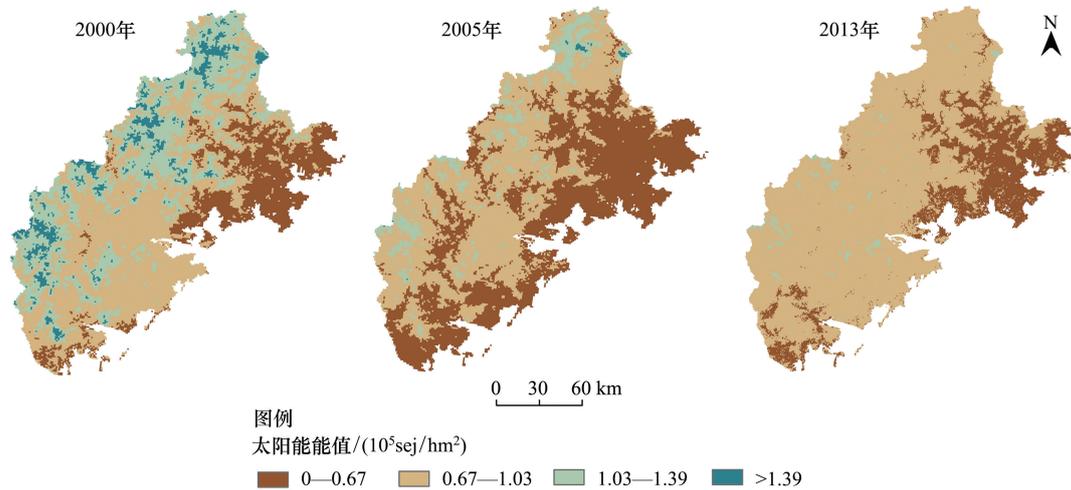


图 4 闽三角城市群可更新能值密度

Fig.4 The density of renewable emery of Fujian delta urban agglomeration

势,闽三角城市群城市化过程中对外部输入能源的需求不断增加。从各外部输入能源的子类中可发现,原煤输入量占闽三角城市群整体输入能值的 90%,表明原煤作为基础的战略能源,在化工与钢铁等行业中依旧扮演着重要角色。

表 2 闽三角城市群不可更新能值投入

Table 2 The non-renewable emery investment in Fujian delta urban agglomeration

项目 Item	单位 Unit	单位能值价值 Unit energy values /( sej/g, sej/J)	2000		2005		2013	
			总量 Summation	太阳能 Solar emery/sej	总量 Summation	太阳能 Solar emery/sej	总量 Summation	太阳能 Solar emery/sej
当地不可更新能值(N) Local non-renewable emery (N)								
地下水资源 Ground water resources	g	$8.99 \times 10^5$			$7.95 \times 10^{15}$	$7.15 \times 10^{21}$	$6.75 \times 10^{15}$	$6.07 \times 10^{21}$
煤矿 Coal mine	J	$1.06 \times 10^4$	$4.31 \times 10^{20}$	$4.57 \times 10^{24}$	$4.30 \times 10^{20}$	$4.56 \times 10^{24}$	$4.33 \times 10^{20}$	$4.59 \times 10^{24}$
铁矿石 Iron stone	g	$8.60 \times 10^8$	$7.70 \times 10^{13}$	$6.62 \times 10^{22}$	$7.40 \times 10^{13}$	$6.36 \times 10^{22}$	$6.48 \times 10^{13}$	$5.57 \times 10^{22}$
锰矿石 Manganese ore	g	$8.90 \times 10^8$			$2.25 \times 10^{11}$	$2.00 \times 10^{20}$	$2.70 \times 10^{11}$	$2.40 \times 10^{20}$
铜矿石 Copper ore	g	$1.80 \times 10^9$	$2.29 \times 10^{11}$	$4.12 \times 10^{20}$	$1.95 \times 10^{11}$	$3.51 \times 10^{20}$	$1.76 \times 10^{11}$	$3.17 \times 10^{20}$
铅矿石 Lead ore	g	$1.60 \times 10^{10}$			$3.98 \times 10^{10}$	$6.37 \times 10^{20}$	$6.81 \times 10^{10}$	$1.09 \times 10^{21}$
锌矿石 Zinc ore	g	$1.80 \times 10^9$			$8.96 \times 10^{10}$	$1.61 \times 10^{20}$	$1.61 \times 10^{11}$	$2.90 \times 10^{20}$
硫铁矿石 Sulphur iron ore	g	$8.60 \times 10^8$			$2.34 \times 10^{12}$	$2.01 \times 10^{21}$	$2.21 \times 10^{12}$	$1.90 \times 10^{21}$
总计 Sum				$4.64 \times 10^{24}$		$4.63 \times 10^{24}$		$4.66 \times 10^{24}$
外部输入能源(F) External inflow emery(F)								
原煤 Raw coal	J	$4.00 \times 10^4$	$3.50 \times 10^{19}$	$1.40 \times 10^{24}$	$7.90 \times 10^{19}$	$3.16 \times 10^{24}$	$1.42 \times 10^{20}$	$5.66 \times 10^{24}$
天然气 Natural gas	J	$1.78 \times 10^5$			$5.66 \times 10^{14}$	$1.01 \times 10^{20}$	$9.27 \times 10^{16}$	$1.65 \times 10^{22}$
汽油 Petrol	J	$1.87 \times 10^5$	$6.38 \times 10^{14}$	$1.19 \times 10^{20}$	$1.94 \times 10^{15}$	$3.63 \times 10^{20}$	$2.27 \times 10^{15}$	$4.25 \times 10^{20}$
柴油 Diesel	J	$1.81 \times 10^5$	$6.39 \times 10^{15}$	$1.16 \times 10^{21}$	$9.25 \times 10^{15}$	$1.67 \times 10^{21}$	$1.01 \times 10^{16}$	$1.82 \times 10^{21}$
燃料油 Fuel oil	J	$1.56 \times 10^5$	$1.05 \times 10^{16}$	$1.63 \times 10^{21}$	$1.18 \times 10^{16}$	$1.84 \times 10^{21}$	$2.96 \times 10^{16}$	$4.62 \times 10^{21}$
热力 Thermal	J	$2.03 \times 10^4$	$5.50 \times 10^{14}$	$1.13 \times 10^{19}$	$3.00 \times 10^{15}$	$6.09 \times 10^{19}$	$1.19 \times 10^{17}$	$3.94 \times 10^{20}$
电力 Electricity	J	$2.70 \times 10^5$	$2.30 \times 10^{16}$	$6.21 \times 10^{21}$	$6.12 \times 10^{16}$	$1.65 \times 10^{22}$	$1.45 \times 10^{17}$	$3.91 \times 10^{22}$
液化石油气 Liquefied petroleum gas	J	$1.70 \times 10^5$	$1.36 \times 10^{15}$	$2.31 \times 10^{20}$	$2.29 \times 10^{15}$	$3.90 \times 10^{20}$	$1.46 \times 10^{15}$	$2.49 \times 10^{20}$
总计 Sum				$1.41 \times 10^{24}$		$3.18 \times 10^{24}$		$5.71 \times 10^{24}$

2000 年地下水资源、锰矿石、铅矿石、锌矿石、硫铁矿石、输入天然气等数据缺失,不可更新数据参考福建省同年数据乘以比例(闽三角城市群占地面积与福建省占地面积之比),2000 年、2005 年数据来源于福建省该项数据乘以比例(同年闽三角城市群常住人口与福建省常住人口之比),2013 年输入能源数据来源于厦门、漳州和泉州市各地级市统计数据之和,数据详情参考附录

### 2.3 LDI 指数时空演变

闽三角城市群区域在 2000、2005 和 2013 年的城市化进程中,城市发展的可更新能源投入先减后增,不可更新能源投入(以外部输入能源为主)不断增多,其中,部分城市经济发展对自然生态环境表现出一定的负向影响。因而进一步通过 LDI 指数探讨人类活动对区域生态环境产生影响的时空特征。闽三角城市群的 LDI 指标空间分布图中的像元灰度值大小可反映区域城市化推进过程中人类活动干扰下的景观开发强度(LDI)(图 5),LDI 指数越大,人类干扰强度越强,可依此定量分析人类活动对自然景观生态资源的影响,阐释生态系统服务与功能的耗损情况。在本研究中将 LDI 值进行等级划分,划分标准参考 Mellino<sup>[34]</sup>的相关研究并在此基础上按照区域特点做出相应调整,分别对应无干扰、轻度干扰、中度干扰、强度干扰和剧烈干扰 5 个景观干扰强度等级(表 3)。

表 3 闽三角城市群 LDI 干扰等级划分

Table 3 Landscape development intensity (LDI) interference levels division of Fujian delta urban agglomeration

	LDI 值 Landscape development intensity values				
	0	1—31	31—35	35—39	39—47
干扰等级 Interference levels	无干扰	轻度干扰	中度干扰	强度干扰	剧烈干扰
描述 Description	人类活动对于自然生态环境无影响	人类活动对于自然生态环境呈现出适度干扰状态	人类活动对于自然生态环境产生系统自身可修复的不利影响	人类活动对于自然生态环境产生系统自身较难恢复的不利影响	人类活动对于自然生态环境产生自身不可修复的不利影响

将图形化的 LDI 影像,按照干扰等级进行展示(图 5),得到各干扰等级的面积及占比(表 4)。结果分析如下:(1)在空间尺度上,自内陆至沿海干扰等级逐渐上升,其中,强度干扰与剧烈干扰主要覆盖厦门市、龙海市、晋江市和石狮市;(2)在时间尺度上,2000—2013 年间,无干扰区呈现出缓慢降低的趋势,考虑一定程度上是地形因素对城市群扩展的限制作用,剧烈干扰与强度干扰呈现增加趋势;(3)在 2000—2005 年间,剧烈干扰与强度干扰主要由中度干扰与轻度干扰转换而来,在 2005—2013 年间,中度干扰面积的增加主要是由轻度干扰与无干扰转换而来,由此得出中度干扰与轻度干扰在干扰等级的演变中起到了关键的过渡作用,对于城市群区域内改善人地关系起到了起承转合作用。

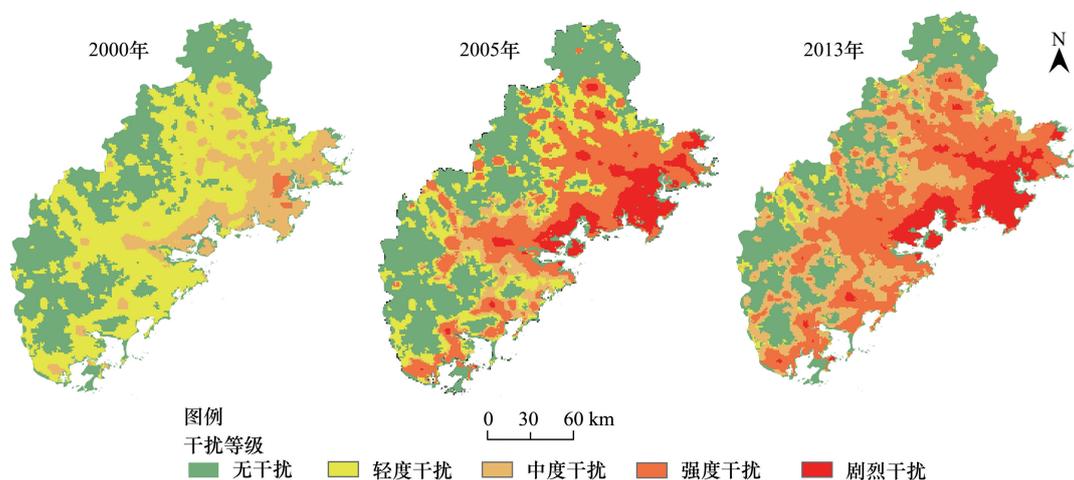


图 5 闽三角城市群 LDI 分布

Fig.5 The LDI distribution of Fujian delta urban agglomeration

### 3 讨论

能源在城市群城市化进程中具有重要支持作用,如何高效的、绿色的使用它们是实现可持续发展的关键。

在本研究中,LDI 图形化有效的将闽三角城市群城市化过程中的能源和物质需求有机联系在一起。

表 4 闽三角城市群干扰等级及面积

Table 4 The distribution levels and area of Fujian delta urban agglomeration

年份 Year	无干扰		轻度干扰		中度干扰		剧烈干扰		强度干扰	
	Non-interference		Mild interference		Moderate interference		Strength interference		Severe interference	
	像元 个数	所占 比重/%	像元 个数	所占 比重/%	像元 个数	所占 比重/%	像元 个数	所占 比重/%	像元 个数	所占 比重/%
2000	16594	51.70	11506	35.85	3820	11.90	174	0.54	0	0
2005	16491	51.38	4753	14.81	1718	5.35	6922	21.50	2210	6.89
2013	14065	43.82	1285	4.01	6423	20.01	7926	24.70	2395	7.46

在人地关系的探讨研究中,前人利用 LDI 指标描述人类活动在湿地内与其缓冲区边界范围内人类活动与生态健康间的相关性<sup>[35]</sup>,但 2014 年 Mellino<sup>[34]</sup>提出将可更新能源纳入到 LDI 的评估中,并利用夜间灯光数据替代土地利用变化数据作为基础数据,进行对人类活动范围的描述与刻画。在前人的研究基础上,本研究首先对闽三角城市群区域能源需求进行时间序列的分析,发现可更新能源波动呈下降趋势,不可更新能源呈现上升趋势,人类对于不可更新能源较之于可更新能源有着更为迫切的需求,但是目前的能源利用模式不利于该区域的可持续发展。其次,闽三角城市群区域适用于宏观视角的研究方法,其中能值核算方法<sup>[36]</sup>和夜间灯光数据<sup>[37]</sup>等都广泛应用于中、宏观研究中,在本文中也同样体现出方法的适用性。最后,2010 年福建省作为生态文明省份,将平衡生态文明与经济建设作为工作重心,闽三角城市群作为福建省最大的经济发展共同体,其在经济与生态的态度折射出中国经济未来发展方向。故本研究基于中国经济迅速发展,但忽略了经济与生态的相互关系这一背景下,通过探讨人类活动对于自然景观干扰强度,实现为大、中型区域城市化的城乡建设规划管理与区域可持续发展提供一定数据参考的目标。

通过该研究使人们意识到能源输入与流动在支持人类活动的重要性,以及不当的能源输入结构对自然资源常造成不可逆转的破坏。通过该研究对政策者提出如下措施建议:(1)将景观开发强度的结果作为城市群城乡规划建设与管理的数据参考,如或对城市群中较密集型城市的非核心区功能进行疏导,缓解城市群内部人口和重工业等对于环境资源的消耗压力,或利用绿地、森林和水域等自然生态系统,进行城郊隔离,搭建生态廊道,实现建筑区域与自然区域的相互协调与科学发展;(2)对不可更新的能源使用进行调控,一方面,通过降低化石燃料及战略资源(矿产和水等)的可获取性。另一方面,增加能源的使用效率,在资源循环利用与再制造方面进行改革创新;(3)积极开发利用当地的可更新能源,如:地热能、风能和太阳能等,当地可更新能源的转化与利用可以有效地改善当地经济发展对于煤矿等化石资源的依赖性,对改善当地环境质量,实现区域可持续发展具有正向引导价值。

本研究对城市群区域城市化进程中人类活动与自然生态系统的相关关系进行了探讨,文中数据多来源于《统计年鉴》且统计数据的项目并不丰富,在今后的研究中可以优化资源项目、更新数据来源等。

#### 4 结论

本研究通过对人类行为数据的组合,包括夜间灯光数据、可更新能源数据和不可更新能源数据,运用景观开发强度(LDI)指标定量描述人类活动对自然景观的影响程度。基于本研究的方法和数据,可以得出如下结论:

(1)夜间灯光数据在闽三角城市群空间尺度表现出从海湾至内陆呈现由高到低的分布状态,与闽三角城市群经济发展水平由高到低分布相吻合;

(2)在资源消耗方面,闽三角城市群的可更新能值的输入,在空间尺度上呈现从海湾向内陆递增趋势,不可更新能源输入在时间尺度上,呈现上升趋势;

(3)LDI 指标为政府决策提供了定性分析信息,其中,厦门市、龙海市、晋江市和石狮市等处于强度干扰、

剧烈干扰区。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 方创琳. 中国城市群形成发育的新格局及新趋向. 地理科学, 2011, 31(9): 1025-1034.
- [ 2 ] 王静, 周伟奇, 许开鹏, 颜景理. 京津冀地区城市化对植被覆盖度及景观格局的影响. 生态学报, 2017, 37(21): 7019-7029.
- [ 3 ] Liao F J, Wang X M. Urban vegetation landscape fragmentation and the change of ecological values in Shenzhen. *Journal of Landscape Research*, 2017, 9(5): 67-70, 73-73.
- [ 4 ] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 王红扬, 周艳妮, 秦正茂. 湖南省城市群生态网络构建与优化. 生态学报, 2011, 31(10): 2863-2874.
- [ 5 ] Buyantuyev A, Wu J G. Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. *Landscape Ecology*, 2010, 25(1): 17-33.
- [ 6 ] 李志刚, 曾熈忱, 叶静文, 李军, 韩诗畴. 珠三角重要生态区域蝶类多样性及其对区域环境的指示. 生态科学, 2015, 34(5): 167-171.
- [ 7 ] Pauw A, Louw K. Urbanization drives a reduction in functional diversity in a guild of nectar-feeding birds. *Ecology and Society*, 2012, 17(2): 27.
- [ 8 ] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 林乃峰, 徐梦佳. 生态安全格局研究的主要内容与进展. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [ 9 ] 黄国和, 安春江, 范玉瑞, 徐琳瑜, 李永平, 蔡宴朋, 李延峰, 李锋. 珠江三角洲城市群生态安全保障技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7119-7124.
- [ 10 ] 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 吴健生. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK. 地理学报, 2018, 73(5): 843-855.
- [ 11 ] 康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展. 生态学报, 2016, 36(5): 1192-1203.
- [ 12 ] 严珅, 孙然好. 京津冀县域城镇化与景观格局变化的协调性研究. 生态环境学报, 2018, 27(1): 62-70.
- [ 13 ] 刘春玲, 王永, 姚翔龙, 童立强, 祁生文, 贺鹏. 天津滨海新区重点海岸带土地生态景观综合分析评价. 第四纪研究, 2018, 38(2): 505-511.
- [ 14 ] 胡志仁, 龚建周, 李天翔, 孙家仁. 珠江三角洲城市群生态安全评价及态势分析. 生态环境学报, 2018, 27(2): 304-312.
- [ 15 ] 朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 曹光兰, 王凡凡. 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究. 生态学报, 2014, 34(06): 1379-1390.
- [ 16 ] 熊鹰, 陈昊林. 基于属性理论的长株潭城市群生态系统健康评价. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1422-1427.
- [ 17 ] Wang Z Y, Tang L N, Qiu Q Y, Chen H X, Wu T, Shao G F. Assessment of regional ecosystem health—a case study of the golden triangle of southern Fujian Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(4): 802.
- [ 18 ] Wu L Y, You W B, Ji Z R, Xiao S H, He D J. Ecosystem health assessment of Dongshan Island based on its ability to provide ecological services that regulate heavy rainfall. *Ecological Indicators*, 2018, 84: 393-403.
- [ 19 ] Brown M T, Vivas M B. Landscape development intensity index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2005, 101(1/3): 289-309.
- [ 20 ] Chen T S, Lin H J. Application of a landscape development intensity index for assessing wetlands in Taiwan. *Wetlands*, 2011, 31(4): 745-756.
- [ 21 ] Bonzongo J C J, Donkor A K, Attibayeba A, Gao J. Linking landscape development intensity within watersheds to methyl-mercury accumulation in river sediments. *Ambio*, 2016, 45(2): 196-204.
- [ 22 ] Odum H T. *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [ 23 ] 林金煌, 陈文惠, 祁新华, 程瑞彤, 陈增文. 闽三角城市群生态系统格局演变及其驱动机制. 生态学杂志, 2018, 37(1): 203-210.
- [ 24 ] Su Y X, Chen X Z, Wang C Y, Zhang H G, Liao J S, Ye Y Y, Wang C J. A new method for extracting built-up urban areas using DMSP-OLS nighttime stable lights: a case study in the Pearl River Delta, southern China. *GIScience & Remote Sensing*, 2015, 52(2): 218-238.
- [ 25 ] 吴小语, 张鹏林. 融合 DMSP-OLS 和 Landsat 影像的城区边界提取. 应用科学学报, 2016, 34(1): 67-74.
- [ 26 ] Ma T, Zhou C H, Pei T, Haynie S, Fan J F. Quantitative estimation of urbanization dynamics using time series of DMSP/OLS nighttime light data: a comparative case study from China's cities. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 99-107.
- [ 27 ] Pandey B, Joshi P K, Seto K C. Monitoring urbanization dynamics in India using DMSP/OLS night time lights and SPOT-VGT data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 49-61.
- [ 28 ] Tripathy B R, Tiwari V, Pandey V, Elvidge C D, Rawat J S, Sharma M P, Prawasi R, Kumar P. Estimation of urban population dynamics using DMSP-OLS night-time lights time series sensors data. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(4): 1013-1020.
- [ 29 ] 周玉科, 高锡章, 倪希亮. 利用夜间灯光数据分析我国社会经济区域发展的区域不平衡特征. 遥感技术与应用, 2017, 32(6): 1107-1113.
- [ 30 ] Li X K, Zhang C R, Li W D, Liu K. Potential application of DMSP/OLS nighttime light data for estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations// *Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Beijing, China: IEEE, 2016: 5749-5752.
- [ 31 ] 杨雪, 张文忠. 基于栅格的区域人居自然和人文环境质量综合评价——以京津冀地区为例. 地理学报, 2016, 71(12): 2141-2154.
- [ 32 ] Wang C D, Zhang S Y, Yan W L, Wang R Q, Liu J, Wang Y T. Evaluating renewable natural resources flow and net primary productivity with a

GIS-Emergy approach: a case study of Hokkaido, Japan. Scientific Reports, 2016, 6: 37552.

- [33] 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.
- [34] Mellino S, Ripa M, Ulgiati S. Spatial accounting of environmental pressure and resource consumption using night-light satellite imagery. Journal of Environmental Accounting and Management, 2013, 1(4): 361-379.
- [35] 张森, 刘俊国, 赵旭, 陈恣恣. 基于景观开发强度法的湿地健康变化研究. 水土保持研究, 2014, 21(3): 157-162.
- [36] 楚芳芳, 蒋涤非. 基于能值分析的长株潭城市群生态经济系统演变态势分析. 经济地理, 2012, 32(2): 143-148.
- [37] Tripathy B R, Sajjad H, Elvidge C D, Ting Y, Pandey P C, Rani M, Kumar P. Modeling of electric demand for sustainable energy and management in India using spatio-temporal DMSP-OLS night-time data. Environmental Management, 2018, 61(4): 615-623.

## 附录:

附表 1 当地不可更新能值数据来源

Attached table 1 The data sources of local non-renewable

项目 Item	单位能值价值 Unit emergy values /( sej/g, sej/J)	时间 Time	数据来源 Data sources
地下水 Ground water resources	$8.99 \times 10^5$	2000	空
		2005	<a href="http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2005/200612/t20061205_56925.html">http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2005/200612/t20061205_56925.html</a> $3.98 \times 10^{10} \text{ m}^3 \times 0.2 = 7.95 \times 10^{15} \text{ g}$ ; 总能值 = $7.15 \times 10^{21} \text{ sej}$ ;
		2013	<a href="http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654084.html">http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654084.html</a> $3.38 \times 10^{10} \text{ m}^3 \times 0.2 = 6.75 \times 10^{15} \text{ g}$ ; 总能值 = $4.57 \times 10^{24} \text{ sej}$ ;
煤矿 Coal mine	$1.06 \times 10^4$	2000	$4.3 \times 4.3 / 4.29 = 4.31 \times 10^8 \text{ t}$ (由 05 年、10 年数据推算得出) = $8.62 \times 10^{10} \text{ kg}$ ; 总热量 = $4.31 \times 10^{20} \text{ J}$ ; 总能值 = $4.56 \times 10^{24} \text{ sej}$ ;
		2005	<a href="http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm">http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm</a> $4.3 \times 10^8 \text{ t} \times 0.2 = 8.60 \times 10^{10} \text{ kg}$ ; 总热量 = $4.30 \times 10^{20} \text{ J}$ ; 总能值 = $4.56 \times 10^{24} \text{ sej}$ ;
		2013	<a href="http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654029.html">http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654029.html</a> $4.22 \times 10^8 \text{ t} \times 0.2 = 8.44 \times 10^{10} \text{ kg}$ ; 总热量 = $4.22 \times 10^{20} \text{ J}$ ; 总能值 = $4.47 \times 10^{24} \text{ sej}$ ;
铁矿石 Ironstone	$8.60 \times 10^8$	2000	$0.74 \times 0.74 / 0.708 = 0.77$ (由 05 年、10 年数据推算得出) = $7.70 \times 10^{13} \text{ g}$ ; 总能值 = $6.62 \times 10^{22} \text{ sej}$ ;
		2005	<a href="http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm">http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm</a> $3.7 \times 10^8 \text{ t} \times 0.2 = 7.40 \times 10^{13} \text{ g}$ ; 总能值 = $6.36 \times 10^{22} \text{ sej}$ ;
		2013	<a href="http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654029.html">http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654029.html</a> $3.24 \times 10^8 \text{ t} \times 0.2 = 6.48 \times 10^{13} \text{ g}$ ; 总能值 = $5.57 \times 10^{22} \text{ sej}$ ;
锰矿石 Manganese ore	$8.90 \times 10^8$	2000	空
		2005	<a href="http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm">http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm</a> $1.12 \times 10^6 \text{ t} \times 0.2 = 2.25 \times 10^{11} \text{ g}$ ; 总能值 = $2.00 \times 10^{20} \text{ sej}$ ;
		2013	<a href="http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654029.html">http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654029.html</a> $1.35 \times 10^6 \text{ t} \times 0.2 = 2.70 \times 10^{11} \text{ g}$ ; 总能值 = $2.40 \times 10^{20} \text{ sej/a}$ ;
铜矿石 Copper ore	$1.80 \times 10^9$	2000	$19.5 \times 19.5 / 16.62 = 22.87$ (由 05 年、10 年数据推算得出) = $2.29 \times 10^{11} \text{ g}$ ; 总能值 = $4.12 \times 10^{20} \text{ sej}$ ;
		2005	<a href="http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm">http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm</a> $9.73 \times 10^5 \text{ t} \times 0.2 = 1.95 \times 10^{11} \text{ g}$ ; 总能值 = $3.51 \times 10^{20} \text{ sej}$ ;
		2013	<a href="http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654030.html">http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654030.html</a> $8.78 \times 10^5 \text{ t} \times 0.2 = 1.76 \times 10^{11} \text{ g}$ ; 总能值 = $3.17 \times 10^{20} \text{ sej}$ ;
铅矿石 Lead ore	$1.60 \times 10^{10}$	2000	空
		2005	<a href="http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm">http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm</a> $1.99 \times 10^5 \text{ t} \times 0.2 = 3.98 \times 10^{10} \text{ g}$ ; 总能值 = $6.37 \times 10^{20} \text{ sej}$ ;
		2013	<a href="http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654030.html">http://www.stats.gov.cn/ztc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654030.html</a> $3.41 \times 10^5 \text{ t} \times 0.2 = 6.81 \times 10^{10} \text{ g}$ ; 总能值 = $1.09 \times 10^{21} \text{ sej}$ ;
锌矿石 Zinc ore	$1.80 \times 10^9$	2000	空

续表

项目 Item	单位能值价值 Unit energy values /( sej/g, sej/J)	时间 Time	数据来源 Data sources
硫铁矿石 Sulphur iron ore	8.60×10 <sup>8</sup>	2005	<a href="http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm">http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm</a> 4.48×10 <sup>5</sup> t×0.2=8.96×10 <sup>10</sup> g; 总能值=1.61×10 <sup>20</sup> sej;
		2013	<a href="http://www.stats.gov.cn/ztjc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654030.html">http://www.stats.gov.cn/ztjc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654030.html</a> 8.04×10 <sup>5</sup> t×0.2=1.61×10 <sup>11</sup> g; 总能值=2.90×10 <sup>20</sup> sej;
		2000	空
		2005	<a href="http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm">http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2006/indexch.htm</a> 1.17×10 <sup>7</sup> t×0.2=2.34×10 <sup>12</sup> g; 总能值=2.01×10 <sup>21</sup> sej;
		2013	<a href="http://www.stats.gov.cn/ztjc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654030.html">http://www.stats.gov.cn/ztjc/ztsj/hjtjzl/2013/201412/t20141216_654030.html</a> 1.11×10 <sup>7</sup> t×0.2=2.21×10 <sup>12</sup> g; 总能值=1.90×10 <sup>21</sup> sej;

闽三角城市群面积在福建省占地面积之比为(2.53/12.4)万平方千米 ≈ 0.2; 2000年闽三角城市群常住人口在福建省常住人口所占之比为(1391/3410)万人 ≈ 0.41; 2005年闽三角城市群常住人口在福建省常住人口所占之比为(1517/3557)万人 ≈ 0.43

附表 2 输入不可更新能值数据来源

Attached table 2 The data sources of inflow non-renewable emergy

项目 Item	单位能值价值 Unit energy values /( sej/g, sej/J)	时间 Time	数据来源 Data sources
原煤 Raw coal	4.00×10 <sup>4</sup>	2000	<a href="http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM">http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM</a> 1.71×10 <sup>7</sup> t×0.41=7.00×10 <sup>10</sup> kg; 总热量=3.5×10 <sup>19</sup> J; 总能值=1.4×10 <sup>24</sup> sej;
		2005	<a href="http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm">http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm</a> 3.68×10 <sup>7</sup> t×0.43=3.16×10 <sup>10</sup> kg; 总热量=7.90×10 <sup>19</sup> J; 总能值=3.16×10 <sup>24</sup> sej;
		2013	<a href="http://www.qztj.gov.cn/tjzl/tjsj/ndsj/201409/t20140928_421971.htm">http://www.qztj.gov.cn/tjzl/tjsj/ndsj/201409/t20140928_421971.htm</a> (1.32×10 <sup>7</sup> t 泉州) <a href="http://www.stats-xm.gov.cn/2014/main0.htm">http://www.stats-xm.gov.cn/2014/main0.htm</a> (4.86×10 <sup>6</sup> t 厦门) <a href="http://zztjj.zhangzhou.gov.cn/tjn/sub/2014/index.html">http://zztjj.zhangzhou.gov.cn/tjn/sub/2014/index.html</a> (1.04×10 <sup>7</sup> t 漳州) 总和=2.83×10 <sup>10</sup> kg; 总热量=1.42×10 <sup>20</sup> J; 总能值=5.66×10 <sup>22</sup> sej;
天然气 Natural gas	1.78×10 <sup>5</sup>	2000	<a href="http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM">http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM</a> (缺值)
		2005	<a href="http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm">http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm</a> 3.86×10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> ×0.43=1.66×10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> ; 总热量=5.66×10 <sup>14</sup> J; 总能值=1.01×10 <sup>20</sup> sej;
		2013	<a href="http://www.qztj.gov.cn/tjzl/tjsj/ndsj/201409/t20140928_421971.htm">http://www.qztj.gov.cn/tjzl/tjsj/ndsj/201409/t20140928_421971.htm</a> (2.08×10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> 泉州) <a href="http://www.stats-xm.gov.cn/2014/main0.htm">http://www.stats-xm.gov.cn/2014/main0.htm</a> (5.73×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> 厦门) <a href="http://zztjj.zhangzhou.gov.cn/tjn/sub/2014/index.html">http://zztjj.zhangzhou.gov.cn/tjn/sub/2014/index.html</a> (6.78×10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> 漳州) 总和=2.72×10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> ; 总热量=9.27×10 <sup>16</sup> J; 总能值=1.65×10 <sup>22</sup> sej;
汽油 Petrol	1.87×10 <sup>5</sup>	2000	<a href="http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM">http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM</a> 3.54×10 <sup>4</sup> t×0.41=1.45×10 <sup>7</sup> kg; 总热量=6.38×10 <sup>14</sup> J; 总能值=1.19×10 <sup>20</sup> sej;
		2005	<a href="http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm">http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm</a> 1.03×10 <sup>5</sup> t×0.43=4.41×10 <sup>7</sup> kg; 总热量=1.94×10 <sup>15</sup> J; 总能值=3.63×10 <sup>20</sup> sej;
		2013	<a href="http://www.qztj.gov.cn/tjzl/tjsj/ndsj/201409/t20140928_421971.htm">http://www.qztj.gov.cn/tjzl/tjsj/ndsj/201409/t20140928_421971.htm</a> (2.72×10 <sup>4</sup> t 泉州) <a href="http://www.stats-xm.gov.cn/2014/main0.htm">http://www.stats-xm.gov.cn/2014/main0.htm</a> (1.87×10 <sup>4</sup> t 厦门) <a href="http://zztjj.zhangzhou.gov.cn/tjn/sub/2014/index.html">http://zztjj.zhangzhou.gov.cn/tjn/sub/2014/index.html</a> (6.07×10 <sup>3</sup> t 漳州) 总和=5.19×10 <sup>7</sup> kg; 总热量=2.28×10 <sup>15</sup> J; 总能值=4.27×10 <sup>20</sup> sej;
柴油 Diesel	1.81×10 <sup>5</sup>	2000	<a href="http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM">http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM</a> 3.40×10 <sup>5</sup> t×0.41=1.39×10 <sup>8</sup> kg; 总热量=6.39×10 <sup>15</sup> J; 总能值=1.1×10 <sup>21</sup> sej;
		2005	<a href="http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm">http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm</a> 4.69×10 <sup>5</sup> t×0.43=2.01×10 <sup>8</sup> kg; 总热量=9.25×10 <sup>15</sup> J; 总能值=1.67×10 <sup>21</sup> sej;

续表

项目 Item	单位能值价值 Unit emery values /( sej/g, sej/J)	时间 Time	数据来源 Data sources
燃料油 Fuel oil	1.56×10 <sup>5</sup>	2013	http://www.qztj.gov.cn/tjzl/tjsj/ndsj/201409/t20140928_421971.htm (1.48 × 10 <sup>5</sup> t 泉州)
			http://www.stats-xm.gov.cn/2014/main0.htm (3.93×10 <sup>4</sup> t 厦门)
		2000	http://zttj.zhangzhou.gov.cn/tjn/sub/2014/index.html (3.05 × 10 <sup>4</sup> t 漳州) 总和=2.19×10 <sup>8</sup> kg;总热量=1.01×10 <sup>16</sup> J;总能值=1.82×10 <sup>21</sup> sej;
			http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM 5.34×10 <sup>5</sup> t×0.41=2.18×10 <sup>8</sup> kg;总热量=1.05×10 <sup>16</sup> J;总能值=1.63×10 <sup>21</sup> sej;
		2005	http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm 5.73×10 <sup>5</sup> t×0.43=2.46×10 <sup>8</sup> kg;总热量=1.18×10 <sup>16</sup> J;总能值=1.84×10 <sup>21</sup> sej;
		热力 Thermal	2.03×10 <sup>4</sup>
http://www.stats-xm.gov.cn/2014/main0.htm (7.34×10 <sup>4</sup> t 厦门)			
2000	http://zttj.zhangzhou.gov.cn/tjn/sub/2014/index.html (2.35 × 10 <sup>5</sup> t 漳州) 总和=6.19×10 <sup>8</sup> kg;总热量=2.96×10 <sup>16</sup> J;总能值=4.62×10 <sup>21</sup> sej;		
	http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM 1.36×10 <sup>12</sup> kw h×0.41=5.50×10 <sup>14</sup> J;总热量=5.50×10 <sup>14</sup> J;总能值=1.13×10 <sup>19</sup> sej;		
2005	http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm 6.98×10 <sup>14</sup> J×0.43=3.00×10 <sup>15</sup> J;总热量=3.00×10 <sup>15</sup> J;总能值=6.09×10 <sup>19</sup> sej;		
2013	http://www.qztj.gov.cn/tjzl/tjsj/ndsj/201409/t20140928_421971.htm (8.47 × 10 <sup>15</sup> J 泉州)		
	http://www.stats-xm.gov.cn/2014/main0.htm (1.09×10 <sup>16</sup> J 厦门) http://zttj.zhangzhou.gov.cn/tjn/sub/2014/index.html (缺值 漳州) 总和=1.94×10 <sup>16</sup> J;总热量=1.94×10 <sup>16</sup> J;总能值=3.94×10 <sup>20</sup> sej;		
电力 Electricity	2.70×10 <sup>5</sup>	2000	http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM 1.56×10 <sup>10</sup> kw h×0.41=2.30×10 <sup>16</sup> J;总热量=2.30×10 <sup>16</sup> J;总能值=6.21×10 <sup>21</sup> sej;
			http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm 3.94×10 <sup>10</sup> kw h×0.43=6.12×10 <sup>16</sup> J;总热量=6.12×10 <sup>16</sup> J;总能值=1.65×10 <sup>22</sup> sej;
		2005	http://www.qztj.gov.cn/tjzl/tjsj/ndsj/201409/t20140928_421971.htm (2.48 × 10 <sup>10</sup> kw h 泉州)
			http://www.stats-xm.gov.cn/2014/main0.htm (8.23×10 <sup>9</sup> kw h 厦门)
		2013	http://zttj.zhangzhou.gov.cn/tjn/sub/2014/index.html (8.95×10 <sup>9</sup> kw h 漳州) 总和=4.02×10 <sup>10</sup> kw h=1.45×10 <sup>17</sup> J;总热量=1.45×10 <sup>17</sup> J;总能值=3.91×10 <sup>22</sup> sej;
			http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/2001/INDEX1.HTM 7.36×10 <sup>4</sup> t×0.41=3.01×10 <sup>7</sup> kg;总热量=1.36×10 <sup>15</sup> J;总能值=2.31×10 <sup>20</sup> sej;
液化石油气 Liquefied petroleum gas	1.70×10 <sup>5</sup>	2000	http://www.stats-fj.gov.cn/tongjijianjian/dz06/index1.htm 11.80×10 <sup>4</sup> t×0.43=5.07×10 <sup>7</sup> kg;总热量=2.29×10 <sup>15</sup> J;总能值=3.90×10 <sup>20</sup> sej;
			http://www.qztj.gov.cn/tjzl/tjsj/ndsj/201409/t20140928_421971.htm (1.39 × 10 <sup>4</sup> t 泉州)
		2005	http://www.stats-xm.gov.cn/2014/main0.htm (1.13×10 <sup>4</sup> t 厦门)
			http://zttj.zhangzhou.gov.cn/tjn/sub/2014/index.html (7.21×10 <sup>3</sup> t 漳州) 总和=3.24×10 <sup>7</sup> kg;总热量=1.46×10 <sup>15</sup> J;总能值=2.49×10 <sup>20</sup> sej;