

# 基于生态足迹法的区域水资源生态承载力计算与评价 ——以珠海市为例

陈栋为, 陈晓宏\*, 孔兰

中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275

**摘要:** 研究了人类社会对水资源的消耗、对自然生态环境的影响以及该影响的量化方法和量化指标, 将生态足迹法引入区域水资源承载力系统, 构建珠海市水资源生态承载力计算模型, 分析计算水资源供给对区域经济社会发展的生态承载力, 并对该地区的水资源生态承载力进行生态盈亏和敏感性评价。结果表明, 总体上珠海市水资源系统呈现生态亏损, 亏损率为 37%, 水资源生态承载呈现超载现象, 珠海市城市化进程中流动人口增长对区域水资源的生态承载压力较大。研究结果还表明, 将生态足迹模型运用到地区水资源承载力中具有较高的可信度, 对地方尺度具有适用性。

**关键字:** 生态足迹, 水资源承载力, 敏感性

**中图分类号:** X143

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2009) 06-2224-06

区域水资源生态承载力的研究对象是一个客观存在的系统, 如何有效测度区域水资源对“自然—社会—经济”复杂巨系统的可持续发展能力是水资源生态承载力研究的热点和难点<sup>[1-4]</sup>。生态足迹方法可估算人类对自然资源的占用程度和研究区域的综合承载力, 同样也可以估算人类对水资源的开发利用程度以及水资源本身承载“自然—社会—经济”复杂巨系统的能力, 并用具体生物物理指标来测量人类对水资源的开发利用是否处于生态系统承载力范围内, 达到定量测量区域水资源生态承载力目的。

目前生态足迹应用研究多集中在区域经济社会发展的生态足迹分析评价领域, 有关单项资源的生态足迹研究较少<sup>[5-8]</sup>, 应用生态足迹法对自然界和人类社会中最活跃的水和水资源的研究目前鲜有文章涉及, 本文将基于生态足迹法, 采用珠海市的水资源以及社会经济数据, 构建珠海市水资源生态承载力计算模型, 研究现有的水资源供给对区域经济社会发展的承载状态, 在此基础上结合生态足迹评价方法对该地区的水资源生态承载力进行评价。

## 1 模型构建

“生态足迹”就是用于衡量人类现在究竟消耗多少用于延续人类发展的自然资源的计算工具。生态足迹模型主要用来计算在一定的人口与经济规模条件下, 维持资源消费和废物消纳所必需的生物生产面积。为区别于普通的面积单位  $\text{hm}^2$  (公顷), 生态足迹单位用  $\text{globalhm}^2$  表示, 简称为  $\text{ghm}^2$ <sup>[9-10]</sup>。

水是人类社会和自然界最活跃的因素, 水资源作为人类社会不可或缺的一种资源影响着方方面面的活动。该模型将水资源供给人类社会各方面的活动, 各个用水项的用水量换算成各类土地的承载能力, 作为生态足迹供给模型。以人类社会各个行业居民消费项换算成各类土地的承载能力, 作为生态足迹消费模型, 对于承载要素主要考虑水资源消费系统内各项, 其他要素如人们对水产品的需求和水资源维持空气湿度等方面, 由于影响程度较小且数据收集难度大暂不纳入模型考虑。

### 1.1 生态足迹供给——水资源生态承载力模型

水资源的本质特征包括有效性、可控性和可再生性三个方面, 有效性是指, 对社会经济发展和生态环境具有有效用的水分均可以看作是水资源, 根据有效性准则定义的水资源包括了降水中的有效部分和径流性水资源, 是一种广义水资源<sup>[11]</sup>。在广义水资源范畴内可以将区域水资源生态承载力(WEC)表达为将水的各个效用反映到各类土地(本文将生产性土地分为耕地、草地、林地、水域、建筑用地和化石燃料用地 6 种类型)的承载能力, 不同类型土地的承载力之和便是区域水资源的承载力, 计算公式为

$$\text{WEC} = \sum_{j=1}^6 B_j = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^k w_i \times s_j \times Y_j \times y_j \quad (1)$$

式(1)中, WEC 为人类社会用水量计算的生态足迹供给, 即区域水资源生态承载力;  $j$  为土地类型(耕地、草地、林地、水域、建筑用地和化石燃料

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50839005); 国家自然科学基金项目(50809078); 国家科技支撑计划基金项目(2006BAB14B07)

**作者简介:** 陈栋为(1982年生), 男, 博士研究生, 研究方向为城市化过程中的水资源效应。E-mail: 44344079@163.com

\*通讯作者: 陈晓宏(1963年生), 男, 教授, 博导, 研究方向为水文水环境。E-mail: eescxh@mail.sysu.edu.cn

**收稿日期:** 2009-10-14

用地);  $B_j$  为  $j$  类土地消费项目折算的承载力( $\text{ghm}^2$ );  $w_i$  为第  $i$  类用水项的用水量 ( $\text{m}^3$ ),  $s_j$  为第  $i$  类用水项换算为第  $j$  类土地的面积的换算系数( $\text{hm}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ ), 根据用水类型和用水定额率定;  $\gamma_j$  为  $j$  类土地的均衡因子; 产量因子  $y_j = y_{kj} / y_{w_j}$ ,  $y_{kj}$  为某区域  $j$  类土地的平均生产力,  $y_{w_j}$  为  $j$  类土地的世界平均生产力。

### 1.2 水资源生态足迹消费模型

生态足迹(EF)代表着区域居民消费状况, 各种不同类型的资源消费和吸纳消费废物所需要的生物生产面积之和便是区域的生态足迹, 计算见公式(2)。

$$\begin{cases} \text{EF} = \sum_{j=1}^6 A_j = N \times \sum_{j=1}^6 a_j = N \times \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n \gamma_j \times \frac{C_{ji}}{P_{ji}} \\ ef = \text{EF} / N \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,  $EF$  为区域生态足迹;  $N$  为人口数(人);  $j$  为土地类型;  $A_j$  为  $j$  类土地消费项目折算的生态足迹;  $a_j$  为  $j$  类土地消费项目折算的人均生态足迹;  $\gamma_j$  为  $j$  类土地的均衡因子;  $i$  为不同类型土地的消费项目类型;  $C_{ji}$  为某一区域  $j$  类土地的  $i$  类消费项目的人均年消费量;  $P_{ji}$  为  $j$  类土地的  $i$  类消费项目的平均产量;  $ef$  为 6 类土地的人均生态足迹。

随着生活水平的提高, 居民对能源和生物资源的消费量日益加大, 生态足迹将在现有的人均生态足迹  $ef$  上有增长的趋势; 同时, 科学技术的发展和运用将带来资源利用效率的提高从而使人均生态足迹  $ef$  呈下降趋势。在上述两方面的共同作用下, 生态足迹的发展出现波动趋势, 考虑到模型的可操作性, 定义一个均衡人均生态足迹  $ef_0$ , 用以表示生活水平提高导致的人均生态足迹增长与科学技术发展引发的单位生态足迹下降之间的平衡状态。

### 1.3 区域水资源生态承载力评价模型

生态盈亏即承载力与生态足迹之间的差值, 它可以用来综合判定一个国家或地区的生产消费活动是否处于当地生态系统可承载的范围之内。

以  $EDR$  表示生态盈亏, 其计算公式为:

$$\begin{cases} \text{EDR} = N \times \text{edr} \\ \text{EDR} = \text{WEC} - \text{EF} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $EDR$  为生态盈亏,  $N$  为人口数;  $\text{edr}$  为人均生态盈亏;  $EC$  为承载力,  $EF$  为生态足迹。当区域生态足迹超过了承载力时,  $EDR$  为负, 称为生态赤字(ED), 大小即为  $EDR$  的绝对值; 当区域的承载力超过了其生态足迹时,  $EDR$  为正, 称为生态盈余(ER), 大小即为  $EDR$ 。

## 2 实例计算——以珠海市为例

### 2.1 计算步骤和数据来源

(1) 确定用水项折算为其他地类的折算系数  $S$ 。采用效益等价和资源替代法确定折算系数和折算地类  $S$ , 单位是  $\text{hm}^2 \cdot (10^4 \cdot \text{m}^3)^{-1}$ , 主要根据珠海市 2007 年水资源公报中的用水项(城镇生活用水、城镇公用用水、生态环境用水、工业用水、农田灌溉用水、林牧渔用水)用水量, 2007 年编制的广东省用水定额(试行), 珠海市 2007 统计年鉴和珠海市 2007 电价价目表等相关统计资料, 计算各个用地类型的单位产值: 耕地=农业单位产值/播种面积, 草地单位产值=畜牧业产值/草地面积, 化石能源用地单位产值根据资源替代法转换为林地生产量, 再根据能量守恒等价法转换为化石能源用地面积, 建筑用地单位产值=建筑业产值/人均建筑用地面积。

(2) 根据统计数据计算该区域水资源生态承载力。在计算水资源生态足迹的供给即生态承载力时, 由于同类生物生产性土地的生产力在不同国家或地区也存在差异, 因此要在这 6 类不同的土地面积前分别乘上一个相应的产量因子, 以转化成具有可比性的生物生产均衡面积。“产量因子”是一个国家或地区某类土地的平均生产力与世界同类平均生产力的比率<sup>[12]</sup>。

(3) 划分消费项目, 计算各主要消费项目的消费量和相应用地的产出量。消费项目包括用水项折算的地类的产出: 食物、衣着、生活用品、生活用能和住地。人均消费和产出的数据来源于珠海市 2007 年统计年鉴, 食物消费以农事活动产出的粮食、猪肉、蔬菜、水果等为主; 生活用能主要包括薪柴、煤炭、电力、液化石油气、柴油等; 住地数据需要统计年末建成区面积和公摊交通面积, 建筑用地除住宅用地外, 交通用地通过区域统计资料获得, 作为住地公摊面积, 计算时加和这几类数据。

(4) 根据统计数据计算该区域水资源生态足迹。在生态足迹“帐户”计算中, 各种物质与能源的消费均按相应的换算比例折算成相应的土地面积。生物生产土地面积主要考虑如下 6 种类型: 可耕地、林地、草地、化石燃料土地、建筑用地和水域。由于不同土地单位面积的生物生产能力差异很大, 因此在计算生态足迹时, 要在这 6 类不同的土地面积计算结果数值前分别乘上一个相应的均衡因子, 以转化为可比较的生物生产均衡面积。根据国际统一标准, 上述 6 种地类的均衡因子分别为 2.8、1.1、0.5、1.1、2.8、0.2<sup>[13]</sup>。

利用与水资源消费所关联的消费品平均产量数据, 将各消费量折算成生物生产性土地面积。分项汇总对应同一生物生产性土地的生态足迹需求项目, 再乘以该类生物生产性土地的均衡因子, 就可以将各类生物生产性土地面积转换为等价生产力的

土地面积,加和均衡后的值就得到所需的生态足迹大小<sup>[14]</sup>。

(5) 根据上述计算数据,计算生态盈亏,并结合珠海市水资源利用现状进行水资源承载力的评价。

## 2.2 基于生态足迹法的区域水资源生态承载力计算

根据珠海市 2007 年水资源公报中的数据,用水项分为城镇生活用水、城镇公用用水、生态环境用水、工业用水、农田灌溉用水、林牧渔用水,结合水资源消费的经济产出状况利用效益等价法确定换算地类,详见表 1。

根据 2007 年广东省用水定额(试行)和珠海市 2007 统计年鉴等相关统计资料,求算人均用地面积  $0.0081 \text{ hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$ ,工业用水量根据水力发电用水定额换算为电能,根据资源替代法转换为林地生产量,

表 1 珠海市 2007 年用水量、用水定额及换算地类

Table 1 Water consumption and fixed consumption, and conversion to a land class in Zhuhai City, 2007

用水项	w (用水量)	数值	单位	换算地类
城镇生活	11 398.3	0.25	$\text{L} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$	建筑用地
城镇公用	3 898.66	1.7	$\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	林地
生态环境	173.36	1.3	$\text{L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	草地
工业	14500	1 000	$\text{m}^3 \cdot (10^4 \text{ kWh})^{-1}$	化石能源
农田灌溉	13 192.2	4 500	$\text{m}^3 \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	耕地
林牧渔	2 101	2 700	$\text{m}^3 \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	林地

表 2 珠海市 2007 水资源生态承载力计算

Table 2 Calculation of the ecological water resources carrying capacity in Zhuhai city, 2007

用水项	换算地类	S (换算系数)	人均供给面积/ $\text{hm}^2$	$\gamma$ (均衡系数)	Y(产量因子)	水资源生态承载力
城镇生活	建筑用地	7.4	0.058	2.82	2.24	0.37
城镇公用	林地	1.61	0.004 3	1.1	1.2	0.005 7
生态环境	草地	2.1	0.000 25	0.54	3.29	0.000 45
工业	化石能源	2.83	0.028	1.14	1.3	0.042
农田灌溉	耕地	2.22	0.02	2.82	2.24	0.13
林牧渔	林地	3.7	0.005 3	1.1	1.2	0.007 1
总计						0.55

表 3 珠海市 2007 年人均生态足迹计算

Table 3 Calculation of the per capital ecological footprint in Zhuhai City, 2007

消费指标	单位	年平均	换算地类	地类产值	均衡系数	人均足迹
食品	元	4 732.44	耕地	64 701.24	2.82	0.206
衣着	元	760.92	化石能源	22 272.97	1.14	0.039
家庭设备用品及服务	元	696.84	化石能源	22 272.97	1.14	0.036
交通和通信	元	3 599.04	化石能源	22 272.97	1.14	0.186
教育文化娱乐服务	元	1 900.92	化石能源	22 272.97	1.14	0.097 6
居住	元	1 376.76	建筑用地	216 761.86	2.24	0.015
园林绿地面积	$\text{hm}^2$	4741	草地	4 401.68	0.54	0.001 8
建成区面积	$\text{hm}^2$	10 805	建筑用地	216 761.86	2.82	0.021
公园面积	$\text{hm}^2$	1 030	草地	4 401.68	0.54	0.000 38
用电	kWh	721 434	化石能源	22 272.97	1.14	0.16
合计						0.76

再根据能量守恒等价为化石能源用地面积。利用公式(1),计算人均水资源生态承载力,如表 2。

## 2.3 区域水资源消费生态足迹计算

根据珠海市 2007 年统计年鉴的居民消费构成和市政公共绿地数据资料,筛选与水资源消费相关的居民消费项目,并结合消费项原料的用地性质确定换算地类。衣着、家庭设备用品及服务、交通和通信、教育文化娱乐、用电等项与工业产品有关的换算为化石能源用地,园林绿地面积、建成区面积、公园面积均以实际面积和地类计算。

根据公式(2)方法,计算出珠海市的人均生态足迹,如表 3。

## 3.分析与评价

### 3.1 水资源生态承载力贡献率分析

根据水资源承载力的计算数据各用水项单位水量生态承载力,进而计算单位水量生态承载力占总体水资源生态承载的百分比作为各用水项的贡献率,计算数据如表 4。

由以上表分析可见,对区域水资源生态承载的贡献较大的两项为城镇生活用水和农田灌溉用水,较小的是生态环境和城镇公用用水,处于中间水平的是工业和林牧渔用水;城镇生活用水对区域水资源生态承载的贡献最大,为 61.73%,说明珠海市城市化进程中人口(常住人口和流动人口),主要是流动人口增长对区域水资源的生态承载压力较大;



水资源承载力的贡献率大小,结果表明,珠海市城市化进程中人口(常住人口和流动人口),主要是流动人口增长对区域水资源的生态承载压力较大;城镇公用用水对区域水资源生态承载的贡献最小,并可在一定程度上缓解水资源的生态承载压力。

(3)通过对等量增加各项用水量 and 计算相应的水资源生态承载力,模拟水资源生态承载对水资源消费量增加的敏感程度,发现珠海市水资源生态承载力随着各个水资源消费项目用水量的增加而增加,趋势呈指数曲线变化,敏感性越来越强,可以用指数函数进行很好的拟合,这说明如果水资源过度消费,其对自然生态环境的影响将越来越大。

(4)从珠海市的研究案例来看,水资源生态承载力对城镇生活用水量的变化最敏感,对农田灌溉用水敏感指数次之,对工业、生态、城镇公用用水量较不敏感,考虑该城市城市化程度高和人口水资源消费量大的影响,该结果基本符合珠海市实际。因此,将生态足迹模型运用到经济发达城市水资源生态承载力中具有较高的可信度,对地方尺度具有适用性。

#### 参考文献:

- [1] 斯嵩,林年丰,等.生态足迹法在可持续发展度量及趋势预测中的应用[J].干旱区资源与环境,2007,33(7):37-40.  
SI Ai, LIN Nianfeng, et al. The application of ecological footprint to the measurement of sustainable development and trend forecast[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 33(7): 37-40.
- [2] 胡淼,周应祺.生态足迹理论的微观分析-成分法的算法及应用[J].上海水产大学学报,2006,15(1):84-90  
HU Miao, ZHOU Yingqi. The arithmetic and application of component-based methodology: micro-analysis of ecological footprint theory[J]. Hjournal of Shanghai Fisheries University, 2006, 15(1): 84-90.
- [3] 董雅洁,梅亚东.用生态足迹法分析水电站对河流生态系统功能的影响[J].水力发电,2007,33(7):27-29.  
DONG Yajie, MEI Yadong. Application of ecological footprint in the analysis of the effects of hydropower station on river ecosystem functions[J]. Water Power, 2007, 33(7): 27-29.
- [4] 王玉梅,尚金城.生态足迹分析法在可持续发展定量评估中的应用-以吉林省2002年生态足迹分析为例[J].干旱区资源与环境,2006,20(1):146-151.  
WANG Yumei, SHANG Jincheng. Application of ecological footprint analysis method to quantitative assessment of sustainable development-A case study of Jilin in 2002[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(1): 146-151.
- [5] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept[J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
- [6] WACKERNAGEL M, REES W. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact On The Earth[M]. Gabriola Island, Canada: New Society Publishers, 1996.
- [7] LENZEN M, MURRAY S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia[J]. Ecological Economics, 2001, 37(2): 229-255.
- [8] WACKERNAGEL M, ONISTO L, LINARESAC, et al. Ecological footprints of nations: How much nature do they use? How much nature do they have?[R]. Commissioned by the Earth Council for the Rioforum. Toronto: International Council for Local Environmental Initiatives, 1997: 10-21.
- [9] 王丽晔.基于生态足迹分析法的人口容量计算研究-以浙江省金华市为例[J].浙江师范大学学报:自然科学版,2008,31(3):343-349.  
WANG Liye. A study on population ecological capacity based on ecological footprint analysis: the case of Jinhua in Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang Normal University: Natural Sciences, 2008, 31(3): 343-349.
- [10] 盘前华,姜秀娟.城市的可持续发展以“生态足迹分析法”度量[J].城市与减灾,2006,(4):1-4.  
PAN Qianhua, JIANG Xiujuan. Measuring the sustainable development of cities by using the analytical method of ecological trace[J]. City and Disaster Reduction, 2006, (4): 1-4.
- [11] 王浩,王建华,秦大庸,贾仰文.基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J].水利学报,2006,37(12):1496-1501.  
WANG Hao, WANG Jianhua, QIN Dayong, JIA Yangwen. Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1496-1501.
- [12] 肖莉,蒋莉,等.小流域可持续发展能力的生态足迹法分析-以重庆市万州区五桥河流域为例[J].农村生态环境,2005,21(4):22-27.  
XIAO Li, JIANG Li et al. Analysis of catchment capacity of sustainable development with the ecological footprint method: a case study of Wuqiaohe Catchment, Wanzhou District, Chongqing City[J]. Rural Eco-Environment, 2005, 21(4): 22-27.
- [13] WACKERNAGEL M, REES W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriola Island: New Society publishers, 1996.
- [14] 张志强,徐中民,陈国栋.生态足迹的概念及计算模型[J].生态经济,2000,(10):8-10.  
Zhang Zhiqiang, Xu Zhongmin, Cheng Guodong. The concept of ecological footprints and computer models[J]. Ecological Economy, 2000, (10): 8-10.
- [15] 李翔,舒俭民.改良生态足迹法在珠海的应用[J].环境科学研究,2007,20(3):148-151  
LI Xiang, SHU Jianmin. Study on the application in Zhuhai with the improved eco-footprint method[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(3): 148-151.
- [16] 周陶,范轶玲,等.基于资源产出法的五通桥区生态足迹动态分析[J].人民黄河,2009,31(7):6-8.  
ZHOU Tao, FAN Yiling. Based on the resources of the ecological footprint of WuTongQiao District output method of dynamic analysis[J]. Yellow River, 2009, 31(7): 6-8.

## The calculations and analysis of regional ecological water resources carrying capacity cabased on Ecological Footprint Analysis Method

CHEN Dongwei, CHEN Xiaohong, KONG Lan

Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

**Abstract:** This paper studies the water consumption in human society that influences the natural ecological environment and the quantitative method and quantitative indicators of the influence. Introduced to the system of regional water resources carrying capacity, the ecological footprint method is used to build Zhuhai calculation model of the ecological carrying capacity of water resources, calculate and analyze the the water supply ecological carrying capacity of regional economy and social development, and assess the gains-losses and sensitivity of the region ecological carrying capacity. It is overall showed that there is a loss of water resource systems, a loss rate of 37% and water resources ecological carrying present overload in Zhuhai city. Because of the process of flowing population growth, regional water resources are carrying more pressure. Our results also show that the ecological footprint model applied to the water resources carrying capacity in the region has high credibility and applicability of the local scale.

**Key words:** ecological footprint; water resources carrying capacity; sensitivity