

## 基于生态足迹理论的厦门市水资源可持续利用分析

薛若晗 (闽江学院海洋学院, 福建福州 350108)

**摘要** 采用生态足迹法计算 2012—2019 年厦门市水资源生态足迹和生态承载力, 并引入万元 GDP 水资源生态足迹、生态压力指数和可持续指数对厦门市水资源可持续利用状态进行分析。结果表明, 2012—2019 年厦门市人均水资源生态足迹变化不大, 平均值 0.272 hm<sup>2</sup>; 人均水资源生态承载力总体下降, 从 0.548 hm<sup>2</sup> 减少到 0.346 hm<sup>2</sup>, 下降了 36.9%; 水资源在 2017 和 2018 年出现生态赤字; 万元 GDP 水资源生态足迹明显降低, 水资源利用总体上处于弱可持续状态。

**关键词** 水资源生态足迹; 生态承载力; 可持续利用; 厦门市

中图分类号 TV 213.4 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)19-0060-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.19.015



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Analysis of the Water Resources Sustainable Utilization in Xiamen City Based on Ecological Footprint Theory

XUE Ruo-han (Ocean College, Minjiang University, Fuzhou, Fujian 350108)

**Abstract** The water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Xiamen from 2012 to 2019 were calculated by using ecological footprint method. The water resources ecological footprint per ten-thousand-yuan GDP, ecological pressure index and sustainable index were introduced to analyze the sustainable utilization of water resources in Xiamen. The results showed that the per capita water resources ecological footprint did not change significantly from 2012 to 2019, with an average value of 0.272 hm<sup>2</sup>. The per capita water resources carrying capacity decreased from 0.548 hm<sup>2</sup> to 0.346 hm<sup>2</sup>, a decrease of 36.9%. There was an ecological deficit in water resources in Xiamen in 2017 and 2018. The water resources ecological footprint per ten-thousand-yuan GDP decreased significantly. The utilization of water resources in Xiamen was in a weak sustainable state.

**Key words** Water resources ecological footprint; Ecological carrying capacity; Sustainable utilization; Xiamen City

要保障区域生态安全, 水资源的可持续利用是其中重要的环节。进行水资源利用评价的方法很多, 目前国际上较常用的是生态足迹法<sup>[1-3]</sup>。生态足迹理论从 1992 年被提出以来, 以其简单便捷性而得到了广泛使用<sup>[4]</sup>。生态足迹是衡量区域可持续发展的重要指标之一, 它将生态资源占用转化成土地面积, 继而综合核算区域自然资产<sup>[5]</sup>。但传统生态足迹模型在对水域用地进行计算时, 只考虑水域的生物生产, 通常只计算渔业生产, 一般未将水资源纳入计算结果中<sup>[6]</sup>。为了克服此缺陷, 黄林楠等<sup>[7]</sup>基于生态足迹理论, 创建水资源用地账户, 构建计算模型, 将水资源消耗量折算成对应的生产用地面积, 计算水资源生态足迹。近年来, 国内外众多学者从模型改进、测度分析和模拟预测等方面对水资源生态足迹的研究方法进行不断地丰富与拓展, 并从各自的角度对各种区域尺度的水资源生态足迹动态特征及其利用的可持续性进行了定量分析和评价, 如李兴正等<sup>[8]</sup>从国家的尺度上, 分析了水资源的供需关系; 沈玉洁等<sup>[9-11]</sup>从省域的尺度上, 分别对河南省、吉林省和黑龙江省的水资源可持续利用进行了分析; 李睿佳等<sup>[12]</sup>和路瑞等<sup>[3]</sup>从流域的尺度上, 先后进行了黄河流域的水资源生态赤字的动态研究和水资源利用的评价; 赵茂崧等<sup>[13-15]</sup>分别从城市群的尺度和单个城市的尺度上, 对川东北城市群、青岛和宿迁的水资源利用状态进行了研究。

笔者选取厦门市为研究区域, 借鉴水资源生态足迹的相关研究和分析方法, 依据厦门市 2012—2019 年水资源相关数据, 采用水资源生态足迹模型, 并选用水资源生态可持续

性评价的相关指数, 分析厦门市水资源生态足迹及生态承载力变化趋势, 评价水资源利用的可持续性, 以期为保障区域生态安全给予理论支持。

## 1 资料与方法

**1.1 研究区域概况** 厦门市是福建省的副省级城市、经济特区, 位于福建东南端。2019 年底厦门市常住人口 429 万, 土地总面积 1 700.61 km<sup>2</sup>, 当年实现生产总值 (GDP) 5 995.04 亿元。厦门市属亚热带海洋性气候, 多年平均降水量 1 513.3 mm, 植被茂盛, 风景宜人, 2019 年获得“国家生态园林城市”称号<sup>[16]</sup>。

**1.2 数据来源** 厦门市多年来各方面统计资料和数据比较完善, 为该研究提供数据基础。该研究所涉及的厦门市人口、GDP 数据来自《厦门经济特区年鉴 (2013—2020 年)》<sup>[16]</sup> 和《福建统计年鉴 (2013—2020 年)》<sup>[17]</sup>, 厦门市总用水量、水资源总量和产水模数等数据来自《厦门水资源公报 (2013—2020 年)》<sup>[18]</sup>。

## 1.3 研究方法

**1.3.1 水资源生态足迹模型。** 计算水资源生态足迹是将某一地区水资源的消耗量转换为对应的生产用地面积, 加入均衡因子进行修正, 得出全球范围内可比的用地面积数值, 用以度量某区域的人口经济对水资源的需求状况<sup>[14, 19]</sup>。计算公式如下:

$$EF_w = N \times ef_w = N \times \gamma_w \times \frac{W}{P_w} \quad (1)$$

式中,  $EF_w$  为区域水资源总生态足迹 (hm<sup>2</sup>);  $N$  为区域人口数;  $ef_w$  为人均水资源生态足迹 (hm<sup>2</sup>);  $\gamma_w$  为水资源的全球均衡因子, 该研究采用 2002 年世界自然基金会 (WWF) 的参数值 5.19;  $W$  为消耗的水资源量 (m<sup>3</sup>);  $P_w$  为全球多年平均产

水模数( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ),参考已有研究,取值 $3\ 140\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ [7,13-14]。

**1.3.2 水资源生态承载力模型。**水资源生态承载力是指某时间段内某地区能提供的水资源可持续利用能力的上限。为了生态环境可持续发展,区域水资源的开发利用通常是将60%的水用于维持生态环境,40%用于满足人类社会发需求[13,19-21]。计算公式如下:

$$EC_w = N \times ec_w = 0.4 \times \Psi \times \gamma_w \times \frac{Q}{P_w} \quad (2)$$

式中, $EC_w$ 为区域水资源总生态承载力( $\text{hm}^2$ ); $ec_w$ 为人均水资源生态承载力( $\text{hm}^2$ ); $\Psi$ 为区域水资源的产量因子,是区域产水模数与全球产水模数的比值; $Q$ 为水资源总量( $\text{m}^3$ ) [13,20-21]。

**1.3.3 水资源生态盈亏。**区域水资源生态盈亏( $ED_w$ )计算公式为:

$$ED_w = EC_w - EF_w \quad (3)$$

若 $ED_w < 0$ ,表示区域水资源出现亏损,其利用是不可持续的;若 $ED_w > 0$ ,则水资源处于可持续利用的状态;若 $ED_w = 0$ ,表示水资源的利用到达临界状态[13,21-22]。

**1.3.4 万元GDP水资源生态足迹。**万元GDP水资源生态足迹( $G_w$ )计算公式为:

$$G_w = \frac{EF_w}{GDP} \quad (4)$$

计算结果数值越低,表示区域水资源利用效率越高;计算结果数值越高,表示利用效率越低[13,21-22]。

**1.3.5 水资源生态压力指数。**水资源生态压力指数( $EP_w$ )为水资源的生态需求占供给的比例[13,21-22]。计算公式如下:

$$EP_w = \frac{EF_w}{EC_w} \quad (5)$$

若 $EP_w = 1$ ,则区域水资源生态需求与供给相对趋于平衡;若 $0 < EP_w < 1$ ,表示区域水资源利用处于生态安全状态;若 $EP_w > 1$ ,表示区域水资源利用处于生态不安全状态,数值大,则不安全程度高[13,21-22]。

**1.3.6 水资源可持续指数。**水资源可持续指数( $SI_w$ )是指某个区域在某段时间内水资源的可持续供给能满足区域发展对水资源需求的程度,即区域水资源利用的可持续状态[11,14]。计算公式如下:

$$SI_w = \frac{EC_w}{EC_w + EF_w} \quad (6)$$

根据已有研究, $SI_w \geq 0.80$ ,表示水资源处于强可持续利用状态; $0.65 \leq SI_w < 0.80$ ,表示处于中可持续利用状态; $0.50 \leq SI_w < 0.65$ ,表示处于弱可持续利用状态; $0.35 \leq SI_w < 0.50$ ,表示处于弱不可持续利用状态; $0.20 \leq SI_w < 0.35$ ,表示处于中不可持续利用状态; $0 < SI_w < 0.20$ ,表示处于强不可持续利用状态[14]。

## 2 结果与分析

**2.1 水资源产量因子** 根据基础数据计算得到2012—2019年厦门市水资源产量因子分别为2.481、2.713、1.990、2.602、4.710、1.726、1.764和2.051。

**2.2 水资源生态足迹** 将基础数据代入公式(1)、(2)、(3),得到2012—2019年厦门市人均水资源生态足迹和生态承载力,进而得出人均生态盈余,详见表1。人均水资源生态足迹根据用水类型可分为生产用水、生活用水、生态用水3类,分别计算出这3类用水足迹占比,详见图1。2012—2019年厦门市降水量和人均水资源生态承载力对比见图2。

表1 2012—2019年厦门市人均水资源生态足迹、生态承载力和生态盈余

Table 1 Per capita water resources ecological footprint, ecological carrying capacity and ecological surplus in Xiamen City from 2012 to 2019  $\text{hm}^2$

年份 Year	人均生态足迹 Per capita ecological footprint	人均生态承载力 Per capita ecological carrying capacity	人均生态盈余 Per capita ecological surplus
2012	0.271	0.548	0.277
2013	0.271	0.645	0.374
2014	0.275	0.339	0.065
2015	0.270	0.619	0.349
2016	0.269	1.996	1.727
2017	0.289	0.262	-0.027
2018	0.270	0.267	-0.003
2019	0.263	0.346	0.083

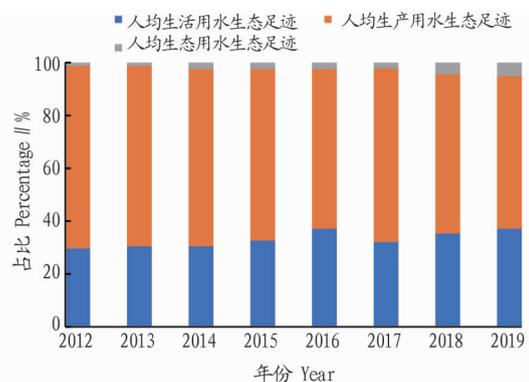


图1 2012—2019年厦门市人均水资源生态足迹构成

Fig. 1 Component percentage of per capita water resources ecological footprint in Xiamen City from 2012 to 2019

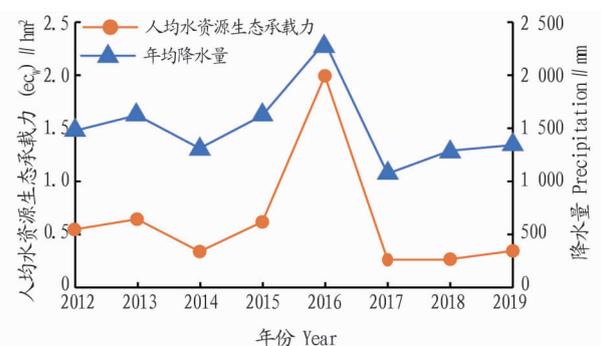


图2 2012—2019年厦门市降水量和人均水资源生态承载力

Fig. 2 Annual average precipitation and per capita water resources ecological carrying capacity in Xiamen City from 2012 to 2019

由表1可知,2012—2019年厦门市人均水资源生态足迹基本保持平稳,平均为 $0.272\ \text{hm}^2$ ,各年变动幅度不大,最大

值是2017年的 $0.289 \text{ hm}^2$ ,最小值是2019年的 $0.263 \text{ hm}^2$ 。从图1可以看出,人均水资源生态足迹各组成部分的比重在2012—2019年虽有变化,但生产用水人均足迹数值和占比始终最大。生产用水人均足迹从2012年的 $0.187 \text{ hm}^2$ 先降低至2016年的 $0.163 \text{ hm}^2$ ,然后2017年反弹上涨至 $0.190 \text{ hm}^2$ ,而后又逐年下降至2019年的 $0.152 \text{ hm}^2$ ,总体趋势下降;其在人均水资源生态足迹中的占比也有所下降,从2012年的69.03%下降至2019年的57.75%。生活用水人均足迹从2012年的 $0.081 \text{ hm}^2$ 小幅升高至2016年的 $0.100 \text{ hm}^2$ ,而后下降至2019年的 $0.098 \text{ hm}^2$ ,总体趋势上升;其在人均水资源生态足迹中的占比也随之增加,从2012年的29.73%增长至2019年的37.23%。生态用水人均足迹从2012年的 $0.003 \text{ hm}^2$ 增长至2019年的 $0.013 \text{ hm}^2$ ;其在人均水资源生态足迹中所占的比例较小但增幅明显,从2012年的1.25%上升至2019年的5.02%。

从图2可以看出,2012—2019年厦门市人均水资源生态承载力除了2016年突然大幅上升之外,总体呈下降趋势,从2012年的 $0.548 \text{ hm}^2$ 下降至2019年的 $0.346 \text{ hm}^2$ ,降幅为36.9%。2016年的降水量最多,为2314.0 mm,较常年值多52.9%,同年的人均水资源生态承载力也达到8年间最高值( $1.996 \text{ hm}^2$ );而2017和2018年降水量分别为1073.7和1290.2 mm,分别比常年值少29.0%和14.7%,这2年的人均水资源生态承载力是8年间较小的。这说明厦门市水资源生态承载力的变动主要是受到各年降水量不稳定的影响。

2012—2019年厦门市人均水资源生态盈亏与人均水资源生态承载力的变动趋势类似。其中,2012、2013、2014、2015、2016、2019年水资源出现生态盈余,尤其是2016年,生态盈余达到最高,为 $1.727 \text{ hm}^2$ ;2014和2019年的生态盈余幅度较小;而2017、2018年水资源出现生态赤字,但幅度不大,分别为 $0.027$ 和 $0.003 \text{ hm}^2$ 。

**2.3 万元GDP水资源生态足迹分析** 根据公式(4)计算出厦门市万元GDP水资源生态足迹,见图3。从图3可以看出,2012—2019年厦门市万元GDP水资源生态足迹大幅减少,从 $0.035 \text{ hm}^2$ 下降至 $0.019 \text{ hm}^2$ ,降幅达45.71%。可见,随着厦门市经济发展和科技进步,水资源利用效率在明显提高,经济社会日益趋向高质量发展。

**2.4 水资源生态压力指数分析** 根据公式(5)计算出厦门市水资源生态压力指数变化情况,见图4。从图4可以看出,2012—2019年厦门市水资源生态压力指数反复波动,波动较大。2016年的指数最低,为0.135,2017和2018年的指数都大于1,最大值是2017年的1.103,其余年份的指数都在0~1。这说明厦门市水资源生态抗压能力并不稳定,存在很大的波动性,尤其2017和2018年的水资源消费量大于供给能力,处于生态不安全状态。

**2.5 水资源可持续指数分析** 根据公式(6)计算出厦门市水资源可持续指数变化情况,见图5。由图5可知,2012—2019年厦门市水资源可持续指数最大值是2016年的0.881,水资源为强可持续利用状态;较小的是2017年的0.476和

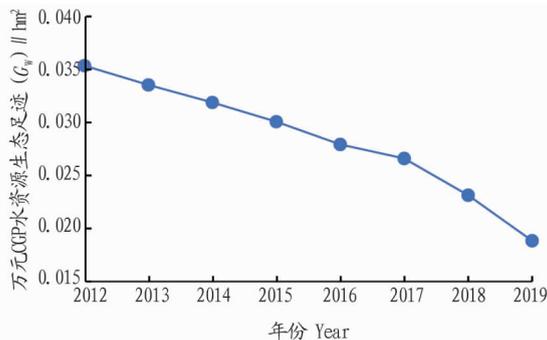


图3 2012—2019年厦门市万元GDP水资源生态足迹

Fig. 3 Water resources ecological footprint per ten-thousand-yuan GDP in Xiamen City from 2012 to 2019

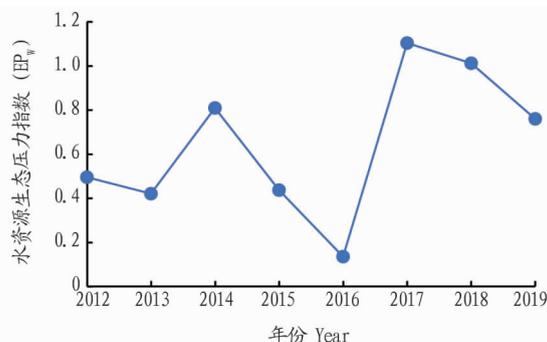


图4 2012—2019年厦门市水资源生态压力指数

Fig. 4 Ecological pressure index of water resources in Xiamen City from 2012 to 2019

2018年的0.497,水资源为弱不可持续利用状态;2014和2019年水资源为弱可持续利用状态;2012、2013和2015年水资源为中可持续利用状态;这8年的平均值为0.631,总体来说水资源为弱可持续利用状态。

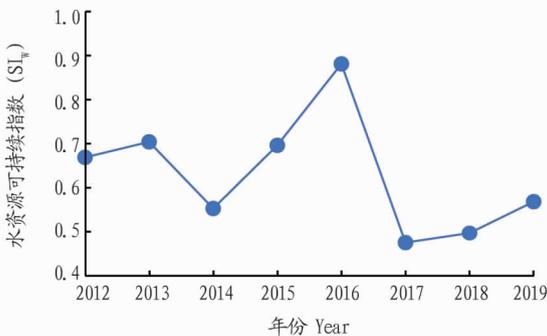


图5 2012—2019年厦门市水资源可持续指数

Fig. 5 Sustainable index of water resources in Xiamen City from 2012 to 2019

### 3 结论与建议

#### 3.1 结论

(1)在研究期间,厦门市人均水资源生态足迹变动幅度不大。从各类用水的生态足迹的数值和占比的排序来看,生产用水足迹的数值和占比在研究期间总体下降,但在3种用水足迹中始终保持领先,这表明厦门市水资源消费是以生产用水为主;位居第二的是生活用水足迹,其数值和占比都小幅上升;处于最末的是生态用水足迹,数值和占比也呈上升

趋势且增幅明显,但由于其数值和占比都较小,因此增加值不大。由此可见,近年来厦门市在提升 GDP 的同时推行生产节水,略有成效;人民生活水平的提高促使生态足迹的小幅增加,这是当前在保障水资源可持续利用时需要重点关注的问题;而生态用水足迹占比的增加则表明当地环保意识日益加强和生态保护行为的增加。

(2) 研究期间厦门市人均水资源生态承载力明显受到降水量的影响,数值起伏较大,引起人均水资源生态盈亏出现相同趋势的变动。在 2017 和 2018 年水资源出现了数值较小的生态赤字,其余年份都存在生态盈余。厦门市地处水资源充沛的福建省,在研究的 8 年里,其水资源却不能常年稳定满足其需要,从长远角度看,这将会制约区域发展。因此,作为福建省的经济发达城市,厦门市的水资源利用情况存在安全隐患。

(3) 研究期间厦门市万元 GDP 水资源生态足迹明显降低,其水资源利用效率有显著提升。水资源生态压力指数只有 2017 和 2018 年超过 1,其余年份都小于 1,水资源生态压力总体来说处于安全范围内,但水资源供需矛盾已经开始显现。这 8 年间的水资源利用状况:有 1 年为强可持续利用;有 3 年为中可持续利用;有 2 年为弱可持续利用;其余的 2 年为弱不可持续利用;就研究期间平均值而言,为弱可持续利用状态。厦门市的水资源利用与区域发展开始出现不协调。

该研究的不足之处主要在于未考虑各产业污水处理用水量对生态足迹的影响,这可作为下一步进行专项研究的方向。

### 3.2 建议

(1) 加强水资源的保护和管理。厦门市当前施行的河湖长制在保护水资源方面取得了一定成效,应继续深化推行,推动和完善小流域综合治理、生态河道建设、溪流养护社会化管养长效机制等。同时也要继续推动修改后的《厦门经济特区水资源条例》顺利实施。

(2) 拓展水资源的来源。在当前形势下,厦门市可以考虑采用以下形式增加水资源供给:首先,加快调水和水源工程建设,加快建设高颜值生态花园之城部署,推进闽西南协同发展区水资源合作,实现水资源联合调度、联合保障,缓解极端天气年份造成的水资源生态承载压力,确保各年间水资源总量的稳定性,以增加水资源生态承载力。其次,提高水资源利用效率,发展节水农业,限制高耗水工业,发展循环经济,采取节水措施继续减少生产用水。再次,强化雨水收集和利用系统,完善污水排放制度,加大督查力度,提高污水净化技术,实现污水处理后再利用。最后,充分利用厦门市滨海的优势,逐渐增大海水代用量的比例,以增加水源。

(3) 倡导节约用水,树立全社会节水观念。厦门市的居民生活用水逐年持续增长,有鉴于此,厦门市应继续增加宣传力度,完善阶梯水价制度,倡导循环使用生活用水。同时也应加强节水技术和用具在居民和生产企业中的推广。在生产、生活、生态方方面面做到保护、节约水资源,构建节水型社会,最终实现水资源的可持续利用。

### 参考文献

- [1] VANHAM D, BIDOGLIO G. A review on the indicator water footprint for the EU28[J]. *Ecological indicators*, 2013, 26: 61-75.
- [2] YU Y, HUBACEK K, FENG K S, et al. Assessing regional and global water footprints for the UK[J]. *Ecological economics*, 2010, 69(5): 1140-1147.
- [3] 路瑞, 赵臻鑫. 基于水资源生态足迹的黄河流域水资源利用评价[J]. *人民黄河*, 2020, 42(11): 48-52, 134.
- [4] WACKERNAGEL M, REES W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective[J]. *Ecological economics*, 1997, 20(1): 3-24.
- [5] 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.
- [6] 李兴正, 林爱文, 杨倩, 等. 基于生态足迹的中国水资源生态承载力供需平衡分析[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(20): 5008-5014.
- [7] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [8] 李兴正, 林爱文, 杨倩, 等. 基于生态足迹的中国水资源生态承载力供需平衡分析[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(20): 5008-5014.
- [9] 沈玉洁. 基于生态足迹法的河南省水资源可持续利用分析[J]. *水资源开发与管理*, 2020, 18(6): 47-52.
- [10] 朱光磊, 赵春子, 朱卫红, 等. 基于生态足迹模型的吉林省水资源可持续利用评价[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(9): 131-143.
- [11] 王思聪, 梁契宗, 陈思元, 等. 基于生态足迹法的黑龙江省水资源可持续利用分析[J]. *黑龙江大学学报*, 2020, 11(2): 29-37.
- [12] 李睿佳, 宋厚娟, 赵冰清, 等. 黄河中游(禹门口-汾河入黄口)区域水资源生态赤字的动态研究[J]. *山西农业科学*, 2017, 45(9): 1507-1512.
- [13] 赵茂斌, 徐瑶, 李卫朋, 等. 川东北城市群水资源生态足迹时空变化分析[J]. *人民长江*, 2020, 51(6): 73-78, 106.
- [14] 兰简琪, 谢世友. 基于生态足迹理论的青岛市水资源可持续分析[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 45(10): 55-62.
- [15] 侯斌晨, 谢世友. 中小城市水资源生态足迹与生态承载力时空分析: 以宿迁市为例[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(12): 134-141.
- [16] 厦门市统计局, 国家统计局厦门调查队. 厦门经济特区年鉴—2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [17] 福建省统计局, 国家统计局福建调查总队. 福建统计年鉴—2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [18] 厦门市水利局. 厦门市 2019 年水资源公报[EB/OL]. (2020-07-03) [2020-02-07]. [http://sl.xm.gov.cn/zfxgk/zfxgkml/tjxx/202007/t20200703\\_2459987.html](http://sl.xm.gov.cn/zfxgk/zfxgkml/tjxx/202007/t20200703_2459987.html).
- [19] Global Footprint Network. Accounting for demand and supply of the Biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework[EB/OL]. (2012-02-20) [2021-02-07]. [http://www.footprintnetwork.org/images/uploads/Methods\\_Paper\\_Draft\\_2011.pdf](http://www.footprintnetwork.org/images/uploads/Methods_Paper_Draft_2011.pdf).
- [20] 张岳. 中国水资源与可持续发展[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2000.
- [21] 谭秀娟, 郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3559-3568.
- [22] 王先庆, 李博, 李进, 等. 基于生态足迹模型的水资源可持续利用分析[J]. *人民长江*, 2019, 50(5): 107-112.