

文章编号: 1007-7588(2013)01-0157-08

# 桂林市水资源可持续利用定量测度与动态分析

邓晓军<sup>1,2</sup>, 翟禄新<sup>1</sup>, 李 艺<sup>1</sup>

(1. 广西师范大学环境与资源学院, 桂林 541004; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

**摘要:**为了定量评价水资源可持续利用的状态和程度,在阐述水资源足迹内涵的基础上,通过构建实体水消费、产品水消耗和生态水需求等账户对2000年-2009年桂林市的水资源利用进行定量测度,并根据水资源匮乏度和万元GDP水资源足迹等评价指标对其进行动态分析。结果表明:10年来,桂林市的水资源足迹总体呈上升趋势,水资源的利用越来越接近不可持续的临界状态;实体水消费在水资源足迹中占的比重最大,而农业灌溉用水又占据了实体水消费的80%以上,今后应进一步调整产业结构,减少传统农业尤其是猪肉、牛肉等水资源密集型产品的生产,大力发展电子信息产业和旅游业;尽管万元GDP水资源足迹逐步下降,但与国内发达地区相比还存在很大差距,水资源的利用效率和效益还应进一步提高。

**关键词:**水资源;可持续利用;水资源足迹;水资源承载力;桂林

## 1 引言

水是生命之源,是人类赖以生存和发展不可缺少的一种宝贵资源,又是自然环境的重要组成部分,是可持续发展的基础条件。水资源的可持续规划与管理主要处理水资源开发利用与社会经济发展、生态环境保护间的关系,需要研究人口、经济和环境是否处在水资源系统的承载能力范围之内<sup>[1]</sup>。随着人口的不断增长和社会经济的迅速发展,水资源的需求量不断增加,水环境又不断恶化,水资源短缺已经成为全球性问题。因此,有关水资源利用的定量测度方法是当前水资源可持续规划与管理研究的前沿和热点。

生态足迹是近年来发展的一种定量测度自然资源可持续利用的方法,其概念是由加拿大生态经济学家 William Rees 于 1992 年首先提出的<sup>[2]</sup>,随后他和学生 Wackernagel 博士对生态足迹的计算方法加以完善<sup>[3]</sup>。由于生态足迹具有概念形象、可操作性和普适性强等优点,引起了国内外学术界的广泛关注。2000 年以来,杨开忠、徐中民等学者将生态足迹方法引入国内并开展实证研究,取得了一定的研究成果<sup>[4-6]</sup>。然而,生态足迹并没有把生态系统提

供自然资源和消纳废弃物的功能描述完全。尽管有些学者将水资源纳入了生态足迹的核算,但以往的研究多集中在国家和省级层面上的水资源利用静态分析,且往往对生态水需求考虑不足而不能全面评价区域的水资源可持续利用。为此,本文以桂林市为例,在充分考虑生态水需求的基础上,通过定量测度其水资源足迹来分析其水资源可持续利用变化过程,由此为水资源的可持续规划与管理提供决策依据。

针对传统生态足迹方法的不足,一些学者将其应用于水资源领域,目前主要有两个研究方向:①将水资源相关消耗折算成水域面积,即水生态足迹(Water Ecological Footprint),如黄林楠等在生态足迹模型中建立水资源账户,并将其分为生活用水、生产用水和生态需水足迹三个二级账户<sup>[7]</sup>;②将水资源相关消耗折算成水资源量,即水足迹(Water Footprint),如 Hoekstra 在虚拟水(Virtual Water)的基础上提出任何已知人口(某个人、一个城市、一个区域或全球)的水足迹是生产这些人口所消费的所有资源所需要的水资源数量<sup>[8-9]</sup>。两种途径基本思路一致,但计算方法和表达方式不同<sup>[10]</sup>。

收稿日期:2012-06-01;修订日期:2012-11-21

基金项目:国家自然科学基金(编号:41261005);广西文科中心一般项目(编号:YB2012017);广西师范大学青年基金。

作者简介:邓晓军,男,江西吉安人,博士生,讲师,主要从事水资源与水环境方面的研究。E-mail: mijiun45@163.com

除了实体水消费(entity water consumption),人类的生存与发展还必须消耗各种产品(如粮食、肉类等食品),因而人类的每一项最终消费的量都可以换算成相应的水资源消耗量,即产品水消耗(Production Water Consumption)。同时,人类的生存环境是一个巨型的生态系统,而维持生态系统健康也需要一定数量的水资源,即生态需水(Ecological Water Requirement)。类似于生态足迹,水资源足迹(Water Resources Footprint)是以人类的实体水消费、产品水消耗和生态系统的生态需水为出发点,通过比较支持人类生存发展和维持生态系统健康的水量与自然所能提供的为人类所利用的水资源量(即可更新水资源量)之间的差距,定量测度某一国家或地区目前水资源可持续利用的状态。如果水资源的需求小于供给,则认为经济社会的发展在水资源系统承受范围之内;反之,如果需求大于供给,则认为水资源的利用处于不可持续状态。

## 2 研究方法

### 2.1 水资源足迹的计算

水资源足迹可以定义为:在一定技术条件下,支持某一物质消费水平下某一人口的生存发展以及维持该区域生态系统的健康所必需的水资源量。其计算公式为:

$$WRF = WRF_{ewc} + WRF_{pwc} + WRF_{ewr} = N \cdot WRF_{pc} \quad (1)$$

式中  $WRF$  为水资源足迹( $m^3/a$ );  $WRF_{ewc}$  为人类的实体水消费足迹( $m^3/a$ );  $WRF_{pwc}$  为人类的产品水消耗足迹( $m^3/a$ );  $WRF_{ewr}$  为生态水需求足迹( $m^3/a$ );  $N$  为人口总量(人);  $WRF_{pc}$  为人均水资源足迹( $m^3/a$ )。

### 2.2 水资源足迹的帐户类型

计算水资源足迹主要考虑3个帐户类型:

(1)实体水消费:主要包括生活用水、农业用水和工业用水等,可直接计算。其中生活用水主要包括城乡居民生活用水和公共用水(含建筑业用水、第三产业用水和流动人口用水),农业用水包括农田灌溉用水和林业用水。工业生产需要一定量水的参与,主要用于冷凝、稀释和溶剂等作用。一方面,在水的利用过程中通过不同途径进行消耗;另一方面,又以废水的形式排入自然界,参与正常水循环。所以工业用水的计算十分复杂,通常

都是通过万元工业产值用水量来估算。

(2)产品水消耗:主要包括农作物耗水量、动物产品耗水量和工业产品耗水量。任何产品的生产过程都需要消耗水资源,而且绝大部分产品本身也含有水,因此在计算产品水消耗量时必须考虑这两个方面的水。对于农作物和工业产品而言,其本身含有的水相对于其生产过程中所消耗的水来说只是很小的一部分,在此可以忽略。动物产品耗水量可分成动物产品本身含水量、生长用水和宰杀加工用水三部分。

(3)生态水需求:是指维持生态系统健康所需要的水资源量,也就是人们在开发利用水资源时必须保证生态系统的基本生存和持续发展所需的水量,可分为天然生态系统保育需水量与人工生态建设需水量两部分。主要包括天然的湖泊与河道用水,人工的公园湖泊用水、风景观赏河道用水、城市绿化与园林建设用水以及污水稀释用水等。可综合考虑无植物水面蒸发量和城市园林绿化用水定额来计算。

### 2.3 水资源承载力的计算

一个国家或地区的水资源开发利用率若超过30%~40%,可能引起生态环境的恶化<sup>[1]</sup>,因此在水资源承载力的计算中必须至少扣除60%用于维持生态系统健康。水资源承载力计算公式为:

$$WCC = 0.4 \cdot WRA = N \cdot WCC_{pc} \quad (2)$$

式中  $WCC$  为水资源承载力( $m^3/a$ );  $WRA$  为可利用水资源量( $m^3/a$ );  $N$  为人口总量(人);  $WCC_{pc}$  为人均水资源承载力( $m^3/a$ )。

### 2.4 水资源可持续利用评价指标

2.4.1 水资源压力程度指标 用水资源匮乏度  $WRS$  来表达社会经济发展对水资源的压力程度,计算公式如下:

$$WRS = WRF/WCC \quad (3)$$

当  $WRS > 1$  时,说明已经超出水资源承载力,而且  $WRS$  值越增加,超载越严重;当  $WRS = 1$  时,说明处于水资源承载力临界状态;当  $0 < WRS < 1$  时,说明在水资源承载力范围之内,且随着  $WRS$  值减小,可以再增加的承载能力就越大。

2.4.2 水资源利用效益指标 当前,水资源短缺已

2013年1月

成为我国社会经济可持续发展面临的一个亟待解决的问题,而同时并存的水资源的粗放低效利用又加剧了水资源短缺的程度。因此,提高水资源的利用效率和效益是解决我国水资源短缺的重要出路。可以用水资源足迹与GDP的比值即万元GDP水资源足迹  $WRF_{gdp}$  来测度水资源的利用效益。

$$WRF_{gdp} = WRF/GDP \quad (4)$$

$WRF_{gdp}$  越大,表示水资源的利用效益越低,水资源可持续利用的程度越低;反之, $WRF_{gdp}$  越小,表示水资源的利用效益越高,水资源可持续利用的程度越高。

### 3 桂林市水资源利用定量测度

#### 3.1 实体水消费足迹

实体水消费足迹由农业、工业和生活实体用水等三个核算账户组成,其值为三者之和,其中农业实体用水包括农业灌溉用水和林业用水,生活实体用水包括城乡居民生活用水和公共用水。计算所需相关数据可从《2000年-2009年桂林市水资源公报》获得,结果如表1所示。

#### 3.2 产品水消耗足迹

据调查,桂林市的主要产品可分为农作物产品、动物产品和工业产品三类,其中粮食、油料、甘蔗、蔬菜、水果、茶叶、麻类、罗汉果、油茶籽和油桐籽等农作物产品的水消耗在实体水消费中的农田灌溉用水和林业用水已经计算,同时工业产品的用

水也包括在实体水消费中的工业用水中。为了避免重复计算,产品水消耗足迹账户主要计算猪肉、牛肉、羊肉、兔肉、奶类、禽肉、禽蛋、水产品、蚕茧和蜂蜜等动物产品的水消耗量。但动物产品的水消耗量计算十分复杂,故采用 Chapagain 和 Hoekstra 2004年有关中国动物虚拟水含量的计算结果<sup>[12]</sup>。蚕茧的单位耗水量一般为桑叶单位耗水量的17倍,由于缺乏桑叶的蒸发量计算数据,因此,采用茶叶的蒸发量进行估算。另外,兔肉和蜂蜜的单位耗水量分别采用山羊肉和奶酪的计算结果。各年的动物产品产量来自《2001年-2010年桂林经济社会统计年鉴》,其中2009年的计算结果如表2。

#### 3.3 生态水需求足迹

前面已经介绍在计算水资源承载力的时候必须扣除60%的水资源用来维持生态系统健康,所以这里的生态水需求足迹只需考虑城市绿化与园林建设用水以及污水稀释用水等。但值得注意的是,漓江既是一条城市景观河流又是一条山区雨源型河流,降雨年际年内的差异很大,枯水季节生态和景观缺水的问题十分突出。根据桂林漓江风景名胜区的总体规划和航道管理部门的多年实测资料,桂林水文站不同水位和流量时漓江将呈现不同的景观,如表3。而桂林水文站实测流量大于45m<sup>3</sup>/s的月保证率仅为33%,日保证率仅为60%;大于80m<sup>3</sup>/s的月保证率仅为11%,日保证率仅为40%。因此,为了满足漓江旅游的需要,必须对其进行人

表1 2000年-2009年桂林市的实体水消费足迹

核算账户	年份	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000
农业实体用水		33.67	35.35	45.15	45.73	47.6	45.75	44.38	44.74	43.85	38.33
工业实体用水		4.47	5.25	5.03	4.4	5.01	5.06	6.93	5.36	4.95	4.47
生活实体用水		3.95	2.87	2.68	2.61	2.53	2.56	2.54	2.43	2.53	2.32
实体水消费足迹		42.09	43.47	52.86	52.74	55.14	53.37	53.85	52.53	51.33	45.12

表2 2009年桂林市城乡居民主要消费产品水消耗量

	奶类	猪肉	牛肉	羊肉	兔肉	禽肉	禽蛋	水产品	蚕茧	蜂蜜	合计
单位耗水量(m <sup>3</sup> /kg)	1.000	3.946	12.560	5.202	3.994	3.652	3.550	5.000	6.834	3.457	—
产量(亿kg)	0.026	2.981	0.145	0.026	0.009	1.550	0.435	0.859	0.015	0.005	—
产品水消耗(亿m <sup>3</sup> )	0.026	11.762	1.817	0.136	0.037	5.659	1.543	4.295	0.105	0.017	25.40

表3 桂林水文站不同水位时的漓江景观特点

Table 3 Characteristics of Lijiang river landscape at different water levels in Guilin hydrological station

水位 (m)	流量 (m <sup>3</sup> /s)	漓江景观特点
140.784	10	桂林城区——磨盘山段出现大面积河床裸露
140.969	30	最核心景观兴坪段在枯水期出现倒影
141.086	45	出现宽浅平静的水面,景观特色比较明显
141.123	50	桂林城区——阳朔段的大多数景观出现倒影
141.321	80	桂林城区——阳朔段的景观常年出现倒影

工补水。2004年喻泽斌<sup>[13]</sup>根据漓江水位与河流生态系统的关系以及人们对漓江景观生态的追求,计算了5种类型的漓江景观需水量。结果表明,桂林水文站的流量为30m<sup>3</sup>、45m<sup>3</sup>、55m<sup>3</sup>、70m<sup>3</sup>和80m<sup>3</sup>/s时,为保证漓江的旅游景观,必须分别对其人工补水1.01亿m<sup>3</sup>、2.49亿m<sup>3</sup>、3.42亿m<sup>3</sup>、5.87亿m<sup>3</sup>和7.64亿m<sup>3</sup>。根据已经实施的青狮潭水库,思安江水库以及斧子口、小溶江和川江三座水库三期漓江补水工程的实际情况,可将近10年来的漓江补水需求量依次等量分成五个等级,分别与之对应进行估算。

### 3.4 水资源的供需及其评价指标

可从桂林市历年的统计年鉴和水资源公报提取人口、GDP和水资源总量等数据,根据公式(1)–公式(4),计算出2000年–2009年桂林市的水资源足迹、人均水资源足迹、水资源承载力、人均水资源承载力、水资源匮乏度和万元GDP水资源足迹等内容,以此来定量测度水资源可持续利用的状况,结果如表4。

表4 2000年–2009年桂林市水资源的需求与供给

Table 4 The demand and supply of water resources in Guilin City from 2000 to 2009

年份	水资源需求(亿m <sup>3</sup> )					水资源供给(亿m <sup>3</sup> )		评价指标	
	$WRF_{enc}$	$WRF_{psc}$	$WRF_{ent}$	$WRF$	$WRF_{pc}(m^3)$	$WCC$	$WCC_{pc}(m^3)$	$WRS$	$WRF_{gdp}(m^3/万元)$
2009	42.09	25.40	10.77	78.26	1529.62	105.48	2061.65	0.74	832.07
2008	43.47	24.02	10.72	78.21	1538.61	131.88	2594.43	0.59	885.72
2007	52.86	28.85	9.04	90.75	1798.42	93.60	1854.86	0.97	1215.16
2006	52.74	27.84	8.47	89.05	1783.57	136.80	2739.89	0.65	1438.36
2005	55.14	25.97	5.39	86.50	1747.01	125.80	2540.85	0.69	1610.97
2004	53.37	19.26	4.97	77.60	1571.18	121.53	2460.68	0.64	1694.78
2003	53.85	18.41	4.04	76.30	1555.74	129.97	2649.87	0.59	1919.79
2002	52.53	17.70	4.14	74.37	1525.07	190.08	3898.12	0.39	2079.11
2001	51.33	17.10	3.40	71.83	1481.76	125.02	2579.17	0.57	2164.46
2000	45.12	16.07	2.47	63.66	1320.68	136.32	2828.16	0.47	2120.81

## 4 桂林市水资源利用动态分析

### 4.1 水资源足迹变化分析

10年来桂林市的水资源足迹变化态势如图1所示:2000年–2007年,水资源足迹逐步上升,从2000年的63.66亿m<sup>3</sup>一直攀升到2007年的峰值90.75亿m<sup>3</sup>,然后2008年开始突然下降到78.21亿m<sup>3</sup>,2009年略有回升。对比人均水资源足迹,2000年–2007年也是逐步上升,其中2004年–2005年一年内增加了175.83m<sup>3</sup>,这说明人口的增长和人们的社会经济活动对水资源的需求不断增加。而2007年–2008年降低了259.81m<sup>3</sup>,但一年之内人口只增加了3.7万人,说明相比人口增长产生对水资源消费量的增加,这期间出现的产业结构调整而导致的水资源消费量的减少要大得多。

### 4.2 与其他地区对比分析

如图2,将桂林市的人均水资源足迹与世界上其他国家和中国部分地区的人均水资源足迹<sup>[12,14–21]</sup>相比较可以发现,桂林市的人均水资源足迹比中国平均水平、西北四省以及郑州、大连和石家庄等很高,比重庆、北京和全球平均略高一些,比山东和上海低不少,同时远远低于美国、意大利、加拿大和法国等发达国家,也比希腊、马来西亚和泰国等旅游业发达的国家低很多。不难看出,水资源足迹除了跟国家或地区的经济发展水平有关,还跟旅游业的整体规模有关。之所以两者会相差这么大,主要是因为一些富裕国家,人们消费的产品和服务更多一些,这就直接导致水资源足迹的增加。但是也不

2013年1月

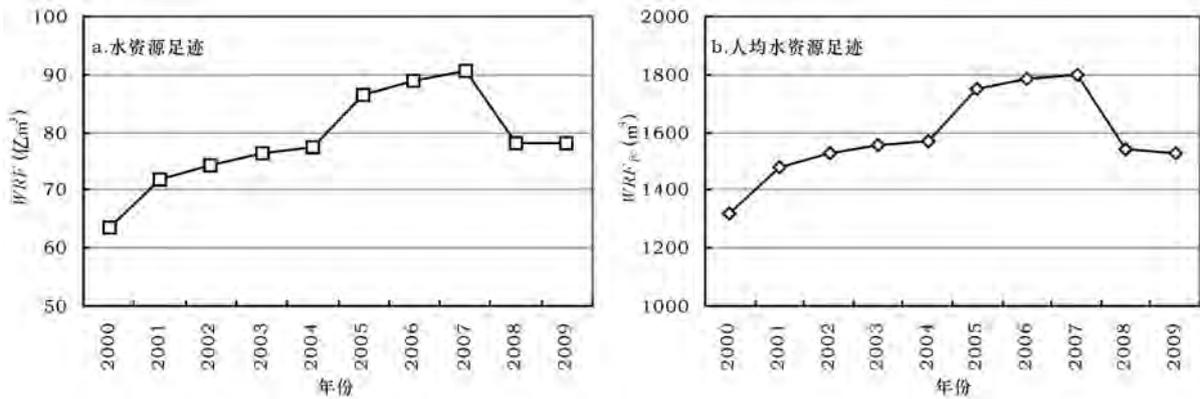


图1 桂林市2000年-2009年水资源足迹动态变化

Fig.1 The variation of total WRF in Guilin City from 2000 to 2009

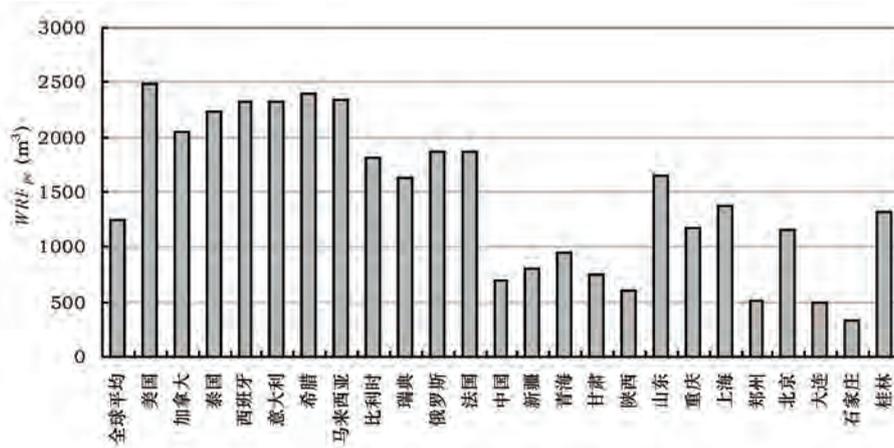


图2 一些国家和地区的人均水资源足迹比较

Fig.2 Comparison of WRF<sub>pc</sub> among several countries and districts

是单纯的消费数量决定人们对水的需求量,人们的消费结构不同也会产生很大的影响,因为一些产品如牛肉和皮革之类的普遍需要消耗更多的水。另外,对比上海、山东等国内发达地区,桂林的经济总体规模显得太小,但是旅游业是属于向外输水的行业(游客在旅游地需要消耗生活实体水资源以及食物和旅游纪念品等产品水资源),同时漓江补水的目的是为了旅游业的发展,而桂林的旅游业是其主打产业,因此人工补水应该纳入真实的水资源足迹核算。这样一来,相比西北四省等地,旅游业较为发达的桂林其水资源足迹要大很多。

### 4.3 水资源足迹结构分析

从图3不难看出,10年来桂林市的水资源足迹结构变化不大,一直是实体水消费占主导地位,而且所占比例从来就没有低于50%。变化幅度稍大

的就是生态需水,从2000年的3.88%逐渐增加到2009年的13.76%,这个主要跟漓江补水工程历年补水总量不大一致有关,但其与实体水消费和产品水消耗相比,仍处于绝对的弱势。产品水消耗这些年来略有增加,但基本上稳定在30%左右,最低是2002年的23.80%,最高是2009年的32.46%。对于实体水消费足迹来说,农业实体用水所占比例最大,每年都是40亿m<sup>3</sup>左右,所占比例一直都高于80%,但也不会超过87%,且最近几年略有下降。工业实体用水所占比例变化不大,每年都保持在10%左右。生活实体用水总体而言变化不大,但从2008年开始增幅较大,尤其是2009年一年之间增加了1.08亿m<sup>3</sup>,所占比例增加了2.78%,这个主要跟近两年来国内外游客大幅度增长,其在桂林旅游期间生活用水以及经济危机以来为扩大内需而加快城市

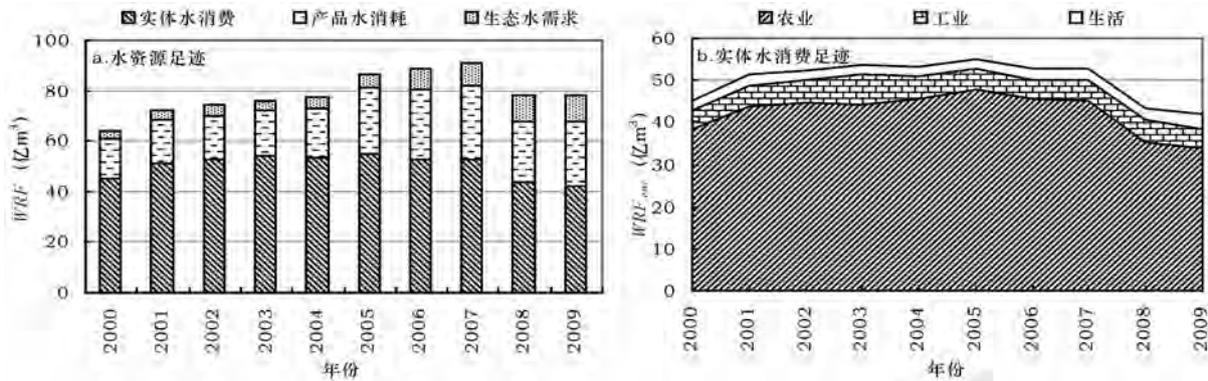


图3 桂林市水资源足迹和实体水消费足迹构成

Fig.3 The structure of WRF and entity water consumption in Guilin City

建设产生的建筑用水导致生活实体用水增长有关。产品水资源消耗中,猪肉、牛肉生产用水一直占据着半壁江山。因此,应逐步调整产业结构,减少传统农业生产,大力发展旅游业和现代工业(考虑到漓江环境保护故应着重发展电子信息产业),同时,在不影响消费水平的前提下,应减少猪肉和牛肉等水密集型产品的生产,适当扩大水消耗较少的蔬菜、水果等的生产规模。

4.4 水资源压力程度分析

一个国家或地区的水资源匮乏度可以反映该国家或地区水资源的利用和缺乏程度。如图4所示,从10年来桂林市的水资源匮乏度动态变化可以看出,总体而言,水匮乏度是逐步增大的,也就是说该区的水资源利用量不断增加,之所以中间有几个拐点,主要是因为该年的可利用水资源量较大或较小。如2002年由于降水比较多,其可利用水资源量高达190.08亿m<sup>3</sup>,而2007年降水比较少,可利用量只有93.60亿m<sup>3</sup>,相比少了将近100亿m<sup>3</sup>,还不到

2002年的一半,而该年的总水足迹比2002年多了16.38亿m<sup>3</sup>,由此水匮乏度相差0.58。这与现实情况非常相符。漓江风景区素有“百里画廊”之称,每年乘船游览漓江的中外游客大约有100万人次,但长达83km的漓江黄金水道只有在流量大于30m/s时才可正常通航。2007年入秋以来,桂林遭遇历史上罕见的大旱,12月份漓江的平均流量只有11m/s左右,以往游客从磨盘山码头上船一直可以游到阳朔的航道,当年只能改从杨堤码头上船,能行船的航道只有约6km,不到原来的1/10。降水的年际年内很不均匀,加上受岩溶地区特有的地形地貌条件影响,当地的水资源有效利用率非常低,而当地各部门的用水不断攀升,导致水资源压力不断增大。

4.5 水资源利用效益分析

从图4可以看出,2000年-2009年间桂林市的万元GDP水资源足迹呈逐步下降趋势,且平均每年下降大约133m<sup>3</sup>。这说明,桂林市水资源的利用效益逐步提高,水资源利用方式也逐步由粗放型、消

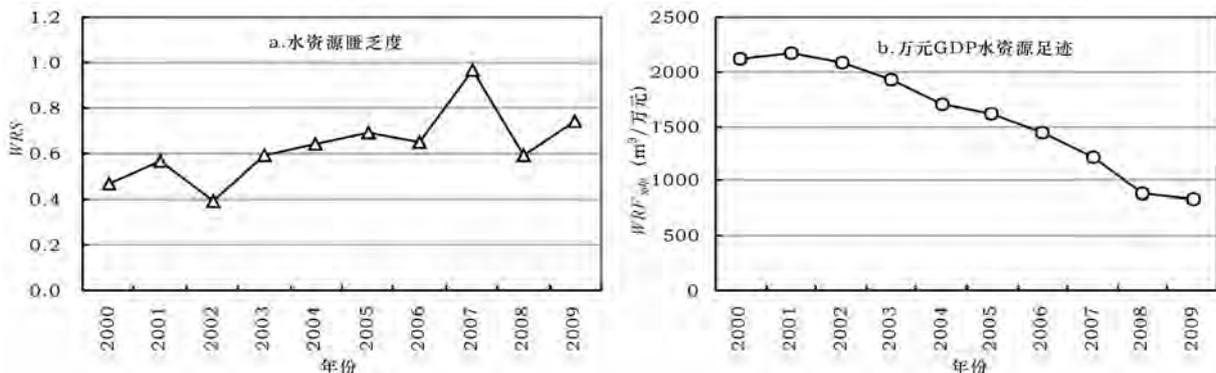


图4 2000年-2009年桂林市水资源匮乏度和万元GDP水资源足迹变化

Fig.4 The variation of WRS and WRF<sub>entity</sub> in Guilin City from 2000 to 2009

2013年1月

耗型转为集约型、节约型。实际情况也与此大致相符,尽管降水资源十分丰富,但由于降雨年际年内分布不均,桂林不同程度存在区域性缺水、季节性缺水和水质性缺水。为此,桂林市通过实施企业用水定额和计划相结合的管理办法、推广应用节水器具和投入巨资进行节水技术改造等途径实现节水。20多年以来,桂林市先后获得“全国城市节约用水先进单位”、“全国节水先进城市”和“国家节水型城市”等荣誉和称号。据相关资料统计显示,2006年桂林市工业用水的重复利用率达76.5%,工业万元GDP用水量下降至233m<sup>3</sup>,日节水量超过0.3亿m<sup>3</sup>。但是与国际和国内的发达城市相比,桂林市的水资源利用效率和效益还是很低,还存在较为严重的资源浪费现象。据统计,2009年广东、浙江、北京和山东的万元工业增加值用水量分别只有77m<sup>3</sup>、56m<sup>3</sup>、23m<sup>3</sup>和15m<sup>3</sup>。值得一提的是天津市,其万元GDP用水量降至31m<sup>3</sup>,万元工业增加值用水量还不到11m<sup>3</sup>,工业用水重复利用率提高到93.5%,多项节水指标保持全国先进水平。而同期桂林市的万元GDP用水量高达476m<sup>3</sup>,万元工业增加值用水量也高达123m<sup>3</sup>。因此在今后的生产中还应进一步注重提高水资源的利用效率和效益。

## 5 结论

水资源足迹为定量测度水资源的可持续利用提供了一种新思路。本文通过构建实体水消费、产品水消耗和生态水需求等水资源足迹账户对2000年-2009年桂林市的水资源利用进行定量测度,并根据水资源匮乏度和万元GDP水资源足迹等评价指标对其进行动态分析,结果表明:10年来,桂林市的水资源足迹总体呈上升趋势,虽然没有超过当地的水资源承载力范围,但是水资源的利用越来越接近不可持续的临界状态;由于考虑了旅游业对外输出实体和产品水资源以及支撑其发展的漓江人工补水,桂林市的水资源足迹比中国平均水平和国内的一些其他地区偏大,但与发达国家和地区相比较小;实体水消费在水资源足迹中占的比重最大,而农业灌溉用水又占据了实体水消费的80%以上,今后应进一步调整产业结构,减少传统农业尤其是猪肉、牛肉等水资源密集型产品的生产,大力发展电子信息产业和旅游业;万元GDP水资源足迹逐步下

降,但跟国内发达地区相比还存在很大差距,水资源的利用效率和效益还应进一步提高。

## 参考文献(References):

- [1] 左其亭,陈曦.面向可持续发展的水资源规划与管理[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [3] Wackernagel M, Rees W E. Our Ecological Footprints: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [4] 杨开忠,杨咏,陈洁.生态足迹分析理论与方法[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 630-636.
- [5] 徐中民,张志强,程国栋.甘肃省1998年生态足迹计算与分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 607-615.
- [6] 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.
- [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] Allan J A. Overall Perspective on Countries and Regions[A]. Rogers P, Lydon P. *Water in the Arab World: Perspectives and Prognoses*[C]. Massachusetts: Harvard University Press, 1994.
- [9] Hoekstra A.Y. Virtual Water: An Introduction[A]. *Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series (No.12)*[C]. Delft, The Netherlands: IHE, 2003.
- [10] 吴志峰,胡永红,李定强,等.城市水生态足迹变化分析与模型[J]. *资源科学*, 2006, 28(5): 152-156.
- [11] 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.
- [12] Chapagain A.K, Hoekstra A.Y. *Water Footprints of Nations*[A]. *Value of Water Research Report Series (No.16)*[C]. IHE Delft, 2004.
- [13] 喻泽斌. *漓江流域水资源可持续利用研究*[D]. 重庆:重庆大学, 2004.
- [14] 龙爱华,徐中民,张志强.西北四省(区)2000年的水资源足迹[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 692-700.
- [15] 邓晓军,谢世友,杨诗源,等.水足迹分析法在山东省的应用研究[J]. *农业现代化研究*, 2007, 28(2): 232-234.
- [16] 邓晓军,谢世友,王新华.重庆市2004年的水足迹分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(5): 593-597.
- [17] 邓晓军,谢世友,王李云,等.城市水足迹计算与分析——以上海市为例[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(1): 62-68.
- [18] 陈俊旭,张士锋,华东,等.基于水足迹核算的北京市水资源保障研究[J]. *资源科学*, 2010, 32(3): 528-534.
- [19] 戚瑞,耿涌,朱庆华,等.基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 486-495.

[20] 韩宇平,雷宏军,潘红卫,等.基于虚拟水和广义水资源的区域水资源可持续利用评价[J].水利学报,2011,42(6):729-736.

[21] 刘梅,许新宜,王红瑞,等.基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析[J].自然资源学报,2012,27(6):1022-1034.

## Quantitative Measurement and Dynamic Analysis of Sustainable Utilization of Water Resources in Guilin City

DENG Xiaojun<sup>1,2</sup>, ZHAI Luxin<sup>1</sup>, LI Yi<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Resources, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China;

2. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The water resources footprint concept has been developed as an indicator of water use in relation to the consumption of people. The water resources footprint of a city is defined as the volume of water needed for the production of the goods and services consumed by the inhabitants of the city. Closely linked to the water resources footprint concept is the virtual water concept. Virtual water is defined as the volume of water required to produce a commodity or service. The water resources footprint of a city can be assessed by taking the use of domestic water resources, subtracting the virtual water flow that leaves the city and adding the virtual water flow that enters the city. Based on water resources footprint, water resources utilization was measured quantitatively in Guilin city from 2000 to 2009, and analyzed dynamically on the basis of the evaluation index of water resources scarcity and water resources footprint per ten thousand CNY GDP. We found that the water resources footprint of Guilin in 2009 was  $7.826 \times 10^9 \text{m}^3$ , per capita water resources footprint was  $1529.62 \text{m}^3$ , the water resources footprint of entity water consumption was  $4.209 \times 10^9 \text{m}^3$ , the water resources footprint of production water consumption was  $2.54 \times 10^9 \text{m}^3$ , and the water resources footprint of ecological water requirements was  $1.077 \times 10^9 \text{m}^3$ . The water resources carrying capacity was  $10.548 \times 10^9 \text{m}^3$ , per capita water resources carrying capacity was  $2061.65 \text{m}^3$ , the water resources scarcity was 0.74, the water resources footprint per ten thousand CNY GDP was  $832.07 \text{m}^3$ . The water resources footprint has been increasing for Guilin city over the past decade, and water resource utilization is more and more close to an unsustainable critical state. Although water resources footprint per ten thousand CNY GDP has been declining steadily in Guilin, compared to other developed domestic areas there is still a large gap.

**Key words:** Water resources; Sustainable utilization; Water resources footprint; Water resources carrying capacity; Guilin city