

基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度 时空差异变化格局

孙才志^{1,2,*}, 刘玉玉¹, 陈丽新¹, 张 蕾¹

((1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029; 辽宁省自然地理与空间信息科学重点实验室, 大连 116029))

摘要: 水足迹可以衡量人类对水资源的真实占有量, 而水足迹强度则表征了人类对水资源的利用效率水平。在计算出 1997—2007 年中国各地区水足迹的基础上, 借助于基尼系数和锡尔指数计算方法, 探索分析中国近 11a 水足迹强度发展的空间格局变化规律。结果表明: 中国水足迹强度整体呈下降趋势, 水资源利用效率有所提高, 但是区域发展不平衡; 水足迹强度区域总差异经历了“先增大后缩小”的过程, 中东西三大地带空间发展呈先极化后趋同的态势, 南北区差异总体有所缩小; 对水足迹强度区域内部差异贡献份额南方大于北方、东部大于中西部; 促使空间差异格局变化的主要因素为区域发展策略、经济发展水平和市场发育程度等; 另外, 发现中国水污染足迹强度区域差异极化现象非常严重, 说明随经济的发展部分地区水污染问题很严峻。最后针对发现的问题提出了协调我国经济发展与水资源利用的相应建议。

关键词: 水足迹强度; 空间差异; 基尼系数; 锡尔指数; 分离系数

The spatial-temporal disparities of water footprints intensity based on Gini coefficient and Theil index in China

SUN Caizhi^{1,2,*}, LIU Yuyu¹, CHEN Lixin¹, ZHANG Lei¹

¹ Urban and Environment College of Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

² Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstract: Water footprint can measure the real water resources consumption of the human being, and its intensity reflects the water utilization efficiency. Based on the calculated water footprint in different regions of China from 1997 to 2007, this paper analyzed the spatial distribution variations in the past 11 years using Gini coefficient and Theil index. The results show that water footprint intensity has declined on the whole in China which means the water utilization efficiency has improved, in spite of regional imbalance, the general regional difference of water footprint intensity has experienced a course of successive increase first and decrease next. The spatial development tends to polarize from 1997 to 2002 and be similar in the next few years, and the difference between the south and north reduced. The south concerning the share of contribution to water footprint intensity in regional differences is larger than that of the north, and the east share is larger than that of the west. The main factors causing the spatial distribution variations are the regional development strategy, the level of economic development and the degree of market development. In addition, it has been found that polarization in regional differences of water pollution footprint intensity is very serious in China, which reveals the fact that, with the economic development, the water pollution problems in some areas are very serious. At last, some corresponding suggestions responding to identified problems were put forward in order to coordinate the relations between economy development and water resources utilization in China.

Key Words: water footprint intensity; spatial differences; Gini coefficient; Theil index; separation factor

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(07BJY066); 国家自然科学基金资助项目(40501013)

收稿日期: 2009-01-09; **修订日期:** 2009-05-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suncaizhi@sohu.com

水是基础性的自然资源和战略性经济资源,是国民经济发展与生态环境的命脉,是实现可持续发展的重要物质基础。水足迹是表征在一定的物质生活标准下,生产一定人群(个体、城市或国家)消费的产品和服务所需要的水资源数量^[1]。与生态足迹^[2]类似,水足迹能够成为分析人类消费模式和行为对水资源影响的一个很好的工具。水足迹从消费角度衡量人类对水资源系统的真实占用,建立了水资源利用与人类消费模式的联系,同时由于将水问题拓展到了社会经济领域,因而是当前测度人类活动对水资源系统环境影响的最好指标^[3]。本文在借鉴以往相关研究的基础上^[4-12],计算出 1997—2007 年中国 31 个省市水足迹强度,用其衡量中国水资源利用效率水平。由于水短缺、水污染以及水治理难等水危机越来越严峻,提高用水效率就显得尤为重要。本文通过基尼系数、锡尔指数以及分离系数的计算,分析中国水足迹强度区域差异变化规律及其成因,期望对中国水资源利用效率的空间分布规律有深入的认识和探讨,为水资源利用可持续发展提供政策性启示。

1 研究方法 with 原理

区域差异是国内外研究的热点问题,测度绝对差异一般采用标准差等指标,而测量相对差异的方法常见的有变差系数、基尼系数、锡尔指数以及广义熵指数等。

1.1 锡尔(Theil)指数空间差异分解

锡尔系数又称锡尔熵,最早是由锡尔等人于 1967 年首先提出,因其可以分解为相互独立的组间差异和组内差异而被广泛用于衡量经济发展相对差距。由于其适用于空间差异的地区分解,本文引入该指数,来量化水足迹强度在空间上的差异程度,将其空间差异分解成两部分:地区间的差异指标 T_{BR} 和地区内部差异指标 T_{WR} 。空间总体差异指标公式为^[13-14]:

$$\text{Theil} = T_{BR} + T_{WR} = \sum_{i=1}^n v_i \log \frac{v_i}{d_i} + \sum_{i=1}^n v_i \left[\sum_{j=1}^m v_{ij} \log \frac{v_{ij}}{d_{ij}} \right] \quad (1)$$

式中, n 和 m 为区域个数和区域内省市个数, v_i 和 v_{ij} 分别代表 i 区域和该区域内 j 省市水足迹量占全国水足迹总量的份额, d_i 和 d_{ij} 为 i 区域和该区域内 j 省市生产总值占全国的 GDP 的份额。Theil 值越大,表示各区域间水足迹强度水平差异越大。

据 Walsh 等人的相关研究,锡尔指数中的区域之间差异和区域内部差异能进一步组合成一个反映区域之间相对分离的衡量—区域分离系数(Separation index),计算公式如下:

$$SEP_r = T_{BR} / \log(d/d_k) \times \log(d_k) / T_{WR} \quad (2)$$

式中, SEP_r 为区域分离系数, T_{BR} 和 T_{WR} 分别代表区域之间差异和区域内部差异, d 代表所有区域的总 GDP, d_k 表示所有区域的 GDP 中最小 GDP 的值。通过相同基本单元分类的区域分离系数值大小的比较,能够揭示区域系统内水足迹强度差异的空间变化特征。

1.2 水足迹强度基尼系数

基尼系数^[15-17],是由意大利经济学家 C. 基尼在其 1912 年首次提出的一种不均等指数演化而来的,由于该指数能非常方便地反映出总体收入差距状况而成为国际上非常流行的指标。经过后人的改造,现在常用的基尼系数其公式为:

$$G = \frac{1}{2\mu} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i p_j |y_j - y_i| \quad (3)$$

式中, μ 为全国平均水足迹强度, y_i 是 i 省市的水足迹强度, p_i 是 i 省市 GDP 占全国 GDP 的比重。按照国际惯例以基尼系数 0.4 作为分配贫富差距的“警戒线”,在这里也采用该划分方法,即基尼系数在 0.2 以下,表示中国水足迹强度社会分配“高度平均”或“绝对平均”;0.2—0.3 之间表示“相对平均”;0.3—0.4 之间为“比较合理”;0.4—0.5 为“差距偏大”;0.5 以上为“高度不平均”。

2 中国水足迹的计算

2.1 计算资料

选取 1997—2007 年中国 31 个省市自治区(未包括台湾、香港和澳门)为研究范围,计算数据来源:联合国

粮农组织的 Climate 数据库中有关中国部分的数据以及 Cropwat 需水量计算软件;国内外农畜产品虚拟水含量研究文献;《中国统计年鉴》、《中国农业年鉴》、《历年中国农业发展报告》、《中国环境统计年鉴》、《中国环境统计公报》、《中国水资源公报》等资料。

2.2 计算路线

水足迹的计算方法有两种:一种方法是自上而下的方法,水足迹等于总的区域内水资源利用量加上流入该区域的虚拟水流量,再减去流出该区域的虚拟水流量。另一种是采用自下而上的方法,它将该国家居民所消费的商品与服务数量与各自产品和服务的单位产品虚拟水含量相乘求和得到。根据水足迹的概念和计算方法,并结合前人研究的成果,本文对水足迹的计算包括以下部分。

2.2.1 淡水足迹

(1) 消费的农畜产品水足迹

根据计算的单位农畜产品等虚拟水含量和统计的农村和城镇居民消费产品的数据,对主要产品包括粮食、蔬菜、食用油、猪肉、牛羊肉、家禽、蛋、奶、水产品及酒等计算得到居民消费的农畜产品虚拟水量。鉴于相同消费品在不同生产地区所耗水量有所不同,而消费品未必是本区所生产,本文从消费的角度进行概化计算,即不同地区消费某种产品所耗水量取全国该产品耗水的平均值。而对于比重很大的粮食,其单产虚拟水含量采用文献^[1]中计算结果进行分区计算。各产品的单产虚拟水含量根据国内外相关研究^[9-12]经计算和整理,其全国平均值结果见表 1。

表 1 中国主要农-畜产品单位质量虚拟水含量
Table 1 Virtual water contents in the primary crops-livestock products of China

虚拟水量 Virtual water/(m ³ /kg)						
粮食 Grain	鲜菜 Vegetables	食用油 Edible oil	猪肉 Pork	牛肉 Beef	羊肉 Sheep meat	鸡肉 Chicken meat
1.13	0.1	5.24	2.211	12.56	5.202	3.652
虚拟水量 Virtual water/(m ³ /kg)						
水产品 Aquatic products	蛋类 Eggs	奶类 Milks	果类 Fruits	白酒 White spirit	啤酒 Beer	
5.0	3.55	1.9	1.0	1.982	0.296	

(2) 消费的工业产品水足迹

工业产品虚拟水含量计算十分复杂,同时数据受限。本文采用如此概化:通过 SPSS 软件分析得出居民人均消费支出(除去食品消费)与人均 GDP 呈显著线性相关,计算中将工业耗水量按照当年各地区的 GDP 比例匹配作为各地区居民消费工业产品耗水量真实值,再将该值乘以当年的工业消费系数作为工业产品水足迹。其中工业消费系数为:(工业生产总值 - 出口工业品贸易值 + 进口工业品贸易值)/工业生产总值。

(3) 生活和生态水足迹

生活实体水消费包括实际生活用水和服务业用水,居民(城镇和农村)实体水消费采用生活用水量数据。生态环境用水是现状年生态系统中天然生态和人工生态建设所消耗的水资源数量,由于目前统计数据受限,无法获得全面的生态用水数据,文中的生态用水依据于中国水资源公报(仅包括城市环境和部分河湖、湿地的人工补水),比实际生态环境用水要小。

2.2.2 水污染足迹

造成水污染的途径有很多,本文主要从废污水污染的角度反映水污染足迹。水污染足迹是消纳生活和生产以及酸雨等的超出水体承载能力的污染物对水资源的占用需求量,通过废水污染稀释用水 Q 来反映。采用如下公式:

$$Q = (C_i/C_0 - 1)q_i \quad (4)$$

式中, C_i 和 C_0 分别表示第 i 种污染物的实测和水质达标浓度, q_i 是未达标废水的排放量。受数据资料

所限,本文主要计算工业污水排放的污染物包括化学需氧量和氨氮;污染物浓度达标排放标准采用地表水环境质量标准(GB 3838-2002)中的Ⅲ类水标准,该两种污染物排放达标浓度分别为 20mg/L 和 1.0mg/L。

2.3 计算结果

根据上述计算,得到 1997—2007 年中国水资源消费足迹,11a 中国水足迹总量年平均为 7387.7 亿 m^3 ,人均水足迹为 $582.44\text{m}^3/(\text{人}\cdot\text{a})$ 。其中农畜食品水足迹贡献最大为 5639.85 亿 m^3/a ,占总量的 76.34%,其次依次是水污染、生活、工业水足迹,所占比例分别为:10.61%、8.4% 和 3.43%,生态环境水足迹最小,仅占总量的 1.22%。水资源足迹排名前 5 位的是河南、广东、山东、四川、江苏。水足迹最小的是西藏,仅为 16.68 亿 m^3 (图 1)。限于篇幅,仅将 2007 年各项计算结果列于表 2。

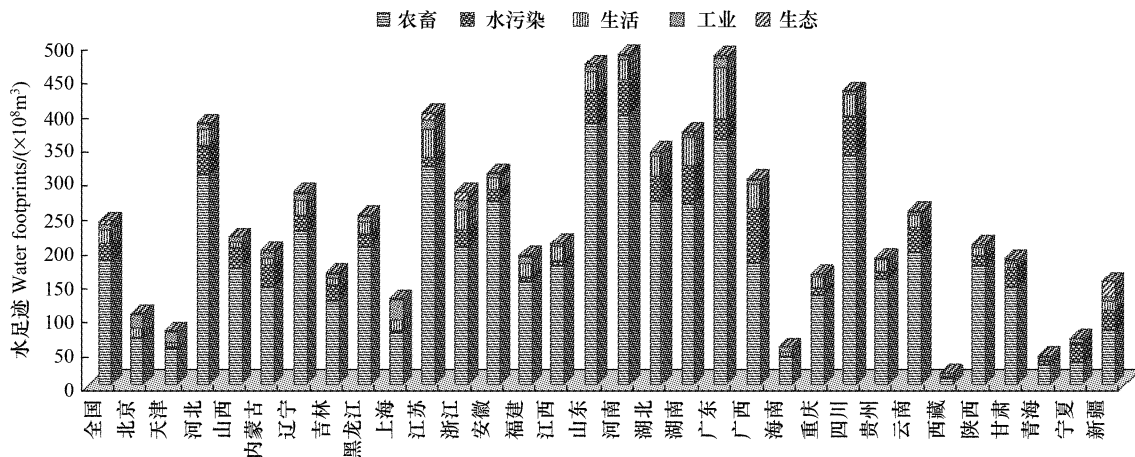


图 1 中国水足迹组成结构

Fig. 1 The composition of the water footprints in China

由于计算方法和内容与国内外研究不尽一致,本文结果与国内外相关研究相比偏小。Hoekstra、Chapgain^[8]和马静^[9]计算采用自上而下的方法,水足迹等于总的区域内水资源利用量(包括蓝水和绿水)加上净流入该区域的虚拟水流量。而区内水资源利用量主要从生产角度统计,计算时蓝水为国民经济取水量,绿水为农产品总用水量(农产品产量乘以相应的虚拟水含量)减去田间蓝水量(农业取水量乘以渠系利用系数)^[9],很难避免水量重复计算,例如在计算农产品产量时包括了粮食、肉类、禽蛋等,部分粮食在生产肉蛋等时消耗以虚拟水的形式累加到生产肉蛋等虚拟水含量中去,此部分粮食虚拟水含量就被重复计算了。王新华、徐中民和龙爱华^[1]等利用自下而上的方法从消费角度计算 2000 年中国水足迹,人均水足迹为 601.6m^3 ,与本文计算结果近似。虽然水足迹计算结果不尽相同,但都能反映出中国水足迹分布的大致规律。

3 中国水足迹强度的时空差异分析

水足迹强度指标反映各省区的水资源利用效率,利用水足迹除以国内生产总值(GDP)得到。水足迹强度越大,表明单位 GDP 所消耗的水足迹的数量越高。中国八大区域^① 1997—2007 年水足迹强度的变化见图 2。

中国水足迹强度在 1997—2007 年整体呈下降趋势,明显说明中国水资源利用效率在提高;而水足迹强度地区差异较显著,西北、东北、西南和黄淮海地区水足迹强度普遍高于全国平均水平,西北最高,长江中下游比较接近全国平均水平,华南、华北和东南地区水足迹强度普遍低于全国平均水平,东南最低,华北地区次之;后几年水足迹强度空间差异比前几年有所缩小。水足迹强度空间特征具体表现为:沿海低于内地,南方低于北

① 中国八大区,华北地区:北京、天津和山西;东北:内蒙古、辽宁、吉林和黑龙江;黄淮海地区:河北、河南、山东和安徽;西北地区:陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆;东南地区:上海、浙江和福建;长江中下游:江苏、湖北、湖南和江西;华南:广东、广西、海南;西南:四川、贵州、云南和西藏。

方,东部低于西部,西北地区最高;经济发达省(市)低于欠发达省(区)的特征。水足迹强度差异受到自然条件、土地生产能力和区域经济发展水平等的影响,反映各地区在水资源利用效益的差异程度。中国经济发展迅速,单位 GDP 产值所消耗的水足迹在 11a 降低的同时明显表现出区域的差异不平衡性,本文将通过基尼系数和锡尔指数两种方法相结合来分析中国水足迹强度的时空差异变化规律,并诠释这种不平衡性。

表 2 2007 年中国水资源足迹

Table 2 Water footprints of China in 2007

地区 Region	淡水足迹 Fresh water footprints/(×10 ⁸ m ³)				水污染足迹 /(×10 ⁸ m ³)	总水足迹 /(×10 ⁸ m ³)
	农畜 Cropslivestock	工业 Industry	生活 Domestic	生态 Ecology	Water pollution footprints	Gross water footprints
北京 Beijing	83.45	14.60	24.79	2.72	0.15	125.72
天津 Tianjin	59.86	4.82	19.60	0.51	0.11	84.91
河北 Hebei	333.94	23.91	8.55	2.03	17.29	385.72
山西 Shanxi	178.39	9.53	7.31	0.45	15.84	211.53
内蒙古 Inner Mongolia	148.23	14.17	10.96	6.65	16.56	196.57
辽宁 Liaoning	245.21	24.32	11.10	2.53	9.08	292.24
吉林 Jilin	133.91	11.74	8.38	1.99	9.78	165.79
黑龙江 Heilongjiang	208.52	18.61	8.00	0.47	13.74	249.33
上海 Shanghai	91.31	21.60	28.39	1.04	0.50	142.84
江苏 Jiangsu	342.32	48.42	14.61	16.16	3.69	425.20
浙江 Zhejiang	231.09	33.95	16.06	12.64	31.01	324.76
安徽 Anhui	267.13	26.08	5.21	1.60	10.08	310.10
福建 Fujian	160.32	21.15	11.18	1.42	0.78	194.84
江西 Jiangxi	183.52	22.90	5.45	2.02	4.70	218.59
山东 Shandong	404.51	32.51	12.00	3.20	3.55	455.77
河南 Henan	393.71	32.74	6.94	5.17	17.62	456.19

地区 Region	淡水足迹 Fresh water footprints/(×10 ⁸ m ³)				水污染足迹 /(×10 ⁸ m ³)	总水足迹 /(×10 ⁸ m ³)
	农畜 Cropslivestock	工业 Industry	生活 Domestic	生态 Ecology	Water pollution footprints	Gross water footprints
湖北 Hubei	254.46	29.38	7.01	0.09	11.22	302.15
湖南 Hunan	261.05	44.62	6.26	3.21	30.87	346.02
海南 Hainan	42.99	6.09	6.26	0.09	0.31	55.75
广西 Guangxi	191.48	48.58	5.41	5.63	20.52	271.62
广东 Guangdong	439.65	90.54	14.24	6.06	16.14	566.62
贵州 Guizhou	157.03	16.95	3.15	0.56	3.91	181.60
四川 Sichuan	343.19	34.43	5.59	1.86	14.42	399.49
重庆 Chongqing	132.04	17.33	6.34	0.43	7.20	163.34
云南 Yunnan	205.84	19.95	4.55	1.80	4.31	236.45
西藏 Xizang	11.52	2.15	5.21	0.4	0.26	19.54
陕西 Shaanxi	184.84	13.55	6.31	0.81	3.17	208.69
甘肃 Gansu	154.28	9.45	4.47	2.97	15.89	187.06
青海 Qinghai	30.94	3.28	6.14	0.19	9.13	49.68
宁夏 Ningxia	33.69	1.76	6.31	0.97	15.79	58.52
新疆 Xinjiang	93.25	11.29	7.28	20.45	28.47	160.74
全国 China	6001.67	710.4	293.1	106.12	336.09	7447.38

3.1 中国水足迹强度时空总体差异变化分析

3.1.1 水足迹强度区域总差异特征分析

根据计算公式(1)和(3)得出 1997—2007 年中国水足迹强度差异变化基尼系数和锡尔指数。发现这两

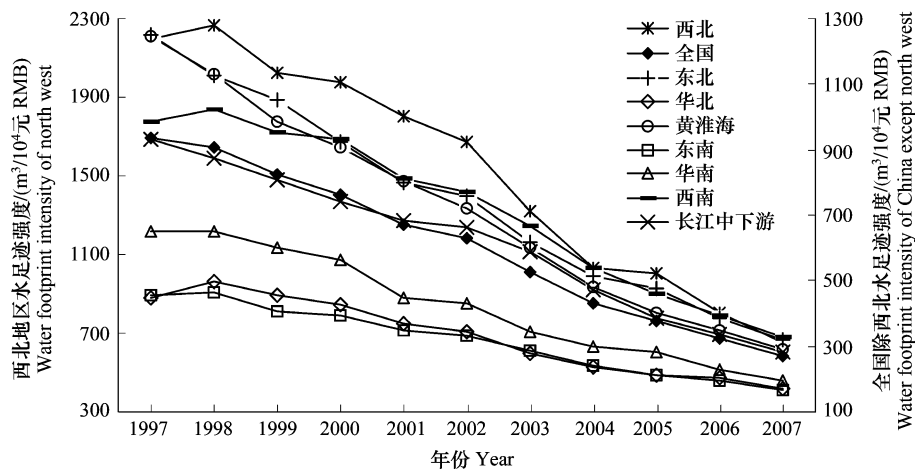


图2 中国八大区域水资源足迹强度的变化

Fig.2 Variations on the water footprint intensity in China

种差异测度方法所得中国水足迹强度区域空间总差异变化趋势很相似(图3)。

11a 间,基尼系数和总锡尔指数均呈现出“先增大(1997—2003 年)→后缩小(2003—2007 年)”的近似倒 U 型曲线发展态势。这说明,中国水足迹强度区域总差异经历了先增大后缩小的过程。根据环境库兹涅茨倒 U 型曲线的原理,认为上述中国水足迹时空差异的变化规律是由于:最初前几年中国各个地区之间的区位优势、资源禀赋、经济基础等不同而使各种生产要素向平均利润率高的地区转移和积聚,表现出用水效率差距拉大,导致水足迹强度差异扩大,处于倒 U 型曲线的左侧;经过一定的时间,用水效率较高地区的优势达到一定程度后,另外一些地区各种优势会逐步体现出来,加之政府的引导,水足迹强度区域差异会缩小,表现在倒 U 曲线的右侧。由于是在后几年差异有所控制并变小,刚刚进入倒 U 曲线的右侧,今后几年这种差异变小的趋势还会加剧,即中国水足迹强度空间差异在未来几年很可能会呈收敛而向一定的平衡发展。

3.1.2 淡水足迹强度和水污染足迹强度区域差异分解

将中国水资源足迹分解为淡水足迹和水污染足迹,并对两者的强度根据公式(3)分别计算出 1997—2007 年各自的基尼系数(图4),结果表明:淡水足迹由于在总水足迹中所占比重非常大,其强度基尼系数变化特征和范围呈现与总体水足迹强度大致相同,表现为先增大后缩小,范围均在“警戒线”以下;水污染足迹强度基尼系数结果也表现出先增大后缩小的趋势,由 1997 年 0.408 急剧增大到 2005 年的 0.690,后两年为 0.597 和 0.562 有所控制,范围均超过“警戒线”,并由“差距偏大”变为“高度不平均”。这表明,中国水污染足迹强度区域差异在 11a 间超过警戒线并迅速拉大,而使水污染足迹强度区域呈现极度不平衡,某些地区水污染现象势必非常严重,而这种状况持续 11a 的同时,差异还在继续,说明某些地区的水污染问题已经迫在眉睫。虽然近几年随着经济社会的发展,管理技术有很大提高,水污染处理达标排放力度也有所加大,但是结果表明这些还不够,我们需要对水污染做更多的工作,坚持达标排放、调整产业结构和布局、完善和实施相关的规章制度,

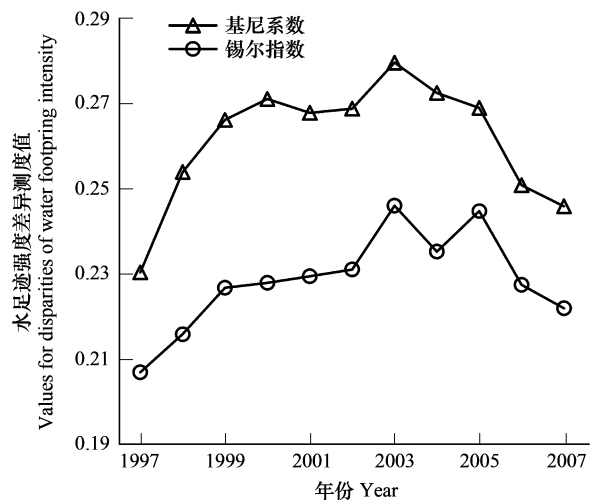


图3 中国水足迹强度区域总差异变化

Fig.3 Variations on the regional disparities of water footprint intensity in China

使污染降到最小。否则,生态环境长时间负载超过其容量的水污染足迹量,对环境对人类社会的危害,后果将不堪设想。

3.2 中国水足迹强度时空区际间及内部空间分异动态变化特征分析

3.2.1 中国水足迹强度区域差异演变分解特征

根据锡尔指数公式,将 1997—2007 年中国水足迹强度的区域总体差异分解为地区间差异以及地区内部差异,由计算结果表 3 可以看出:中国八大区、东中西区和南北区不同划分地域的组间锡尔指数 T_{BR} 、地带内部差异 T_{WR} 的差异导致中国水足迹空间差异变化,整体来看:11a 间八大区组间差异 (41.4%—47.62%) 对整体差异的贡献要小于其内部差异;东中西区组间差异 (58.36%—67.6%) 对总体差异的贡献要大于其内部差异;南北区组间差异 (12.79%—24.41%) 对整体差异贡献份额远远小于其内部差异。这表明,中国水足迹强度整体空间差异与中国各地区发展的内部差异和区

间差异有关,东中西地区差异主要受该 3 区组间不同而不同,而南北地区差异几乎取决于此 2 区内部的差异。

从时间来看,中国八大地区水足迹强度差异的组间差异指数 T_{BR} 和内部差异 T_{WR} 大致呈先逐步增大后缩小的变化,而使中国水足迹强度差异先扩大后缩小。中国各区域水足迹强度的组内差异在很大程度上影响空间差异分布,表 3 详细包括了各大区域内部的地区差异对组内差异的贡献份额:八大区域中,华南地区和长江中下游地区对组内差异贡献最大,二者之和占总组内差异的 40% 以上,西北地区最小;东中西区域中,东部地区最大,占组内总差异的近 60%;南北区域中,南部差异贡献占 60% 以上,大于北方地区。

3.2.2 中国水足迹强度区域差异变化趋势

区域分离系数表示区域空间相互分离状况的大小,反映了区域差异的空间结构变化趋势。在公式 (2) 中,选取东中西中 GDP 最小的西部地区作为参照区域,计算我国三大地带之间的区域分离系数。由表 4 发现,1997—2003 年分离系数由 6.61 急剧增大到 10.152,空间极化加强,后几年所控制并变小至 9.194,发展趋同明显。以 GDP 较少的北部地区作为参照区域,计算南北两大区域的分离系数,发现南北之间的区域分离系数远远小于东中西之间的区域分离系数,且在 1997—2007 年间由 2.068 波动减小到 1.186,表明中国水足迹强度南北区域之间的分离程度远远小于东中西区域之间的分离程度,且南北差异呈缩小态势发展。

4 中国水足迹强度区域差异成因分析

相同基本单元分类的区域分离系数数值大小的比较,能够揭示区域系统内水足迹强度差异的空间变化特征。而造成中国水足迹强度时空差异的成因是复杂多元的,为进一步揭示区域差异的演化规律,在此选用 8 个因素为标准,通过地理分区,引用区域分离系数方法对它们进行综合定量比较,区域分离系数值扩大则表明该因素对区域经济差异具有促进作用,区域分离系数值越大表明该成因对区域经济差异的影响作用越强。用人口、人均 GDP、产业结构转换能力综合指数、人均固定资产投资、人均社会消费品零售额、技术市场交易完成额、人均水资源量以及单位面积粮食产量分别作为人口压力、经济发展水平、产业结构优化升级、区域发展策略、市场发育程度、技术水平、水资源禀赋和农业土地生产能力的衡量,以此 8 个指标为标准,分别将中国 31 个省市区分分为两大区域,指标值高的前 15 个地区为一个区域,另外 16 个地区为另一区域。

按照以上 8 种标准进行地理分区,分别计算 8 种情景下的分离系数,结果表明,1997—2007 年中国水足迹强度区域分离系数大致均呈先增大后缩小的趋势,计算的 8 种情景下的 11a 年均分离系数值的排序依次是:人均固定资产投资 (17.147)、社会消费品零售额 (12.763)、人均 GDP (12.635)、技术市场交易完成额

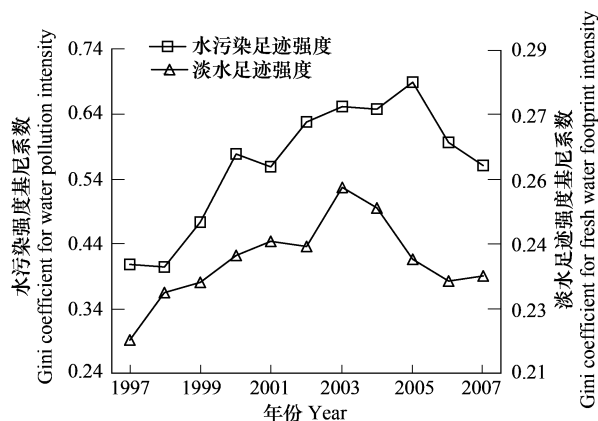


图 4 中国淡水和水污染足迹强度区域差异变化

Fig. 4 Variations on the regional disparities of fresh water and its pollution footprint intensity in China

表 3 中国水足迹强度区域差异变化及分解

年份 Year	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<i>G</i>	0.2254	0.2490	0.2612	0.2661	0.2629	0.2638	0.2746	0.2675	0.2640	0.2459	0.2409
<i>Theil</i>	0.2020	0.2109	0.2218	0.2230	0.2245	0.2261	0.2411	0.2303	0.2398	0.2225	0.2170
八大区	0.0962	0.0933	0.0946	0.0924	0.0939	0.0936	0.1105	0.1012	0.1097	0.1007	0.0993
Eight regions of China	47.62	44.24	42.65	41.43	41.83	41.40	45.83	43.94	45.75	45.26	45.76
比重 proportion/%	0.0134	0.0118	0.0114	0.0124	0.0111	0.0118	0.0092	0.007	0.0075	0.0052	0.0053
东北 North East	6.63	5.60	5.14	5.56	4.94	5.22	3.82	3.04	3.13	2.34	2.44
比重 proportion/%	0.0084	0.0142	0.015	0.0126	0.014	0.013	0.013	0.0125	0.0114	0.014	0.0113
华北 North China	4.16	6.73	6.76	5.65	6.24	5.75	5.39	5.43	4.75	6.29	5.21
比重 proportion/%	0.0155	0.0149	0.022	0.0242	0.0252	0.0264	0.0256	0.0262	0.0239	0.0259	0.0252
黄淮海 ^a	7.67	7.06	9.92	10.85	11.22	11.68	10.62	11.38	9.97	11.64	11.61
比重 proportion/%	0.0057	0.0043	0.0052	0.0088	0.0128	0.012	0.0105	0.0087	0.0144	0.0117	0.0093
西北 North West	2.82	2.04	2.34	3.95	5.70	5.31	4.36	3.78	6.01	5.26	4.29
比重 proportion/%	0.0063	0.0076	0.0064	0.0071	0.0069	0.0062	0.0064	0.0069	0.0068	0.0071	0.0066
东南 South East	3.12	3.60	2.89	3.18	3.07	2.74	2.65	3.00	2.84	3.19	3.04
比重 proportion/%	0.0188	0.023	0.026	0.0248	0.0284	0.0298	0.0334	0.0325	0.0294	0.0286	0.0282
长江中下游 ^b	9.31	10.91	11.72	11.12	12.65	13.18	13.85	14.11	12.26	12.85	13.00
比重 proportion/%	0.0235	0.0275	0.027	0.0317	0.0227	0.0232	0.0241	0.0262	0.0268	0.0191	0.021
华南 South China	11.63	13.04	12.17	14.22	10.11	10.26	10.00	11.38	11.18	8.58	9.68
比重 proportion/%	0.0142	0.0144	0.0142	0.009	0.0096	0.01	0.0084	0.0089	0.0098	0.0103	0.0108
西南 South West	7.03	6.83	6.40	4.04	4.28	4.42	3.48	3.86	4.09	4.63	4.98
比重 proportion/%	0.1058	0.1176	0.1272	0.1306	0.1306	0.1325	0.1306	0.1291	0.1301	0.1218	0.1177
<i>T_{WR}</i>	52.38	55.76	57.35	58.57	58.17	58.60	54.17	56.06	54.25	54.74	54.24
比重 proportion/%	0.1179	0.1234	0.1368	0.1382	0.1457	0.1488	0.1630	0.1539	0.1512	0.1444	0.1392
东中西地区	58.36	58.53	61.70	61.97	64.91	65.83	67.60	66.81	63.07	64.91	64.15
East, Middle and West of China	0.0515	0.0529	0.0514	0.0523	0.0418	0.0405	0.0473	0.0489	0.0539	0.0452	0.0462
东 East	25.48	25.08	23.16	23.47	18.61	17.91	19.61	21.23	22.46	20.30	21.28
比重 proportion/%	0.0146	0.0175	0.0163	0.0165	0.0166	0.0166	0.0124	0.0107	0.0115	0.0125	0.0131
中 Middle	7.21	8.28	7.37	7.38	7.40	7.33	5.15	4.66	4.78	5.63	6.03
比重 proportion/%	0.0182	0.0171	0.0172	0.0160	0.0204	0.0202	0.0184	0.0167	0.0232	0.0204	0.0186
西 West	9.00	8.11	7.73	7.18	9.09	8.93	7.65	7.26	9.68	9.15	8.58
比重 proportion/%	0.0841	0.0875	0.0850	0.0848	0.0788	0.0773	0.0781	0.0764	0.0886	0.0781	0.0778
<i>T_{WR}</i>	41.64	41.47	38.30	38.03	35.09	34.17	32.40	33.19	36.93	35.09	35.85
比重 proportion/%	0.0493	0.0397	0.0370	0.0329	0.0356	0.0318	0.0341	0.0295	0.0348	0.0331	0.0297
南北地区	24.41	18.82	16.67	14.73	15.85	14.05	14.13	12.79	14.50	14.86	13.68
South and North of China	0.0979	0.1113	0.1185	0.1173	0.1111	0.1151	0.1306	0.1281	0.1234	0.1135	0.1157
南 South	48.45	52.76	53.45	52.59	49.47	50.92	54.18	55.61	51.45	51.02	53.34
比重 proportion/%	0.0548	0.0601	0.0663	0.0729	0.0778	0.0792	0.0764	0.0728	0.0816	0.0758	0.0716
北 North	27.14	28.48	29.88	32.68	34.67	35.03	31.69	31.60	34.05	34.07	32.98
比重 proportion/%	0.1527	0.1712	0.1848	0.1901	0.1889	0.1943	0.2070	0.2008	0.2050	0.1894	0.1873
<i>T_{WR}</i>	75.59	81.18	83.33	85.27	84.15	85.95	85.87	87.21	85.50	85.14	86.32
比重 proportion/%											

a 黄淮海 Huanghuaihai; b 长江中下游: The middle and lower reaches of Changjiang River

表 4 中国水足迹强度区域分离系数

Table 4 The separation index for regional intensity of the water footprint in China

年份 Year	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
东中西区 East, Middle and West of China	6.610	6.705	7.660	7.746	8.867	9.295	10.152	9.948	8.483	9.322	9.194
南北方 South and north of China	2.068	1.503	1.300	1.140	1.258	1.101	1.169	1.051	1.230	1.285	1.186

(9.942)、产业结构转换能力综合指数(9.664)、单位粮食面积产量(7.049)、人均水资源量(2.473)、人口(1.005),这说明,区域发展策略、经济发展水平和市场发育程度对中国水足迹强度区域差异变化影响非常显著,其次是技术水平、产业结构优化升级,这几方面是促使水足迹强度差异形成和变化的主要动力;农业土地生产能力和水资源禀赋在一定程度上影响用水效率的不均衡性;而人口压力对水足迹强度区域不平衡性影响相对较小,说明人均用水效率受空间地理影响是比较间接的,而人类各种活动包括生产和消费的模式不同对水足迹强度差异影响更为直接。

由以上成因分析中国水足迹强度的时空差异变化规律:具有享受优惠区域发展策略、发达的经济、发育完善的市场体系、较高的技术水平、较强的产业结构转换能力等发展优势的地区,其水资源利用效率提高的速度逐渐与其他地区分离,表现出差异扩大的态势,反映在倒 U 型曲线的左侧;当这种差异发展到一定程度,另外一些地区资源禀赋较好等发展优势表现出来,加之政府引导,这种差异会得到控制并缩小。2000 年提出西部大开发战略决策,2005 年继续推行西部大开发、振兴东北地区等老工业基地、促使中部崛起等战略决策,促使区域差异扩大的中国用水效率在后几年有所控制,虽然在总量上差异还很大,但是这种差异已经有缩小的趋势,即反映在进入倒 U 型曲线的右侧发展。整体差异变化分析如此,分区内部差异也是遵循同样的规律。

5 结论与启示

(1)从产品消费角度核算人类对水资源的真实需求情况,是水资源可持续利用管理的一个新的内容,对水资源利用政策的制定具有重要意义。通过计算,1997—2007 年中国水资源消费足迹总量为 7387.7 亿 m^3/a ,其中农畜产品水足迹贡献最大,占总量的 76.34%,其次是水污染(10.61%),生态环境水足迹最小,仅占总量的 1.22%。需要说明的是,在计算农畜产品水足迹时,应考虑到不同时间消费产品单产虚拟水含量是变化的,事实上,随着经济技术的发展,单位产品所耗水量应该是降低的,但是由于数据资料受限,本文采用概化平均来处理,亦可从整体把握中国水足迹发展的变化和规律。

(2)中国水足迹强度在 11 年间总体呈下降趋势,即中国水资源利用效率在逐步提高,但各个地区用水效率提高的速度是不同的,表现出一定的差异性和不平衡性,这种差异呈现出“先(1997—2003 年)增大后(2003—2007 年)缩小”的近似倒 U 型曲线发展态势,分析表明未来几年这种差异缩小的趋势会持续。

(3)中国水足迹强度整体空间差异与区域发展的内部差异和区间差异有关,东中西地区差异主要受该 3 区组间不同而不同,而南北地区差异几乎取决于此 2 区内部的差异。八大区域中,华南地区和长江中下游地区对组内差异贡献最大,二者之和占总组内差异的 40% 以上,西北地区最小;东中西区域中,东部地区最大,占组内总差异的近 60%;南北区域中,南部贡献占 60% 以上而大于北方地区。

(4)通过计算分析得知,11a 间中国水足迹强度差异总体大致呈倒 U 型曲线发展,东中西三大地带差异先扩大后缩小,南北不平衡性有所减小。利用分离系数定量计算出促使水足迹强度差异形成和变化的主要因子为区域发展策略、经济发展水平、市场发育程度、技术水平以及产业结构优化升级等,因此可以从主要因素入手,结合水资源利用效率较低地区的资源禀赋等优势,制定区域发展策略、引进技术和投资、调整产业结构等一系列措施促使水资源利用效率差异减小,进而缓解我国水资源短缺、水污染严重等水危机问题,一定程度上推进我国水资源利用的可持续发展。

(5)本文将经济学中测量收入差异的指标锡尔指数和基尼系数引入到水足迹强度差异的研究中,由于数据资料受限,时间序列再长一些,上述结果的说明力会更强一些。同时,通过分析发现,中国水污染足迹强度差异极化现象非常严重,部分地区必须严格控制污水排放总量,削减工业污染,对水污染重点排放行业严格实

行用水定额、循环用水定额和节水标准,工业生产做到“增长不增污”甚至“增长减污”。由于本文只对部分工业污水污染物排放进行计算,而其他污染物以及生活污水排放等没有计算在内,所以水污染足迹结果是非常保守的,有待深入研究。

References:

- [1] Wang X H, Xu Z M, Long A H. Estimation of Water Footprint of China in 2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(5):774-780.
- [2] Chen C Z, Lin Z S. Wavelet analysis of China's per capita ecological footprint from 1961 to 2005. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 338-344.
- [3] Long A H, Xu Z M, Wang X H, Shang H Y. Impacts of population, affluence and technology on water footprint in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10):3358-3365.
- [4] Hoekstra A Y, Hung P Q. Globalization of water sources: international virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*, 2005, 15: 45-56.
- [5] Long A H, Zhang Z Q, Xu Z M, Su Z Y. Analysis of water footprint and consumption pattern in Gansu Province. *Advance in Water Science*, 2005, 16(3):418-425.
- [6] Ma J, Wang D X, Hoekstra A Y, Xia H X. Application of the virtual water trade to China's grain security. *Advance in Water Science*, 2006, 17(1):102-107.
- [7] Ma T. Analysis of ecological elements flow in foreign trade of China. Shanghai: Fudan University Press, 2007:111-172.
- [8] Huang L N, Zhang W X, Jiang C L, Fan X Q. Ecological footprint method in water resources assessment. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [9] Hoekstra A Y and Hung P Q. Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows Between Nations in Relation to International Crop Trade, Value of Water Research Series No. 11. Delft, The Netherlands: IHE, 2002:15-17.
- [10] Hoekstra A Y and Chapagain A K. water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 2007, 21: 35-48.
- [11] Ma J, Wang D X, Lai H L, Wang Y. Water footprint-an application in water resources research. *Resources Science*, 2005, 27(5):96-99.
- [12] Xu Z M, Long A H, Zhang Z Q. Virtual water consumption calculation and analysis of Gansu Province in 2000. *Acta of Geographica Sinica*, 2003, 58(6):861-869.
- [13] Ou X J, Shen Z P, Wang R C. Spatial structure evolution of regional economic growth and its inequality in China since 1978. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(6):641-648.
- [14] Ou X J, Zhao Q. Quantitative analysis of factors of regional economic inequality in Jiangsu Province with regional separation index. *Geographical Research*, 2007, 26(4):693-704.
- [15] Liu H. Regional inequality measurement: methods and evaluations. *Geographical Research*, 2006, 25(4):710-718.
- [16] Zhang Y B, Mai Z Q, Chen X G, Peng X C. Analysis of city resource-environment Gini coefficient in Guangdong Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 728-734.
- [17] Daniel Urrutiaguer. French decentralisation of the performing arts and regional economic Disparities. *Journal of Cultural Economics*, 2005, 29: 299-312.

参考文献:

- [1] 王新华,徐中民,龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析. *冰川冻土*, 2005, 27(5):774-780.
- [2] 陈成忠,林振山. 中国 1961-2005 年人均生态足迹变化. *生态学报*, 2008, 28(1): 338-344.
- [3] 龙爱华,徐中民,王新华,尚海洋. 人口、富裕及技术对 2000 年中国水足迹的影响. *生态学报*, 2006, 26(10):3358-3365.
- [5] 龙爱华,张志强,徐中民,苏志勇. 甘肃省水资源足迹与消费模式分析. *水科学进展*, 2005, 16(3):418-425.
- [6] 马静,汪党献, A. Y. Hoekstra, 夏海霞. 虚拟水贸易在我国粮食安全问题中的应用. *水科学进展*, 2006, 17(1):102-107.
- [7] 马涛. 中国对外贸易中的生态要素流分析. 上海:复旦大学出版社, 2007:111-172.
- [8] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,范晓秋. 水资源生态足迹计算方法. *生态学报*, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [11] 马静,汪党献,来海亮,王 茵. 中国区域水足迹的估算. *资源科学*, 2005, 27(5):96-99.
- [12] 徐中民,龙爱华,张志强. 虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用. *地理学报*, 2003, 58(6):861-869.
- [13] 欧向军,沈正平,王荣成. 中国区域经济增长与差异格局演变探析. *地理科学*, 2006, 26(6):641-648.
- [14] 欧向军,赵清. 基于区域分离系数的江苏省区域经济差异成因定量分析. *地理研究*, 2007, 26(4):693-704.
- [15] 刘慧. 区域差异测度方法与评价. *地理研究*, 2006, 25(4):710-718.
- [16] 张音波,麦志勤,陈新庚,彭晓春. 广东省城市资源环境基尼系数. *生态学报*, 2008, 28(2): 728-734.