

# 基于水足迹理论的江苏省水资源可持续利用评价

刘楚焯, 赵言文, 马群宇, 卞雪, 贲春月

(南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** [目的] 通过核算考虑灰水的江苏省水足迹, 评价江苏省水资源可持续利用现状和发展趋势, 为制定合理的水资源管理政策提供科学依据, 并对水资源管理提出创新对策。[方法] 采用水足迹理论核算分析江苏省 2005—2015 年水足迹及其变化特征, 选取水资源与经济、社会、环境协调发展水平 4 个子系统共 14 个指标对这 11 a 间江苏省水资源可持续利用情况进行分析, 并引入 GM(1,1) 灰色模型预测了未来 5 a (2016—2020 年) 水足迹的发展趋势。[结果] ① 江苏省水足迹在 11 a 间总体呈倒 U 趋势, 峰值在 2011 年, 达  $1.22 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , 随后急剧减少; ② 江苏省年均水足迹自给率为 88.1%, 经济社会协调水平较高且呈现可持续发展的趋势, 但依然处于严重水资源短缺状态; ③ 在“惯性发展”的情境下, 到 2020 年江苏省水足迹较 2015 年减少  $2.04 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 年均降幅为 0.92%。[结论] 随着最严格水资源管理制度的落实, 各行业用水效率不断提高, 江苏省水资源利用呈现出可持续发展的态势。

**关键词:** 水足迹; 水资源; GM(1,1); 可持续利用; 江苏省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0313-08

中图分类号: X143

**文献参数:** 刘楚焯, 赵言文, 马群宇, 等. 基于水足迹理论的江苏省水资源可持续利用评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 313-320. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.051; Liu Chuyue, Zhao Yanwen, Ma Qunyu, et al. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Jiangsu Province based on water footprint theory[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 313-320. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.051

## Evaluation of Sustainable Utilization of Water Resources in Jiangsu Province Based on Water Footprint Theory

LIU Chuyue, ZHAO Yanwen, MA Qunyu, BIAN Xue, BEN Chunyue

(College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

**Abstract:** [Objective] The gray water footprint was considered to evaluate the situation and trend of sustainable utilization of water resources in Jiangsu Province, and to provide scientific basis and policy support to some extent for the determination of reasonable water sustainable utilization strategies, and to give some innovative advices for water resources management. [Methods] The study calculated water footprint and its characteristics in Jiangsu Province from 2005 to 2015 by applying the water footprint theory, and analyzed the situation of sustainable utilization of water resource in terms of water footprint structure, social benefit, economic benefit and ecological security. In addition, GM(1,1) was used to predict the development trend in the next five years. [Results] ① The water footprint of Jiangsu Province showed an inverted U-shaped curve in the study period, got the highest ( $1.22 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ) in 2011, and showed a fast declining trend. ② Jiangsu Province can self-supply (average water self-supplication is 88.1%) in supply water resources. It is in a high level of economic and social benefit, but still be in a state of serious water shortage. ③ According to the “Inertia development” situation, the water footprint in 2020 will have a 0.92% decline as compared with that in

收稿日期: 2017-03-20

修回日期: 2017-05-01

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“农村发展中生态环境管理研究”(70833001)

第一作者: 刘楚焯(1992—), 女(汉族), 辽宁省沈阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持、环境规划与环境影响评价。E-mail: 936013957@qq.com, Tel: 15240209004。

通讯作者: 赵言文(1965—), 男(汉族), 江苏省徐州市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持、环境生态学、环境影响评价研究。E-mail: ywzhao@njau.edu.cn。

2015. [Conclusion] As the strictest water resources control system was applied, water use efficiency has been improved, and the water resources utilization of Jiangsu Province presents a trend of sustainable development.

**Keywords:** water footprint; water resources; GM(1,1) model; sustainable utilization; Jiangsu province

水是生命之源、生产之要、生态之基,是支撑社会经济发展的基础性战略资源。受人类活动和气候变化等因素影响,全球水资源压力一直不断加剧。中国人均水资源量 2 173 m<sup>3</sup>,仅为世界平均水平的 1/4。人多水少,水资源时空分布不均是我国的基本国情和水情;此外,随着我国经济发展进入新常态和新型城镇化进程的加快,水资源供需矛盾进一步突出。当前我国水资源面临的形势十分严峻,水资源短缺,水污染严重,水生态环境恶化问题日益突出,已成为制约经济社会可持续发展的主要瓶颈。近年来,国家相继出台了《关于实行最严格水资源管理制度的意见》、《水污染防治行动计划》等法规政策,从制度上实行最严格水资源管理。如何实现水与经济社会环境的协调发展,成为当前必须要关注的紧迫性问题。水足迹与可持续发展是近年来水资源领域的研究热点。从国外研究进展来看,有些学者<sup>[1-2]</sup>从生产角度围绕各行业水足迹及虚拟水,研究行业水资源可持续利用评价与优化配置;有些学者<sup>[3-5]</sup>从消费角度计算国家、地区、流域水足迹,评价消费模式、产品贸易对全球及区域水资源安全和可持续利用的影响;还有学者<sup>[6-9]</sup>从理论角度探究水资源可持续性评价指标体系,提出水资源可持续利用对策与管理建议。在中国,水资源可持续利用研究已十分广泛,但以往研究多围绕实体水展开,忽视了农业生产中对土壤水的利用以及区域间虚拟水贸易的影响,因此单纯从常规水资源角度研究区域水资源可持续利用情况具有一定局限性。而水足迹不仅考虑了实体水,还涵盖了虚拟水及其贸易,能够反映消费者对区域内部水资源(内部水足迹)和外部水资源(外部水足迹)的依赖程度,将水资源评价的视角从区域内部拓展到外部,为区域水资源可持续发展提供了全新的思路。因此,基于水足迹理论可以更全面、更客观地表征区域水资源可持续利用情况。我国涉足水足迹领域时间尚短,且主要集中于水足迹概念及区域层面上的计算应用研究<sup>[10-12]</sup>,将水足迹理论应用于水资源可持续利用评价研究较少。本研究将二者结合,并引入灰色预测模型对水足迹趋势进行预测,对区域水资源管理提出创新性建议,为江苏缓解用水矛盾、解决水资源短缺危机提供决策依据。

## 1 研究区概况

江苏省位于中国东部沿海中心,地理坐标为东经

116°18′—121°57′,北纬 30°45′—35°20′,是中国综合发展水平最高的省份之一。该省土地面积 1.072 × 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,其中水域面积达 1.73 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,占该省总面积 17%,为全国水面积比重之最。江苏省属东亚季风气候区,处在亚热带和暖温带的气候过渡地带,多年平均降水量 1 015.45 mm,降水分布是南部多于北部,沿海多于内陆。2015 年该省水资源总量为 5.82 × 10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>,人均水资源占有量分别相当于全国和世界人均水平的 1/3 和 1/12。该省总体上水资源总量丰富,但人均水资源不足,区域间水资源利用不平衡,同时水环境日趋恶化,水资源短缺已成为制约江苏经济社会发展的重要因素。

## 2 研究方法

水足迹理论是由荷兰学者 Hoekstra 于 2002 年提出,该理论能够更为全面和真实地表征某一区域水资源的实际占用情况。灰色系统理论 GM(1,1)模型作为灰色预测的核心模型,以其“小样本”和“贫信息”的研究特质及简单实用的优点,广泛应用于趋势预测研究中。本研究结合水足迹理论和 GM(1,1)模型对江苏省水资源可持续利用情况进行评价和预测。

### 2.1 水足迹理论

水足迹(WF)是一定区域内人口消费的产品和服务所使用的水资源总量<sup>[13]</sup>。水足迹从生产和消费角度衡量区域水资源的真实需求和占用情况,不仅包括人类社会发展所消耗的实体水,还包括隐藏在产品和服务内的虚拟水,能够真实的表征区域水资源的利用量。采用自上而下法计算水足迹,根据江苏省的实际情况及资料的可获得性,建立农畜需水量、工业用水量、生活用水量、生态用水量以及虚拟水进出口量 6 个账户,对 2005—2015 年江苏省水足迹及其分析指标进行计算。

2.1.1 总水足迹(WFP) 一个国家或地区的水足迹(WFP)由 2 部分构成:内部水足迹(IWF)和外部水足迹(EWFP),即<sup>[14]</sup>:

$$WFP = IWF + EWFP \quad (1)$$

2.1.2 内部水足迹(IWFP) 区域内部水足迹(IWFP)指生产该国家或地区当地居民所消费的所有产品和服务的区域内水资源总量,等于该区域内水资源总利用量减去通过产品贸易出口给其他区域的虚拟水量:

$$IWFP = AWU + IWW + DWW + EWW - VWE \quad (2)$$

式中:AWU——农产品需水量;IWW——工业需水量;DWW——居民生活用水量;EWW——生态用水量;VWE——产品虚拟水的出口量。

(1) 农畜需水量(AWU)。农业是水资源消耗最大的部门,本文的农畜用水量是利用水足迹理论计算得到,可以更真实地表征农业的水资源利用情况。农畜需水量由农作物虚拟水和动物产品虚拟水两部分组成。传统的农业用水管理主要关注灌溉用水,忽视了作物生产过程对土壤水的利用以及化肥和农药等的使用对水环境产生的污染,但不包括农业灌溉中损失的部分水量。在计算农作物需水量的时候,采用修正的标准彭曼(Penman-Monteith)公式计算气候因素影响下的参考农作物需水  $ET_0$  (mm/d)

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273}(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \quad (3)$$

式中: $\Delta$ ——饱和水汽压与温度相关曲线的斜率; $R_n$ ——作物表面的净辐射; $G$ ——土壤热通量; $\gamma$ ——湿度计常数; $T$ ——平均空气温度; $U_2$ ——2 m高的风速; $e_a$ ——饱和水汽压; $e_d$ ——实测水汽压; $e_a - e_d$ ——饱和水汽压与实测水汽压的差额。

其次, $K_c$ 以作物系数对  $ET_0$  进行调整获得单位面积该农作物需水量  $W_c$  ( $m^3/hm^2$ ):

$$W_c = K_c \cdot ET_0 \quad (4)$$

本文的作物系数指联合国粮农组织(FAO)推荐的作物系数(部分作物系数缺失,采用相近作物系数代替)。

动物产品生产用水包括活体动物虚拟水含量和宰杀加工用水两部分,前者包括动物整个生长过程中消耗的饲料的虚拟水含量、饮用水、圈舍清洁用水和加工饲料的用水量。其大小取决于动物的品种、饲养系统、饲料消耗量以及饲养地的气候条件。由于计算需要很多数据难以获得,本文采用2012年 Mekonnen 和 Hoekstra<sup>[15]</sup>有关中国动物产品虚拟水的最新研究成果,此次研究较2007年 Hoekstra 和 Chapagain<sup>[5]</sup>更为全面地考虑了动物产品的灰水足迹。

(2) 工业用水量(IWW)。工矿企业在生产过程中用于制造、加工、冷却、空调、净化、洗涤等方面的用水,按新水取用量计,不包括企业内部的重复利用水量。

(3) 生活用水量(DWW)。生活用水包括城镇生活用水和农村生活用水。城镇生活用水由居民用水和公共用水(含第三产业及建筑业等用水)组成;农村生活用水指居民生活用水。

(4) 生态用水量(EWW)。主要是指城镇环境用水,仅包括人为措施供给的城镇环境用水,不包括河湖、湿地补水及降水、径流自然满足的水量,未涉及到调水工程所产生的过境水量。本文中的工业用水量、生活用水量和生态用水量的相关数据从历年的水资源公报上获得。

2.1.3 外部水足迹(EWFP) 区域外部水足迹(EWFP)表示由其他地区生产并被本地区居民所消费的产品和服务所消耗的水量,等于进口虚拟水量减去从其他区域进口再出口的虚拟水量,即:

$$EWFP = VWI - VWE_{re} \quad (5)$$

式中:VWI——进口产品虚拟水量;  $VWE_{re}$ ——向其他国家或地区输出的进口产品再出口量。

因进出口贸易中各商品种类繁多,本文采用简化计算方法,虚拟水贸易中农林牧渔业与工业产品虚拟水含量分别用各自万元产值用水量与贸易价值相乘得到。由于部分数据难以获得,本文忽略了进口产品再出口的虚拟水量<sup>[16]</sup>。

## 2.2 灰色预测模型 GM(1,1)

目前,预测方法主要包括回归分析法、灰色预测法、趋势外推法、时间序列法以及神经网络法。灰色模型预测是以灰色模型为基础的,在诸多的灰色模型中,以GM(1,1)模型最为常用。GM(1,1)模型作为一种典型的趋势分析模型,因其“小样本”和“贫信息”的研究特质及简单实用的优点,特别适用于那些因素众多、结构复杂、涉及面广而层次较高、综合性较强的社会经济系统指标的趋势预测,是应用最为广泛的灰色模型<sup>[17]</sup>。

## 2.3 水资源可持续利用评价指标体系

参考戚瑞等<sup>[18]</sup>基于水足迹理论的区域水资源利用评价体系,根据江苏省实际情况,选取水资源系统发展水平、水资源与经济协调水平、水资源与社会协调水平、水资源生态安全水平4个子系统共14个指标,构建水资源可持续利用评价指标体系,综合反映区域水资源复合系统中经济、社会、生态环境与水源的协调发展状况,以衡量区域水资源可持续利用状态(图1)。

## 2.4 数据来源

数据来源主要包括:联合国粮农组织 CROPWAT 需水量计算软件及 CLIMWAT 数据库,国际动物产品虚拟水含量研究成果中关于中国部分的数据成果<sup>[15]</sup>,江苏省历年水资源公报,《江苏省统计年鉴》《中国统计年鉴》。

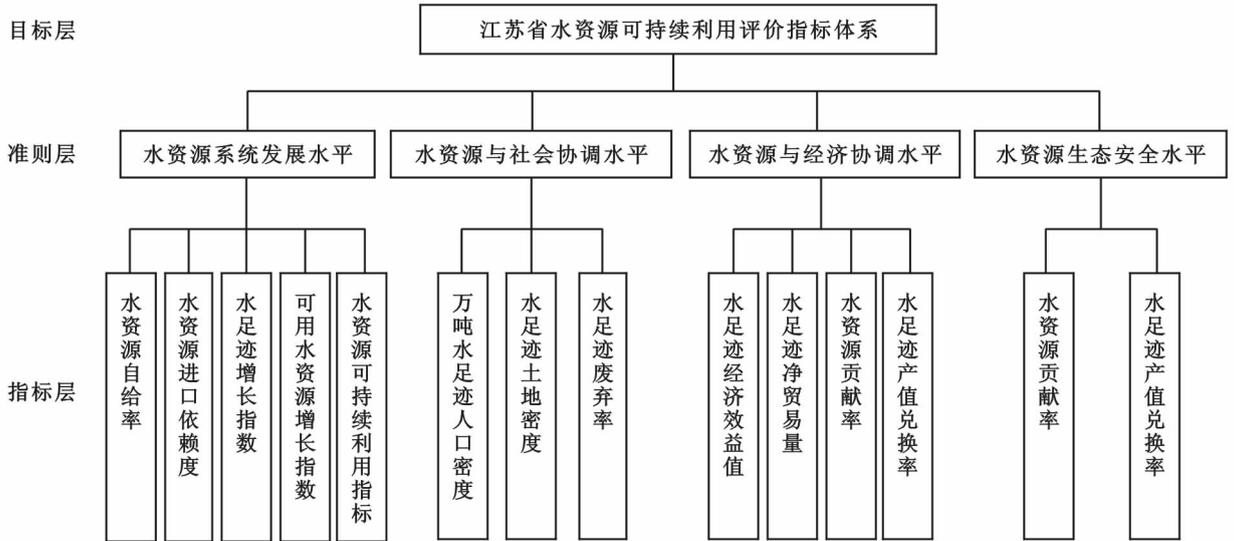


图 1 江苏省水资源可持续利用评价指标体系

### 3 结果与分析

#### 3.1 江苏省水足迹计算结果

江苏省 2005—2015 年水足迹计算结果和变化趋势分别如表 1 和图 2 所示。从图 2 可以看出,江苏省水足迹呈倒 U 形曲线,在 2011 年达到峰值,为  $1.22 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,此后呈现出明显下降趋势,水足迹和人均水足迹分别下降了 9% 和 10%,这是由于 2011 年江苏省政府出台了《关于实行最严格水资源管理制度的实施意见》,水资源利用效率明显提高;同时,建立节水减排专项资金,通过以奖代补的形式,鼓励重点企业实行节水减排技术改造,节水效果显著。11 a 间江苏省平均水足迹为  $1.13 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,年均增长  $1.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,人均水足迹  $1447 \text{ m}^3/(\text{人} \cdot \text{a})$ ,高于全球人均水足迹  $1240 \text{ m}^3/(\text{人} \cdot \text{a})$ ,但与世界发达国家(如美国  $2480 \text{ m}^3/(\text{人} \cdot \text{a})$ ,加拿大为  $2049 \text{ m}^3/(\text{人} \cdot \text{a})$ )还有一定差距,可见人均水足迹的水平与经济发展程

度有着一定的关系,经济越发达的地区其人均水足迹也相对较高。相较于赵晨等<sup>[14]</sup>和谷学明等<sup>[16]</sup>的 2000—2010 年江苏省水足迹研究,本研究水足迹计算结果偏大近  $4.00 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,这是由于本研究将农畜产品的灰水足迹考虑在内,更为全面地反映江苏省水资源真实的消费情况。从表 1 可以看出,农业和工业是江苏省水足迹消费主要部门。农畜用水历年均占江苏省水足迹最大比重,约为总水足迹的 83%,11 a 间从  $8.713 \times 10^{10} \text{ m}^3$  增长为  $9.60 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,有些年份略有下降,但总体上呈缓慢上升趋势,历年农畜产品平均虚拟水含量为  $9.52 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,是实体水平均消费量的 3.3 倍。工业用水作为水足迹的第二大组成部分,自 2007 年起呈明显下降趋势,这主要是由于江苏省不断加大产业结构调整,同时开展了行业专项节水行动,万元工业增加值用水量明显降低,因此,在全省对外贸易平稳增加的情况下,虚拟水进出口贸易量却下降明显,江苏省的工业用水效率显著提高。

表 1 江苏省 2005—2015 年水足迹构成

 $10^8 \text{ m}^3$ 

年份	农畜用水量	工业用水量	生活用水量	生态用水量	进口虚拟水量	出口虚拟水量	总水足迹	人均水足迹/ $\text{m}^3$
2005	871.30	207.90	39.59	3.04	191.88	230.74	1 082.97	1 427.22
2006	867.02	220.30	42.82	3.04	200.18	265.60	1 067.76	1 394.67
2007	879.88	225.30	44.87	3.08	194.48	277.18	1 070.43	1 386.03
2008	914.58	209.40	45.72	3.10	152.18	237.80	1 087.18	1 400.65
2009	953.47	194.60	47.41	3.18	119.73	170.96	1 147.44	1 469.19
2010	987.60	191.90	48.90	3.20	140.71	195.13	1 177.18	1 495.97
2011	1 023.79	192.90	49.70	3.30	137.09	189.62	1 217.16	1 540.90
2012	1 010.72	193.10	50.50	3.30	117.72	177.64	1 197.70	1 512.25
2013	1 004.85	142.20	51.50	3.20	87.32	123.45	1 165.62	1 468.22
2014	998.59	127.30	52.90	2.70	74.72	109.35	1 146.86	1 440.78
2015	960.88	125.10	54.40	2.00	64.46	102.87	1 103.98	1 384.13

## 3.2 水足迹可持续性评价

2005—2015 年江苏省水足迹可持续性指标值,计算结果详见表 2。

本研究根据图 1 的评价指标体系计算得到

表 2 江苏省水足迹可持续性指标分析结果

评价准则	评价指标	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
水资源系统发展水平	水资源进口依赖度 WD/%	17.72	18.75	18.17	14.00	10.43	11.95	11.26	9.83	7.49	6.51	5.84
	水资源自给率 WSS/%	82.28	81.25	81.83	86.00	89.57	88.05	88.74	90.17	92.51	93.49	94.16
	水足迹增长指数 WFPR/%	—	-1.40	0.25	1.56	5.54	2.59	3.40	-1.60	-2.68	-1.61	-3.74
	可用水资源增长指数 WAR/%	—	-13.40	22.58	-23.75	5.90	-4.20	28.40	-24.18	-24.05	40.85	45.77
	水资源可持续利用指标 WSI	—	0.10	0.01	0.07	0.94	0.62	0.12	0.07	0.11	0.04	0.08
	可持续状态		不可持续	可持续	不可持续	可持续	不可持续	可持续	不可持续	不可持续	可持续	可持续
水资源与社会协调水平	万吨水足迹人口密度(人/10 <sup>4</sup> t)	7.01	7.17	7.21	7.14	6.81	6.68	6.49	6.61	6.81	6.94	7.22
	水足迹土地密度/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	101.02	99.60	99.85	101.42	107.04	109.81	113.54	111.73	108.73	106.98	102.98
	水足迹废弃率/%	6.36	6.70	6.68	6.33	5.38	5.32	5.18	5.89	6.10	6.16	6.44
水资源与经济协调水平	水足迹经济效益值/(元·m <sup>-3</sup> )	17.17	20.36	24.31	28.50	30.03	35.19	40.35	45.13	51.26	56.75	63.51
	水足迹净贸易量/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	38.86	65.42	82.70	85.62	51.22	54.42	52.53	59.92	36.13	34.63	38.40
	水资源贡献率/%	8.32	16.18	16.68	22.65	12.80	14.19	10.67	16.05	12.74	8.67	6.60
	水足迹产值兑换率	1.03	1.02	1.02	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95	0.94	0.96
水资源生态安全水平	水资源匮乏指标 WS/%	231.92	264.04	215.94	287.61	286.64	306.96	247.19	320.82	411.11	287.19	189.65
	水资源压力指数 WP/%	240.24	280.21	232.62	310.27	299.43	321.15	257.86	336.87	423.85	295.86	196.25

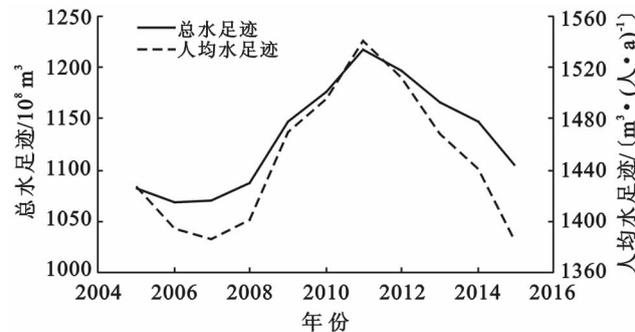


图 2 江苏省 2005—2015 年总水足迹与人均水足迹

3.2.1 水资源系统发展水平分析 2005—2015 年江苏省水足迹结构中内部水足迹所占比率逐年提高,年均水资源自给率为 88.1%,低于中国水足迹自给率平均水平 93.6%,高于世界平均水平 84%。11 a 间水资源自给率均在 80%以上,其中 2012—2015 连续 4 a 高达 90%以上,说明江苏省水资源供给能力较强,基本能满足本省发展需要。这与江苏省的自然地理和气候条件有关:江苏省位于我国华东沿海地区,且地处长江流域与淮河流域下游,水网密布,雨量充沛,有着丰富的可用水资源。随着江苏省经济发展步入新常态,全省对区外工农业产品的进口依赖度明显降低,虚拟水进口量从 2005 年  $1.92 \times 10^{10} \text{ m}^3$  下降至 2015 年  $6.45 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,水资源进口依赖度降幅高达 67%,可见江苏省可通过实施虚拟水贸易战略,加强从省外引进初级产品和服务以补充区域内人口的生活生产需求,缓解本地区的水资源压力。另外,从图 3

江苏省水足迹构成可以看出,工业内部水足迹仅占 0.8%,这看似与经济实力雄厚的江苏省情不符,究其原因这是由于内部水足迹中工业部分的核算方法为工业用水量与工业虚拟水出口量之差,即不包含工业产品出口虚拟水。江苏省为我国东部沿海省份且综合经济发展水平较高,对外经济贸易相对发达,工业制成品产出多的同时也大规模出口,导致虚拟水向外流出,同时也有利于对区外虚拟水资源的进口利用。

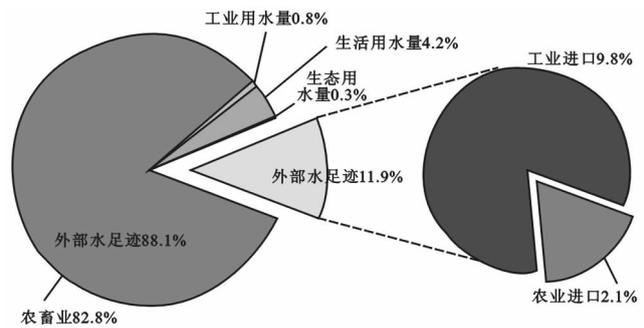


图 3 江苏省 2005—2015 年水足迹构成

从图 4 可以看出,江苏省水足迹增长指数总体呈先上升后下降趋势,在 2009 年出现最高值,达到 5.54%,随后曲折式下降,于 2012—2015 年连续 4 a 实现水足迹负增长,说明江苏省节水型社会建设工作成效显著,实行最严格水资源管理成绩突出。11 a 间江苏省水资源总量在  $2.84 \times 10^{10} \text{ m}^3$  (2013 年中等干旱年份)至  $5.82 \times 10^{10} \text{ m}^3$  (2015 年丰水年份)范围内上下波动,除 2013,2015 年外其余年份均属平水年,

年均水资源总量为  $4.24 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , 而江苏省年均水足迹  $1.13 \times 10^{11} \text{ m}^3$ , 可见水足迹远远大于水资源可利用量, 11 a 间有一半年份江苏省水资源利用处于非可持续利用状态, 水资源安全问题严峻。同时, 通过表 2 可以看出, 2014 和 2015 年该省连续两年水资源利用呈现可持续状态, 随着用水效率的提高, 江苏省水资源短缺问题略有好转, 呈现出可持续发展态势。但可用水资源量受到降雨、气温、出入境水资源量等不可控因素影响, 只有通过不断提高水资源利用率、加快产业转型升级、推广海绵城市建设等措施降低人类对水资源的消耗, 才是解决水资源短缺、保证水资源可持续利用的根本途径。

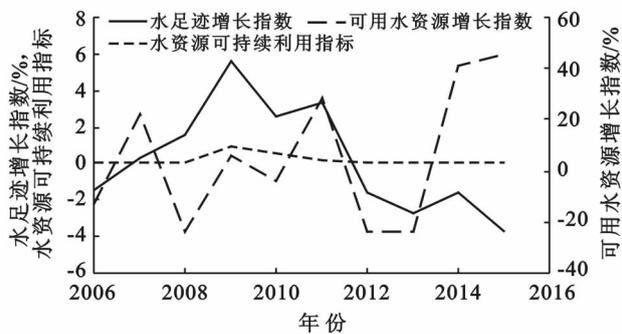


图 4 江苏省水足迹可持续性性能

**3.2.2 水资源与社会协调水平分析** 该组指标表明江苏省水足迹社会效益整体水平较高, 在人们生产生活中得到了有效利用, 发挥着积极效应。万吨水足迹人口密度值从 2011—2015 年逐年增长, 增幅为 11%, 表明江苏省单位水足迹承载人口能力在缓慢增强; 水足迹土地密度随水足迹趋势变化, 总体上呈现出先上升后下降趋势, 相对世界和我国平均水平均较大单位国土面积占用水资源量偏大, 这是因为受到城市发展水平、产业布局等因素影响; 水足迹废弃率水平较为稳定, 平均废弃率为 6%, 表明江苏省清洁生产水平较高, 在节水管理和污水处理方面取得了较大进步。应进一步加快先进适用节水技术成果推广应用, 全方位提高各个领域用水效率。

**3.2.3 水资源与经济协调水平分析** 在 2005—2015 年江苏省经济发展进程中, 水资源利用与经济发展曲线朝着可持续的轨迹方向前进。11 a 间江苏省经济增长水平高于水资源投入水平, 水足迹经济效益指标不断高攀, 增幅高达 2.7 倍, 这与江苏省经济的飞速发展、水资源利用效率的提高密不可分, 说明水资源在江苏省国民经济发展中得到了有效利用, 水足迹产生的经济效益不断增大, 水资源利用水平大幅提高, 这与前人<sup>[16,19-21]</sup>江苏省水资源利用效率稳步提升的

研究结论保持一致; 江苏省水足迹净贸易量均为正, 且总体呈下降趋势, 表明江苏省在虚拟水贸易中属于水资源输出地, 出口情势放缓, 水资源贸易格局稳定。但随着省内产业结构不断转型升级、优化调整, 水资源利用效率不断提高, 在全省对外贸易稳步增加的情况下, 虚拟水净贸易值却逐年收窄; 水资源贡献率较高, 说明该地区可用水资源不仅支撑了当地的生产发展, 而且对缓解其他地区水资源压力做出很大贡献; 水足迹产值兑换率在  $1 \pm 0.6$  范围内波动, 即进口单位虚拟水产品经济价值与出口单位虚拟水产品经济价值持平, 说明江苏省在虚拟水贸易中处于均衡地位, 应通过深入实施创新驱动发展战略, 依靠新技术、新业态、新模式, 推动实体经济优化结构, 推动传统产业生产、管理和营销模式变革, 建立可持续的循环经济体系和生产模式, 进一步提升在虚拟水贸易中的地位。

**3.2.4 水资源生态安全水平分析** 该组指标表明江苏省水资源利用呈现出与生态环境相协调的可持续发展态势, 但水资源生态安全状况不容乐观, 依然处于严重水资源短缺状态, 水资源承载压力巨大, 水资源系统严重超载。这个结果与冷建飞等<sup>[22]</sup>通过生态足迹方法得出的结论基本一致, 江苏省水资源利用一直处于生态赤字的极不安全状态。11 a 间江苏省水资源匮乏指数和压力指数均超过 100%, 远远超出了 40% 的水资源开发利用阈值, 在 2013 年二项指标达到最高水平, 随后以每年 30% 的速率下降, 说明江苏省水资源安全状况有所改善, 一方面是由于近两年雨量充沛, 降雨量显著增加; 另一方面是因为江苏省通过实施最严格水资源管理制度, 水生态文明城市建设、开展全民节水行动等工作, 在一定程度上缓解了本地区水资源紧张状态。应通过优化产业结构、加强虚拟水进口以及广泛开展节水活动等措施降低对本地水资源的耗费, 从而改善水资源安全状况。这里需要说明的是, 本文可用水资源总量指当地降水形成的地表和地下水总产量, 即地表产流量与降水入渗补给地下水量之和, 未计入农业生产耗费的土壤水和雨水等, 这也是造成水资源压力指数偏高的另一个原因。

### 3.3 预测模型运行结果分析

按照 GM(1,1) 模型的求解步骤, 编写 MATLAB 灰色预测程序。最终建立 GM(1,1) 预测模型为:

$$x_{(t+1)}^{(1)} = -621\ 243.610\ 5e^{-0.0018487t} + 622\ 326.581\ 6$$

式中:  $a$ —0.001 848 7;  $C$  值为 0.045;  $P$  值为 1; 模型的预测精度为 1 级, 适合做中长期预测。GM(1,1) 模型模拟值及拟合相对误差值详见表 4。预测相对误差范围为  $-7.46\% \sim 6.59\%$ , 平均相对误差绝对值为 4.17%, 模型拟合效果好。

表3 GM(1,1)模型模拟结果

年份	模拟结果	实际值	拟合相对误差/%
2005	1 082.97	1 082.97	0.00
2006	1 147.46	1 067.76	-7.46
2007	1 145.34	1 070.43	-7.00
2008	1 143.22	1 087.18	-5.15
2009	1 141.11	1 147.44	0.55
2010	1 139.00	1 177.18	3.24
2011	1 136.90	1 217.16	6.59
2012	1 134.80	1 197.70	5.25
2013	1 132.70	1 165.62	2.82
2014	1 130.61	1 146.86	1.42
2015	1 128.52	1 103.98	-2.22

假设江苏省水足迹发展速度保持2005—2015年下降水平,即处于“惯性发展”情景下,采用GM(1,1)模型预测得到未来5a的水足迹大小,结果列于表4。根据预测,到2020年江苏省水足迹 $1.118 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,较2015年减少 $2.04 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,年均下降0.92%,低于2005—2015年的年均增幅0.19%。

表4 江苏省2016—2020年水足迹预测结果  $10^8 \text{ m}^3$ 

年份	2016	2017	2018	2019	2020
预测值	1 126.44	1 124.36	1 122.28	1 120.21	1 118.14

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

(1) 2005—2015年江苏省总水足迹呈倒U型曲线,峰值在2011年,达 $1.22 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,随后急剧减少,11a间江苏省平均水足迹为 $1.13 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,人均水足迹 $1.45 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,年均增长量 $1.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(2) 江苏省年均水足迹自给率为88.1%,水资源自给能力较强,经济社会效益整体水平较高且朝着可持续的轨迹方向前进,水资源安全状况有所改善,但依然处于严重水资源短缺状态。随着最严格水资源管理制度的落实,各行业用水效率不断提高,江苏省水资源利用呈现出可持续发展的态势。

(3) 在“惯性发展”的情境下,“十三五”期间江苏省水足迹将继续保持逐年下降水平,到2020年江苏省水足迹下降至 $1.12 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,较2015年减少 $2.038 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,年均降幅0.92%。

(4) 本研究创新之处在于结合水足迹从水资源复合系统角度构建指标体系论证了江苏省水资源可持续发展状况,并结合预测模型对十三五期间江苏省水足迹做出趋势预测,能够更为全面地表征江苏省水资源真实消耗水平。但目前国内水足迹的核算仍比较

粗略,且多以农作物和动物产品虚拟水的计算为主,对工业产品、生活和生态用水等相关研究较少,大多直接引用水资源公报上实体水的统计数据,且本文忽略了出口再进口这部分虚拟水贸易量的影响,各学者得出的结果差异性较大,研究也未考虑科技进步水平等因素,如万元产值用水量只是按照算术平均值简化处理,因此确切的结果还需进一步的探究。

### 4.2 建议

(1) 制定水足迹管理政策。将水足迹纳入水资源管理体系,建立水足迹帐户和绿色档案,打造水资源精细化管理,倒逼高耗水企业绿色转型。在流域规划中,对流域进行水足迹评价;在经济政策中,成立水足迹审计部门,对企业用水情况做定期审计,并要求其按季度发布水足迹报告。当企业水足迹消耗过大,对水资源短缺地区造成严重影响时,需要其致力于减少该地区的水足迹;在国际贸易中,给予政策倾斜限制高耗水产品出口,优先出口低耗水优势产品,进口高耗水劣势产品;在制定法律法规中,发布法规规定用水收费标准以水足迹作为依据,水法修订确立以蓝水足迹衡量用水效率。

(2) 提升水资源自给能力。加快推进海绵城市建设,充分开发利用雨洪资源,夯实水资源供给基础。具体措施包括雨水采集、海水淡化、废水处理、水回收和再利用技术,等等。

(3) 调整水资源消费结构。农业是耗用水资源最多的部门,应通过调整农业产业结构,适当扩大稻谷、蔬菜、油料等低耗水、高经济效益农作物的种植规模,同时推广农业节水技术和器具;加快工业产业转型升级,淘汰产业链落后、高耗能产业,大力发展现代服务业、金融等第三产业;倡导健康饮食习惯,调整不良饮食结构,降低对高耗水产品的消费。

(4) 加强虚拟水贸易战略合作。紧抓“一带一路”发展契机,推进虚拟水贸易多边合作,合理调配与优化配置水资源以保障水资源安全。充分发挥江苏省的沿海地理优势,加强贸易流通,调整产业结构及贸易格局,降低对外贸易对水资源的消耗和污染,合理控制虚拟水出口,从而平衡水赤字,以缓解江苏省水资源供需矛盾和短缺危机。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Imura H, Matsuoka M, Fukushima Y, et al. Study on Sustainable Agricultural Production and Agricultural Water Use Efficiency in the Yellow River Basin of China [M]. US: From Headwaters to the Ocean, 2008, 465-470.
- [2] Van R D J, Hugh T, Wade B T. Urban and industrial

- water use in the Krishna Basin, India[J]. *Irrigation & Drainage*, 2009,58(4):406-428.
- [3] Arfanuzzaman M D, Atiq Rahman A. Sustainable water demand management in the face of rapid urbanization and ground water depletion for social-ecological resilience building[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2017,10(C):9-22.
- [4] Erzin A E, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. Sustainability of national consumption from a water resources perspective: The case study for France[J]. *Ecological Economics*, 2013,88(7):133-147.
- [5] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern[J]. *Water Resources Management*, 2007,21(1):35-48.
- [6] Zhang G P, Hoekstra A Y, Mathews R E. Water Footprint Assessment (WFA) for better water governance and sustainable development[J]. *Water Resources & Industry*, 2013,1/2(2):1-6.
- [7] Pires A, Morato J, Peixoto H, et al. Sustainability Assessment of indicators for integrated water resources management [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,578:139.
- [8] Rouillard J, Vidaurre R, Brouwer S, et al. Governance regime factors conducive to innovation uptake in urban water management: Experiences from Europe [J]. *Water*, 2016,8(10):477.
- [9] Vollmer D, Regan H M, Andelman S J. Assessing the sustainability of freshwater systems: A critical review of composite indicators [J]. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2016,45(7):765-780.
- [10] Jia Shu, Huang Ying. The economic analysis of sustainable utilization of agricultural water resources in Shandong province[J]. *Energy Procedia*, 2011,5(5):2120-2124.
- [11] Yuhuan Sun, Ningning Liu, Jixia Shang, et al. Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,142:613-625
- [12] Weiming Chen, Sanmang Wu, Yalin Lei, et al. China's water footprint by province, and inter-provincial transfer of virtual water[J]. *Ecological Indicators*, 2017,74:321-333.
- [13] 王新华,徐中民,龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析[J]. *冰川冻土*, 2005,27(5):774-780.
- [14] 赵晨,王远,谷学明,等. 基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率[J]. *生态学报*, 2013,33(5):1636-1644.
- [15] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products[J]. *Ecosystems*, 2012,15(3):401-415.
- [16] 谷学明,王远,赵卉卉,等. 江苏省水资源利用与经济增长关系研究[J]. *中国环境科学*, 2012,32(2):351-358.
- [17] 周玲玲,王琳,余静,等. 基于水足迹理论的即墨市水资源可持续利用对策研究[J]. *中国海洋大学学报:自然科学版*, 2014,44(11):95-100.
- [18] 戚瑞,耿涌,朱庆华. 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.
- [19] 刘洁,谢丽芳,杨国英,等. 丰水区城镇化进程与水资源利用的关系:以江苏省为例[J]. *水土保持通报*, 2016,36(3):193-199.
- [20] 王倩,魏巍,刘洁,等. 江苏省水资源利用相对效率时间分异与影响因素[J]. *水土保持通报*, 2017,37(1):308-314.
- [21] 岳金桂,游海霞. 江苏省水资源可持续利用问题研究[J]. *水利经济*, 2016,34(3):41-45.
- [22] 冷建飞,张倩. 基于生态足迹模型的水资源可持续利用研究:以江苏省为例[J]. *重庆理工大学学报:自然科学版*, 2015,29(7):54-59.

(上接第 312 页)

- [21] 陈贤干,汪小钦,陈芸芝. 大区域 TM 影像归一化植被指数季相归一化处理方法[J]. *遥感信息*, 2015(6):81-88.
- [22] Fu Guobin, Chen Shulin, Mccool D K. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS[J]. *Soil& Tillage Research*, 2006,85(1):38-49.
- [23] 黄金良,洪华生,张珞平,等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. *水土保持学报*, 2004,18(5):75-79.
- [24] 何钦,孔令军. 福建省水土流失治理情况调查[J]. *调研世界*, 2014(4):34-37.
- [25] 福建省水利厅,福建省统计局. 福建省水土保持公报[J]. *福建水土保持*, 2011,2(2):1-15.
- [26] 福建省统计局. 福建统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2016.