DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2021. 03. 32

浙江省主要农作物水足迹时空特征研究

王芳芳1,赵春芳1,余凤荣1,童亿勤1,2,3

(1. 宁波大学 地理科学与旅游文化学院,浙江 宁波 315211; 2. 宁波市高等学校协同创新中心"宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心",浙江 宁波 315211; 3. 浙江省新型重点专业智库宁波大学东海研究院,浙江 宁波 315211)

摘 要: 农作物水足迹是衡量水资源利用效率的重要指标,为解决水资源短缺问题提供了新的研究视角。以浙江省主要农作物为研究对象,利用 CROPWAT8.0、CLIMWAT2.0 和 ArcGIS 软件,计算和分析了 2002 - 2018 年浙江省的主要农作物水足迹时空特征。结果表明:2002 - 2018 年浙江省农作物总水足迹变动幅度较大,总体呈下降趋势,2016 年最低,2002 年最高,减幅达 16.18%;水足迹内部结构中,粮食作物的水足迹稳居首位,其次是水果、茶叶、蔬菜和油料作物,粮食作物水足迹内部结构中晚稻水足迹占比最大,玉米水足迹占比最小;区域水足迹差异显著,海岛地区农作物总水足迹最低,平原、盆地地区农作物总水足迹最为丰富,山地、丘陵地区农作物总水足迹次之;人均农作物水足迹不仅受农作物总水足迹影响,更受人口数量的影响,人口分布稀疏的县域人均水足迹明显高于人口分布密集的城区。

关键词:水足迹;农作物;时空特征;浙江省

中图分类号:S27 文

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)03-0232-09

Spatial and temporal characteristics of water footprint of main crops in Zhejiang Province

WANG Fangfang¹, ZHAO Chunfang¹, YU Fengrong¹, TONG Yiqin^{1,2,3}

School of Geography and Tourism Culture, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
 Ningbo University Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research,
 Ningbo 315211, China;
 Ningbo University Donghai Institute, Ningbo 315211, China)

Abstract: The crop water footprint is an important index for measuring water resources utilization efficiency, it provides a new approach to solving the problem of water resources shortage. Taking the main crops in Zhejiang Province as the research object, we used CROPWAT8.0, CLIMWAT2.0 and ArcGIS software to calculate and analyze the temporal and spatial characteristics of water footprints of the main crops in Zhejiang Province from 2002 to 2018. The results showed that the total water footprint of crops in Zhejiang Province changed greatly from 2002 to 2018, showing a general downward trend, with the lowest value in 2016, the highest value in 2002 and a total decrease of 16.18%. In the internal structure of water footprints, the water footprint of food crops ranked first, followed by fruits, tea, vegetables and oil crops. In the internal structure of the water footprint of food crops, the water footprint of late rice accounted for the largest proportion, whereas that of corn accounted for the smallest. There were significant regional differences in water footprints, with the lowest total water footprint of crops in island areas, the highest in plain and basin areas, followed by that in mountainous and hilly regions. The per capita water footprint of crops was affected not only by the total water footprint of crops, but also by the population. The per capita water footprint of counties with sparse population was significantly higher than that of cities with dense population.

收稿日期:2020-09-25; 修回日期:2021-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41976209); 浙江两化融合联合基金项目(U1609203); 浙江省科技厅公益技术应用 研究项目(2016C33021)

作者简介:王芳芳(1995-),女,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事区域发展与环境研究。

通讯作者:童亿勤(1962-),男,浙江宁波人,高级实验师,硕士生导师,主要从事区域资源环境与可持续发展研究。

Key words: water footprint; crop; temporal and spatial characteristics; Zhejiang Province

1 研究背景

随着城镇化的快速发展,水资源逐步上升为国 家长远发展的战略性资源。水资源的安全供给是保 障国家粮食安全的重要基础[1],水资源是工农业发 展的重要组成部分,但水资源时空分布不均导致许 多地区水资源缺乏,严重影响了经济与社会的发展, 特别是水资源直接影响着农业的生产发展和粮食安 全保障[2]。近些年来,随着经济与社会的快速发 展,实体用水量已达到自然资源的峰值,如何缓解水 资源面临的困境、高效利用水资源,已成为当前学术 研究的焦点^[3]。1993 年, Allan^[4]认为虚拟水在农业 中指农产品在生产过程中消耗或生产所需要的水资 源量。"水足迹"的概念是基于"虚拟水"的定义提 出,2002年,Hoekstra 等[5]提出"水足迹"的概念,水 足迹指一个国家(一个地区或一个人)在一定时间 内消费的所有产品和服务所需要的水资源总量[6], 可以真实地反映国家或地区对水资源的需求和占用 情况,从而反映水资源量的压力大小。农作物水足 迹指农产品从刚开始播种到后来收割整个流程中消 耗的所有水资源量[7],可以反映农作物耗水类型, 对评估合理利用区域农业水资源具有重大意义[8], 同时为分析和研究农业水资源问题提出了新的研究 思路。

水足迹的概念提出后国内外学者们从不同尺度 上对水足迹进行了研究。国外学者从大尺度出发, 如 Hoekstra 等^[9]对全球人类生产生活用水的水足迹 进行了核算和分析; Mekonnen 等[10] 对全球小麦水 足迹进行了评估: Marston 等[11]利用农作物模型,量 化了严重干旱对地区农业生产、水足迹等方面的影 响,便于人们了解干旱对水-粮食-贸易耦合系统 的影响。而国内学者主要从国家尺度、省级尺度和 流域尺度3个方面开展研究,如孙世坤等[12]以小麦 为研究对象,揭示了中国小麦生产水足迹的区域差 异;李红颖等[13]、韩宇平等[14]、程雨菲等[15]、高海燕 等[16]分析了吉林省、河北省、山东省、宁夏地区区域 农作物水足迹,提出根据作物耗水规律,调整结构, 调整灌溉模式,以缓解水资源短缺现状;卓拉等[17]、 黄会平等[18]针对黄河流域和海河流域的小麦水足 迹,进行了研究。

浙江省地处长江三角洲地区,经济发达,人口密度大,陆域面积小,城市化在推进的过程中依旧面临着人多地少、资源紧张等一系列问题。浙江省常住

人口6 456.76万人,占全国总人口的 4.57%,人口密度大。全省陆域面积狭小,约占全国的 1.1%,仅为 10.55×10⁴ km²。全省属于亚热带季风气候,降水丰富,水资源总量大,年均 937×10⁸ m³,但因人口数量众多,人均水资源占有量(2 008 m³)低于全国人均水资源占有量(2 0051 m³)。除此之外,浙江省还面临水资源污染严重,农业用水粗放型管理的问题,用水浪费严重,农业水资源短缺问题并没有得到足够的重视^[19],农业是安身立命之本,农作物的生长发展与农业水资源利用息息相关。因此,本文运用水足迹的理论和方法,计算和分析浙江省主要农作物水足迹的时空特征,这不仅可以为有效利用农业水资源,调整作物种植模式,缓解农业面临的困境提供科学依据,而且还可以为其他地区水资源评价提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

研究区为浙江省11个地级市及县域,见图1。



图 1 浙江研究区域图

研究时段为 2002 – 2018 年,除此之外农作物产量来源于《浙江省统计年鉴》、《宁波市统计年鉴》等各个地区的统计年鉴。 K_c 作物系数借助于联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United States, FAO)提供的 CROPWAT8.0 软件和 CLIMWAT2.0 软件支持。软件操作流程以及功能如下:

首先,从 CLIMWAT 2.0 软件获取当地的气候、降水量、土壤(注:除水稻需水量需要土壤数据外,其他指标可以不需要)等信息,然后利用 CROPWAT 8.0 软件模拟作物蒸散发量,为便于计算,蒸散发量 需乘

舟山市

6229

5744

以单位换算系数 10,换算成 m³/hm²,最后根据数据结果计算虚拟水含量,然后再乘以农作物产量,即得到农作物水足迹。其中茶叶虚拟水含量(16.04 m³/kg)和水果虚拟水含量(0.46 m³/kg)系借用孙才志等^[20]研究成果。CLIMWAT 2.0 软件除了可以导出数据

宁波市

4813

4470

绍兴市

5999

5561

嘉兴市

4430

4013

1571

1347

外,还提供全球 5 000 多个观测站的数据,这些观测站中,有 3 个观测站位于浙江省,分别是杭州站、温州站和定海站^[21]。浙江省 11 个地级市分别采用的观测站数据如表 1 所示,根据软件操作流程,所得各个观测站的农作物需水量如表 2 所示。

衢州市

2370

2137

金华市

4351

4053

表 1	各地级市数据来源所对应的观测站名称
70. 1	

温州市

丽水市

台州市

湖州市

观测站	杭州	杭州	杭州	杭州	杭州	1 温	州温	盐州	温州	温州	温州	定海
				表 2	各观测站	i主要农作	丰物需水 量	[21]			m	³ /hm ²
	Κ.	早稻	晚稻	小麦	大麦	玉米	豆类	薯类	甘蔗	蔬菜	油料	棉花
杭州观测站	ţ	4534	5266	3696	1031	3668	1541	3085	8336	1816	4013	5561
温州观测岛	<u> </u>	4063	5418	3912	1440	3451	1529	2717	8655	2226	3796	5443

4015

3711

1773

1614

3228

3010

2.2 研究方法

浙江省(平均值)

定海观测站

地级市

杭州市

本文利用 Zimmer 创建的计算方法并结合张 蕾^[22]的研究,将农作物虚拟水计算公式表达为:

$$V_c = W_c / Y_c \tag{1}$$

式中: V_c 为作物 c 虚拟水含量, m^3/t ; W_c 为作物 c 需水量, m^3/hm^2 ; Y_c 为作物 c 的单产量, t/hm^2 。

$$W_c = ET_c = ET_0 \cdot K_c \tag{2}$$

式中: ET_c 为 K_c 对 ET_0 进行修正后获得某种农作物蒸散发量; ET_0 为参考作物蒸散发量; K_c 为作物系数。

按照 FAO 推荐计算 ET_0 的标准彭曼(Penman – Monteith) 公式计算:

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 - 0.3 U_2)}$$

式中: R_n 为农作物表面的净辐射量, $MJ/(m^2d)$; e_d 为实测水气压,kPa; e_a 为饱和气压,kPa; G 为土壤 热通量, $MJ/(m^2d)$; T 为平均气温, \mathbb{C} ; γ 为干湿度 常量, kPa/\mathbb{C} ; U_2 为距离地面2 m高处的风速,m/s; Δ 为 e_a 与 T 的比值, kPa/\mathbb{C} 。

公式(3) 仅考虑气象参数对农作物需水量的影响,忽略其他因素。

3 浙江省主要农作物水足迹演变分析

3.1 **2002 - 2018** 年农作物总水足迹特征 根据上述方法,计算得到 2002 - 2018 年浙江省

农作物总水足迹,见图 2。由图 2 可见,2002 - 2018 年浙江省农作物总水足迹总体呈下降趋势,但波动起伏较大。2016 年农作物总水足迹值最低,为124.23×10 8 m³;2002 年农作物水足迹值最高,为148.21×10 8 m³;最大值比最小值高 16.18%。2002 - 2006 年农作物总水足迹呈现先下降再上升的趋势,变化最明显的是 2002 - 2003 年,农作物总水足迹相差约 10×10 8 m³。2007 - 2014 年变化不大,基本在 140×10 8 m³ 上下浮动。2015 - 2018 年,呈下降趋势,其中 2015 - 2016 年下降趋势最为明显,相差 14.27×10 8 m³,约11.49%。

9783

8925

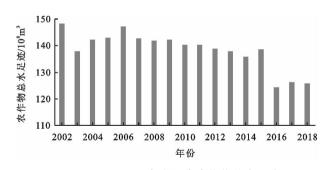


图 2 2002 - 2018 年浙江省农作物总水足迹

3.2 农作物水足迹内部结构变化特征

3.2.1 2002-2018 年农作物水足迹内部结构特征 根据上述方法,计算得到 2002-2018 年浙江省各类 农作物水足迹值,其结果见图 3。由图 3 可知,粮食作 物的水足迹呈减小趋势,但其值一直稳居各类农作物 的首位。粮食作物水足迹总体减小的原因,首先是 2003 年浙江省出台政策,鼓励旱粮作物的生产^[23],对 粮食作物耕作类型进行了调整,水田作物减少,导致 水足迹减少;其次,随着人们消费水平的提高,经济作 物需求不断上升,粮食作物种植面积有所减少,粮食 作物水足迹有减小趋势。粮食作物需水量虽然不是 最多,但粮食作物产量最大,尤其是晚稻,故使得粮食 作物水足迹稳居各类农作物的首位。茶叶水足迹和 水果水足迹呈缓慢增大趋势。这与气候条件的改变、 品种的改良、产量的增加等有关,同时也表现了居民 饮食结构的多样性。蔬菜单位质量虚拟水含量最小, 为 0.095 m³/kg,但拥有巨大的需求量,种植面积广, 产量高,所以蔬菜水足迹不是最小,蔬菜水足迹的大、 小除了受到自身需水量(平均2 137 m³/hm²)的影响, 产量对其也有很大影响。浙江省的油料作物主要是 油菜,油菜一般生长在气候湿润的地区,由于油料播 种面积的有限性,某种程度上减少了对水资源的消 耗[24],因而油料作物水足迹最低。

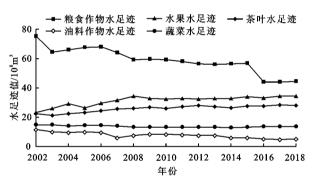


图 3 2002 - 2018 年浙江省各类农作物水足迹

通过计算得到 2002 - 2018 年浙江省各类粮食 作物水足迹值,其结果见图 4。粮食作物是食物主 要来源,分析粮食作物水足迹内部结构,有利于反映 农作物内部结构特征。由图 4 可看出,在粮食作物 中,水稻水足迹比重最大,这与气候条件和居民饮食 习惯有关。其中晚稻水足迹占主导地位,播种面积 大,需水量大,再加上种植历史悠久,所以晚稻水足 迹大于早稻水足迹。粮食作物水足迹中位于第二的 是小麦和大麦水足迹,因大麦水足迹在统计数据中 过小,不容易显示,所以将大麦与小麦水足迹合并为 一类。小麦水足迹远远大于大麦水足迹,这主要是 因为浙江省地处亚热带,热量条件好,主要种植冬小 麦,其生长周期长,需水量大,而大麦生长育期短,需 水量较小;其次 2013 年以来浙江省以旱地、冬(春) 闲地为重点,扩大小麦生产种植面积。番薯历年来 水足迹比较稳定,这与固定的种植面积和种植条件 有关。玉米水足迹最小,这与浙江省的玉米多种植 在丘陵地带且种植面积小有关。

综上,浙江省主要农作物水足迹内部结构中,粮食作物和油料作物水足迹呈减小趋势,茶叶和水果水足迹有波动增大趋势,变化最小且趋于稳定的是蔬菜水足迹。粮食作物水足迹内部结构中,晚稻水足迹占比最大,玉米水足迹占比最小,其他类型的粮食作物水足迹都占有一定的比例。

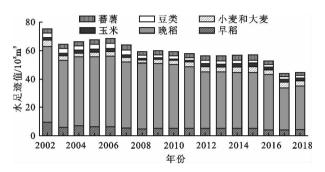


图 4 2002 - 2018 年浙江省各类粮食作物水足迹

3.2.2 2006 年和 2016 年地级市水足迹内部结构 通过计算得到 2006 年和 2016 年地级市农作物水足迹内部结构(表 3、4)。浙江省的 11 个地级市水足迹结构差异大,主要表现在晚稻水足迹、小麦水足迹、玉米水足迹、油料水足迹等在各市农作物水足迹中所占的比例差别大。尤其是小麦水足迹、油料作物水足迹差异最为突出,就 2016 年而言,最大值是嘉兴,达 14 442 × 10⁴ m³,最小值是舟山,为 0;而 2006 年,油料作物水足迹差异最大,最大值是湖州市,达 3 0851 × 10⁴ m³,最小值是舟山,为 0。丽水、温州棉花水足迹,甘蔗水足迹的值为 0,这与气候条件和土壤条件有关。除此之外丽水小麦水足迹、大麦水足迹、玉米水足迹和甘蔗水足迹相对占比较大,这与流域地形,农作物灌溉水源充足有关[25]。

浙江省拥有良好的的气候条件,适合大面积水稻种植,因此11个地级市粮食作物水足迹中,水稻一直占有突出地位。因晚稻产量大、生长周期长、单位质量农作物虚拟水含量大,所以晚稻水足迹值最高。茶叶和油料属于经济作物^[26],自身需水量较大,各市(除舟山市外)具有一定的种植区域,由于其产量大,所以农作物水足迹也较大。各市农作物水足迹内部结构较为稳定的是蔬菜水足迹和水果水足迹,蔬菜和水果的消费需求大,产量大,这反映出居民饮食结构的丰富性和需求的多样性。

4 主要农作物水足迹地域差异分析

4.1 农作物总水足迹的地理分布特征 采用 ArcGIS 软件对浙江省各地区 2006 和 2016

年主要农作物总水足迹进行空间特征可视化,其结果见图 5。由图 5 可见,农作物总水足迹的地理空间分布格局略有差别。差别主要表现在杭州市区农作物总水足迹数值在不断变小,绍兴市上虞区农作物总水足迹从 2006 年的 4.00×10^8 m³ 以上变为2016 年的 4.00×10^8 m³ 以下,湖州市的长兴县农作物总水足迹从 $3.00 \times 10^8 \times 3.99 \times 10^8$ m³ 变为 $2.00 \times 10^8 \times 2.99 \times 10^8$ m³ 变为 $3.00 \times 10^8 \times 2.99 \times 10^8$ m³ 变为 $3.00 \times 10^8 \times 3.99 \times 10^8$ m³ 。纵

观 2006 - 2016 年浙江省主要农作物总水足迹变化 差异较小。

浙江省气候湿润,雨热同期,地形类型分布广泛,复杂多样。农作物总水足迹较高的地区主要集中在平原、丘陵地带,农作物总水足迹较低的地区主要集中在山区、海岛地带,处在不同的地形区会影响农作物播种类型,从而影响该地区的农作物总水足迹。除自然条件外,农作物总水足迹大小还与农作物需水量大小有关,比如棉花、甘蔗、晚稻等高耗水农作物直接影响当地农作物水足迹总量[27]。

表 3 2006 年浙江省各地级市农作物内部水足迹

 10^4 m^3

农作物	杭州	湖州	嘉兴	金华	丽水	宁波	衢州	绍兴	台州	温州	舟山
早稻	1022	53	349	8212	1471	8959	15629	9757	5422	14031	33
晚稻	49380	66814	74556	46821	2426	41135	55392	50518	44484	49793	2889
小麦	6117	498	4368	1547	0	630	598	2778	6336	1725	0
大麦	82	597	1782	18	0	93	37	197	450	0	0.89
玉米	5568	609	993	558	0	0	1675	3041	2027	754	320
豆类	5180	2354	3142	2257	3101	4392	1991	2403	3760	1668	0
薯类	5698	8986	1267	1492	6613	1947	8513	2865	5449	5155	450
油料	15813	30851	21200	6267	2682	6498	10722	8490	1897	1670	0
棉花	378	18	1002	56	0	3525	447	1732	330	0	57
甘蔗	2467	207	1267	2336	0	1245	453	829	2898	0	0
蔬菜	33315	7122	17639	8991	9827	16871	6639	12568	15807	20216	2415
茶叶	43210	14179	247	28957	24461	35583	11906	74721	5381	5495	245
水果	16821	12624	7068	25219	16506	60016	36933	25823	50909	17363	3825
总量	185051	144912	134880	132731	67087	180894	150935	195722	145150	117870	10235

表 4	2016 年浙江省各地级市农作物水足迹内部结构

 10^4 m^3

农作物	杭州	湖州	嘉兴	金华	丽水	宁波	衢州	绍兴	台州	温州	舟山
早稻	836	15	0.67	5811	97	2863	8728	9271	7524	11830	1.05
晚稻	24318	44135	54341	29017	265	15817	53682	40700	31679	42865	1521
小麦	4228	2143	14442	1241	0	839	298	4143	2192	597	0
大麦	58	96	816	13	0	22	40	37	25	0	2
玉米	8635	630	1072	3705	0	0	2876	4784	1956	1017	530
豆类	3142	876	2835	2034	2495	689	1817	2710	2022	1333	0
薯类	3307	3517	720	2744	4690	430	5632	3945	2479	2637	291
油料	141216	6864	4729	9711	3275	652	18468	8751	3172	4125	0
棉花	211	143	770	2031	0	22	497	537	336	0	71
甘蔗	1350	34	458	2554	0	169	76	496	2127	0	0
蔬菜	34204	6896	22341	10877	10982	3739	10070	9474	17594	20087	1612
茶叶	45153	169456	122	34614	50717	6278	12044	1014748	8022	9775	136
水果	35148	11169	29015	29640	15270	15372	38429	2176	62584	24060	3321
总量	301806	245974	131662	133992	87791	46892	152657	1101772	141712	118326	7485

舟山市下辖 2 区 2 县,陆地面积狭小,属于海岛城市,土地资源、水资源等较为匮乏,农作物种植类型有限、结构单一,主要种植水稻、薯类、玉米、水果、蔬菜、茶叶等满足基本生活需求的农作物,是全省农作物总水足迹最低的区域,其中嵊泗县水足迹总量低于0.01×10⁸ m³,岱山县、定海区、普陀区不到0.4×10⁸ m³。温州市的洞头区属于海岛县,种植条件有限,农作物总水足迹不到0.2×10⁸ m³,椒江区、路桥区位于

台州市经济活动的中心,临近沿海,农作物生产活动少,农作物种植面积少,是造成农作物总水足迹低的主要原因。丽水市云和县多丘陵山地,农作物总水足迹较低。宁波市的慈溪市、余姚市,绍兴市的嵊州市、诸暨市,衢州市的江山县、龙游县以及湖州市的长兴县等地区的水源丰富,土壤肥沃,水足迹基本在3×10⁸ m³以上,水足迹较高。除此之外的其他地区农业水足迹大多为1×10⁸ m³~3×10⁸ m³。

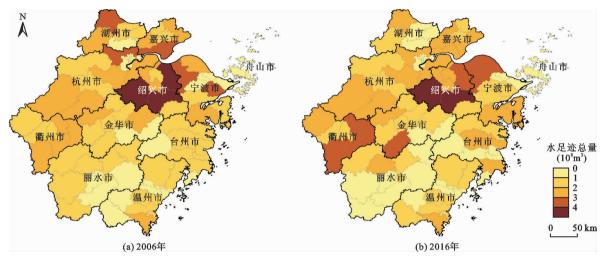


图 5 2006 和 2016 年浙江省农作物总水足迹空间分布

4.2 人均农作物水足迹的地理分布特征

采用 ArcGIS 软件对浙江省各地区 2006 年和 2016 年人均农作物水足迹进行空间特征可视化,其 结果见图 6。分析图 6 可知,人均农作物水足迹的 地理空间分布格局不同,主要体现在:2006 年嘉兴市的平湖市以及丽水市的市龙泉、庆元县、莲都区人均农作物水足迹从 400 m³ 以上变为 2016 年 400 m³ 以下,而衢州市的开化县、丽水市云和县年人均农作物水足迹从 2006 年的 400 m³ 以下变为 2016 年的 400 m³ 以上。除此之外,金华市的婺城区、金东区人均农作物水足迹从 200~299 m³ 变为 2016 年的 100 m³ 以下,丽水市青田县从 199~200 m³ 变为 2006 年的 100 m³ 以下,景宁畲族自治县从人均 100 m³ 以下变为 300~399 m³。

总体来看,在地形地势条件优越、土壤肥沃、水源充足、农作物总水足迹比较丰富、人口较少的地区,人均农作物水足迹会较高,如嘉兴市的嘉善县、海盐县,宁波市的余姚市,湖州市的长兴县以及绍兴市的嵊州市、诸暨市等地区。地处河谷平原、丘陵、盆地中的地区,水网密布,光热充足,人口密度小,人均农作物水足迹也较高,如杭州市的建德市、淳安县,金华市的武义县,衢州市的大部分地区,2006和

2016 年的人均农作物水足迹基本上都在 400 m³以上,属于水足迹最大的地区。丽水市陆域总面积 17 298 km²,位居 11 个地级的首位,但因地形地势条件较差,人口少,所以人均农作物水足迹值较高,如遂昌县、松阳县。舟山市的嵊泗县 2006 和 2016 年人均农作物水足迹均小于 10 m³;普陀区、岱山县、洞头县小于 100 m³,这与所处的地理位置不利造成耕地面积狭小、水资源紧张等因素有关。除自然条件之外,人口数量也对人均水足迹有较大的影响^[28],如杭州市总体上农作物总水足迹较高,但因城区拥有巨大的人口数量,造成人均农作物水足迹较小;与之相反是丽水市云和县,人口数量较少,农作物总水足迹值小于 1.0×10⁸ m³,但人均农作物水足迹却在 300 m³以上。

浙江省东部人口密集,西部人口相对较少,东西部人均农作物水足迹差异较大,西部人均水足迹高于东部,海岛地区人均农作物水足迹最低;除此之外,在河流众多,水源丰富,地形平坦,光热条件较好,人口较少的地区,人均水足迹值也会较高。

4.3 农作物水足迹的空间聚类分析

以 2006 和 2016 年浙江省各地区农作物总水足迹和人均农作物水足迹值为样本,应用 SPSS 软

件^[29],进行空间系统聚类分析,最后借助 ArcGIS 软件得到农作物水足迹聚类分布图,如图 7 所示。图

7表明,2006与2016年的农作物水足迹聚类空间格局基本一致。

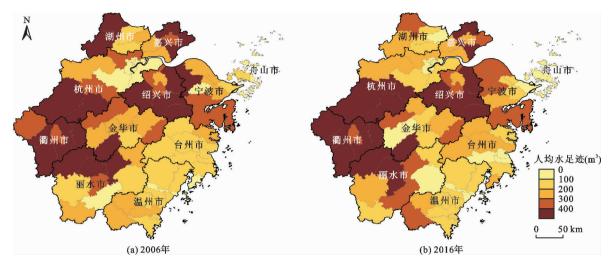


图 6 2006 和 2016 年浙江省人均农作物水足迹的空间分布

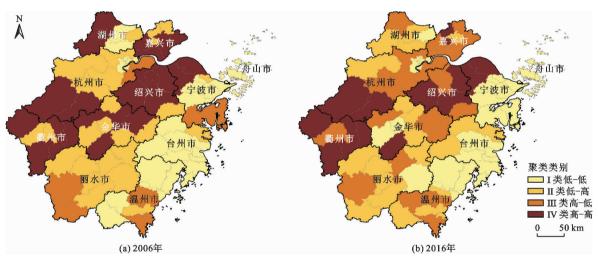


图 7 2006 和 2016 年浙江省农作物水足迹聚类空间分布

I类表示农作物总水足迹值和人均农作物水足迹值均低。洞头县、玉环县以及舟山市全部属于 I类地区,它们均属于海岛地区,海岛地区自身条件的限制是影响农作物水足迹的主要因素。宁波市的海曙区、奉化区、鄞州区,温州市的永嘉县、乐清县和台州市的城区、温岭市等地区也属于 I 类地区,这些地区储水条件不足、地理位置不利是主要的影响因素。杭州市的城区大部分地区也属于 I 类,主要由于城区人口密度大,农业活动少,造成农作物总水足迹与人均农作物水足迹偏低^[30]。

Ⅱ类表示农作物总水足迹值较低而人均农作物水足迹值较高。如金华市的浦江县、永康市和丽水市的遂昌县、松阳县等地区地处山区,农作物耕种面积有限,人口分布少,人均农作物水足迹相对较高;杭州市的临安市地处山区,海拔较高,农业发展受到

限制,也属于Ⅱ类地区。

Ⅲ类代表农作物总水足迹值较高而人均农作物水足迹值较低。如温州市的苍南县、瑞安县农业区位条件较为优越,水源充足,农作物总水足迹相对较高,但沿海地区经济效益高,人口密度大,使得人均农作物水足迹偏低。

Ⅳ类代表农作物总水足迹值和人均农作物水足迹值都高。如宁波市的余姚市、慈溪市,嘉兴市的大部分地区等临近海洋,水源丰富,地势平坦,拥有较高的农作物总水足迹和人均农作物水足迹。衢州市的龙游县、衢江区、江山县,绍兴市的诸暨市、嵊州市也属于Ⅳ类地区,这些地区地形相似,四周高,中间低,土地肥沃且河流汇入为其提供了充足的水源,因而具有良好的农作物种植条件。金华市的东阳市、武义县也为Ⅳ类地区,主要是因为河流经过、水库广

泛分布而拥有良好的水利条件,使其具有独特的优势。杭州市的淳安县、建德县热量充足,降水丰沛,人口相对较少,所以也为IV类地区。通过聚类分析发现,衢州市(除常山县、柯城区)的农作物水足迹在2006和2016年均为IV类,说明衢州市农业水资源丰富,整个市域内水足迹内部结构稳定。绍兴市、金华市、嘉兴市整体农作物水足迹相对较高,水资源较为丰富,水足迹内部结构差异小。杭州市、宁波市、湖州市农作物水足迹内部结构差异大。台州市、温州市、丽水市农作物水足迹相对比较低,内部差异较小。舟山市2006和2016年都为I类地区,因其为海岛城市,农业资源有限,造成农作物水资源严重匮乏,内部差异最小。

综上所述,浙江省农作物水足迹空间差异明显,各地蕴含的水资源状况不同。地处平原、河谷、盆地的地区,农作物种植具有良好的区位条件,农作物水资源状况明显优于海岛、山地地区。人口分布较为稀疏的县域人均水足迹明显优于人口密集的城区。从聚类分析结果看,对于2006年较低等级到2016年较高等级的地区,根据调研可知当地政府有改善水资源的措施,比如庆元县、云和县、平阳县;而青田县、永嘉县等地区由于水资源大量使用,人口密集,水资源问题有恶化趋势。因此,各市面对水资源现状应该要有对应措施,比如种植节水农作物、调整农作物类型以及改进技术、一水多用等措施。

5 结 论

基于水足迹理论,借助 CROPWAT8.0、CLIM-WAT2.0 和 ArcGIS 等软件,从农作物水足迹的时间演变到农作物水足迹的空间差异,分析了浙江省 2002 – 2018 年的主要农作物水足迹时空特征,结论如下:

- (1)2002 2018 年浙江省农作物总水足迹总体呈下降趋势,波动幅度较大。2016 年农作物总水足迹值最低,为124.23 × 10^8 m³,2002 年农作物水足迹值最高,为148.21 × 10^8 m³,减幅达 16.18%。
- (2)在水足迹内部结构中,粮食作物的水足迹 稳居首位,其他作物水足迹依次是水果水足迹、茶叶 水足迹、蔬菜水足迹和油料作物水足迹。从水足迹 内部结构的时间演变上来说,粮食作物水足迹和油 料作物水足迹有下降趋势,粮食作物水足迹年际变 化较大,茶叶水足迹和水果水足迹有上升趋势,蔬菜 水足迹保持稳定年际变化小。
- (3)农作物水足迹空间差异显著,平原、盆地地 区农作物总水足迹较高,山地、丘陵地区农作物总水

足迹次之。人均农作物水足迹除了与农作物总水足迹有关,还与人口数量密切相关,人口分布较为稀疏的县域人均水足迹明显优于人口密集的城区,东南沿海地区整体较低,海岛地区最低。聚类分析表明位于平原、盆地、河谷的地区由于水网密布、水源充足,其农作物水资源状况明显高于海岛、山地地区。

参考文献:

- WANG Yanyun, LONG Aihua, XIANG Liyun, et al. The verification of Jevons' paradox of agricultural water conservation in Tianshan District of China based on water footprint
 Agricultural Water Management, 2020, 239:106 – 163.
- [2] 吴 芳,王 浩,杨 陈,等. 中国农业水足迹时空差异和流 动格局研究[J]. 人民长江,2019,50(6):104-110+218.
- [3] 姜秋香,李鑫莹,王子龙,等. 黑龙江省农业水足迹时空分布及用水效率分析[J]. 东北农业大学学报,2020,51(11);87-96.
- [4] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water: Otherwise our hydropolitical futures would be impossible [C]//Priorities for Water Resources Allocation and Management. London: Official Development Assistance, 1993: 13-26.
- [5] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade; A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade [C] // Value of Water Research Report Series No. 12. Delft, Netherlands; IHE, 2003:13-23.
- [6] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade[J]. Global Environmental Change: Part A, 2005, 15 (1):45-56.
- [7] 徐鹏程,张兴奇. 江苏省主要农作物的生产水足迹研究 [J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):232 237.
- [8] 任 才,於嘉闻,龙爱华. 基于作物水足迹的塔里木盆地水资源压力评价分析[J]. 水利水电技术,2019,50 (12);27-37.
- [9] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. 水足迹评价手册[M]. 刘俊国, 曾昭, 赵乾斌, 等, 译. 北京:科学出版社, 2012.
- [10] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products
 [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 139 (15):1577-1600.
- [11] MARSTON L, KONAR M.. Drought impacts to water footprints and virtual water transfers of the central valley

- of California [J]. Water Resources Research, 2017, 53 (7):5756-5773.
- [12] 孙世坤,王玉宝,吴普特,等. 小麦生产水足迹区域差 异及归因分析[J]. 农业工程学报,2015,31(13): 142-148.
- [13] 李红颖,秦丽杰,杨 婷. 吉林省水稻生产水足迹时空分 异研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018,39(2):32-39.
- [14] 韩宇平,曲 唱,贾冬冬. 河北省主要农作物水足迹与耗水结构分析[J]. 灌溉排水学报,2019,38(10):121-128
- [15] 程雨菲,曹升乐,杨裕恒,等. 山东省农业水足迹周期及 趋势变化分析[J]. 南水北调与水利科技,2018,16 (4):169-175.
- [16] 高海燕,李王成,李 晨,等. 宁夏主要农作物生产水足迹及其变化趋势研究[J]. 灌溉排水学报,2020,39 (3):110-118.
- [17] 卓 拉,王 伟,冯变变,等. 黄河流域小麦生产水足迹量 化与评价[J]. 农业机械学报,2019,50(9):264-271.
- [18] 黄会平,张 冰,李新生,等. 海河流域农业水足迹分布 及对气候变化的响应[J]. 人民黄河,2019,41(2): 64-69+75.
- [19] 周 芬,魏 婧,王 贝,等. 浙江省区域水资源承载力分析及 强载措施研究[J]. 水利规划与设计, 2020(8):39-43.
- [20] 孙才志,张 蕾. 中国农产品虚拟水 耕地资源区域时

- 空差异演变[J]. 资源科学,2009,31(1):84-93.
- [21] 赵春芳. 基于水足迹理论的浙江省水资源可持续利用研究[D]. 宁波:宁波大学, 2017.
- [22] 张 蕾. 中国虚拟水和水足迹区域差异研究[D]. 大连:辽宁师范大学, 2009.
- [23] 蔡仁祥,张 慧,林宝义,等. 浙江省小麦生产现状与发展对策[J]. 分子植物育种, 2018, 16(5):1717 1720.
- [24] 維新萍,刘晓洁. 中国典型农作物需水量及生产水足迹区域差异[J]. 节水灌溉, 2020(1):88-93.
- [25] 王 婷,毛德华. 中国主要粮食作物虚拟水—虚拟耕地 复合系统利用评价及耦合协调分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(4):40-49+56.
- [26] 杨裕恒,曹升乐,程雨菲,等. 济南市 1997 2014 年农业水足迹及结构变化特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2017,36(8);95-102.
- [27] 郑晓雪,秦丽杰. 不同降水年型吉林省中部玉米生产水足迹研究[J]. 浙江农业学报,2019,31(5):695-703.
- [28] 卞慧娟. 基于 GIS 和水足迹理论的山东省主要作物生产用水风险评价[D]. 青岛:山东科技大学, 2018.
- [29] 张旭东,吴迪,郝迪,等. 辽宁省玉米生产水足迹影响 因素分析及空间聚类[J]. 节水灌溉,2019(12):82 -87 + 101.
- [30] 赵春芳,董朝阳,伍 磊,等. 浙江省水资源生态足迹时 空格局[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):242-248.

(上接第231页)

- [17] 杨 帆,张宽地,杨明义,等. 植被缓流效果试验研究 [J]. 泥沙研究,2017,42(2):54-60.
- [18] LAWRENCE D S L. Macroscale surface roughness and frictional resistance in overland flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 22(4):365-382.
- [19] 谢 艳,朱崇林,雷孝章. 含植被坡面水动力学特性的实验研究[J]. 中国农村水利水电,2021,(2):18-23.
- [20] 赵卫伟,景何仿,王维红,等. 刚性植被作用下复合明渠水流特性实验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2020,35(4);469-478.
- [21] 李树慧,张银华,蔡怀森. 河岸刚性植被缓冲带对水流 阻力的影响[J]. 水电能源科学,2020,38(9):32-35.
- [22] 张 璐,刘渊博,雷孝章. 黑麦草密度对坡面水流阻力影

- 响的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2020,39(6):99-106.
- [23] 熊杰,袁野平,林颖典. 浸没及非浸没刚性短植被群对异重流运动特性的影响[J]. 上海交通大学学报,2020,54(3):285-294.
- [24] SCHEWE G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 133;265-285.
- [25] SHIH W, WANG C, COLES D, et al. Experiments on flow past rough circular cylinders at large Reynolds numbers [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 49 (1-3):351-368.