

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0111

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. CHENG Y F, CAO S L, YANG Y H, et al. Analysis of agricultural water footprint cycle and trend change in Shandong Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 169-175. (in Chinese)

山东省农业水足迹周期及趋势变化分析

程雨菲, 曹升乐, 杨裕恒, 张玺, 李锡铜

(山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘要: 农业用水状况及其周期趋势分析对合理制定农业用水分配、提高水资源利用效率有着重要的现实意义。依据水足迹理论, 分别计算了山东省 1978–2014 年农业总水足迹及其分项, 利用经验模态分解(EMD)分别分析了各水足迹值的波动周期, 从多时间尺度分析了农业总水足迹值波动影响因素, 并结合对数平均迪氏分解(LMDI)方法, 分析了引起总水足迹增长的主要贡献因素。结果表明: 林牧渔业水足迹以 3.5 a 为周期波动, 种植业水足迹以 5 a 为周期波动, 总水足迹以 8 a 为周期波动; 农业总水足迹 3 a 短波动周期主要受种植业影响, 8 a 长波动周期在 2002 年前主要受畜牧业影响, 2002 年后则主要受种植业影响; 农业总水足迹及各分项多年来均呈增长趋势; 蓝水、绿水、灰水足迹值的变化均对总水足迹值的增长起正向促进作用, 多年来农业总水足迹值的增长由绿水足迹主导逐渐转变为蓝水足迹主导。

关键词: 水足迹; EMD; 周期; LMDI; 山东省

中图分类号: S271 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0169-07

Analysis of agricultural water footprint cycle and trend change in Shandong Province

CHENG Yufei, CAO Shengle, YANG Yuheng, ZHANG Xi, LI Xitong

(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The agricultural water utilization situation and the analysis of its cycle and trend is of great practical significance for the rational allocation of agricultural water and the improvement of water resource utilization efficiency. Based on the water footprint theory, in this paper we calculated the total agricultural water footprint and its components in Shandong Province from 1978 to 2014. Empirical mode decomposition (EMD) was used to analyze the fluctuation cycle of each water footprint value. We analyzed the influencing factors of total agricultural water footprint fluctuation on multiple time scales. Furthermore, adopting the logarithmic average Dewar decomposition method (LMDI), we analyzed the main contributors to the growth of total water footprint. The results showed that the water footprint of forestry, animal husbandry, and fishery fluctuated over a period of 3.5 years, the water footprint of planting industry fluctuated over a period of 5 years, and the total water footprint fluctuated over a period of 8 years. The three year fluctuation period of total agricultural water footprint value was mainly affected by planting industry. The eight year fluctuation period was mainly affected by animal husbandry before 2002, and by planting industry after 2002. The total agricultural water footprint and its components showed an increasing trend over the years. The changes of blue, green, and gray water footprints all played a positive role in the growth of total water footprint. Over the years, the main factor influencing the growth of total agricultural water footprint switched from the green water footprint to the blue water footprint.

Key words: water footprint; EMD; cycle; LMDI; Shandong Province

收稿日期: 2017-11-16 修回日期: 2018-03-23 网络出版时间: 2018-04-02
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180402.1511.004.html>
基金项目: 山东省水利科研与技术推广项目(SDSLKY201604)

Fund: Water Conservancy Research and Technology Promotion Project of Shandong Province (SDSLKY201604)

作者简介: 程雨菲(1994), 女, 安徽安庆人, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: 846861277@qq.com

通讯作者: 曹升乐(1960), 男, 陕西人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源方面的研究工作。E-mail: cao_s@sdu.edu.cn

水资源问题长久以来都是一个全球性的关注热点^[1]。中国是农业大国,而农业是用水大户,分析农业用水状况及趋势,提高水资源利用效率有着很重要的现实意义。1993 年英国学者 Allan 首次提出了虚拟水的概念^[2],而后 2002 年荷兰学者 Hoekstra 在虚拟水的基础上提出了水足迹的概念^[3]。自此,国内外学者基于水足迹理论展开了国家、行政区、流域等不同尺度的水足迹的计算分析^[4-6]。对于农业水足迹的研究,通过 CNKI 数据库检索发现,2008 年前的研究主要为全球尺度的农产品水足迹评价研究,且侧重点为农作物虚拟水的核算^[7],随着众多学者对水足迹研究的深入,2009 年后更多学者开始对国家及地区尺度农作物产品水足迹进行研究,影响水足迹变化的因素及水足迹时空尺度上的变化等的研究也越来越多^[8-9]。2010 年胡娟^[10]等人对中国地区国家尺度上粮食作物水足迹核算进行了详细的研究;2013 年 SUN^[11]等人以粮食作物为研究对象,探求了影响其水足迹变化的因素。目前在农业水足迹研究方面具有以下特点:大多数研究针对的是某一特定粮食作物^[12],或只包含种植业和畜牧业^[13],很少涉及林业及渔业;水足迹的核算多仅分析单一变化趋势^[14],而对于水足迹的周期波动趋势及影响因素鲜有研究。

鉴于此,本文利用山东省 1978—2014 年资料,运用 EMD 分析方法对种植业、畜牧业、林业及渔业 4 类产品水足迹进行周期波动分析,研究水足迹周期变化特性并分析水资源利用趋势,结合 LMDI 方法分析农业总水足迹变化的主要贡献因素,期望得出农业产品水足迹变化规律,了解不同农业产品不同时间尺度对水资源的消耗情况,为制定农产品生产决策提供科学依据。

1 研究区域概况

山东省地处黄河下游,是我国的农业大省,耕地率位居全国榜首。省内河流湖泊较多,但淡水资源量不足,属人均占有量少于 500 m³ 的严重缺水地区^[15]。近年来由于地下水的过度开采、海水入侵、径流量的减少等原因,水资源供需矛盾日益加剧。农业是山东省的用水大户,2016 年农业用水约占总用水量的 65%^[16]。

2 研究方法及数据来源

2.1 农业水足迹计算

依据水足迹的定义^[17],农业总水足迹表示该地区相应时间内生产所有农业产品消耗的淡水资源总

量,即农业产品消耗的相应蓝水、绿水、灰水足迹之和。山东省农业总水足迹计算公式如下:

$$W_{F_T} = W_{F_{green}} + W_{F_{blue}} + W_{F_{grey}} \quad (1)$$

式中: W_{F_T} 为农业生产总水足迹 (m³); $W_{F_{green}}$ 为农业生产消耗绿水足迹 (m³); $W_{F_{blue}}$ 为农业生产消耗蓝水足迹 (m³); $W_{F_{grey}}$ 为农业生产消耗灰水足迹 (m³)。

农业生产消耗的蓝水、绿水、灰水足迹的计算公式如下:

$$W_{F_{green}} + W_{F_{blue}} + W_{F_{grey}} = \sum_{i=1}^n U_i W_{F_{green}} \times P + \sum_{i=1}^n U_i W_{F_{blue}} \times P + \sum_{i=1}^n U_i W_{F_{grey}} \times P \quad (2)$$

式中: P 为各农业产品产量 (kg); $U_i W_{F_{green}}$ 为单位质量农业产品消耗的绿水足迹 (m³/kg); $U_i W_{F_{blue}}$ 为单位质量农业产品消耗的蓝水足迹 (m³/kg); $U_i W_{F_{grey}}$ 为单位质量农业产品消耗的灰水足迹 (m³/kg); i 表示不同农产品类别。

2.2 EMD 分解法

EMD 分解,即经验模态分解,由黄锬于 1998 年^[18]提出。其优点在于无需预先设定基函数,直接依照自身数据不同时间尺度的特征进行信号分解,是一种新型自适应信号时频处理方法^[19]。EMD 分解的关键在于检验模态的分解,将复杂的原始信号分解为多个本征模函数 (Intrinsic Mode Function, 简称 IMF) 和具有单一性的趋势项 (Residual)。分解出的 IMF 分量能体现出信号不同时间尺度的局部特性,因而 EMD 分解实际上即为将原始数据分解为有实际物理背景的多个波动的叠加,通过 EMD 对农业水足迹分解得到的各数据分量规律性更强,能更直观的体现出农业水足迹的波动性,进行 EMD 分解的相应步骤可参考文献^[20-21],在此不多赘述。

2.3 LMDI 分析

LMDI 即对数平均迪氏分解,因其在分解过程中不存在残差且对于数据中是否有零项无要求而被广泛应用^[22]。该方法主要是将目标变量变化分解为若干个子变量,用以分析识别各子变量对目标变量的影响程度 (贡献率)^[23]。本文运用 LMDI 方法分析农业总水足迹,从蓝水足迹^[24] (消耗来自地表及地下水)、绿水足迹^[25] (源于降雨) 及灰水足迹^[26] (源于稀释污水) 三方面考虑,研究三类水分别对总水足迹变化的变动效应和变动贡献率。具体分解公式如下:

$$W_F = \sum_{i=1}^n W_{F_i} = \sum_{i=1}^n x_{i,1} \cdot x_{i,2} \cdot \dots \cdot x_{i,m} \quad (3)$$

式中: W_F 表示总水足迹值 (m^3); W_{F_i} 表示 ($i=1, 2, 3, 4$) 产业(农林牧渔业)水足迹值 (m^3); $x_{i,m}$ 表示 i 产业第 m 个分解因素值。

则第 m 个分解因素的影响效应为:

$$\Delta W_{F_m} = \sum_{i=1}^n \frac{W_{F_i}^T - W_{F_i}^0}{\ln W_{F_i}^T - \ln W_{F_i}^0} \ln \frac{x_{i,m}^T}{x_{i,m}^0} \quad (4)$$

式中: $W_{F_i}^T$ 表示在第 T 年 i 产业的总水足迹值 (m^3); $W_{F_i}^0$ 表示基年 i 产业水足迹值 (m^3); $x_{i,m}^T$ 、 $x_{i,m}^0$ 分别表示 T 年和基年 i 业第 m 个分解因素的值。本文将农业总水足迹值分解为蓝水、绿水、灰水足迹值 3 个因素, 则农业总水足迹值变量的加法分解模型为:

$$\Delta W_F = W_F^T - W_F^0 = \Delta W_{F_{green}} + \Delta W_{F_{blue}} + \Delta W_{F_{grey}} = \sum \Delta W_{F_{i,green}} + \sum \Delta W_{F_{i,blue}} + \sum \Delta W_{F_{i,grey}} \quad (5)$$

式中: ΔW_F 表示农业总水足迹值变化量 (m^3); $\Delta W_{F_{green}}$ 、 $\Delta W_{F_{blue}}$ 、 $\Delta W_{F_{grey}}$ 分别表示绿水、蓝水、灰水足迹变化导致的总水足迹值变化量 (m^3)。

2.4 数据来源及整理

本文农产品产量数据来自 1978–2014 年的《山东省统计年鉴》及《山东省水资源公报》。将农产品分为种植业、畜牧业、林业及渔业四类, 按照四种类别整理数据, 并分别计算了各类产品的水足迹值及农业总水足迹值。本文共计算了种植业产品 19 种(包括谷物、棉花、蔬菜等)、林业产品 3 种(种树、板栗及核桃)、畜牧业产品 6 种(包括猪肉、牛肉、羊肉等)、渔业产品 1 种(水产品)。对于单位农作物产品虚拟水的确定本文依照 Zimmer 和 Renault 基于对不同产品类型分区计算的方法^[27], 引用 FAO 的 CLIMATE 数据库和 CROP 数据库有关中国部分的数据进行计算, 具体计算方法参照相应参考文献^[28–29], 在此不再赘述。对于单位动物产品虚拟水, 由于计算数据多且不易获得, 故本文采用 Chapagain 和 Hoekstra 根据世界各国动物和动物产品贸易数据, 计算世界各国动物产品虚拟水含量研究中中国部分的数据^[30]。本文采用的四类单位质量产品的水足迹值见表 1。

3 结果分析

3.1 山东省农业总水足迹变化分析

运用经验模态分解的方法对山东省 1978–2014 年农业总水足迹进行分解得到 2 个 IMF 分量及趋势项 R , 见图 1, 各 IMF 分量周期及方差贡献率见表 2。

表 1 山东省各类单位质量农产品的水足迹

Tab. 1 Water footprint of various unit-mass agricultural products in Shandong Province

产品种类	产品名称	绿水	蓝水	灰水	总虚拟水 m^3/t
种植业	小麦	764	645	319	1 728
	稻谷	578	510	226	1 313
	玉米	639	19	319	977
	谷子	1 772	35	231	2 037
	高粱	1 088	22	116	1 226
	其他	1 437	46	180	1 664
	豆类	2 700	632	217	3 549
	薯类	214	11	88	313
	油料作物	2 489	337	491	3 317
	花生	1 525	73	273	1 870
	棉花	1 455	461	621	2 538
	蔬菜	220	62	169	451
	果用瓜	150	2	108	260
	苹果	914	26	306	1 246
	梨	1 002	27	335	1 364
	葡萄	393	2	182	577
	桃	927	31	316	1 274
	杏	1 534	52	523	2 109
	枣(鲜)	550	2	170	723
其他水果	1 475	39	493	2 008	
林业	种树	2 184	185	309	2 678
	板栗	1 456	123	206	1 785
	核桃	4 368	369	618	5 355
畜牧业	猪肉	5 050	405	648	6 103
	牛肉	12 795	495	398	13 688
	羊肉	5 347	452	14	5 813
	禽肉	2 836	281	854	3 971
	牛奶	927	145	210	1 282
鸡蛋	2 211	217	666	3 094	
渔业	水产品	3 564	562	842	4 968

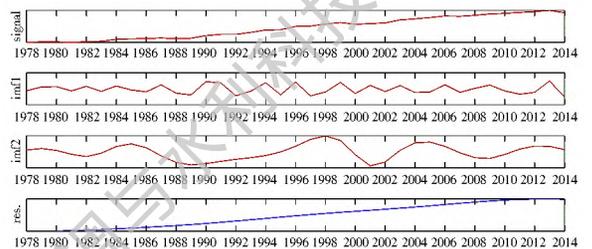


图 1 山东省农业总水足迹值变化的 IMF 分量及其趋势项 R
Fig. 1 The IMF component and its trend item of total agricultural water footprint change in Shandong Province

从图 1 可以看出山东省 1978–2014 年农业水足迹的变化是非线性非平稳的, 每个 IMF 分量体现

了水足迹值不同时间尺度的变化, IMF1 体现的是一个 3 a 的周期性波动, IMF2 显示的是 8 a 的周期性波动; 从方差贡献率可以看出, 山东省农业生产总水足迹以 8 a 周期波动为主; 从趋势项 R 可以看出总水足迹量不断增长, 1988 年之前增长较平稳, 而 1988–2006 年增长则较为迅速, 2006 年后增长趋势又趋向平稳。

表 2 山东省农业总水足迹值的 IMF 分量周期及方差贡献率

Tab. 2 The IMF component cycle and variance contribution rate of total agricultural water footprint in Shandong Province

内容	IMF1	IMF2
平均周期/a	2.8	8.2
方差贡献率(%)	27.52	72.48

3.2 农林牧渔各类水足迹变化分析

分别计算生产四类产品消耗的虚拟水量, 对四类水足迹分别运用 EMD 分解分析波动趋势。各虚拟水量 EMD 分解结果如图 2 所示, 对四类水足迹进行分解, 结果均得到 2 个 IMF 分量及趋势项 R , 四类水足迹分解的各 IMF 分量周期及方差贡献率见表 3。

表 3 四类水足迹各 IMF 分量周期及方差贡献率

Tab. 3 IMF cycle and variance contribution rate of four types of water footprint

项目	种植业		林业		畜牧业		渔业	
	IMF1	IMF2	IMF1	IMF2	IMF1	IMF2	IMF1	IMF2
周期/a	3.2	5.3	3.5	11	3.6	8.5	3.4	7
方差贡献率(%)	40.56	59.44	57.96	42.04	54.10	45.90	54.16	45.84

从图 2 和表 3 可以看出, 四类产品水足迹其 IMF1 分量周期基本一致, 大约均以 3.5 a 为周期变化, 这与农业总水足迹 IMF1 分量的 3 a 周期非常接近。从 IMF2 分量可以看出, 各分类水足迹除却 3.5 a 的短周期变化外, 种植业有 5 a 波动周期; 林业有 11 a 的波动周期; 畜牧业有 8.5 a 的波动周期; 渔业有 7 a 的波动周期。从方差贡献率来看, 林业、畜牧业及渔业均以 IMF1 分量展现的 3.5 a 的短周期波动为主, 种植业以 5 a 的长波动周期为主。从趋势项 R 可以看出, 农林畜牧业水足迹均呈现上升趋势。从波动周期和振动幅度来看, 种植业 IMF1 分量和 IMF2 分量振动幅度变化不大, 在 2002 年前波长无太大变化, 但 2002 年后两分量的波长均呈现增长的趋势, 变化周期时长有所增加; 林业 IMF2 分量多年波动周期和振幅均变化平稳, IMF1 分量在 1990–2002 年间波动振幅变化较大, 2002 年后又逐渐趋向平稳; 畜牧业 IMF2 分量变化非常平稳, 从波

形上看近似正/余弦曲线, 可见畜牧业 8 a 的长周期变化非常平稳, 外界环境等对其影响较小; 渔业两 IMF 分量 1990–2002 年波动振幅也有所加大, 2002 年后波动趋向平稳, 同时波长有增长趋势, 周期有所变大。

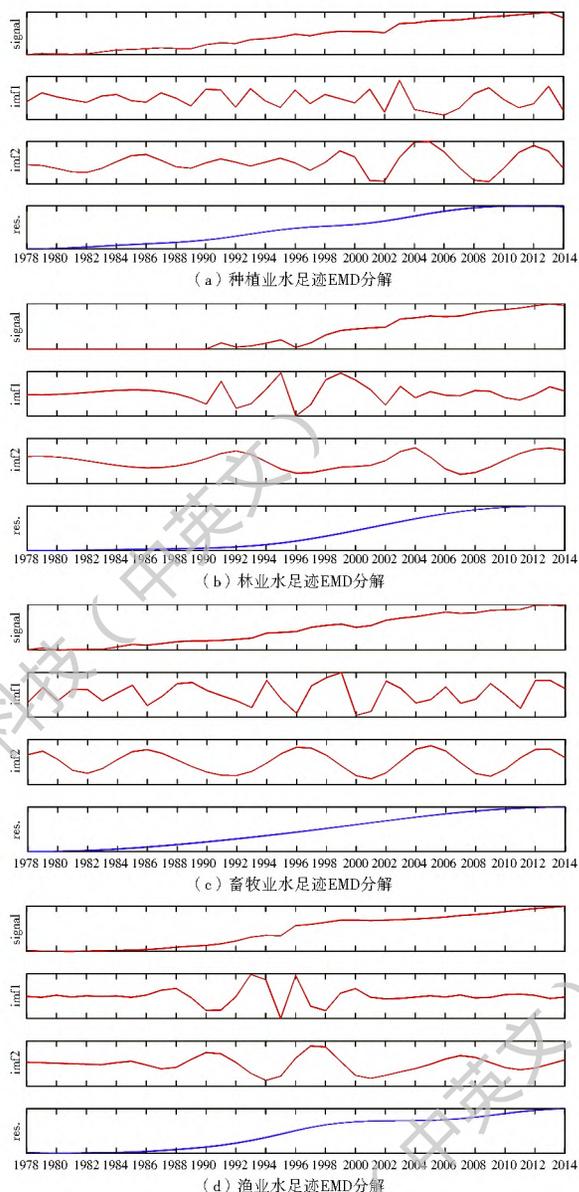


图 2 农林牧渔业水足迹 EMD 分解

Fig. 2 EMD decomposition of water footprint in planting, forestry, animal husbandry, and fishery

3.3 山东省农业总水足迹时间波动成因分析

影响水足迹变化的因素很多, 从农业总水足迹构成来看, 其中种植业水足迹所占比重最大, 其次为畜牧业, 林业和渔业所占比重很小。因而种植业和畜牧业水足迹周期变化对于农业总水足迹的周期变化影响最大。图 3 分别展示了农业总水足迹与种植业水足迹及畜牧业水足迹 IMF1 分量的比较。从图 3 中可以看出, 总水足迹 IMF1 分量虽与畜牧业水足迹 IMF1 分量波动大致相同, 但振幅相差较大; 相

比较而言总水足迹与种植业水足迹 IMF1 分量波动更为同步,且振幅更为相近,波峰波谷出现基本一致。因而农业总水足迹 3 a 波动周期主要受种植业水足迹影响。农业总水足迹 IMF1 分量与种植业水足迹 IMF1 分量峰谷变化在 1982 年左右和 2006 年左右不一致,这两个时期农业总水足迹波动与畜牧业水足迹波动基本保持一致,由于这两个时期山东省发生旱灾,粮食种植受天气影响较大,产量有所减少,总水足迹受畜牧业水足迹影响更大。总的来说,可认为山东省农业虚拟水总量 3 a 尺度的波动主要受种植业水足迹的影响。

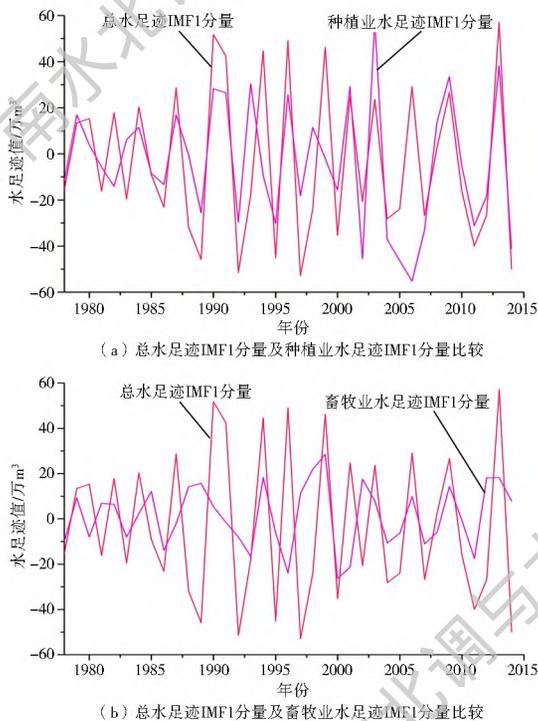


图 3 水足迹 IMF1 分量比较

Fig. 3 Comparison of IMF1 components of water footprints

图 4 为农业总水足迹 IMF2 分量分别与种植业和畜牧业 IMF2 分量的比较,从图中初步可以看出,2002 年之后种植业水足迹变化与总水足迹变化波动基本完全同步,振幅、波峰、波谷均保持同步;而 2002 年之前总水足迹的变化与种植业和畜牧业水足迹间的关系从图中无法得出明确结果,现进一步分析。将总水足迹 IMF2 分量与种植业、畜牧业水足迹 IMF2 分量分别进行相关分析,以 2002 年为时间节点,不同时间段的相关系数结果见表 4。相关系数越接近 1 表明两者相关关系越大。可以看出,2002 年后总水足迹 IMF2 分量与种植业水足迹 IMF2 分量的相关系数为 0.96,基本接近于 1,表明两者存在很强的相关关系,可认为 2002 年后总水足迹的 8 年变化周期主要受种植业影响;2002 年前,

畜牧业水足迹与总水足迹 IMF2 分量间相关系数大于种植业与总水足迹 IMF2 分量间的相关系数,表明 2002 年前总水足迹的变化与畜牧业关系更大。由此可认为总水足迹 8a 长周期的波动变化在 2002 年前受畜牧业影响更大,而 2002 年之后则主要受种植业影响。

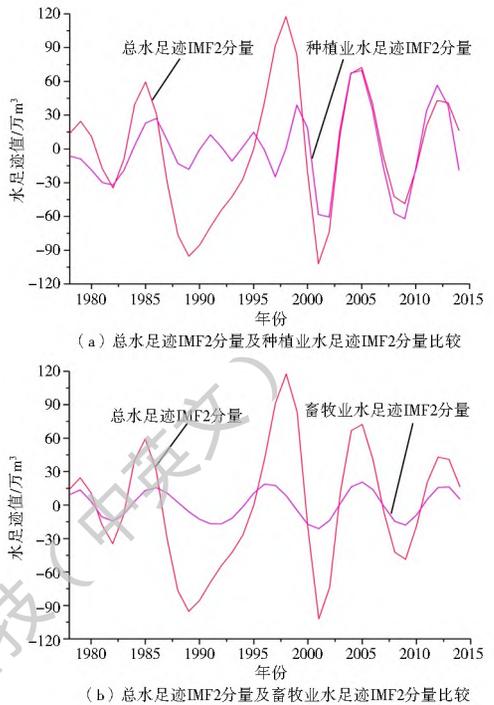


图 4 水足迹 IMF2 分量比较

Fig. 4 Comparison of IMF2 components of water footprints

表 4 不同水足迹 IMF2 分量间的相关系数结果

Tab. 4 The correlation coefficient between IMF2 components of different water footprints

年份	相关系数	
	总水足迹与种植业水足迹 IMF2 分量比较	总水足迹与畜牧业水足迹 IMF2 分量比较
1978-2001	0.39	0.67
2002-2014	0.96	0.84
1978-2014	0.58	0.75

3.4 农业总水足迹增长趋势分解分析

1978 年以来,山东省农业总水足迹值呈增长趋势,2014 年总水足迹值为 2460 86 万 m^3 ,是 1979 年的 5 倍;1979-2014 年间农业总水足迹值增加了 1984.35 万 m^3 ,6 个时段的增加量分别为 122.89 万 m^3 、239.11 万 m^3 、537.57 万 m^3 、203.89 万 m^3 、263.26 万 m^3 、105.52 万 m^3 。表 5 为 1979-2014 年山东省农业总水足迹变化的分解因素效应。

从 1979-2014 年农业总水足迹值分解因素效应变化趋势中可以看出:多年来蓝水、绿水、灰水足迹效应值均为正值,可见三者对总水足迹的增长均

起了显著的正向促进作用,但是这种正向作用在减弱;总体来说绿水足迹对农业总水足迹的增长贡献度最大,灰水足迹次之;贡献效应结构多年间发生了改变,多年间各因素效应值从绿水最大逐渐转变为蓝水最大,即对总水足迹增长的贡献度由绿水最大转变为蓝水最大,可见总水足迹增长趋势由绿水主导逐渐变为蓝水主导。这种转变主要由以下原因造成:随着近年来经济的快速发展和人民生活水平的提高,山东省降雨径流逐渐减少,对地下水的开采越加严峻,故而耗水重心逐渐由源于降水的绿水转变为来自地表及地下的蓝水。

表 5 1979—2014 年山东省农业总水足迹变化的分解因素效应

Tab. 5 Effects of decomposition factors of total agricultural water footprint change in Shandong Province in 1979—2014
万 m³

年份	绿水效应	蓝水效应	灰水效应
1979—1984	132.70	130.60	128.71
1985—1990	200.72	134.31	174.07
1991—1996	285.53	157.56	234.03
1997—2002	79.49	32.41	95.04
2003—2008	75.51	90.93	69.14
2009—2014	29.47	52.05	22.03
均值	133.90	99.64	120.50

4 结论

农业水资源的合理配置问题是农业水资源可持续开发利用和社会经济可持续发展的保障和基础。本文基于 EMD 及 LMDI 模型,以山东省为例,分析了 1978—2014 年种植业、林业、畜牧业及渔业的水足迹波动周期,并分析了引起农业水足迹增长的变动效应和变动贡献因子,得出了以下结论。

(1) 从种植业、林业、畜牧业及渔业角度基于 EMD 分解的方法分析水足迹变化,表明水足迹存在不同时间尺度的周期变动,不同变化周期的主要影响因素不同,同一变化周期在不同时间段其主要影响因素也不同。

(2) 基于 LMDI 的总水足迹分解表明影响山东省总水足迹增长的主要因素多年来逐步发生了改变,用水结构发生了变化。

参考文献(References):

[1] TURREL H, BURKE J, FAURES J M. Climate change, water and food security FAO reports 36[R]. Rome: FAO water reports, 2011.

[2] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydrological futures would be impossible[C]. Priori-

ties for water resources allocation and management. London: ODA, 1993: 13-26.

[3] HOEKSTRA A Y. Virtual Water Trade: An Introduction[A]. Hoekstra A Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade[C]. Value of Water Research Report Series No12, IHE DELFT, February 2003.

[4] LIU J, WILLIAMS J R, ZEHNDER A J, et al. GEPIC: Modeling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale[J]. Agricultural Systems, 2007, 94(2): 478-493. DOI: 10.1016/j.agry.2006.11.019.

[5] SIEBERT S, DILL P. Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation[J]. Journal of Hydrology, 2010, 384(3): 199-217. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.07.031.

[6] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global and high resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 7(2): 2499-2542. DOI: 10.5194/hess.14.1259-2010.

[7] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[R]. Value of Water Research Report Series No. 11, Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE, 2002.

[8] 孙世坤, 王玉宝, 刘静, 等. 中国主要粮食作物的生产水足迹量化及评价[J]. 水利学报, 2016(9): 1115-1124. (SUN S K, WANG Y B, LIU J, et al. Quantification and evaluation of water footprint of major grain crops in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016(09): 1115-1124. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150956.

[9] 刘莉, 邓欧平, 邓良基, 等. 2003~2011 年四川省各市(州)农业水足迹时空变化与驱动力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015(7): 1133-1141. (LIU L, DENG O P, DENG J L, et al. Agricultural water footprint space-time change and driving factors research of various cities in Sichuan province from 2003 to 2011[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015(7): 1133-1141. (in Chinese)) DOI: 10.11870/cjlyzyhj201507008.

[10] 邹君, 胡娟, 杨玉蓉, 等. 中国区域粮食生产与消费中的虚拟水平衡研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(8): 908-913. (ZOU J, HU J, YANG Y R, et al. Virtual water equilibrium of foodstuff production and consumption in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(8): 908-913. (in Chinese))

[11] SUN S K, WU P T, WANG Y B. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 444: 498-507.

[12] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 中国灌区粮食生产水足迹及用水评价[J]. 自然资源学报, 2014(11): 1826-1835. (CAO X C, WU P T, WANG Y B, et al. Agriculture water utilization assessment based on water footprint of grain production evaluation in irrigated farmland of China[J]. Journal of Natural Resources, 2014(11): 1826-1835. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.11.002.

- [13] 付强, 刘焯, 李天霄, 等. 水足迹视角下黑龙江省粮食生产用水分析[J]. 农业机械学报, 2017(6): 184-192. (FU Q, LIU Y, LI T X, et al. Analysis of water utilization in grain production from water footprint perspective in Heilongjiang Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 184-192. (in Chinese)) DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.024.
- [14] 张宇, 李云开, 欧阳志云, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米生产灰水足迹及其县域尺度变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6647-6654. (ZHANG Y, LI Y K, OUYANG Z Y, et al. The grey water footprint of the winter wheat summer maize crop rotation system of the North China Plain[J]. Journal of Ecology, 2015, 35(20): 6647-6654. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201405211051.
- [15] 余灏哲, 韩美. 基于水足迹的山东省水资源可持续利用时空分析[J]. 自然资源学报, 2017(3): 474-483. (YU H Z, HAN M. Spatial-temporal Analysis of Sustainable Water Resources Utilization in Shandong Province Based on Water Footprint[J]. Journal of Natural Resources, 2017(3): 474-483. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.20160406.
- [16] 金菊良, 崔毅, 杨齐祺, 等. 山东省用水总量与用水结构动态关系分析[J]. 水利学报, 2015(5): 551-557. (JING J L, CUI Y, YANG Q Q, et al. Analysis on the dynamic relationship between water consumption and water structure in Shandong[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015(5): 551-557. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20141268.
- [17] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities[J]. Ecological Economics, 2007, 64(1): 143-151. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2007.02.023.
- [18] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1998, 45(45): 899-955.
- [19] 谢平, 许斌, 陈广才, 等. 变化环境下基于希尔伯特-黄变换的水资源评价方法[J]. 水力发电学报, 2013(3): 27-33. (XIE P, XU B, CHENG G C, et al. Water resources assessment based on Hilbert-Huang transformation in the changing environments[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2013(3): 27-33. (in Chinese))
- [20] 冯平, 丁志宏, 韩瑞光, 等. 基于EMD的降雨径流神经网络预测模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009(1): 152-158. (FENG P, DING Z H, HAN R G, et al. Precipitation runoff forecasting ANN model based on EMD[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2009(1): 152-158. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-6788.2009.01.021.
- [21] 王翠柏, 梁小俊, 楼章华, 等. 钱塘江上游径流时序变化的多时间尺度分析[J]. 人民黄河, 2013(3): 30-32. (WANG C B, LIANG X J, LOU Z H. Multiple time scales analysis of the time series variation of runoff in the upper Qiantang River[J]. Yellow River, 2013(3): 30-32. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2013.03.012.
- [22] SHEINBAUM-PARDO C, OZAWA L, CASTILLO D. Using logarithmic mean Divisia index to analyze changes in energy use and carbon dioxide emissions in Mexico's iron and steel industry[J]. Energy Econ. 2010, 32, 1337-1344. DOI: 10.1016/j.eneco.2010.02.011.
- [23] SHEINBAUM-PARDO C, MORA-PREZ S, ROBLES-MORALES G. Decomposition of energy consumption and CO₂ emissions in Mexican manufacturing industries: Trends between 1990 and 2008[J]. Energy Sustain. Dev. 2012, 16, 57-67. DOI: 10.1016/j.esd.2011.08.003
- [24] 王艳阳, 王会肖, 蔡燕. 北京市水足迹计算与分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 954-960. (WANG Y Y, WANG H X, CAI Y. Calculation and analysis of water footprint in Beijing City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 954-960. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.00954.
- [25] 刘民士, 刘晓双, 侯兰功. 基于水足迹理论的安徽省水资源评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014(2): 220-224. (LIU S M, LIU X S, HOU L G. Assessing water resource of Anhui Province Based on water footprint theory[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014(2): 220-224. (in Chinese)) DOI: 10.1870/cjlyzyhj201402009.
- [26] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Globalization of water: sharing the planet's freshwater resources[J]. Water Encyclopedia, 2008, 43(2): 147.
- [27] ZIMMER D, RENAULT D. Virtual water in food production and global trade: Review of methodological issues and preliminary results[C]. // HOEKSTRA A Y. Virtual water trade. IHE Delft, 2003: 93-107.
- [28] 于成, 张祖陆. 山东省冬小麦夏玉米作物生产水足迹研究[J]. 水电能源科学, 2013(12): 202-204. (YU C, ZHANG Z L. Study on production water footprint of winter wheat and summer maize in Shandong Province[J]. Water Resources and Power, 2013(12): 202-204. (in Chinese))
- [29] 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, 15(5): 1577-1600. DOI: 10.5194/hess-15-1577-2011.
- [30] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Water footprints of nations[C]. // Value of Water Research Report Series No. 16. Netherlands: IHE Delft, 2004: F80.