

基于农作物水足迹的济南市农业用水评价

杨裕恒, 曹升乐, 付雅君, 李晶莹
(山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要: 水足迹是评价一个地区水资源利用模式以及消费模式的新方法。基于水足迹理论, 计算了1997-2013年济南市农作物用水量、进出口虚拟水量、水足迹值, 分析了济南市农业水资源状况与农业水资源安全状况。结果表明: 济南市水足迹组成中绿水、蓝水、灰水足迹均呈现逐年增加趋势; 农产品水足迹中小麦、玉米、蔬菜3类作物对济南市农业具有支撑作用; 农业水安全方面, 济南市多年平均水资源匮乏度为536%, 水资源压力指数高达789%, 农业人均水足迹为717.9 m³。总而言之, 济南市农业水资源压力巨大, 水资源匮乏严重, 需要提高当地水资源的可调节性, 优化种植结构与虚拟水进口种类, 强化节水工作。

关键词: 水足迹; 虚拟水; 农作物产品; 水资源安全评价; 济南市

中图分类号: TV213.4; F323.21 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)03-0228-06

Evaluation on agricultural water utilization of Jinan City based on crop water footprint

YANG Yuheng, CAO Shengle, FU Yajun, LI Jingying
(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Water footprint is a new method for the evaluation of utilizing and consuming patterns of regional water resources. Based on water footprint theory, Jinan city's crop water supply amount, import and export of virtual water amount and value of water footprint were calculated in this paper. The conditions of agricultural water resource and its security condition from 1997 to 2013 were analyzed. The results showed that footprint of green water, blue water and grey water in Jinan's water footprint increased year by year. In water footprint for agricultural production, wheat, corn and vegetables played the supporting roles for Jinan's agriculture. In the aspect of agricultural water security, water resources average deficiency degree was 536%, pressure index was up to 789%, agricultural per capita water footprint was 717.9 m³. Overall, Jinan's agricultural water pressure and water shortage are serious which need people to improve the regulation and storage capacity of local water resources, to optimize the planting structure and import types of virtual water, and to strength water-saving projects.

Key words: water footprint; virtual water; crop product; security assessment of water resources; Jinan city

1 研究背景

人类生产、消费的各种产品中,除了实体的水资源之外,还包含许多“看不见的水资源”。1993年,英国学者Allan^[1]首次提出了产品中隐含的水资源的计算方法,并将其命名为“虚拟水”。在产品虚拟水研究的基础上,荷兰学者Hoekstra^[2]在2002年提出了“水足迹”的概念,借此更加全面地理解产品中

真实水资源消费与需求。《水足迹评价手册》中定义水足迹是国家、地区或个人生产产品和服务所需要的直接或者间接水资源量^[2-3]。其概念按照水的来源方式不同,还可以进一步细分为来自地表水与地下水的蓝水足迹^[4-5]、来自降雨的绿水足迹^[6]、稀释污水的灰水足迹^[7]。现阶段,国外学者通过对特定区域水足迹的计算与分析,寻找合适的指标评价区域粮食安全与水安全,以达到水资源可持续利用

收稿日期:2016-11-22; 修回日期:2017-01-19

基金项目:山东省省级水利科研及技术推广项目(SDSLKY201604)

作者简介:杨裕恒(1992-),男,福建三明人,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。

通讯作者:曹升乐(1960-),男,陕西蒲城人,教授,博士生导师,研究方向为水文学及水资源。

的目标^[8]。国内引入水足迹理论的时间较短,目前处于学习阶段。国内学者分析了北京^[9]、武威^[10]、重庆^[11]、上海^[12]等城市农产品水足迹,并取得了一定的进展,但目前针对济南市农产品水足迹的研究较少。

济南市农业文明久远,耕地率高于全省平均水平,小麦、玉米等粮食作物与水果产量较大。但济南市水资源较为紧缺,如何使济南市农业可持续发展成为目前研究的关键性问题^[11]。故本文基于农作物水足迹理论,计算济南市本地农业用水量、农业水足迹值、本地农业虚拟水输出量、农业水足迹单位面积变化规律等值,最终评价济南市农业水资源匮乏程度。通过一系列计算与评价,为减少济南市水资源压力、实现农业水资源的长期可持续利用提供新思路。

2 研究区域概况

济南市地处山东省的西北部,其地理位置位于平原与山地的交汇处,因此地势由南部山区向北部平原区递减。全市共划分为6区、3县、1县级市,全市面积8 177.2 km²。受温带季风气候的影响,济南市冬春季干燥少雨,夏季炎热多雨,年均气温14℃左右,年均降雨650~700 mm。济南农业文明源远流长,自古便是重要的粮食基地,代表性作物有小麦、玉米、蔬菜、水果等。济南市的河流分别属于黄河、小清河、海河3大水系,3大水系对济南市农业地区,尤其是黄河以北地区农业的高产稳产起着重要的保障作用。近年来,市内加大了各项节水设施的建设,灌溉效率得到提高,目前农业灌溉及农村生活用水约占总用水量的50%左右。全市机耕总面积为26.09×10⁴ hm²,93.6%的耕地可以得到有效灌溉^[13]。全市水资源总量与附近城市相比较为充足^[14],其中地表水约占总量的38%,地下水水量约占62%。人均水资源量较为紧缺,用水配置生产方式较为粗放^[14],属于资源型缺水城市^[15]。

3 研究方法 with 数据来源

3.1 研究方法

3.1.1 作物生长水足迹 本文根据《济南市统计年鉴》中所统计的农作物种类,结合济南市农产品的特点,主要计算粮食作物(主要包括小麦、稻谷、玉米、谷子、高粱和其他谷物)、豆类、薯类、油料作物(主要包括花生和其他油料作物)、蔬菜、棉花、水果(主要包括苹果、梨、葡萄、桃、杏、枣和其他水果)

等7大类。根据水足迹的定义^[16],在实际计算中通常采用自上而下的方法,即用本地农业用水总量加(减)本地农业虚拟水输入(出)量^[17],计算公式如下:

$$\begin{aligned} AWFP &= AWU - AVWE + AVWI \\ &= AWU + NVWI \end{aligned} \quad (1)$$

式中:AWFP为农业水足迹,10⁸ m³; AWU为本地农业用水总量,10⁸ m³; AVWE为本地农业虚拟水输出量,10⁸ m³; AVWI为本地农业虚拟水输入量,10⁸ m³; NVWI为农业虚拟水净输入量,10⁸ m³。鉴于目前济南市没有精确的农业贸易数据,本文采用间接估算的方法计算区域虚拟水进出口量^[18]。根据中国人均消费食品的需求^[16],列出消费粮食、油料、蔬菜、水果数量见表1。人均消耗食品数量与当地常住人口乘积为当地食品消费数据,对比当地农产品生产数据,缺少(多余)的产品数量应为本地农业虚拟水净输入(出)量。

表1 人均每年消耗食品数量 kg

食品分类	粮食	油料	蔬菜	水果
人均数量	400	12.7	86.9	33.1

本地农业用水总量采用生产法计算,它反映生产一定数量的农产品所消耗的全球统一量纲的水单位数^[10],用公式表示为:

$$\begin{aligned} AWU &= AWU_{green} + AWU_{blue} + AWU_{grey} \\ &= \sum_{i=1}^n UWF_{green} \times P + \sum_{i=1}^n UWF_{blue} \times P + \\ &\quad \sum_{i=1}^n UWF_{grey} \times P \end{aligned} \quad (2)$$

式中:AWU为本地农业用水总量,10⁸ m³; AWU_{green}、AWU_{blue}、AWU_{grey}分别为绿水足迹、蓝水足迹、灰水足迹,10⁸ m³; UWF_{green}、UWF_{blue}、UWF_{grey}分别为单位质量农作物的绿水、蓝水、灰水消耗量,m³/t; P为农作物产量,t。

3.1.2 农业单位面积水足迹 农业单位面积水足迹(AWFP_{ua}, 10⁴ m³/km²)为农业水足迹(AWFP, 10⁸ m³)与当地种植面积(PA)的比值。其值表示区域的单位面积耗用水资源状况,数值越大表示耗用水量越高,用公式表示为:

$$AWFP_{ua} = AWFP/PA \quad (3)$$

3.1.3 农业人均水足迹 人均水足迹(AWFP_{pc}, m³/人)为地区农业水足迹(AWFP, 10⁸ m³)与当地人口(TP)的比值,用公式表示为:

$$AWFP_{pc} = AWFP/TP \quad (4)$$

3.1.4 农业水资源匮乏度 农业水资源匮乏度(AWS,%)为地区农业水足迹(AWFP, 10^8 m^3)与该区农业水资源总量(AWA, 10^8 m^3)的比值,用公式表示为:

$$AWS = AWFP/AWA \times 100\% \quad (5)$$

式中:AWA表示该区域农业水资源总量, 10^8 m^3 , AWS越大,表示该区域农业水资源匮乏度越高,缺水状况越严重。

3.1.5 水资源压力指数 为说明区域农业生产对水资源的占用情况,将区域水足迹(10^8 m^3)与该区可利用农业水资源量(10^8 m^3)的比值定义为水资源压力指数AWSI:

$$AWSI = (AWU + AVWE)/AWA \times 100\% \quad (6)$$

式中:AWU为本地农业用水总量, 10^8 m^3 ; AVWE为本地农业虚拟水输出量, 10^8 m^3 ; AWA表示该区域农业水资源总量, 10^8 m^3 。AWSI衡量了区域农业生产用水对水资源的强度,反映区域水资源压力状况,农业生产对水资源的真实占用量。若AWSI > 1,说明本地区生产所用水足迹大于可用水资源量,该区农业生产用水量已经超过了该区可利用水资源量,该区面临着较严重的水资源压力^[19]。

3.2 数据来源

因缺少济南市农作物水足迹值,参照文献[20],以山东省数据代替济南市数据。该手册所研究的农作物水足迹为1996-2005年水足迹的平均值(即可看成2001年份水足迹值),借鉴其他学者^[21]对山东省农作物单位虚拟水量的研究结果,重新确定济南市不同年份单位质量农作物水足迹值。济南市2001年单位质量农作物水足迹值见表2。已有研究表明,在过去30年中,随着农作物单产的提高,粮食作物灌溉水分生产率年均提高约0.4%,经济作物年均提高0.3%^[22-23]。故本文以2001年为基准期,按照同倍比的方法进行缩放,修正各年份农作物虚拟水含量^[24-25]。1997-2013年农产品的产量和经济增长数据、农业水资源消耗等数据均来自于文献[26-27]。

4 结果分析

4.1 年际水足迹结构变化

1997年至2013年济南市农作物用水总量计算结果如图1所示,绿水、蓝水、灰水足迹都呈现增加趋势。绿水、蓝水、灰水足迹年均增长率分别为2.0%、0.9%、2.3%,总虚拟水平均增长率为1.9%。

其中灰水足迹占总虚拟水的28.6%,并且增长速度最快,这表示该区域农业施用化肥量与农药量导致水污染程度呈现增加趋势,减少农作物种植、加工过程中的灰水足迹势在必行。绿水足迹占农作物用水总量的54.2%左右,表明降雨为济南市农作物的主要需水来源。蓝水足迹约为总虚拟水的17.2%且较为稳定,表明济南市地表水与地下水用于农作物生产所占比例较小。

表2 2001年单位质量农作物的绿水、蓝水和灰水及总虚拟水值 m^3/t

农作物	绿水	蓝水	灰水	总虚拟水
小麦	685	184	111	980
稻谷	551	486	215	1252
玉米	609	18	304	931
谷子	1689	33	220	1942
高粱	1037	21	111	1169
其他谷物	1370	44	172	1586
豆类	2605	610	209	3424
薯类	206	11	85	302
油料作物	2401	325	474	3200
棉花	1404	445	599	2448
蔬菜	242	6	163	411
果用瓜	145	2	104	251
苹果	882	25	295	1202
梨	967	26	323	1316
葡萄	379	2	176	557
桃	894	30	305	1229
杏	1480	50	505	2035
枣	531	2	164	697
其他水果	1423	38	476	1937

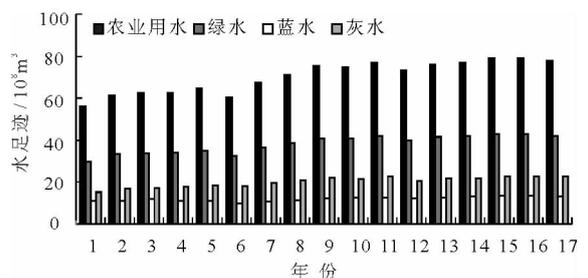


图1 农产品水足迹值年际结构变化

根据济南市年鉴中的数据,济南市粮食、蔬菜、水果满足自给自足之外,还可以对外输出;油料自给不足,需要对外进口。图2为济南市逐年水足迹账

户图,本地农业用水总量、农业水足迹、本地农业虚拟水输出量都呈现逐年升高趋势。表明济南市农业水足迹大部分依赖于本地水资源,这与我国山东是粮食生产主要地区的地理位置相吻合。因此在水资源较为紧缺的山东地区从事大规模的农业生产,水安全与 3 类水足迹的有效管理显得至关重要^[28]。表 3 为水足迹账户分项拟合公式,本地农业用水总量、农业水足迹、本地农业虚拟水输出拟合曲线 y 分别与年份 x 呈现二次函数、一次函数、指数函数关系,且拟合效果良好,可通过该公式模拟未来农业水足迹变化,并通过该变化做出及时应对。

4.2 单位面积水足迹变化

济南市 1997 - 2013 年农作物面积见表 4。由表 4 可见,近年来济南市农作物种植面积变化幅度较小,多年平均种植面积为 $60.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。单位面积水足迹逐年变化见图 3,可见水足迹值呈现递增趋势。根据图 3 中的数据,可拟合出单位面积水足迹逐年的变化方程见(7)式。

$$y = 2.1672x + 95.983, R^2 = 0.9204 \quad (7)$$

表 4 济南市历年农作物种植面积表

																km ²	
1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
5873	6100	6136	6039	5984	5991	5904	6087	6236	6220	6203	6060	6185	6209	6223	6069	5917	

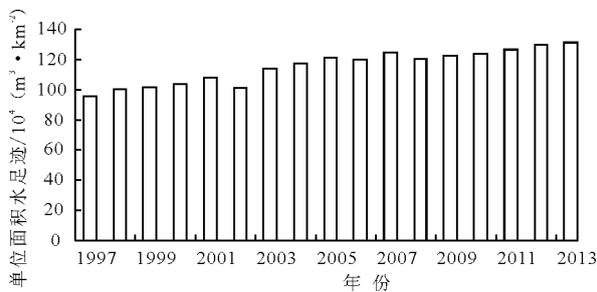


图 3 单位面积农作物水足迹逐年变化图

4.3 各行政区年均水足迹情况

济南市各行政区域年均水足迹值见图 4。由图可见,历城区、长清区、平阴县、济阳县、商河县、章丘市水足迹值较高,符合其为济南市农作物生产主要基地的特征^[13]。而历下区、市中区、槐荫区、天桥区农作物水足迹值较小,表明这些地区农作物种植面积较小(其中历下区在 2008 年以后已经没有农作物种植区域),城市产业结构向第三产业转移。

4.4 农作物产品水足迹变化

图 5 为济南市农作物产品虚拟水足迹年际变化趋势图,从图 5 中可以看出济南市农作物种植结构

预测 2020、2025 年济南市单位面积水足迹值分别为 $148.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 、 $158.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。鉴于单位面积水足迹呈现线性增长,建议在保证济南市农业经济稳定与满足当地居民对农产品需求的同时,适当减少高水足迹农作物种植面积,探索一条合理的济南市农业发展道路。

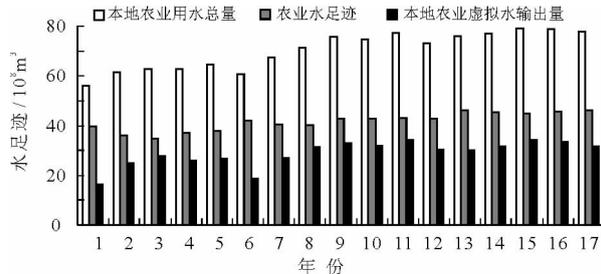


图 2 济南市逐年水足迹账户图

表 3 水足迹项目公式拟合表

类别	拟合公式	相关系数
本地农业用水总量	$y = -0.084x^2 + 2.798x + 44.86$	$R^2 = 0.925$
农业水足迹	$y = 0.645x + 35.76$	$R^2 = 0.824$
本地农业虚拟水输出量	$y = 10.34x^{0.303}$	$R^2 = 0.636$

较为稳定。结构图中,蔬菜在农作物水足迹中所占的比重最大,约占水足迹总量的 42%,这主要与济南市蔬菜的需求量较高、蔬菜生长周期短、单位面积产量较高有关。玉米、小麦等粮食作物所占的比重也较大,约占总水足迹的 38%,这主要是由于这两类作物的种植面积和产量较大。总体来看,除在 2002 年山东遭遇百年一遇大旱,济南地区水足迹略有下降外^[29],济南市农作物水足迹大体呈逐年递增趋势。在耕地面积减少与北方地区水资源紧缺的大背景下,农作物产品的水足迹提高,表明农业综合生产效率得到了提高。同时为实现水资源的可持续利用,更应注意单位产值的水资源使用量的问题,适当减少高耗水作物的种植并寻求其代替性作物。

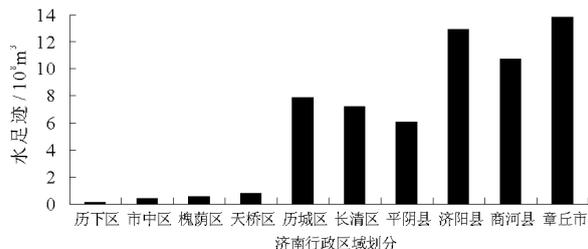


图 4 济南市各行政区年均水足迹图

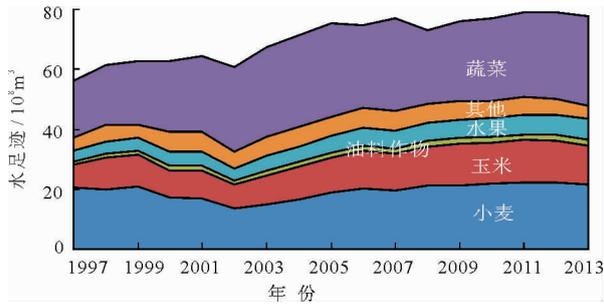


图5 济南市主要农作物产品虚拟水足迹年际变化趋势图

4.5 水资源安全评价

水资源匮乏度、水资源压力属于水资源安全评价指标^[30],指标变化主要受年降水量、居民用水方式的影响。因缺乏1997-1999年数据,故计算2000-2013年水资源安全评价指标,计算结果见表5、图6。

表5 济南市水资源安全评价表

年份	水资源 匮乏度/%	水资源 压力/%	农业人均 水足迹/m ³
2000	480	568	658.5
2001	704	1016	668.6
2002	1409	2147	734.3
2003	263	388	697.8
2004	263	391	682.4
2005	363	463	719.1
2006	526	778	713.5
2007	506	798	712.1
2008	606	941	706.5
2009	402	612	763.2
2010	412	647	750.7
2011	531	788	740.4
2012	591	849	747.6
2013	449	661	756.0
多年平均	536	789	717.9

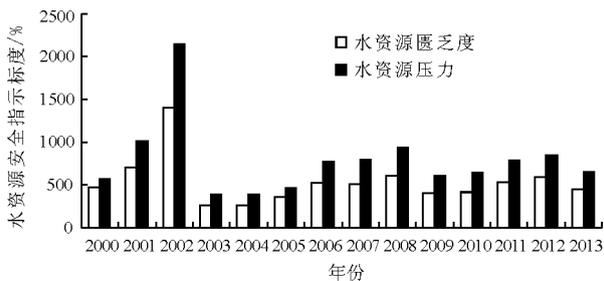


图6 济南市逐年水资源安全评价指标

计算结果表明:济南市水资源匮乏度与水资源压力较不稳定,约以5 a为一个变化周期。多年平均水资源匮乏度为536%,水资源压力指数高达789%,农业人均水足迹为717.9 m³。对比Pfister等^[31]及孙芳玲^[32]的研究,显示济南市为极端缺水地区,水资源压力巨大。南水北调东线二、三期工程启动以及国家对济南市海绵城市的建设,将有机会缓解济南市的农业水资源压力状况^[33]。

5 结论

水足迹是评价一个地区水资源利用模式以及消费模式的新方法^[33]。本文收集了1997-2013年济南市水资源相关数据,计算了济南市水足迹结构变化、农作物水足迹组成以及水资源安全评价指标,分析了济南市水资源安全情况,得出以下结论:

(1)1997-2013年济南市绿水、蓝水、灰水水足迹平均以2.0%、0.9%、2.3%的趋势增加,其中玉米、小麦和蔬菜的虚拟水足迹值较大,约占总虚拟水的80%左右。根据水足迹账户各分项农业用水、本地出口虚拟水、农业水足迹的增长趋势拟合出变化公式,为下一步研究做准备。

(2)单位面积水足迹呈现较快的增加趋势,水资源负荷逐年增加,预测2020、2025年济南市单位面积水足迹值分别为 $148.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 、 $158.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。各行政区单位面积水足迹差别较大,表明城市各县(市)、区功能区划逐渐明显,有利于各个产业的进一步发展。

(3)济南市多年平均水资源匮乏度为536%,水资源压力指数高达789%,农业人均水足迹为717.9 m³。研究结果充分证明济南市水资源处于严重匮乏状态,水资源压力巨大。

(4)根据济南市农业水足迹现状,必须重视绿水、蓝水、灰水水足迹资源的管理,调整农业种植结构,减少使用人工肥料及杀虫剂,才能更有效地提高粮食安全和作物产量。减少水分蒸发损失的灌溉技术,须从源头上控制农业生产水量,适当减少高耗水农产品的生产,同时适当减少虚拟水贸易对外输送,适量增加高耗水农产品的进口,减小本地用水压力。在水资源严重匮乏的年份(例如2002年)进行节水、储水,利用南水北调、海绵城市等建设,加大水资源的可调蓄性,实现济南市农业的长远可持续发展。

参考文献:

[1] Allan J A. Overall perspectives on countries and regions

- [C]//. *Water in the Arab World: Perspectives and Prognoses*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1994:65 - 100.
- [2] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. 刘俊国, 曾昭, 赵乾斌, 等译. 水足迹评价手册[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] Hoekstra A Y. *Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade* [R]. Value of Water Research Report Series. Delft, The Netherlands, 2003.
- [4] 吴兆丹, 赵敏, Upmanu Lall, 等. 关于中国水足迹研究综述[J]. 中国人口资源与环境, 2013, 23(11): 73 - 80.
- [5] 周玲玲, 王琳, 王晋. 水足迹理论研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(5): 106 - 111.
- [6] Liu C M, Li Y C. "Greenwater" and water conservation: discussions on the connotation of China's water resource [J]. *Impact of Science on Society*, 2006(1): 16 - 20.
- [7] Hoekstra A Y, Chapagain A K. *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources* [M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2008.
- [8] 黄晶, 宋振伟, 陈卓. 北京市水足迹及农业用水结构变化特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6546 - 6554.
- [9] 曾昭, 刘俊国. 北京市灰水足迹评价[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1169 - 1178.
- [10] 李泽红, 董锁成. 武威绿洲农业开发对民勤绿洲来水量的影响——基于水足迹的视角[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 86 - 91.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 赵文韬. 济南市农业产业化发展策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [14] 李常锁, 秦品瑞. 济南市水资源概况及开发利用初探[J]. 山东国土资源, 2010, 26(10): 21 - 25.
- [15] 孙芳玲. 山东省水资源生态足迹研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2011.
- [16] 王博. 基于水足迹理论的吉林省辽河流域城市化进程中水资源可持续利用评价与优化配置研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [17] 韩玉, 杨晓琳, 陈源泉, 等. 基于水足迹的河北省水资源安全评价[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(8): 1031 - 1038.
- [18] 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.
- [19] Cao Xinchun, Wu P T, Wang Y B, et al. Assessing blue - green water utilisation in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(8): 3165 - 3178.
- [20] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crop and derived crop products [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(5): 1577 - 1600.
- [21] Chapagain A K, Hoekstra A Y. *Water footprints of nations* [C]//. Value of Water Research Report Series; No. 16. Delft, the Netherlands: IHE, 2004: 1 - 80.
- [22] 武俊霞, 胡广录. 高台县农作物灌溉水分生产力年际变化[J]. 发展, 2009(8): 116 - 117.
- [23] 耿献辉, 张晓恒, 宋玉兰. 农业灌溉用水效率及其影响因素实证分析——基于随机前沿生产函数和新疆棉农调研数据[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 934 - 943.
- [24] 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, 24(7): 1133 - 1141.
- [25] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard* [M]. London, U K: Earthscan, 2011.
- [26] 巩宪群. 济南年鉴(1998 ~ 2015) [M]. 济南: 济南出版社, 1998 - 2015.
- [27] 山东省水利厅. 山东省水资源公报(1998 ~ 2015年). [R/OL].
- [28] Rockstrom J, Lannerstad M, Falkenmark M. Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(15): 6253 - 6260.
- [29] 顾润源, 汤子东. 2002年夏季山东干旱成因分析[J]. 气象, 2004, 30(8): 22 - 26.
- [30] 翁清, 马骏, 袁军. 基于水足迹理论的苏北地区水资源评价[J]. 中国农村水利水电, 2016(4): 33 - 37.
- [31] Pfister S, Koehler A, Hellweg S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA [J]. *Environmental Science & Technology (American Chemical Society)*, 2009, 43(11): 4098 - 4104.
- [32] 孙芳玲. 山东省水资源生态足迹研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2011.
- [33] 王新华, 徐中民, 李应海. 甘肃省2003年的水足迹评价[J]. 自然资源学报, 2006, 20(6): 909 - 915.