中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

水足迹视角下陕西省种植业水资源利用评价及经济发展脱钩分析

张炜, 覃求

引用本文:
张炜, 覃求. 水足迹视角下陕西省种植业水资源利用评价及经济发展脱钩分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 153–162.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180447

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于作物生产水足迹的陕西省水资源压力评价

Assessment of water stress in Shaanxi Province based on crop water footprint

中国生态农业学报. 2015(5): 650–658 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141312

农业生产与水资源承载力评价

Agricultural production and evaluation in terms of water resources carrying capacity

中国生态农业学报. 2016, 24(7): 978–986 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151102

生态文明视角下四川省资源环境压力的时空变化特征

Spatio–temporal changes in resource environment pressure due to eco–civilization in Sichuan Province, China

中国生态农业学报. 2016(1): 121–130 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150849

农产品水足迹评价研究进展

A review of water footprint assessment for agricultural products

中国生态农业学报. 2017, 25(7): 1071–1080 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170027

基于生态水文理念的流域水资源规划研究*——以子牙河为例

Water resources planning driven by eco–hydrology theorem:A case study of Ziya River basin

中国生态农业学报. 2016, 24(12): 1722–1731 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160548

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 1 月 第 27 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2019, 27(1): 153−162

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180447

张炜, 覃求. 水足迹视角下陕西省种植业水资源利用评价及经济发展脱钩分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 153−162
ZHANG W, QIN Q. Decoupling analysis on water resources utilization of planting industry and economic development in Shaanxi Province from the perspective of water footprint[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(1): 153−162

水足迹视角下陕西省种植业水资源利用评价及经济发展脱钩分析*

张 炜, 覃 求

(西安建筑科技大学管理学院 西安 710055)

摘 要: 陕西省位于“一带一路”关键地带, 经济发展将处于加速转型的关键时期, 期间农业水资源可利用量势必被进一步压缩, 因此对陕西省各地市种植业水足迹进行量化并研究与其经济发展的协调关系, 有利于明确各区域种植业生产的用水情况并为陕西省水资源管理提供参考。本研究运用水足迹理论, 将灌溉水在输配水及田间灌溉过程中的损失纳入作物区域生产水足迹核算之中, 通过核算 2005—2016 年陕西省种植业的水足迹值, 定量分析了陕西省各作物耗水量的时空差异性, 以及绿水足迹利用效率和各市水环境压力状况, 并结合脱钩模型研究了种植业经济增长与水资源利用和水环境变化的脱钩关系。结果显示: 1)各作物耗水量在研究期内差异较大, 蔬菜和水果水足迹较低, 分别为 0.42 $m^3 \cdot kg^{-1}$ 和 0.51 $m^3 \cdot kg^{-1}$, 茶叶则高达 30.29 $m^3 \cdot kg^{-1}$, 但总体呈下降趋势; 2)各地市种植业耗水量构成呈现较大差异性, 关中地区粮食类作物占比为 69.59%, 陕北地区玉米和水果占 75.16%, 陕南地区则相对均衡, 耗水量组成基本与水资源禀赋和作物水足迹大小相一致; 3)全省绿水足迹利用效率相对较低, 水环境压力指数呈现南部低, 中部、北部高的特点, 其中咸阳市水环境压力指数 12 年间平均高达 4.75, 是水环境压力最为严重地区; 4)陕西省种植业经济增长与水资源利用和水环境压力强脱钩状态分别占比 45.45%和 27.27%。研究结果说明, 陕西省各市种植结构相对合理, 但绿水足迹利用效率和水环境压力上仍需改良, 种植业经济增长与水资源利用的关系逐渐完成了由弱脱钩的初级协调到强脱钩的优质协调的转变, 但仍面临着种植业经济增长与水环境压力增大的挑战。

关键词: 陕西省; 水足迹; Tapio脱钩模型; 种植业; 经济增长; 水环境压力; 作物耗水量; 水足迹利用效率
中图分类号: S271 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-6237(2019)01-0153-10

Decoupling analysis on water resources utilization of planting industry and economic development in Shaanxi Province from the perspective of water footprint*

ZHANG Wei, QIN Qiu

(School of Management, Xi’an University of Architecture and Technology, Xi’an 710055, China)

Abstract: Shaanxi Province is located in a key area of the “One Belt One Road” promoted by China. The availability of agricultural water resources is bound to be further scarce due to accelerated economic transformation as a result of the “One Belt One Road” project.

* 陕西省社会科学基金项目(12Q023)和陕西省教育厅专项科研计划项目(13JK0223)资助
张炜, 主要研究方向为资源环境管理和项目投资优化与决策。E-mail: 352753390@qq.com
收稿日期: 2018-05-08 接受日期: 2018-09-20

* This study was supported by Shaanxi Provincial Social Science Fund (12Q023) and Shaanxi Provincial Department of Education Special Research Project (13JK0223).
Corresponding author: ZHANG Wei, E-mail: 352753390@qq.com
Received May 8, 2018; accepted Sep. 20, 2018

To therefore quantify water footprint of the crop industry and to determine the co-ordination between planting and economic development are critical for further clarification of the water use in planting and setting up relevant reference basis for water resources management in Shaanxi Province. Thus this paper incorporated the loss of water during distribution and irrigation of crop water footprint. By accounting for the value of water footprint of the crop industry in Shaanxi Province for the period 2005–2016, we analyzed the spatial and temporal differences in water consumption by various crops in Shaanxi Province, the utilization efficiency of green water and the pressure of water environment. Combined with the Tapio model, the change in relationship between economic growth of crop farming, water resource utilization and water environment was determined. The results showed that: 1) water consumption by various crops was significantly different during the study period. The water footprint of vegetables and fruits were respectively 0.42 $m^3 \cdot kg^{-1}$ and 0.51 $m^3 \cdot kg^{-1}$, while that of tea was as high as 30.29 $m^3 \cdot kg^{-1}$. However, there was an overall downward trend in water use. 2) The water consumption composition of planting industry in different areas was quite different, crop water consumption proportion in Guanzhong was 69.59%, grain and corn water consumption proportion in northern Shaanxi was 75.16% and that in southern Shaanxi was relative equilibrium among various corps. The water consumption composition was basically the same as water endowment and crop water footprint. 3) The use efficiency of green water footprint was relatively low. Also the pressure index of water environment was low in the south, high in the central and north. The average water environment pressure index for Xianyang was as high as 4.75 in 12 years, indicating serious water environment pressure. 4) The decoupling of economic growth of crop industry with water resource use and water environment pressure accounted respectively for 45.45% and 27.27% of total water use in the province. The research results showed that planting structure in Shaanxi Province was relatively reasonable and that green water footprint was hugely utilized. The efficiency and pressure of water environment still needed improvement. The relationship between economic growth of crop industry and water resources use was being gradually transformed from primary co-ordination of weak decoupling to quality co-ordination of strong decoupling. However, it still faced the change of industrial diversity, economic growth and environmental pressures.

Keywords: Shaanxi Province; Water footprint; Tapio decoupling model; Crop industry; Economic growth; Water environment pressure; Crop water consumption; Water footprint use efficiency

水是人类生命之源，也是社会经济发展的重要影响因素之一。我国是农业大国，农业用水总量占比高达 60%以上(数据来源于 2005—2016 年中国水资源公报)，在如今我国 3 次产业结构转型升级，以及生态农业发展要求日益提高的新时期，更加科学地分析地区农业水资源利用状况及其与经济协调发展之间的关系变得尤为重要。传统视角下的农业水资源评价主要关注灌溉用水用量，却缺少对雨水以及从水量角度评价农作物种植过程中所产生的污染量[1-2]的关注。而 Hoekstra 于 2002 年提出的“水足迹”及其相关理论，由于其除了关注蓝水(地下和地表水与传统计量的灌溉用水相对应)外，还包含了绿水(可利用的雨水)和灰水(污水)[3-4]，这一理论为水资源评价提供了更为广阔的视野，而受到广泛关注。目前，国内不少学者运用水足迹理论对地区的水资源状况进行了评价。王艳阳等[5]、苏芮等[6]分别核算了北京和新疆水足迹并在此基础上对区域水足迹结构以及水资源利用效率状况进行了评价。针对地区农业水足迹，大多数学者的研究主要集中在对于粮食作物的生产水足迹核算以及地区农业水资源结构变化、水资源承载力方面的研究[7-10]。随着水足迹研究的进一步深入，也有学者从水足迹视角研究了地区水足迹与经济协调发展之间的关系。王旭等[11]核算了宁夏中卫市的农业水足迹，并运用 OECD 模型研究了中卫市水资源量与经济发展的可持续性；李宁等[12]通过计算长江中游城市群 2000—2015 年的水足迹构成，定量分析了该区域近 16 年间水资源的利用状况，并结合协调发展脱钩评价模型对水资源利用与经济增长协调关系进行综合评价。

综合目前水足迹评价以及与经济发展协调性的研究来看，首先，地区内水足迹的评价主要集中于对工业、农业、生活生态等其中一方面或几方面的整体性研究，整体虽然能较为宏观地把握问题，但也存在无法针对性提出解决问题措施的可能[13-14]。其次，就农业水足迹核算本身而言，研究尺度一般以田间尺度为主，且大多忽略了作物水足迹由于地区气象以及灌溉水平等的不同所产生的差异性；而相关研究表明，地区之间水足迹值存在的较大差异性往往可能影响评价结果的可靠性[15]。同时，较少将地区的作物水足迹与经济发展的协调性相结合。陕西省地处“一带一路”建设的关键区域，经济结构进一步加速转型升级，期间农业水资源可利用量势必被进一步压缩。基于此，本文从水足迹视角出发，将灌溉水在输配水及田间灌溉过程中的损失纳入作物区域生产水足迹的核算之中，通过计算 2005—2016 年陕西省 10 个地级行政区的种植业水足迹，定量分析了陕西省各作物耗水量的时空差异性和各市水环境压力状况，并结合脱钩模型对陕西省种植业水资源利用和水环境变化与经济协调发展的关系进行综合评

价, 以期为陕西省水资源管理提供参考。

1　模型设定与数据来源

1.1　基于区域用水量的作物生产水足迹计算模型

本文根据《陕西省统计年鉴》以及陕西省农产品特点, 将核算对象分为五大类: 粮食作物(小麦、玉米、大豆、稻谷)、油料作物(油菜、花生)、经济作物(棉花、烟草、茶叶、麻类)、蔬菜、水果。其中, 由于烟草、茶叶、麻类、水果、蔬菜种类繁多, 相关数据难以准确界定, 因此在水足迹核算过程中的作物蒸发蒸腾量参考《陕西省农业用水定额修订说明》。

1.1.1　作物区域绿水足迹、蓝水足迹

作物区域绿水足迹(WF_{green}, $m^3 \cdot kg^{-1}$)和蓝水足迹(WF_{blue}, $m^3 \cdot kg^{-1}$)的计算方法[16]:

$$WF_{green} = CWU_{green} / Y = 10 \times ET_{green} / Y \quad (1)$$

$$WF_{blue} = CWU_{blue} / Y = 10 \times (ET_{blue} + I_f + I_c) / Y \quad (2)$$

式中: CWU_{green}、CWU_{blue}为作物所消耗的绿、蓝水资源量, $m^3 \cdot hm^{-2}$; ET_{green}、ET_{blue}为作物绿水、蓝水蒸散发量, mm; I_f为灌溉水在田间灌水过程中的损失量, mm; I_c为灌溉水在输、配水过程中的损失量, mm; Y为作物产量, $kg \cdot hm^{-2}$; 10 为将水深转换为单位陆地水量的单位转换系数。ET_{green}、ET_{blue}按下式进行计算:

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_{eff}) \quad (3)$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_{eff}) \quad (4)$$

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (5)$$

I_f、I_c[17]可按照下式计算:

$$I_f = ET_{blue} / \eta_f - ET_{blue} \quad (6)$$

$$I_c = ET_{blue} / \eta - ET_{blue} / \eta_f \quad (7)$$

$$I_f + I_c = ET_{blue} / \eta - ET_{blue} \quad (8)$$

式中: ET_0为参考作物蒸发蒸腾量, mm, 本文采取 FAO 推荐的 Pen-man-Monteith 公式进行计算; ET_c为假定作物在最优条件下, 作物生长所需要蒸散发量, 因此数值等于作物需水量, 但作物在实际生长过程中可能会受到土壤水胁迫的影响, 从而蒸散发量可能小于 ET_c, 由于在市级尺度下的作物水足迹研究在准确界定各作物的土壤有效水含量上有一定困难, 因此本文选取理想状况下 ET_c 计算绿水、蓝水足迹; P_{eff}为作物生育期有效降水量, mm, 本文采取美国农业部土壤保持局(USDA SCS)提出的方法进行计算; η_f为田间水利用系数; η 为灌溉水利用系数, 根据陕西省“十五”、“十一五”、“十二五”相关政府工作报告以及 2016 年农田灌溉水有效利用系数测算分析成果表, 核算期内历年陕西省灌溉水利用系数见表 1。

表 1　陕西省 2005—2016 年间灌溉水利用系数

Table 1　Irrigation water utilization coefficients in Shaanxi Province from 2005 to 2016

年份 Year	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
灌溉水利用系数 Irrigation water utilization coefficient	0.48	0.50	0.51	0.52	0.53	0.54	0.54	0.55	0.55	0.55	0.56	0.56

1.1.2　作物区域灰水足迹

作物在种植过程中人工所施用的化肥、农药等无法被作物完全吸收, 部分化肥农药在降水和径流的作用下, 以一定流失率进入受纳水体引起的水体污染属于面源污染, 由最大污染物决定, 在数量上等于该污染物的稀释水量。因此灰水足迹(WF_{grey}, $m^3 \cdot kg^{-1}$)可由下式计算:

$$WF_{grey} = \max\left(WF_{grey,1}, WF_{grey,2}, \cdots WF_{grey,i}\right) \quad (9)$$

$$WF_{grey,i} = \frac{(a \times AR)/(C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad (10)$$

式中: $WF_{grey,i}$表示第 i 种污染物的灰水足迹; α 为淋溶率; AR 为某种污染物单位面积施用量, $kg \cdot hm^{-2}$; C_{max}表示水质标准浓度; C_{nat}为自然本地浓度。一般认为, 农药对灰水足迹影响较小[18], 根据陕西省实际情况, 为了避免重复计算, 本文选取排放量最大的氮肥作为灰水足迹计算的主要来源。

由于国内少有学者对陕西省氮肥淋失率的具体研究, 因此本文参照高凡等[19]对灰水足迹研究综述中的论述以及 Chapagain 等[20]在 2010 年对淋失率研究, 考虑氮肥的淋失率为 10%。C_{max}根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中给定的第III类集中式生活饮用水地表水水源地的硝酸盐(以 N 记)的限值标注, 取值为 0.01 $kg \cdot m^{-3}$; C_{nat}为本地浓度取值, 一般假定为 0 $kg \cdot m^{-3}$。作物的单位面积氮肥施用量是能否准确核算灰水足迹的关键, 本文中的陕西省各作物的化肥施用量参照已有的研究[21-23]确定, 对于数据缺失的作物(棉花、烟草、麻类、烟草), 本文参照杨帆等[24]和马立锋等[25]对我国种植业化肥施用量的研究, 取全国平均值。

1.1.3　作物区域水足迹总量计算

本文定义作物区域水足迹总量为绿水足迹、蓝水足迹、灰水足迹之和, 结前所述, 设定作物区域水足迹总量计算公式如下:

$$WF = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (11)$$

1.2　脱钩理论模型

“脱钩理论”是研究经济发展与资源消耗是否同步变化的一种方法, 常被用于能源消耗和碳排放领域[26]。根据这一理论, 资源利用与经济增长主要存在“耦合”

和“脱钩”两种关系，前者指的是资源利用伴随经济增加而增加，后者指的是资源利用伴随经济的增加而减少。脱钩又分为“相对脱钩”、“绝对脱钩”。相对脱钩指的是经济增长时，资源消耗以较低的比率增长；绝对脱钩指的是经济增长的同时，资源消耗反而呈现下降状态，由此可见绝对脱钩也是水资源利用的最佳状态。常见的脱钩模型有 Vehmas 脱钩指数、OCED 脱钩因子、Tapio 弹性指数、TGT 脱钩方程等。由于 Tapio 模型相对于其他模型能更加精细地划分脱钩程度且能侧重特定年份的分析，对于判定脱钩状态的演替过程具有一定的优势[27-28]。因此本文在分析中采用 Tapio 弹性指数模型，从陕西省种植业经济增长对水资源真实占用量，以及对陕西省水资源环境压力两个方面来研究陕西省种植业和水资源利用的脱钩关系，模型如下：

$$\mathrm{DE}_{(\mathrm{WF,TPO})}=\frac{\left(\mathrm{WF}_{t+1}-\mathrm{WF}_{t}\right)/\mathrm{WF}_{t}}{\left(\mathrm{TPO}_{t+1}-\mathrm{TPO}_{t}\right)/\mathrm{TPO}_{t}} \tag{12}$$

$$\mathrm{DE}_{(\mathrm{WF}_{\mathrm{grey,\,TPO}})}=\frac{\left[\mathrm{WF}_{\mathrm{grey}(t+1)}-\mathrm{WF}_{\mathrm{grey}(t)}\right]/\mathrm{WF}_{\mathrm{grey}(t)}}{\left(\mathrm{TPO}_{t+1}-\mathrm{TPO}_{t}\right)/\mathrm{TPO}_{t}} \tag{13}$$

式中：DE 为脱钩指数；t、t+1 为计算起始年份；WF 为水足迹；TPO(total planting output value)为种植业总产值；$\mathrm{DE}_{(\mathrm{WF,TPO})}$表示种植业经济增长与水资源真实占用量之间的脱钩关系，$\mathrm{DE}_{(\mathrm{WFgrey,TPO})}$表示种植业经济增长与之所造成的水资源环境压力的脱钩关系，其脱钩程度判断如表 2 所示。

表 2　Tapio 指数脱钩程度判断表[29]

Table 2　Tapio index decoupling degree judgment table

脱钩类型 Decoupling type	脱钩状态 Decoupling state	Δ 种植业总产值(ΔTPO) Δ total planting output value	Δ 水足迹/Δ 灰水足迹($\Delta\mathrm{WF}/\Delta\mathrm{WF}_{\mathrm{grey}}$) Δ water footprint /Δ green water footprint	脱钩指数(DE) Decoupling index
负脱钩 Negative decoupling	弱负脱钩 Weak negative decoupling	<0	<0	0<DE<0.8
	强负脱钩 Strong negative decoupling	<0	>0	DE<0
	增长负脱钩 Expansive negative decoupling	>0	>0	DE>1.2
脱钩 Decoupling	衰退脱钩 Recessive decoupling	<0	<0	DE>1.2
	强脱钩 Strong decoupling	>0	<0	DE<0
	弱脱钩 Weak decoupling	>0	>0	0<DE<0.8
耦合 Coupling	衰退型耦合 Recessive coupling	<0	<0	0.8<DE<1.2
	扩张性耦合 Expansion coupling	>0	>0	0.8<DE<1.2

1.3　数据来源

本文研究区域 2005—2016 年间的月平均最高温度、月平均最低温度、湿度、风速、日照、辐射强度、月降水量均来自于中国气象数据网(http://data.cma.cn/)中陕西省 32 个气象站数据。

作物系数和作物生育期参考《中国主要作物需水量与灌溉》、《北方地区农作物灌溉用水定额》、中国气象数据网(http://data.cma.cn/)，陕西省各地级市作物产量、单位面积产量、水资源总量等数据均来自《陕西省统计年鉴》(2006—2017 年)；各地级水资源总量来自《陕西省水资源公报》(2005—2016 年)。

参考作物蒸发蒸腾量(ET_0)通过联合国粮农组织(FAO)开发的 cropwat 8.0 计算得到。

2　结果与分析

2.1　陕西省种植业耗水量(绿水足迹与蓝水足迹)

2.1.1　种植业耗水量的时空差异性

根据水足迹理论相关定义，绿水和蓝水分别表征着作物生长期间田间总雨水蒸散量和作物田间灌溉的蒸散量，属于实质性消耗水量，本文将两者之和定义为作物耗水量。图 1 显示，陕西省各地级市种植业在耗水量的构成上由于种植结构的不同呈现较大差异性。关中 5 市(西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南)耗水量构成以粮食类作物为主，占比平均高达 69.59%，其中关中作为小麦的主产区，占比为 42.59%。不同于关中地区，陕北 2 市(榆林、延安)的粮食类作物生产耗水集中在玉米作物，占比为 37.18%，水果占比同样高达 37.98%。而陕南 3 市(汉中、安康、商洛)5 类作物耗水量占比组成相对较为均衡，其中茶树、烟草作为陕南地区重要的经济类作物，其耗水量占比分别为 8.40%、1.45%。这说明在区域水足迹核算过程中忽略地区种植结构差异性会产生较大结果偏差，从而影响评价结果的准确性。

其次，从不同种作物在不同年份耗水量的变化情况(图 2)可以看出，2005—2016 年间，同种作物耗水量在不同年份呈现一定幅度的波动，总体上呈现下降趋势，这与研究期内种植技术提升，作物单位面积产量提高趋势保持一致。其中，经济类作物茶叶下降尤为明显，

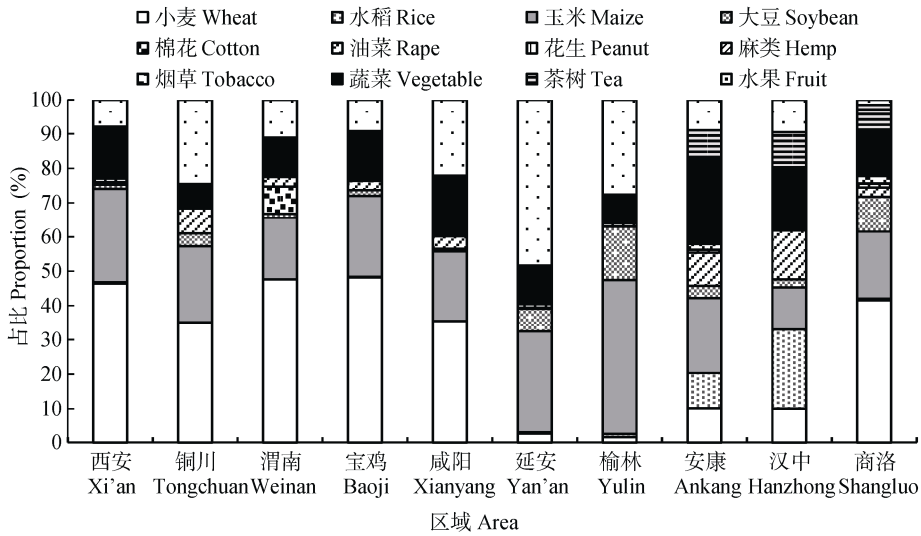

图 1　2005—2016 年陕西省各地级市种植业各种作物耗水量平均组成

Fig. 1　Average proportions of water consumptions of different crops in planting industry in various cities of Shaanxi Province during 2005 to 2016

12 年间茶叶耗水量从 46.28 $m^3 \cdot kg^{-1}$ 下降到 18.52 $m^3 \cdot kg^{-1}$, 这主要是由于作为陕西省茶叶主产区的汉中、安康两市其单位面积产量分别从 199 $kg \cdot hm^{-2}$、212 $kg \cdot hm^{-2}$ 提升至 585 $kg \cdot hm^{-2}$、448 $kg \cdot hm^{-2}$。但在此期间, 不同作物的耗水量呈现较大差异性, 2005—2016 年间, 小麦、水稻、玉米、大豆、棉花、油菜、花生、麻类、烟草、蔬菜、茶和水果的作物均值耗水量分别为 2.73 $m^3 \cdot kg^{-1}$、1.76 $m^3 \cdot kg^{-1}$、1.66 $m^3 \cdot kg^{-1}$、5.35 $m^3 \cdot kg^{-1}$、8.98 $m^3 \cdot kg^{-1}$、4.47 $m^3 \cdot kg^{-1}$、1.79 $m^3 \cdot kg^{-1}$、4.04 $m^3 \cdot kg^{-1}$、2.27 $m^3 \cdot kg^{-1}$、0.42 $m^3 \cdot kg^{-1}$、30.30 $m^3 \cdot kg^{-1}$和 0.51 $m^3 \cdot kg^{-1}$, 最大值茶与最小值蔬菜差距较大。由此, 结合图 1 的各地级市种植业耗水量组成, 陕南区域水资源相对较为丰富, 降雨量多, 适宜种植耗水量较高的经济类作物茶、烟草; 陕北地区水资源相对较为匮乏, 适宜种植耗水量较低的玉米和水果类作物; 而关中地区地处平原, 水资源和降水量以及种植技术均优于陕北地区, 可大量种植耗水量中等且生活必须的粮食类作物。这与图 3 中经济作物耗水量最大, 油料作物次之, 粮食类、水果、蔬菜作物最低的理论测算结果相一致。说明从水足迹视角来看, 陕西省各地级市当前的作物种植结构相对合理。

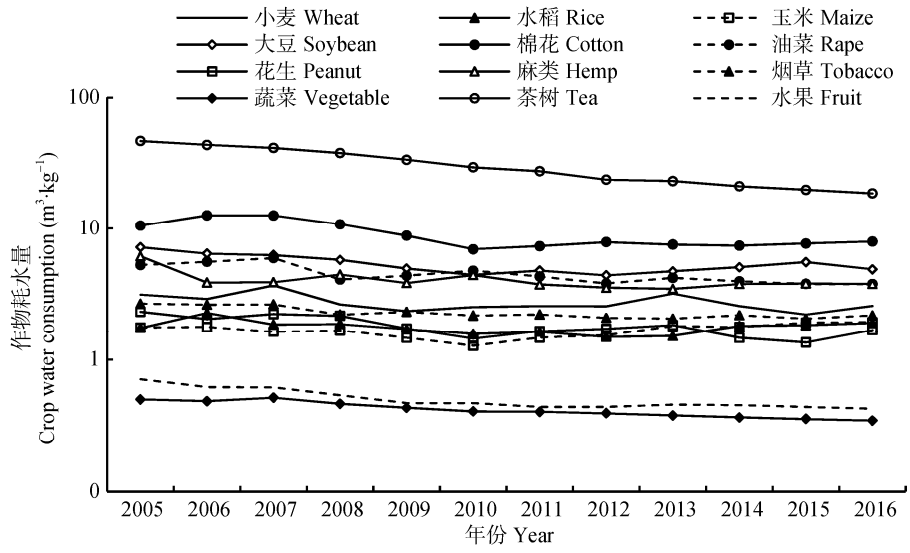

图 2　2005—2016 年陕西省作物耗水量变化趋势

Fig. 2　Trends of water consumption of different crops in Shaanxi Province during 2005 to 2016

2.1.2　种植业绿水足迹利用效率分析

作物耗水量中的绿水足迹来源于降水, 相比于灌溉用水的蓝水足迹, 拥有较低的机会成本。本文利用绿水足迹占作物耗水量的相对百分比, 衡量作物绿水足

迹的利用效率。从表 3 可以看出，同种作物的绿水足迹利用效率具有明显的空间差异性。以作物小麦为例，安康市小麦绿水足迹利用效率为 35.78%，而榆林仅为 10.80%，总体上陕南的绿水足迹利用效率高于陕北和关中。产生这种差异的原因主要是陕南水资源禀赋先天较高，降水量相对充裕，研究期内陕南年平均降水量 825.91 mm，而陕北年平均降水量仅为 485.35 mm。另一方面，不同作物生育期的不同也是造成绿水足迹利用效率差异的重要原因。以花生为例，陕西省花生的生育期在 6—9 月，这与陕西省降雨量集中时期相吻合，这也是花生的绿水足迹利用效率高于小麦、油菜的原因所在。但根据刘聪[30]的研究，陕西省主要粮食类作物小麦、玉米的绿水足迹利用效率在全国仅处于中等水平，发展潜力大。因此，更好地利用雨水以提高绿水足迹的利用效率，科学规划区域种植作物类型，才能更有效促进生态农业和节水型社会建设目标的达成。

表 3 2005—2016 年陕西省各地级市作物绿水足迹平均相对占比

Table 3 Average relative proportions of crop green water footprints in various cities in Shaanxi Province during 2005 to 2016 %

区域 Area	小麦 Wheat	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean	棉花 Cotton	油菜 Rape	花生 Peanut	麻类 Hemp	烟草 Tobacco	蔬菜 Vegetable	茶树 Tea	水果 Fruit
西安 Xi'an	15.47	20.28	33.88	33.92	28.61	20.98	24.06	—	—	47.68	—	52.24
铜川 Tongchuan	14.58	28.09	37.31	36.26	—	21.09	—	—	—	44.08	—	76.94
渭南 Weinan	17.70	28.11	42.17	48.29	39.46	24.30	27.23	61.87	100.00	53.93	—	61.39
宝鸡 Baoji	21.81	—	43.98	48.52	42.70	29.01	30.82	—	89.10	45.30	—	70.80
咸阳 Xianyang	16.09	—	35.60	36.74	29.12	21.48	26.32	47.04	62.86	43.02	—	64.02
延安 Yan'an	13.68	22.95	27.26	38.56	29.03	18.25	20.84	50.90	82.17	36.41	—	66.17
榆林 Yulin	10.80	19.05	22.10	31.43	23.35	15.94	15.22	36.04	45.93	26.21	—	42.93
安康 Ankang	35.78	43.45	62.11	52.80	44.40	40.42	59.77	84.13	100.00	65.03	57.63	44.99
汉中 Hanzhong	26.58	37.60	68.34	68.52	59.83	40.75	59.29	80.43	100.00	63.86	65.11	49.81
商洛 Shangluo	22.88	27.18	60.63	51.91	44.00	24.38	40.22	73.42	73.56	55.62	61.30	64.74

"—" 表示研究期内作物种植较少，统计时不做考虑。"—" means that the crop area is too little not to be calculated.

2.2 陕西省种植业水环境压力(灰水足迹)评价

灰水足迹在作物种植过程中虽然不会真实的消耗，但却从水量的角度反映了种植业对水资源环境的破坏量。由表 4 可知，各地级市的灰水足迹也由于种植结构的不同存在较大差异，总体上而言，粮食类作物、蔬菜、水果灰水足迹占比较大。然而，产生这种现象的原因却有不同，粮食类作物是由于播种面积较大，研究期内年平均播种面积占总面积的 70%以上；而水果。蔬菜是由于单位面积氮肥用量相对较高，分别为 442 $kg \cdot hm^{-2}$、367 $kg \cdot hm^{-2}$，是小麦 183 $kg \cdot hm^{-2}$ 的 2 倍以上。

表 4 2005—2016 年陕西省各地级市各种作物年平均灰水足迹总量

Table 4 Annual average gray water footprint of different crops in various areas of Shaanxi Province during 2005 to 2016 $\times 10^8$ $m^3 \cdot a^{-1}$

区域 Area	小麦 Wheat	水稻 Rice	玉米 Maize	大豆 Soybean	棉花 Cotton	油菜 Rape	花生 Peanut	麻类 Hemp	烟草 Tobacco	蔬菜 Vegetable	茶树 Tea	水果 Fruit
陕西 Shannxi	21.11	1.85	26.19	1.94	1.25	2.74	0.40	0.01	0.37	16.30	2.76	47.15
西安 Xi'an	3.86	0.02	4.15	0.08	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	2.18	0.00	2.10
铜川 Tongchuan	0.51	0.00	0.62	0.05	0.00	0.09	0.00	0.00	0.01	0.17	0.00	2.25
渭南 Weinan	5.46	0.00	4.54	0.13	1.16	0.26	0.13	0.00	0.01	1.94	0.00	6.66
宝鸡 Baoji	3.69	0.01	3.01	0.11	0.00	0.16	0.00	0.00	0.05	1.61	0.00	2.60
咸阳 Xianyang	4.17	0.00	3.89	0.06	0.01	0.34	0.00	0.00	0.03	2.96	0.00	11.25
延安 Yan'an	0.12	0.01	1.65	0.26	0.02	0.04	0.02	0.00	0.03	0.70	0.00	11.63
榆林 Yulin	0.07	0.04	3.08	0.67	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.70	0.00	7.80
安康 Ankang	1.12	0.47	1.89	0.14	0.00	0.65	0.07	0.00	0.12	1.97	0.86	1.18
汉中 Hanzhong	0.84	1.28	1.61	0.16	0.00	1.08	0.05	0.00	0.04	1.77	1.44	1.49
商洛 Shangluo	1.28	0.01	1.74	0.28	0.00	0.06	0.06	0.00	0.08	0.64	0.45	0.18

为进一步评价种植业对当地水环境的影响程度，本文引入水资源环境压力指数反映种植业对当地水环境的影响程度，种植业水环境压力指数为灰水足迹与当地水资源总量的比值，若值大于 1 则表明当地的水资源量已经满足不了修复种植业所产生的污染，水环境面临着较大压力。选取 2008 年、2012 年、2016 年为代表年份对水环境压力指数的变化情况进行分析，使用 GIS 10.0 将其可视化，并将其水环境压力指数分为 5 个等级：水环境压力缓解区、水环境压力轻度增强区、水环境压力中度增强区、水环境压力重度增强区、水环境压力极度增强区。从图 3 可以看出，关中是陕西省粮食作物主产区，化肥施用量较大，因此水资源环境压力强于陕北，其中咸阳市水环境压力指数 12 年间平均为 4.75，属于水环境压力极度增强区。从时间维度来看，渭南市、铜川市随着时间增长，水环境压力趋于恶化较为明显，这主要因为增加了单位面积化肥施用量较大的水果种植面积所造成的。

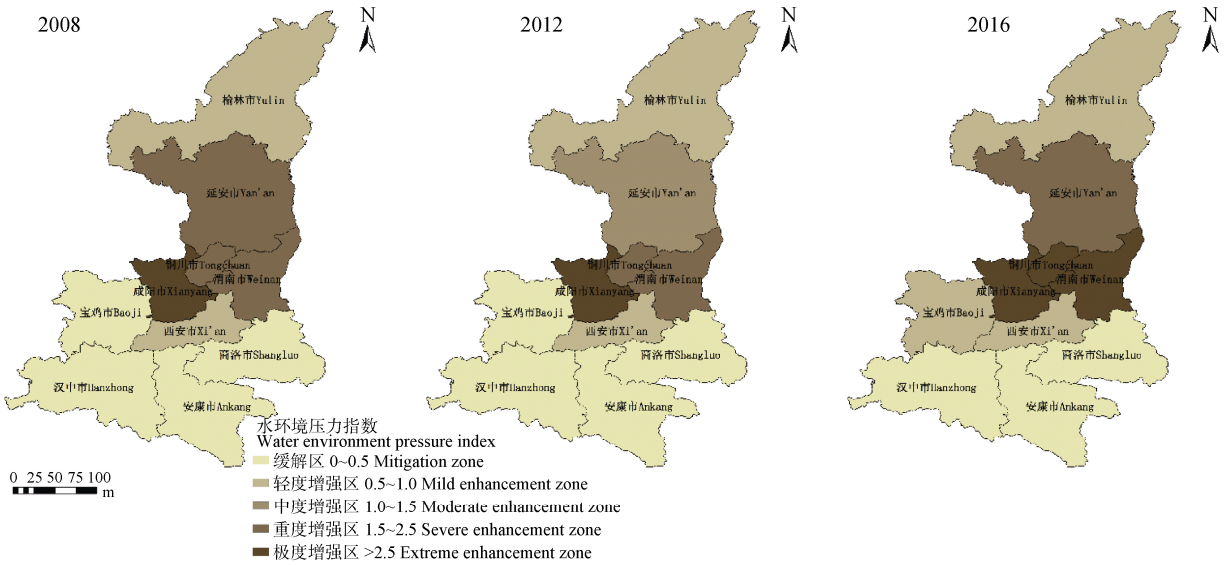

图 3　2008 年、2012 年和 2016 年陕西省水资源环境压力空间变化

Fig. 3　Spatial variation of environmental pressure on water resources in Shaanxi Province in 2008, 2012 and 2016

2.3　陕西省种植业经济增长与水资源利用脱钩评价

由表 5 可以看出，陕西省种植业总产值呈现较快增长状态，研究期内平均增速为 14.5%。因此脱钩状态只可能存在增长性负脱钩、强脱钩、弱脱钩、扩张性耦合 4 种。而水足迹总量受到整体种植技术、单位面积产量提升的影响增幅为 0.80%，因此陕西省种植业与水资源真实占用量之间的脱钩关系也呈现弱脱钩、强脱钩的互相交替状态，且弱脱钩主要集中在 2012 年以前。这是因为陕西省自 2013 年 9 月开始实施《陕西省实行最严格水资源管理制度考核办法》以来，2013—2016 年种植业水足迹呈现持续下降状态，且与经济发展的脱钩状态呈现以强脱钩为主的优质协调。但从经济增长与对水资源环境造成的压力方面来看，初级协调占总评价年份的 64%且在 2008 年出现了扩张性耦合的严重失调状态，一方面说明化肥农药等化学物质的施用虽然对农作物产量以及种植业经济增长有一定正面影响，但是如何合理施用适量化肥，减少对水质的影响是当前陕西省种植业迫切解决的问题；另一方面，说明在水资源利用考核中，即使在经济发展与水资源利用的整体协调的优质状况下，对种植过程中所造成的水资源压力个体不协调的状态应该加以重视和解决。

3　讨论与结论

本文将灌溉水在输配水及田间灌溉中的损失量纳入作物生产水足迹的构成要素之一，通过计算 2005—2016年陕西省10个地级行政区的种植业水足迹，定量分析了陕西省各作物耗水量的时空差异性和各市水环境压力状况，并结合脱钩模型对陕西省种植业水资源利用与经济协调发展度进行综合评价。结果表明，陕西省各作物之间水足迹差异较大，蔬菜、水果水足迹较低，分别为 0.42 $m^3 \cdot kg^{-1}$、0.51 $m^3 \cdot kg^{-1}$，而经济类作物茶叶则高达 30.29 $m^3 \cdot kg^{-1}$，各作物耗水量在时间序列上总体呈现下降趋势，经济类作物茶叶尤为明显，从 46.28 $m^3 \cdot kg^{-1}$下降到 18.52 $m^3 \cdot kg^{-1}$；同时，研究期内陕西省各地级市种植业耗水量组成呈现较大差异性，

表 5 2005—2016 年陕西省水资源利用与种植业生产总值脱钩状态

Table 5 Decoupling of water resources utilization and crop production in Shaanxi Province during 2005 to 2016

年份 Year	种植业总产值 TPO ($\times10^8$ ¥)	水足迹 WF ($\times10^8$ m^3)	灰水足迹 WF_{grey} ($\times10^8$ m^3)	Δ 总产值 ΔTPO (%)	Δ 水足迹 ΔWF (%)	水足迹脱钩指数 $DE(_{WF,TPO})$	脱钩状态 Decoupling state	Δ 灰水足迹 ΔWF_{grey} (%)	水环境脱钩指数 $DE(_{WFgrey,TPO})$	脱钩状态 Decoupling state
2005	472.90	496.71	108.04	10.68	3.14	0.29	弱 Weak	2.64	0.25	强 Strong
2006	523.42	512.31	110.89	20.24	–6.17	–0.30	强 Strong	–2.13	–0.11	强 Strong
2007	629.34	480.71	108.53	23.28	3.55	0.15	弱 Weak	4.89	0.21	弱 Weak
2008	775.85	497.77	113.84	6.15	–1.57	–0.25	强 Strong	5.28	0.86	扩张性耦合 Expansion coupling
2009	823.60	489.98	119.85	34.44	5.12	0.15	弱 Weak	11.25	0.33	弱 Weak
2010	1 107.24	515.07	133.33	22.89	–6.15	–0.27	强 Strong	–7.55	–0.33	强 Strong
2011	1 360.66	483.38	123.27	12.17	4.29	0.35	弱 Weak	1.56	0.13	弱 Weak
2012	1 526.28	504.10	125.20	12.35	7.92	0.64	弱 Weak	2.55	0.21	弱 Weak
2013	1 714.79	544.00	128.39	9.10	–4.14	–0.46	强 Strong	1.00	0.11	弱 Weak
2014	1 870.78	521.48	129.68	2.13	1.10	0.52	弱 Weak	1.12	0.53	弱 Weak
2015	1 910.71	527.22	131.13	6.12	3.26	0.53	强 Strong	1.16	0.19	强 Strong
2016	2 027.56	544.43	132.66	—	—	—	—	—	—	—

TPO: total planting output value; WF: water footprint; WF_{grey}: grey water footprint; ΔTPO: change rate of TPO; ΔWF: change rate of WF; $DE(_{WF,TPO})$: decoupling index of WF; ΔWF_{grey}: change rate of WF_{grey}; $DE(_{WFgrey,TPO})$: decoupling index of water environment.

关中地区耗水量组成以粮食类作物为主，陕北则以玉米和水果为主，而陕南地区各类作物耗水量则较为平均，各地区耗水量组成基本与其水资源禀赋、种植技术高低相一致。绿水足迹利用效率方面，同一区域不同作物的绿水足迹利用效率差异较大，以作物小麦为例，安康市小麦绿水足迹利用效率为 35.78%，而榆林仅为 10.80%，总体上陕南的绿水足迹利用效率高于陕北和关中，但与农业较发达地区相比，绿水足迹利用效率相对较低。就水环境压力而言，陕北、关中地区面临着不同程度的水环境压力，其中咸阳市水环境压力指数 12 年间平均为 4.75，属于水环境压力极度增强区。从脱钩关系评价来看，陕西省种植业经济增长与水资源利用和水环境压力强脱钩状态分别占比 45.45%和 27.27%，陕西省近 12 年来水资源与种植业经济增长之间的关系逐渐完成了由弱脱钩的初级协调到强脱钩的优质协调的转变，但仍面临着种植业经济增长与水环境压力增加的挑战。

由于对陕西省作物水足迹做详细核算的研究较少，而小麦作为重要粮食类作物，在水足迹研究中较为普遍，因此本文在表 6 中给出了本研究与其他研究对于小麦水足迹研究差异的对比。与冯东溥等[31]以及刘帝等[32]的研究相比，本文以地级市为研究尺度，为区域尺度的水资源管理提供了相应理论支持；与史利洁等[9]的研究相比，首先本研究根据陕西省作物种植实际情况，共核算了 12 类作物(本文水果实际包含作物为:苹果、柑桔、梨、葡萄、猕猴桃)的蓝水、绿水、灰水足迹，更能真实反映陕西省各地级市种植业水足迹实际情况以及种植结构的差异性；其次，本研究在种植业水足迹合算的基础上结合脱钩模型对陕西省种植业水资源利用和水环境变化与经济协调发

表 6 不同学者对陕西区域小麦水足迹研究比较

Table 6 Comparison of different scholars' researches on wheat water footprint in Shaanxi region

作者 Author	研究区域 Study area	研究期 Study period	作物水足迹组成 Water footprint composition	水足迹 Water footprint ($m^3 \cdot kg^{-1}$)	参考文献 Reference
张炜等 Zhang Wei, et al.	陕西省 Shaanxi Province	2005—2016	绿水、蓝水(灰水) Green water, blue water (grey water)	2.75 (3.21)	—
史利洁等 Shi Lijie, et al.	陕西省 Shaanxi Province	2000—2012	绿水、蓝水 Green water, blue water	1.29	[9]
刘帝等 Liu Di, et al.	陕西省关中地区 Guanzhong Region, Shaanxi Province	1998, 2005, 2010	绿水、蓝水 Green water, blue water	0.96	[31]
冯东溥等 Feng Dongpu, et al.	陕西省宝鸡峡灌区 Baoji Gorge Irrigation District, Shaanxi Province	1994—2010	绿水、蓝水(灰水) Green water, blue water (grey water)	0.68 (1.04)	[32]

括号内数据为包含灰水足迹下的作物水足迹。Values in brackets are water footprint containing grey water footprint.

展进行了综合评价; 本研究将灌溉水在输配水及田间灌溉过程中的损失纳入作物区域水足迹的核算之中, 因此小麦水足迹结果相应其他研究偏大, 但与吴普特等[16]在考虑输配水及田间灌溉过程中的损失下核算的陕西省小麦水足迹(未考虑灰水足迹)核算结果1.91~2.97区间相吻合。本研究的不足在于, 农田在实际中很难实现充分灌溉, 作物蒸散发有可能是在一定的水分胁迫下进行的, 因此真实的蒸腾散发量会偏小, 下一步的研究将考虑水胁迫下的作物水足迹核算, 进一步增加种植业水足迹核算的精确性。

根据以上研究结果, 提出以下改善陕西省种植业水资源利用以及与经济协调发展的建议: 1)根据水资源禀赋, 进一步优化当前陕西省各地级市种植结构, 提高作物单位面积产量, 对于缺水的陕北、关中地区, 通过引进先进的灌溉技术增加绿水足迹占比; 2)通过调整化肥施用结构、增施有机肥施用的宣传和指导、改良土壤等方式, 提升作物对肥料吸收利用, 减少化肥的过量施用和流失, 从而达到从源头减少灰水足迹, 降低陕西省各地级市水环境压力; 3)陕西省种植业水资源利用与经济发展不仅要做到占用量上的协调发展, 同时也要注意水环境的协调发展。因此, 当前我们应该把目光更多聚集到如何改善经济增长与水环境压力上, 从而实现种植业经济增长与水环境变化之间的长期强脱钩状态。

参考文献 References

[1] FALKENMARK M. Freshwater as shared between society and ecosystems: From divided approaches to integrated challenges[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2003, 358(1440): 2037–2049

[2] ROCKSTRÖM J. Green water security for the food makers of tomorrow: Windows of opportunity in drought-prone savannahs[J]. Water Science & Technology, 2001, 43(4): 71–78

[3] 黄万霞, 闫滨, 姬建梅. 关于国内外灰水足迹的研究综述[J]. 环境工程, 2017, 35(12): 149–153
HUANG W X, YAN B, JI J M. A review of researches on the gray water footprint[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(12): 149–153

[4] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. London: Earthscan, 2011

[5] 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

[6] 苏芮, 陈亚宁, 张燕, 等. 新疆城乡居民虚拟水消费结构及其用水效率评价[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 181–186
SU R, CHEN Y N, ZHANG Y, et al. Estimation of virtual water consumption structure and water efficiency in cities and rural areas of Xinjiang[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(1): 181–186

[7] 虞祎, 张晖, 胡浩. 农业生产与水资源承载力评价[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(7): 978–986
YU Y, ZHANG H, HU H. Agricultural production and evaluation in terms of water resources carrying capacity[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(7): 978–986

[8] 田园宏, 诸大建, 王欢明, 等. 中国主要粮食作物的水足迹值: 1978—2010[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(6): 122–128
TIAN Y H, ZHU D J, WANG H M, et al. Water footprint calculation of China's main food crops: 1978–2010[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(6): 122–128

[9] 史利洁, 吴普特, 王玉宝, 等. 基于作物生产水足迹的陕西省水资源压力评价[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 650–658
SHI L J, WU P T, WANG Y B, et al. Assessment of water stress in Shaanxi Province based on crop water footprint[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 650–658

[10] 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
LIU L, DENG O P, DENG L J, 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, 24(7): 1133–1141

[11] 王旭, 高翔, 曹蕾, 等. 水足迹视角下的宁夏中卫市农业水资源利用评价[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2015, 51(5): 619–624
WANG X, GAO X, CAO L, et al. Evaluation of agricultural water resource utilization from the water footprint perspective in Zhongwei City, Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2015, 51(5): 619–624

[12] 李宁, 张建清, 王磊. 基于水足迹法的长江中游城市群水资源利用与经济协调发展脱钩分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 202–208
LI N, ZHANG J Q, WANG L. Decoupling and water footprint analysis of the coordinated development between water utilization and the economy in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(11): 202–208

[13] GROLL M, OPP C, KULMATOV R, et al. Water quality, potential conflicts and solutions-an upstream-downstream analysis of the transnational Zarafshan River (Tajikistan, Uzbekistan)[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(2): 743–763

[14] PERRY C. Water footprints: Path to enlightenment, or false trail?[J]. Agricultural Water Management, 2014, 134: 119–125

[15] 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, 47(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, 47(9): 1115–1124

[16] 吴普特, 孙世坤, 王玉宝, 等. 作物生产水足迹量化方法与评价研究[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 651–660
WU P T, SUN S K, WANG Y B, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 651–660

[17] 郭元裕. 农田水利学[M]. 第 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1997
GUO Y Y. Irrigation and Drainage Engineering[M]. 3rd ed. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1997

[18] 付永虎, 刘黎明, 起晓星, 等. 基于灰水足迹的洞庭湖区粮食生产环境效应评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 152–160
FU Y H, LIU L M, QI X X, et al. Environmental effects evaluation for grain production based on grey water footprint in Dongting Lake area[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 152–160

[19] 高凡, 李玉中, 郭家选, 等. 农产品水足迹评价研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 1071–1080
GAO F, LI Y Z, GUO J X, et al. A review of water footprint assessment for agricultural products[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(7): 1071–1080

[20] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives[J]. Ecological Economics, 2011, 70(4): 749–758

[21] 王小英, 陈占飞, 胡凡, 等. 陕西省农田化肥投入过量与不足的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 159–165
WANG X Y, CHEN Z F, HU F, et al. Study on the excessive and insufficient of chemical fertilizer inputs on farmland in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(6): 159–165

[22] 赵佐平, 闫莎, 刘芬, 等. 陕西果园主要分布区氮素投入特点及氮负荷风险分析[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5642–5649
ZHAO Z P, YAN S, LIU F, et al. Analysis of nitrogen inputs and soil nitrogen loading in different kinds of orchards in Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5642–5649

[23] 刘侯俊, 巨晓棠, 同延安, 等. 陕西省主要果树的施肥现状及存在问题[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 38–44
LIU H J, JU X T, TONG Y A, et al. The status and problems of fertilization of main fruit trees in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(1): 38–44

[24] 杨帆, 孟远夺, 姜义, 等. 2013 年我国种植业化肥施用状况分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 217–225
YANG F, MENG Y D, JIANG Y, et al. Chemical fertilizer application and supply in crop farming in China in 2013[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 217–225

[25] 马立锋, 苏孔武, 黎金兰, 等. 控释氮肥对茶叶产量、品质和氮素利用效率及经济效益的影响[J]. 茶叶科学, 2015, 35(4): 354–362
MA L F, SU K W, LI J L, et al. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer on tea yield, quality, nitrogen use efficiency and economic benefit[J]. Journal of Tea Science, 2015, 35(4): 354–362

[26] 邱强, 方鑫, 左翔. 城市化对碳排放非线性脱钩效应的研究——基于 Tapio 脱钩模型的估计[J]. 现代经济探讨, 2017, (5): 76–82
QIU Q, FANG X, ZUO X. Study on the nonlinear decoupling effect of urbanization on carbon emission — Based on the estimation of Tapio decoupling model[J]. Modern Economic Research, 2017, (5): 76–82

[27] 杨振华, 苏维词, 赵卫权. 岩溶地区水资源与经济发展脱钩分析[J]. 经济地理, 2016, 36(10): 159–165
YANG Z H, SU W C, ZHAO W Q. Decoupling analysis of urban water resources and economic development based on water ecological footprint[J]. Economic Geography, 2016, 36(10): 159–165

[28] 周银香. 交通碳排放与行业经济增长脱钩及耦合关系研究——基于 Tapio 脱钩模型和协整理论[J]. 经济问题探索, 2016, (6): 41–48
ZHOU Y X. Study on the decoupling and coupling relationship between transportation carbon emissions and industry economic growth — Based on Tapio decoupling model and cointegration theory[J]. Inquiry into Economic Issues, 2016, (6): 41–48

[29] TAPIO P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137–151

[30] 刘聪. 中国粮食生产的水资源利用特征评价[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2017, (4): 22–29
LIU C. Evaluation on utilization of water resources of food production in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition, 2017, (4): 22–29

[31] 冯东溥, 魏晓妹, 降亚楠. 宝鸡峡灌区小麦水足迹时空变化特征与归因分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 269–277
FENG D P, WEI X M, JIANG Y N. Temporal and spatial variation characteristics and attribution analysis of wheat water footprint in Baojixia Irrigation Area, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 269–277

[32] 刘帝, 操信春, 王玉宝. 基于田间实际耗水的作物生产水足迹[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(8): 719–724
LIU D, CAO X C, WANG Y B. Water footprint of grain production based on crop water consumption[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(8): 719–724