

# 黄河上中游水资源与粮食安全耦合关系特征分析 ——以陕甘宁青为例

刘 显<sup>1,3\*</sup>, 徐悦悦<sup>2</sup>, 孙从建<sup>1</sup>, 陈 伟<sup>1</sup>, 李 皎<sup>1</sup>, 张齐飞<sup>1</sup>

1. 山西师范大学 地理科学学院, 太原 030031

2. 山西农业大学 山西有机旱作农业研究院, 太原 030031

3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 杨凌 712100

**摘 要:** 探明陕甘宁青地区水资源与粮食安全的耦合特征, 不仅有助于促进区域水资源及粮食生产的可持续发展, 且对于经济社会发展具有重要意义。本文应用水资源负载指数及水足迹方法, 通过分析区域水资源自然属性以及配置、粮食消费对水资源的需求等维度, 系统分析了该区域水资源与粮食安全的耦合特征。结果表明: (1) 2000—2016年, 区域水资源总量呈不显著的增加趋势, 水资源负载指数由3.9增加到13.1, 相应的负载等级由Ⅱ级上升到Ⅲ级, 说明不具备进一步开发的潜力; (2) 农业生产的水资源被挤占, 农业用水比例由78.6% (2004年) 减小到76.1% (2016年), 而区域粮食安全对水资源的需求数量在提高; (3) 区域居民膳食结构由口粮性向动物性产品转变, 进一步加剧了区域粮食和水资源的负担; 区域粮食消费水足迹由2000年的79.7 Gm<sup>3</sup>增长到2016年100.1 Gm<sup>3</sup>。依据研究结果从区域种植结构优化潜力、节水灌溉技术和虚拟水贸易的层面提出提高区域蓝水、绿水利用效率, 减少灰水数量的措施以便更好地缓解区域水资源压力, 促进粮食生产和水资源利用的可持续发展。

**关键词:** 水资源; 粮食安全; 水足迹; 耦合特性; 人口增长

## Analysis of the coupling characteristics between water resources and food security in the upper and middle reaches of the Yellow River: a case study of Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region, Northwest China

LIU Xian<sup>1,3\*</sup>, XU Yueyue<sup>2</sup>, SUN Congjian<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, LI Jiao<sup>1</sup>, ZHANG Qifei<sup>1</sup>

1. School of Geography Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China

2. Shanxi Institute of Organic Dryland Farming, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

收稿日期: 2021-11-26; 录用日期: 2021-12-16; 网络出版: 2022-01-18

Received Date: 2021-11-26; Accepted Date: 2021-12-16; Online first: 2022-01-18

基金项目: 山西省基础研究计划 (202103021223261); 山西师范大学博士科研启动项目 (0505/02070541); 2021年度山西省研究生教育教学改革研究课题 (2021YJJG133)

Foundation Item: Fundamental Research Program of Shanxi Province (202103021223261); Doctoral Scientific Research Foundation of Shanxi Normal University (0505/02070541); Graduate Education Reform Project of Shanxi Province in 2021 (2021YJJG133)

通信作者: 刘 显, E-mail: lxian0123@163.com

Corresponding Author: LIU Xian, E-mail: lxian0123@163.com

引用格式: 刘 显, 徐悦悦, 孙从建, 等. 2022. 黄河上中游水资源与粮食安全耦合关系特征分析——以陕甘宁青为例 [J]. 地球环境学报, 13(4): 369–379.

Citation: Liu X, Xu Y Y, Sun C J, et al. 2022. Analysis of the coupling characteristics between water resources and food security in the upper and middle reaches of the Yellow River: a case study of Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region, Northwest China [J]. *Journal of Earth Environment*, 13(4): 369–379.

**Abstract: Background, aim, and scope** Sustainable utilization of water resources is an important factor in ensuring food security. Understanding the coupling characteristics of water resources and food security in the Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region is not only beneficial for the promotion of sustainable development of regional water resources and food production, but also has significant implications in economic and social development. The present study, conducted in the Shaanxi, Gansu, Ningxia, and Qinghai regions of the People's Republic of China. **Materials and methods** Systematically defined the coupling characteristics of regional water resources and food security by utilizing the water resource load index and water footprint method to analyze natural properties of regional water resources and their allocation, food consumption, and demand for water resources. **Results** Firstly, the results showed that, from 2000 to 2016, there was an insignificant increase in total regional water resources, with the water resource load index increasing from 3.9 to 13.1 and the corresponding load level rising from level I to level II, with no potential for further development. Secondly, the water resources were utilized in agricultural production, with the proportion of agricultural water consumption decreasing from 78.6% in 2004 to 76.1% in 2016, and the water resource demand for regional food security increasing. Finally, the results demonstrated that the dietary transition of the regional population from grain-based to animal-based diet further intensified the burden on regional food production and water resources. The water footprint of regional grain consumption increased from 79.7 Gm<sup>3</sup> in 2000 to 100.1 Gm<sup>3</sup> in 2016. **Discussion** The Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region has been subjected to intense water resource pressures and has no potential for further development. Agricultural water resources have been exploited and the sustainability of regional water resources and food security has been gravely threatened. Changes in dietary patterns and population growth increased the need for regional food security and water resources. The gradual shift in the dietary patterns of residents from grains to animal products has intensified the demand for water resources to provide regional food security. Owing to population growth, the water footprint of food consumption in the region is projected to increase by 5.0% by 2045. **Conclusions** The sustainable development of water resource utilization and food production in the Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region is facing significant challenges and must be prioritized; relevant departments need to take immediate and effective actions. **Recommendations and perspectives** Based on these results, we took into consideration optimization potential of regional planting structure, water-saving irrigation technology, and virtual water trade and proposed measures to improve the utilization efficiency of regional blue and green water and minimize the amount of grey water in an attempt to alleviate the pressures on regional water resources and promote sustainable development of food production and water resource utilization.

**Key words:** water resources; food security; water footprint; coupling characteristics; population growth

粮食安全关乎社会稳定和经济健康发展, 实现粮食安全不仅有助于社会稳定和经济的可持续发展, 也有益于全球粮食安全。我国作为世界上人口最多的国家, 对粮食消费需求巨大 (Liu et al, 2021), 粮食安全问题历来是政府决策者关注的重要问题 (Zhang et al, 2010)。我国长期以来通过增加化肥、农药、灌水量等高资源投入的方式进行农业生产, 促使人均粮食产量由 1949 年的 209.0 kg 增加到 2019 年的 470.8 kg, 已达到 FAO 规定的人均 400 kg 的粮食安全标准 (Liu et al, 2020)。但这种通过高资源投入为代价换来的粮食安全, 具有不可持续性, 带来的深层次问

题已经严重影响我国经济社会的高质量发展。水资源作为保障粮食产量的关键因素, 其是否可持续利用是实现区域粮食安全和粮食生产可持续发展的基本前提。虽然我国水资源总量丰富, 但由于庞大的人口基础, 导致人均水资源仅为全球均值的四分之一, 位列十三个贫水国 (王西琴等, 2016)。在气候变化背景下, 日益显著的水资源时空异质性、高耗水的农业活动进一步加剧了区域水资源的供需矛盾 (王浩等, 2013)。随着气候变化的加剧, 我国耕地逐渐北扩, 进一步加剧了北方地区水资源的供需矛盾 (Liu et al, 2021), 从而威胁粮食安全 (Liu et al, 2019; Liu et al,

2021)。尤其是属于干旱、半干旱区的西北地区,其水资源利用是否具有可持续性保障粮食安全的重要因素。因此,探明水资源与粮食安全的耦合特性,针对性地提出促进区域水资源高效利用和粮食生产可持续发展的有效建议措施,是保障我国粮食安全的重要途径。

关于水资源和粮食安全耦合特性的研究一直受到国内外广大学者的关注。其中一部分学者重点关注了滴灌(Qin et al, 2016; 要家威等, 2021)、喷灌(Amare, 2020)、微灌(Li et al, 2018)、分根交替灌溉(Kang et al, 2017)、调亏灌溉(Du et al, 2015)和覆膜灌溉(Xu et al, 2020)等节水灌溉技术条件下水资源与粮食生产的耦合特性。这些节水技术的推广有助于从作物用水的角度来减少粮食生产对水资源的需求数量。与此同时,通过利用精准农业和雨水智能农业技术来大力发展旱作农业(Leal Filho and de Trincheria Gomez, 2018),可有效提高作物对降水的利用效率,进而减少对灌溉水的需求数量,达到缓解区域水资源压力的目的。除此之外,部分学者关注了粮食需求对水资源的耦合特性,例如:气候变化与膳食结构的转变(Damerau et al, 2019; Duan et al, 2019; 江文曲等, 2021; 辛良杰, 2021)和食物浪费(Jalava et al, 2016)。这些因素增加了区域粮食安全对食物及水资源的需求数量。综上所述,目前关于水资源与粮食生产耦合特性的研究主要集中在“用水”或“需水”单一方面,在区域水资源自然属性、水资源配置以及需求数量等多个层面进行系统的耦合评价还有待加强。

因此,本文以水资源利用和粮食生产矛盾较为突出的黄河中上游的陕西、甘肃、宁夏和青海作为研究区域,通过系统分析区域水资源时空分布特征、水资源压力指数、用水结构特征、膳食结构转变及人口增长对粮食消费水足迹需求数量的影响,分析区域水资源和粮食安全的耦合特性,探索促进区域水资源利用和粮食生产可持续发展的有效途径,为区域粮食安全做出贡献。

## 1 研究区概况及数据方法

### 1.1 研究区域概况

陕甘宁青地区(89°40'—111°24'E, 31°60'—42°79'N)位于黄河中上游(图1),属于干旱、

半干旱及生态环境较为脆弱的地区(Liu et al, 2019),包含陕西省、甘肃省、宁夏回族自治区和青海省。该区域海拔范围为460—3600 m,土地资源丰富(约占全国的14.8%,包括盆地、高原、山地、平原等地貌类型)(孙梦华等, 2021),但水资源极度匮乏,2019年其水资源总量仅占全国的6.0%。其降雨量和蒸散发分别呈现出东多西少和西多东少的特点,2000—2019年平均值分别为432 mm和1005 mm。虽然该区域水资源匮乏,但土地资源、日照充足,具有较为丰富的太阳能资源,适宜农业发展。

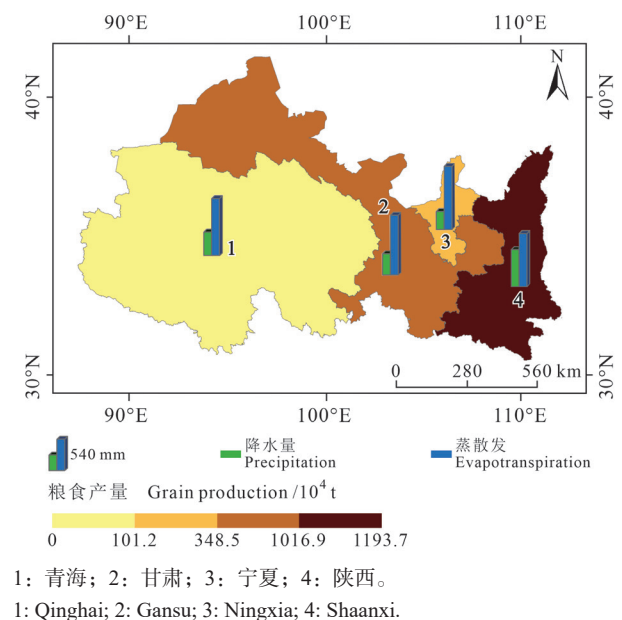


图1 研究区域概况  
Fig. 1 Overview of the region

### 1.2 数据来源

本研究涉及到的数据主要包括2000—2016年陕甘宁青地区的气象数据、农业数据、人口数据和消费数据。气象数据来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)(CMD C 2000—2016)。农业数据主要包括:粮食产量、播种面积、灌溉面积、灌溉用水量、水资源总量、农业用水、工业用水、生态用水、生活用水等,取自2001—2017年的全国及各省份水资源公报(<http://www.mwr.gov.cn/>)、全国及各省份统计年鉴(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>)、《中国农村统计年鉴》(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/>)、《中国环境统计年鉴》(<https://kns.cnki.net/kns8?dbcode=CYFD/>)和《中国农业年鉴》(<https://kns.cnki.net/kns8?>

dbcode=CYFD/)。人口数据取自 2001—2017 年各省份的统计年鉴。消费数据主要包括：口粮、牛肉、猪肉、鸡肉、蛋类、奶类和水产品的消费数量，主要取自 2001—2017 年各省份及全国统计年鉴 (<http://www.stats.gov.cn/tjsj/>) 以及《中国农村统计年鉴》(<https://kns.cnki.net/kns8?dbcode=CYFD/>)。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 水资源负载指数

水资源负载指数将区域水资源的自然和社会属性进行了充分考量，可科学表征区域水资源开发利用程度及其开发潜力（夏帆等，2020）：

$$C = K \times \sqrt{P \times G} \div W \quad (1)$$

式中： $C$  为区域水资源负载指数； $P$  为区域人口

数量（单位为万人）； $G$  为区域 GDP（单位为亿元）； $W$  为区域水资源总量（单位为亿  $m^3$ ）； $K$  为区域降水系数。

$K$  是与区域全年降水量（ $R$ ，单位为 mm）相关的系数，不同年份不同的降水量决定了不同的  $K$  值，其确定方法如下：

$$K = \begin{cases} 1.0, & R \leq 200 \text{ mm} \\ 1.0 - 0.1 \times \frac{R - 200}{200}, & 200 < R \leq 400 \text{ mm} \\ 0.9 - 0.2 \times \frac{R - 400}{400}, & 400 < R \leq 800 \text{ mm} \\ 0.7 - 0.2 \times \frac{R - 800}{800}, & 800 < R \leq 1600 \text{ mm} \\ 0.5, & R > 1600 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

进一步将水资源负载指数划分为五个等级，如表 1 所示。

表 1 水资源负载指数分级评价标准  
Tab. 1 Classification and evaluation criteria of water resources load index

| 等级<br>Level | $C$       | 水资源利用程度<br>Water resources utilization degree | 水资源开发潜力<br>Water resources development potential |
|-------------|-----------|---|--|
|             | $\geq 10$ | 很高 Very high                                  | 潜力很小 Very small potential                        |
|             | $[5, 10)$ | 高 High  | 潜力较小 Small potential                             |
|             | $[2, 5)$  | 中等 Medium                                     | 潜力中等 Medium potential                            |
|             | $[1, 2)$  | 较低 Low  | 潜力大 Big potential                                |
|             | $[0, 1)$  | 低 Rather low                                  | 潜力很大 Great potential                             |

#### 1.3.2 粮食生产水足迹量化方法

$$WF_{\text{prod}}^i = (BMF_i + GWF_i + G'WF_i) \div G_i \quad (3)$$

式中： $WF_{\text{prod}}^i$  为  $i$  区域的粮食生产水足迹（单位为  $m^3 \cdot kg^{-1}$ ）； $BMF_i$  为  $i$  区域粮食生产过程中蓝水足迹（即灌溉水消耗量，单位为  $m^3$ ）； $GWF_i$  为  $i$  区域粮食生产过程中绿水足迹（即降水消耗量，单位为  $m^3$ ）。 $G'WF_i$  是第  $i$  省级行政区粮食生产过程中灰水足迹（即稀释农业生产过程污染物所需要的水资源量，单位为  $m^3$ ）。 $G_i$  为  $i$  区域粮食产量（单位为 kg）。

$$GWF_i = \sum_{c=1}^n (W_g^c \times A_G^c) \quad (4)$$

式中： $W_g^c$  是粮食作物  $c$  生育期的绿水消耗量（单位为  $m^3$ ）（Luan et al, 2018）。 $A_G^c$  为作物  $c$  的种植面积（单位为  $hm^2$ ）； $n$  为所有粮食作物种类的总和，本研究取稻谷、小麦、玉米、豆类和薯类。

$$W_g^c = 10 \times \min(ET_c^c, P_c^c) \quad (5)$$

式中： $P_c^c$  是粮食作物  $c$  生育期的有效降水量

（单位为 mm）。 $ET_c^c$  是作物  $c$  生育期实际的蒸散量（单位为 mm）；乘以 10 是为了将水深（单位为 mm）转换为单位地表的水量（单位为  $m^3 \cdot hm^{-2}$ ）。

$$ET_c^c = K_c \times ET_0 \quad (6)$$

式中： $K_c$  为作物  $c$  的系数； $ET_0$  为参考作物蒸发蒸腾量（单位为  $mm \cdot d^{-1}$ ）。

$$ET_0 = [0.408 \times \Delta (R_n - G) + \gamma \times 900 \div (T + 273) \times \mu_2 \times (e_s - e_a)] \div [\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times \mu_2)] \quad (7)$$

式中： $\Delta$  为饱和水汽压与温度曲线斜率（单位为  $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ ）； $R_n$  为参考作物冠层表面净辐射（单位为  $MJ \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ ）； $G$  为土壤热通量（单位为  $MJ \cdot (m^2 \cdot d)^{-1}$ ）； $\gamma$  为干湿表系数（单位为  $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ ）； $T$  为 2 m 处的日平均气温（单位为  $^\circ C$ ）； $\mu_2$  为 2 m 处风速（单位为  $m \cdot s^{-1}$ ）； $e_s$  为饱和水汽压（单位为 kPa）； $e_a$  为实际水汽压（单位为 kPa）。

将各区域、相同时段内各站点日降水量的平

均值作为该省份该时段的逐日降水量值。采用美国农业部推荐的方法来计算粮食作物生育期的有效降水量 (Döll and Siebert, 2002):

$$P_c^c = \begin{cases} \frac{P \times (4.17 - 0.2 \times P)}{4.17}, & P < 8.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \\ 4.17 + 0.1 \times P, & P \geq 8.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $P$  为降水量 (单位为 mm)。

$$\text{BWF}_i = \sum_{c=1}^n (I_G^c \times A_G^c) \quad (9)$$

式中:  $I_G^c$  为粮食作物  $c$  的单位面积灌溉用水量 (单位为  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $A_G^c$  为粮食作物  $c$  的播种面积 (单位为  $\text{hm}^2$ )。

$$I_G^c = \text{WU}_A \times R_G^c \div A_G^c \quad (10)$$

式中:  $R_G^c$  为区域农作物灌水量占总灌溉水量的比值 (Sun et al, 2019);  $\text{WU}_A$  为区域灌溉总用水量 (单位为  $\text{m}^3$ )。

$$R_G^c = (\text{ET}_c^c - P_c^c) \times A_G^c \div \sum_{c=1}^n [(\text{ET}_c^c - P_c^c) \times A_G^c] \quad (11)$$

$$G'WF_i = \alpha \times \text{AR} \div (c_{\max} - c_{\text{nat}}) \quad (12)$$

式中:  $\text{AR}$  为每公顷氮肥折纯施用量 (单位为  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ );  $\alpha$  为淋溶率, 一般取 10% (Sun et al, 2019);  $c_{\max}$  为最大容许浓度, 取  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $c_{\text{nat}}$  为污染物的自然本底浓度 (单位为  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。

### 1.3.3 食物消费水足迹

$$\text{WF}_{\text{cons}_p} = c_p \times \rho_p \times \text{WF}_{\text{prod}}^G \quad (13)$$

式中:  $\text{WF}_{\text{cons}_p}$  为食物  $p$  的人均消费水足迹 (单位为  $\text{m}^3$ );  $\text{WF}_{\text{prod}}^G$  为研究区域的作物生产水足迹 (单位为  $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )。  $c_p$  为食物  $p$  的人均消费量 (单位为  $\text{kg}$ );  $\rho_p$  为食物  $p$  折算成原粮系数 ( $p$  为口粮、牛肉、猪肉、羊肉、禽类、蛋类和奶类) (单位为  $\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$ ); 由于农村和城镇居民对于口粮的消费统计分别以原粮和商品粮进行, 故分别以 1.0 和 1.25 作为系数, 将农村和城镇居民的口粮消费统一折算为原粮; 牛肉、猪肉、羊肉、禽类、蛋类、奶类和水产品折算系数分别为: 7.0、3.5、3.0、2.1、2.5、2.1 和 2.0 (Li et al, 2014; Liu et al, 2019)。

## 2 结果与分析

### 2.1 陕甘宁青地区水资源禀赋差异

#### 2.1.1 水资源时空分布特征

陕甘宁青地区水资源时空分布差异显著。通

过对 2000—2016 年陕甘宁青地区水资源与时间的 M-K 趋势分析, 可知其水资源随时间推移呈不显著的增加趋势, 年均增幅为 2.0%, 可见该区域水资源基本维持在较为稳定的状态 (图 2)。从空间角度而言, 青海水资源较为丰富, 多年均值为  $686.1 \text{ 亿 m}^3$ , 比陕甘宁青地区均值高 109.6%。宁夏水资源最为匮乏, 其多年水资源量较陕甘宁青地区均值低 97.0%。对于干旱的陕甘宁青地区而言, 水资源丰富与否, 直接决定着该区域可用于粮食生产的水资源数量及其是否具有进一步增加潜力, 关乎区域粮食安全及粮食生产的可持续发展。

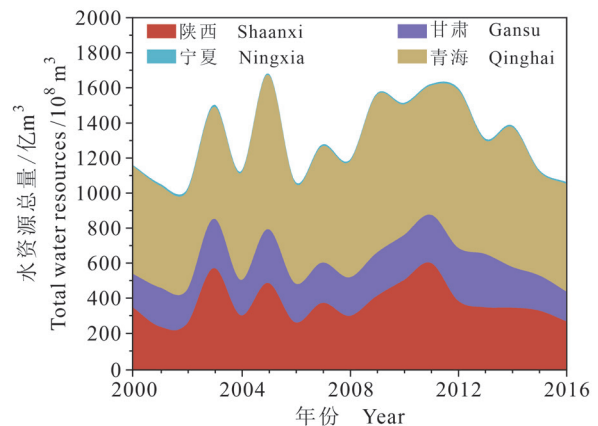


图2 2000—2016年陕甘宁青地区水资源总量动态变化  
Fig. 2 Dynamic changes in water resources in Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region during 2000—2016

#### 2.1.2 水资源开发潜力分析

2000—2016年陕甘宁青地区水资源开发潜力在逐年减小。2000—2016年陕甘宁青地区水资源负载指数随时间推移呈显著增加的趋势 ( $P < 0.05$ ), 年均增幅为 11.2% (图 3)。其水资源负载等级由 2000 年的 III 级提升到 2016 年的 I 级, 这也说明其已处于高水资源压力水平, 已不具备进一步开发的可能性 (图 3a)。其中尤为严峻的是宁夏地区, 其水资源负载指数呈显著增加趋势 ( $P < 0.05$ ), 由 2000 年的 57.3 增加到 2016 年的 137.2, 增加了 139.4% (图 3b)。在水资源量保持常年稳定的基础上, 水资源负载指数的显著增加, 预示着区域水资源的不可持续性。这也表征了该区域已无法通过进一步开采水资源来满足农业部门对水资源的需求, 威胁了区域粮食安全和粮食生产的可持续发展。

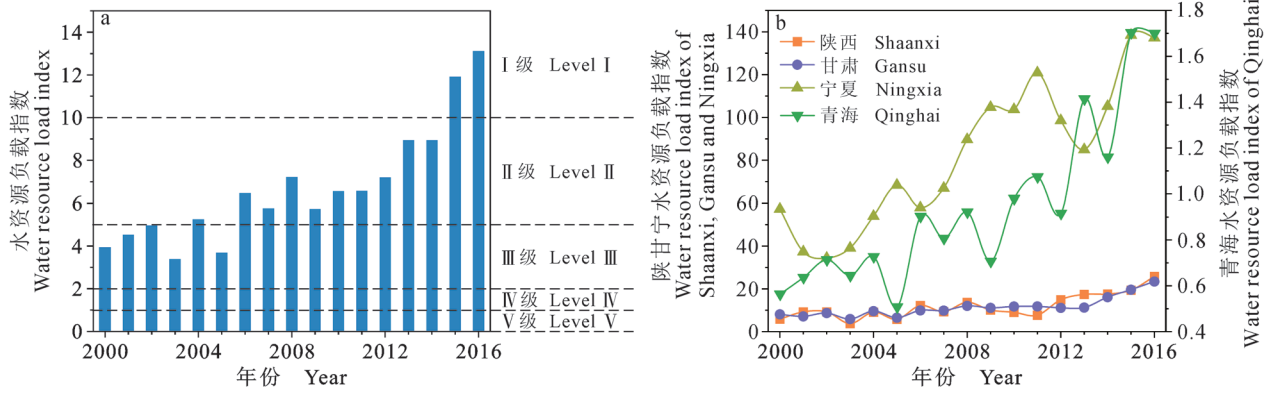


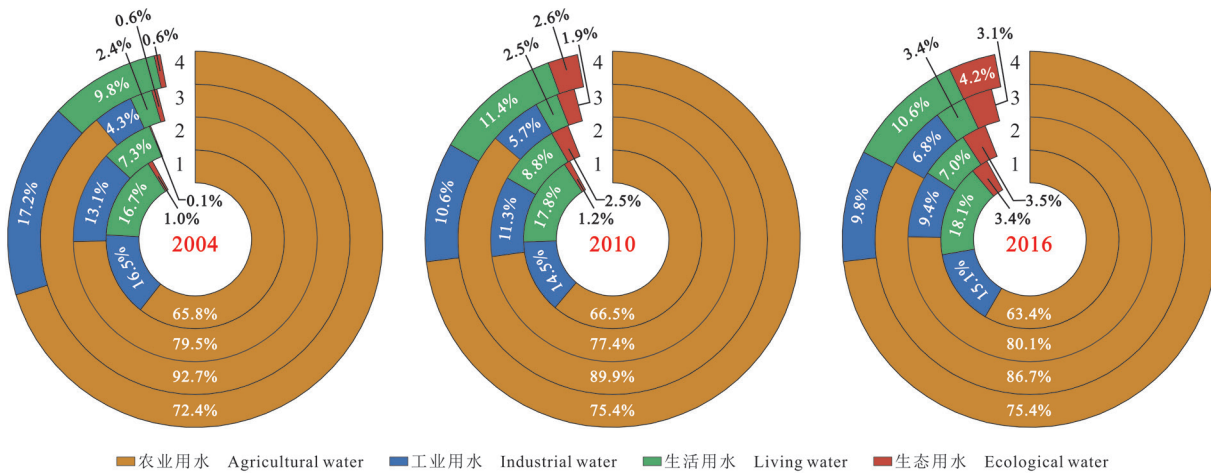
图 3 2000—2016 年陕甘宁青地区水资源负载指数动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of water resources load index in Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region during 2000—2016

2.1.3 用水结构时空特征

陕甘宁青地区农业用水量的比重在减小。随着时间推移, 陕甘宁青地区的农业用水比重由 2004 年的 78.6% 减小到 2016 年的 76.1%, 年均减幅为 0.3% (图 4)。其中农业用水减幅最显著的是宁夏地区 ( $P < 0.01$ ), 2004—2016 年其农业用水比重减少了 6.4%, 年均减幅达到 0.5%。值得注意的是水资源压力较小的青海地区, 在研究期间其农业用水比重增加了 4.1%。这在一定程度上说明区域各水资源压力较大省份的农业用水占比的减小是被动产生的。与农业用水占比的变化趋势相反, 区域生活和生态用水占总用水量的比重随时间呈逐

年增加的趋势, 尤其是生态用水。2004—2016 年陕甘宁青地区的生态用水比重呈极显著增加趋势 ( $P < 0.01$ ), 年均增幅达到 23.6%。从空间角度而言, 2004—2016 年陕甘宁青地区的农业用水比重最大, 多年均值为 77.3%; 生态用水最小, 为 2.0%。水资源压力最大的宁夏, 其农业用水比重多年均值为 89.7%。农业用水比重最小的为陕西省, 其值为 65.8%。通过此结果及国家对黄河流域生态安全的逐渐重视可以预判, 未来区域的生态用水将进一步增加, 在水资源不具备进一步开发潜力的基础上, 必将挤占农业用水, 这势必对区域农业生产的可持续发展和粮食安全带来新的挑战。



1: 陕西; 2: 甘肃; 3: 宁夏; 4: 青海。1: Shaanxi; 2: Gansu; 3: Ningxia; 4: Qinghai.

图 4 陕甘宁青地区各部门用水结构特征

Fig. 4 Water use structure characteristics of different departments in Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region

## 2.2 陕甘宁青地区水资源与粮食安全的相互关系

### 2.2.1 膳食结构对水资源需求的影响

随着收入水平的提高,居民的膳食结构在发生变化,膳食结构的改变决定着区域粮食安全对水资源的需求量。2000—2016年,陕甘宁青地区人均口粮消费水足迹年均减幅达到4.4%(图5)。肉类、水产品、蛋类和奶类的人均消费水足迹分别以年均2.4%、3.0%、-0.7%和10.8%的幅度变化。尤其是奶类,2016年较2000年增长了311.2%。表明居民对口粮的消费需求在减少,而对动物性产品的消费需求在增加。不同的食物在提供同样热量的基础上,所需要的水足迹不同,其中口粮最少,奶类最大(Liu et al, 2019)。可见由于居民膳食结构的转变,若要实现区域粮食安全,则需要提供更多的水资源来满足粮食安全。

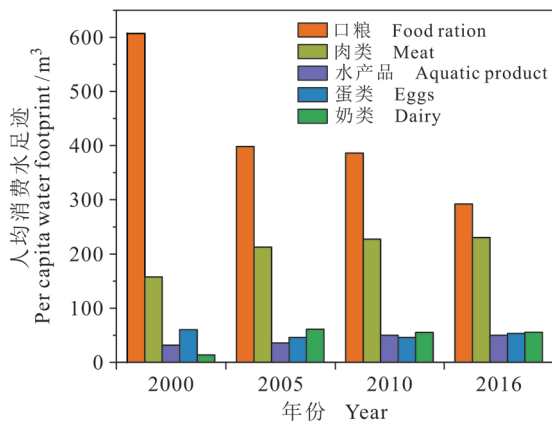
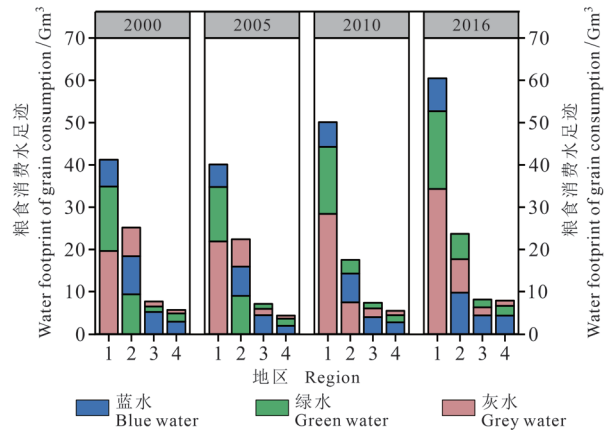


图5 不同食物消费水足迹随时间变化  
Fig. 5 Variation of water footprint of different food consumption over time

### 2.2.2 人口增长对水资源需求的影响

随着人口的增长,陕甘宁青地区的粮食消费水足迹在逐年增加。2000—2016年,在人口增长6.4%的基础上,粮食消费水足迹由 $79.7 \text{ Gm}^3$ (蓝水、绿水和灰水分别占29.4%、35.0%和35.6%)增长到 $100.1 \text{ Gm}^3$ (蓝水、绿水和灰水分别占26.2%、28.5%和45.3%),增长了25.6%(图6)。从空间差异来看,研究期间陕西粮食消费水足迹增幅最大,为46.6%;其次为青海(39.3%)。值得注意的是,甘肃在人口增长3.8%的基础上,粮食消费水足迹减少了5.9%,主要归因于甘肃水分利用效率的提高,研究期间其粮食生产水足迹减少了26.5%。人口的增长必然会导致区域粮食消费水足

迹的增加,进而对用于粮食生产的水资源提出了更高的要求。但随着农业生产技术的提高,降低了粮食生产水足迹,这在一定程度上减少了由于人口增长对区域水资源的需求数量,可以缓解区域水资源压力。



1: 陕西; 2: 甘肃; 3: 宁夏; 4: 青海。  
1: Shaanxi; 2: Gansu; 3: Ningxia; 4: Qinghai.

图6 陕甘宁青地区粮食消费水足迹结构及动态变化  
Fig. 6 Structure and dynamics of water footprint of grain consumption in Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region

## 3 讨论

随着我国经济的不平衡发展和城市化的快速推进,南方的耕地面积在大量减少,“北粮南运”的现象在加剧(Jiang et al, 2015)。这也促使具有耕地面积优势的陕甘宁青地区在保障全国粮食安全方面的地位逐步提升。我国政府高度重视黄河流域的生态环境(例如:中共中央国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》),一定程度上加剧了区域水资源的矛盾,给农业用水和区域粮食安全带来了更高的挑战。

随着未来人口的持续增长,预计陕甘宁青地区的粮食消费水足迹将进一步增加。在不考虑经济社会发展、气候变化、膳食结构转变以及城市化水平的提高等因素对未来农业生产及粮食消费需求影响的基础上,随着人口的增长,研究区未来对于粮食消费水足迹的需求将大幅增加,尤其是2045年(图7)。2045年粮食消费水足迹预计较2016年增加5.0%。在区域未来粮食消费水足迹进一步增加的基础上,其用于农业生产的水资源不具备进一步增加的潜力。从水资源供给角度而言,陕甘宁青地区的水资源总量处于稳定状态(图2),且目前已处于高水资源压力水平,水资源已不具备进一

步开发的潜力(图3)。从水资源配置角度而言,随着工业化、城市化的快速发展,以及对生态环境的高度重视,陕甘宁青地区农业水资源非农化现象严重,尤其是水资源紧缺地区(图4)。从水资源需求方面而言,随着经济和城市化的发展,居民的饮食结构在发生变化,居民更倾向于消费耗水量更大的动物性产品,这无形中增加了区域粮食安全对水资源的需求数量。此外,随着我国南北方经济差异的进一步拉大,南方地区耕地面积在进一步缩小。长期以农业生产为主,具有后备耕地资源的陕甘宁青地区在保障全国粮食安全中的地位在提升。因此,陕甘宁青地区未来的水资源和粮食安全面临着巨大的挑战。

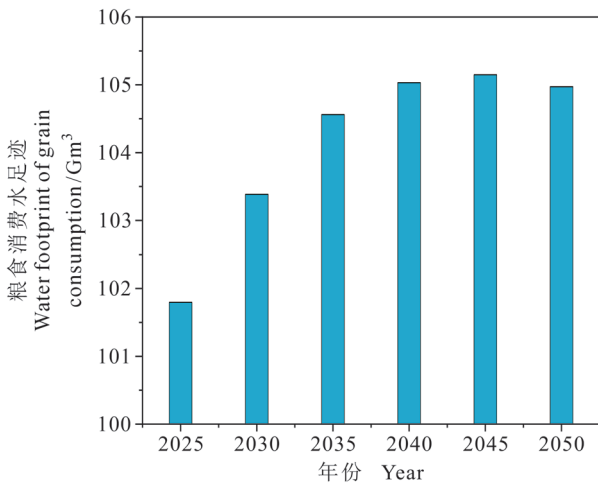
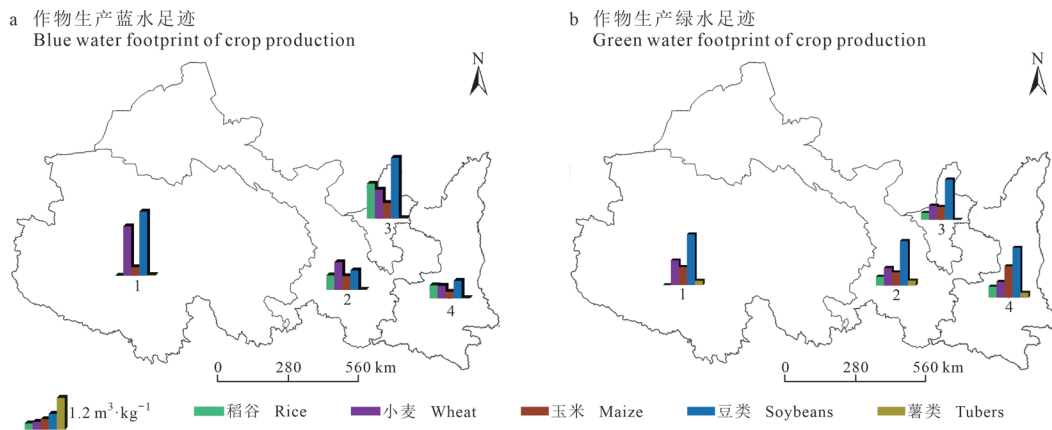


图7 2025—2050年陕甘宁青地区的粮食消费水足迹  
Fig. 7 Water footprint of grain consumption in Shaanxi-Gansu-Ningxia-Qinghai region during 2025—2050

要想实现区域水资源和粮食生产的可持续发展,必须提高区域农业对水资源的利用效率,即减少区域各粮食作物生产水足迹。如图6所示:由于甘肃粮食生产水足迹的减小幅度大于人口增加的幅度,促使其在人口持续增加的基础上,粮食消费水足迹反而呈减小趋势。因此,必须采取措施提高作物对水资源的利用效率,以减小区域生产水足迹。

(1) 优化区域作物种植结构。依据区域间各粮食作物生产水足迹的相对比较优势(同一作物在不同地区间的比较优势)和绝对比较优势(同一地区内不同作物间的比较优势)来调整区域种植结构。如图8a所示:陕西稻谷具有相对比较优势,其生产水足迹是宁夏的0.38倍。同理,对小麦而言,具有蓝水生产足迹相对比较优势的是陕西,其是不具有相对比较优势的青海的0.25倍。对玉米而言,具有相对比较优势的为陕西和青海,这两个省份的玉米生产蓝水足迹分布是区域均值的0.53倍和0.74倍。对于具有相对比较优势的作物应扩大其种植面积,相应地缩减其在不具有比较优势地区的种植面积,提高区域作物对绿水的利用效率,有助于减少作物对蓝水的需求数量。对玉米而言,具有相对比较优势的青海,其绿水生产足迹较区域均值大37.5%(图8b);对小麦而言,具有相对比较优势的陕西地区,其数值为区域均值的1.68倍。因此,扩大具有相对比较优势地区作物的种植面积,同时相应地减少不具有优势的作物比例,有助于提高区域农业水资源利用效率,减少粮食生产对蓝水足迹的需求数量,进而达到缓解区域水资源和促进粮食生产可持续发展的目的。



1: 青海; 2: 甘肃; 3: 宁夏; 4: 陕西。1: Qinghai; 2: Gansu; 3: Ningxia; 4: Shaanxi.

图8 各粮食作物生产水足迹空间分布特征

Fig. 8 Spatial distribution characteristics of water footprint of grain production



(2) 加强田间管理水平, 推广节水灌溉技术。通过对比分析陕甘宁青地区粮食生产水足迹与全国平均水平可知, 陕甘宁青地区粮食灌溉水分生产率仍小于全国均值, 其生产水足迹大于全国均值, 说明其仍具有较大的节水潜力 (Liu et al, 2020)。可通过以下措施来达到减少区域粮食作物生产水足迹的目的: 第一, 加大对农田水利基础设施的支持力度, 推广滴灌、喷灌、调亏灌溉、涌泉根灌、波涌灌等节水灌溉技术以及作物密植、覆膜方式 (李尚中等, 2017) 等种植模式在田间的应用, 从作物生理的角度来提高对蓝水资源的利用效率, 还应培育新型抗旱节水作物品种 (Du et al, 2015; 黄德良, 2019; 吴汉等, 2020), 进而最大程度地减少区域粮食生产对蓝水资源的需求数量, 缓解区域水资源压力, 促进区域水资源和粮食生产的协同发展。第二, 在保证蓝水利用效率最大化的基础上, 还应重点关注绿水资源, 加大田间沟垄集雨 (刘宏胜等, 2018; Xu et al, 2020)、雨水-智慧农业 (Oguge and Oremo, 2018)、地膜覆盖 (谢军红等, 2018)、保水剂 (武继承等, 2011)、作物轮作等技术的应用。根据区域降水特性, 适度调整作物播种时期, 使其生育期与降水相吻合, 最大化地提高区域对降水的利用效率, 进而达到缓解区域水资源压力, 实现粮食生产可持续发展的目的。第三, 根据图6可知, 区域粮食灰水足迹在粮食水足迹中占据较大比重, 采取措施减少区域灰水足迹不仅有助于间接减少区域粮食生产对水资源的需求数量, 而且有助于促进区域生态安全。在大力发展区域节水灌溉技术的基础上, 实行水肥一体化灌溉, 以及精准施肥、测土施肥等技术来提高作物对氮肥的利用效率 (白由路, 2018), 通过发展有机农业来减少作物生长对化肥的需求数量 (Muneret et al, 2018)。总之, 通过以上田间管理措施有望减少区域粮食蓝水和灰水足迹, 增加绿水足迹, 进而最终减少区域粮食生产对水资源的需求, 实现双方的和谐发展。

(3) 加强区域间的粮食贸易。区域内各粮食作物具有相对和绝对比较优势, 区域间同样如此 (图8)。因此, 应在保证区域内口粮绝对安全的基础上, 适度减少水密集型作物的种植比例, 代替以水稀疏性作物。对于短缺的水密集型作物的消费需求, 通过区域间的粮食贸易来满足。这同

样有助于在保障区域粮食安全的基础上, 缓解区域水资源压力。

## 4 结论

(1) 陕甘宁青地区已处于高水资源压力水平, 不具备进一步开发的潜力, 农业水资源被挤占现象进一步加剧, 区域水资源和粮食安全的可持续受到严重威胁。

(2) 膳食结构转变和人口增长对区域粮食安全和水资源带来了更高的要求, 居民的饮食结构逐渐由口粮向动物性产品转变, 加剧了区域粮食安全对水资源的需求数量。随着人口的增长, 预计到2045年该区域粮食消费水足迹较2016年将增加5.0%。

(3) 针对区域水资源及粮食生产不可持续现状, 提出提高蓝水、绿水利用效率, 减少灰水数量的有效建议措施, 以更好地促进区域水资源和粮食生产的可持续发展。

## 参考文献

- 白由路. 2018. 高效施肥技术研究的现状与展望 [J]. *中国农业科学*, 51(11): 2116–2125. [Bai Y L. 2018. The situation and prospect of research on efficient fertilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 51(11): 2116–2125.]
- 黄德良. 2019. 陕北丘陵沟壑区涌泉根灌苹果树调亏灌溉制度与灌水器布置方式研究 [D]. 西安: 西安理工大学. [Huang D L. 2019. Study on deficit irrigation schedule and irrigator arrangement of apple trees by bubble-root irrigation in hilly-gullied areas of northern Shaanxi [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology.]
- 江文曲, 李晓云, 刘楚杰, 等. 2021. 城乡居民膳食结构变化对中国水资源需求的影响——基于营养均衡的视角 [J]. *资源科学*, 43(8): 1662–1674. [Jiang W Q, Li X Y, Liu C J, et al. 2021. Impact of residents' diet changes on water resource demand in China: from the perspective of nutritional balance [J]. *Resources Science*, 43(8): 1662–1674.]
- 李尚中, 樊廷录, 赵刚, 等. 2017. 品种、密度与覆膜方式对旱地春玉米产量和水分利用效率的影响 [J]. *草业学报*, 26(12): 35–47. [Li S Z, Fan T L, Zhao G, et al. 2017. Effects of hybrid, plant density and plastic film mulching on yield and water use efficiency of dryland maize [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 26(12): 35–47.]
- 刘宏胜, 吴兵, 高玉红, 等. 2018. 旱区集雨种植方式对春

- 小麦产量和水分利用效率的影响 [J]. *土壤通报*, 49(4): 862–868. [Liu H S, Wu B, Gao Y H, et al. 2018. Effects of rainfall harvesting planting on grain yield and water use efficiency of spring wheat in semi-arid areas [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 49(4): 862–868.]
- 孙梦华, 牛文浩, 张蚌蚌, 等. 2021. 黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应——以陕甘宁地区为例 [J]. *应用生态学报*, 32(11): 3913–3922. [Sun M H, Niu W H, Zhang B B, et al. 2021. Spatial-temporal evolution and responses of ecosystem service value under land use change in the Yellow River Basin: a case study of Shaanxi-Gansu-Ningxia region, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32(11): 3913–3922.]
- 王浩, 杨贵羽, 杨朝晖. 2013. 水土资源约束下保障粮食安全的战略思考 [J]. *中国科学院院刊*, 28(3): 329–336, 321. [Wang H, Yang G Y, Yang Z H. 2013. Thinking of agriculture development in China based on regional water resources and land cultivation [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 28(3): 329–336, 321.]
- 王西琴, 吴若然, 李兆捷, 等. 2016. 我国农业用水安全的分区及发展对策 [J]. *中国生态农业学报*, 24(10): 1428–1434. [Wang X Q, Wu R R, Li Z J, et al. 2016. Agricultural water security zoning and developmental countermeasures in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 24(10): 1428–1434.]
- 吴汉, 柯健, 何海兵, 等. 2020. 不同间歇时间灌溉对水稻产量及水分利用效率的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 39(1): 37–44. [Wu H, Ke J, He H B, et al. 2020. Experimental study on the effects of different intermittent irrigations on yield and water use efficiency of rice [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 39(1): 37–44.]
- 武继承, 管秀娟, 杨永辉. 2011. 地面覆盖和保水剂对冬小麦生长和降水利用的影响 [J]. *应用生态学报*, 22(1): 86–92. [Wu J C, Guan X J, Yang Y H. 2011. Effects of ground cover and water-retaining agent on winter wheat growth and precipitation utilization [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(1): 86–92.]
- 夏帆, 陈莹, 窦明, 等. 2020. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用 [J]. *水资源保护*, 36(1): 52–57. [Xia F, Chen Y, Dou M, et al. 2020. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources [J]. *Water Resources Protection*, 36(1): 52–57.]
- 谢军红, 张仁陟, 李玲玲, 等. 2018. 覆膜方式对一膜两年覆盖旱地玉米籽粒产量、水分利用效率和土壤水分平衡的影响 [J]. *应用生态学报*, 29(6): 1935–1942. [Xie J H, Zhang R Z, Li L L, et al. 2018. Effects of plastic film mulching patterns on maize grain yield, water use efficiency, and soil water balance in the farming system with one film used two years [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 29(6): 1935–1942.]
- 辛良杰. 2021. 中国居民膳食结构升级、国际贸易与粮食安全 [J]. *自然资源学报*, 36(6): 1469–1480. [Xin L J. 2021. Dietary structure upgrade of China's residents, international trade and food security [J]. *Journal of Natural Resources*, 36(6): 1469–1480.]
- 要家威, 齐永青, 李怀辉, 等. 2021. 地下滴灌量与滴灌带间距对夏玉米生长发育的影响 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 29(9): 1502–1511. [Yao J W, Qi Y Q, Li H H, et al. 2021. Effects of the irrigation quota and drip irrigation pipes spacing on growth and development of summer maize with subsurface drip irrigation [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 29(9): 1502–1511.]
- Amare D G. 2020. Review on effect of different irrigation method on water use efficiency, yield productivity and nitrogen application [J]. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 10(8). DOI: 10.7176/JBAH/10-8-01.
- Damerau K, Waha K, Herrero M. 2019. The impact of nutrient-rich food choices on agricultural water-use efficiency [J]. *Nature Sustainability*, 2(3): 233–241.
- Duan W L, Chen Y N, Zou S, et al. 2019. Managing the water-climate-food nexus for sustainable development in Turkmenistan [J]. *Journal of Cleaner Production*, 220: 212–224.
- Döll P, Siebert S. 2002. Global modeling of irrigation water requirements [J]. *Water Resources Research*, 38(4): 8-1–8-10.
- Du T S, Kang S Z, Zhang J H, et al. 2015. Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security [J]. *Journal of Experimental Botany*, 66(8): 2253–2269.
- Jalava M, Guillaume J H A, Kummu M, et al. 2016. Diet change and food loss reduction: what is their combined impact on global water use and scarcity? [J]. *Earth's Future*, 4(3): 62–78.
- Jiang Y K, Cai W J, Du P F, et al. 2015. Virtual water in interprovincial trade with implications for China's water

