

宁夏固原市主要农作物生产水足迹分析

齐娅荣¹, 张嗣墨¹, 唐莲^{1,2,3}, 陈炯利¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏银川 750021; 3. 旱区现代农业水资源高效利用教育部创新团队, 宁夏银川 750021)

摘要: 水足迹理论为解决水资源短缺问题提供了新的研究方向。基于水足迹理论, 借助 CROPWAT8.0 软件, 利用《宁夏统计年鉴》和《宁夏水资源公报》等资料, 计算分析了宁夏固原市 2009–2017 年主要作物的蓝水、绿水和灰水足迹。结果表明: 蓝水足迹占比最高, 绿水足迹次之, 灰水足迹最少。表明固原市农作物生产用水以蓝水为主, 绿水为辅, 灰水足迹虽然占比较少但逐年递增。建议当地根据水资源具体情况, 调整作物种植模式, 提高绿水利用率, 减少氮肥使用率, 使有限的水资源获得更大的效益, 从而满足粮食安全和生态安全的需求。

关键词: 水资源; 水足迹; 主要农作物; 宁夏固原市

中图分类号: TV213.9; S27

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)01-0091-06

Analysis of water footprint of main crop production in Guyuan, Ningxia

QI Yarong¹, ZHANG Sizhao¹, TANG Lian^{1,2,3}, CHEN Jiongli¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Engineering Research Center of Ministry of Education for the Effective Utilization of Modern Agricultural

Water Resources in Arid Areas, Yinchuan 750021, China; 3. Innovative Team of Ministry of Education

for the Effective Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Areas, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The water footprint theory provides a new research direction for solving the water shortage problem. Based on the water footprint theory, this paper used the data from Ningxia Statistical Yearbook and Ningxia Water Resources Bulletin to calculate and analyze the blue, green and grey water footprints of the main crops in Guyuan, Ningxia, from 2009 to 2017, with CROPWAT8.0 software. The results showed that the blue water footprint accounted for the highest proportion, the green water footprint came second, and the grey water footprint was the least. It indicated that the water used for crop production in Guyuan City was mainly blue water, and supplemented by green water. Although the gray water footprint is relatively small, it is increasing year by year. It is recommended to adjust the local crop planting patterns according to the specific conditions of water resources, in order to increase the utilization rate of green water, and reduce the use rate of nitrogen fertilizer, and therefore to achieve greater benefits from limited water resources and meet food security and water ecological security needs.

Key words: water resources; water footprint; main crop; Guyuan City of Ningxia

1 研究背景

随着经济的飞速发展, 人们开发利用水资源的需求越来越大, 实体水利用已达到自然资源的巅峰, 而“水足迹与虚拟水”的出现为解决目前水资源短缺问题提供了一条有力途径。Hoekstra 等^[1]于 2002 年提出

水足迹的概念, 指出水足迹为一定区域内人口消费的商品和服务所耗用的水资源量。宁夏南部山区是典型的水资源短缺地区, 水足迹理论可为宁夏解决水资源短缺以及当地水资源规划管理提供参考。

目前国内主要针对北方地区的粮食作物水足迹进行研究。冯变变等^[2]基于水足迹, 计算了 2005–

收稿日期: 2019-07-05; 修回日期: 2019-09-12

基金项目: 宁夏 2018 重点研发计划项目 (2018BEG03008); 宁夏高等学校一流学科 (水利工程学科) 项目 (NXYLXK2017A03); 国家自然科学基金项目 (51269022)

作者简介: 齐娅荣 (1996-), 女, 宁夏吴忠人, 硕士研究生, 主要从事旱区水资源调控理论及技术研究。

通讯作者: 唐莲 (1975-), 女, 宁夏银川人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事旱区水资源调控理论及技术研究。

2014 年山西省 6 种主要粮食作物的蓝水和绿水足迹,得到玉米的总水足迹为全省最高且在年际间有增长趋势,但水足迹整体上均呈逐年下降趋势。马凤才等^[3]对黑龙江省 2005–2015 年的主要粮食水足迹进行计算分析,得到蓝水足迹除了水稻呈上升趋势外,其余作物均呈下降趋势;大部分作物的绿水足迹均呈上升趋势;玉米的灰水足迹保持稳定上升的态势,小麦整体呈下降趋势。付强等^[4]计算了黑龙江省各地 2007–2012 年的粮食水足迹,得到粮食作物灌溉用水量逐年增加,粮食蓝水足迹明显低于绿水足迹,粮食生产主要依赖绿水,这与当地降水情况密切相关。杨裕恒等^[5]基于水足迹理论,对 1997–2013 年济南市农作物的用水量进行了计算,结果显示济南市水足迹中绿水、蓝水、灰水足迹均呈逐年增加趋势,且农作物中的小麦、玉米、蔬菜种植占主要地位,这与山东省是我国粮食生产基地的实际情况一致。宋智渊等^[6]对 1980–2012 年敦煌市农业水足迹进行计算评价,结果得到农业水足迹呈逐年上升趋势。韩宇平等^[7]分析了 2000–2015 年京津冀地区作物蓝水、绿水、灰水足迹,得到在此期间,绿水足迹所占比例呈增长趋势,蓝水足迹呈下降趋势,灰水足迹呈先增后降趋势。李红颖等^[8]计算分析了长春市 1960–2012 年玉米生产水足迹,得到玉米的绿水、蓝水足迹占比逐渐减少,而灰水足迹占比呈上升状态,化肥施用量的增加是导致灰水足迹上升的主要原因。通过对大量农业作物水足迹的研究,可以为当地农业种植结构以及农业水资源分配利用提供理论依据。

宁夏地区用水主要以农业为主,固原市是宁夏南部山区的代表地区,同时也是中国四大马铃薯种植基地之一和中国北方特色苗木基地^[9],故本文基于水足迹理论对固原市主要农作物的蓝水、绿水及灰水足迹进行分析,并以此为基础优化作物种植模式,提高水资源利用率,对固原市保障粮食安全和生态安全、保障经济社会可持续发展具有重要意义。

2 研究区域概况

宁夏固原市位于我国黄土高原的西北部,属于黄土丘陵沟壑区。海拔大部分在 1 500~2 200 m 之间。地域范围为北纬 35°14′~36°38′、东经 105°20′~106°58′^[9]。固原市属于半干旱暖温带,是典型的大陆性气候,具有冬天严寒漫长、夏天炎热干燥、一年四季昼夜温差大、灾害性天气多、区域降水差异大等特征。年平均气温在 5.8~7.8℃ 之间,降水稀

少,年降水量 306.9~737.7 mm,日照充足,全年降水时空分布不均,出现间歇性干旱^[9]。

3 研究方法数据来源

3.1 研究方法

3.1.1 作物生长过程中蓝水、绿水足迹计算 1995 年, Falkenmark 以雨养农业和粮食安全问题为基础提出了蓝水、绿水的概念^[1],2002 年, Hoekstra 等^[1]又进一步指出将蓝水和绿水足迹作为测量水资源消耗的指标。蓝水足迹是指作物生长过程中所消耗的地表水和地下水,这里主要指作物生长过程中消耗的灌溉用水量^[10];绿水足迹主要指作物在生长过程中吸收和利用的有效降水量^[11]。计算公式如下:

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_{eff}) \quad (1)$$

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_{eff}) \quad (2)$$

式中: ET_{blue} 为蓝水蒸发蒸腾量, mm; ET_{green} 为绿水蒸发蒸腾量, mm; ET_c 为作物的蒸发蒸腾量, mm; P_{eff} 为有效降水量, mm。若 P_{eff} 大于 ET_c , 则 ET_{blue} 为 0, 否则 ET_{blue} 为 ET_c 与 P_{eff} 之差; ET_{green} 取决于 ET_c 与 P_{eff} 中的较小值。

根据 CROPWAT8.0 软件可得单位面积作物的蒸发蒸腾量 (ET_c) 和有效降水量 (P_{eff})。

由公式(1)、(2) 计算可得作物的蓝水、绿水蒸发蒸腾量, 根据作物需水量的计算, 作物的蒸发蒸腾量即为作物的需水量。蓝水足迹、绿水足迹公式如(3)、(4) 所示:

$$WF_{blue} = CWR_{blue} \cdot A = 10ET_{blue} \cdot A \quad (3)$$

$$WF_{green} = CWR_{green} \cdot A = 10ET_{green} \cdot A \quad (4)$$

式中: WF_{blue} 、 WF_{green} 分别为蓝水足迹、绿水足迹, m^3/a ; CWR 为单位面积作物的年需水量, $m^3/(hm^2 \cdot a)$; A 为作物的种植面积, hm^2 ; 10 为水深(mm) 转化为单位陆地面积水量 (m^3/hm^2) 的转化系数。

3.1.2 作物生长过程中灰水足迹计算 灰水足迹的概念由 Hoekstra 等^[12]于 2008 年首次提出, 后经水足迹网络灰水足迹工作小组完善, 将其定义为以自然本底浓度和现有的环境水质标准为基准, 吸收一定的污染物负荷所需的淡水水量^[13]。农业生产通常会使用大量的化肥和农药来提高农作物的产量, 这些多余的肥料及农药会渗入地下或进入地表径流造成地下水和地表水的污染^[14]。根据对固原市化肥使用情况了解得知, 氮肥在所有使用的化肥中占比最大。因此, 以氮元素作为作物灰水足迹的研究指标^[15]。受数据收集影响, 本文灰水足迹计算仅考虑氮肥对水质造成的污染, 没有考虑其他农药

对水质的影响。

作物灰水足迹计算公式如下^[16]:

$$WF_{grey} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} = \frac{\partial \cdot A_{ppl}}{C_{max} - C_{nat}} \quad (5)$$

式中: WF_{grey} 为灰水足迹, m^3/a ; L 为年产量, kg/a ; ∂ 为氮肥的淋失率; A_{ppl} 为氮肥使用量, kg/a ; C_{max} 为现有环境水质标准下氮元素的最高排放浓度, kg/m^3 ; C_{nat} 为自然条件下水体中氮元素的质量浓度, kg/m^3 。

根据《第一次全国污染源普查—农业污染源肥料流失系数手册》将氮元素淋失率确定为 10%^[15]; C_{max} 值根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中的 III 类水标准确定为 0.01 kg/m^3 ^[17]; C_{nat} 值通常设定为 0^[17]。

3.1.3 作物生长过程中总水足迹计算 作物生长总水足迹是指作物在整个生长过程中所利用的总水资源量, 包括有效降水(绿水)、来自地表或地下的灌溉用水(蓝水)以及由氮肥所引起的污染水(灰水), 其为评价作物生产过程中水资源消耗及用水效率的综合指标^[18], 计算公式如下^[19]:

$$WF_{总} = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (6)$$

式中: $WF_{总}$ 为灰水足迹, m^3/a ; WF_{green} 、 WF_{blue} 、 WF_{grey} 分别为绿水足迹、蓝水足迹、灰水足迹, m^3/a 。

3.2 数据来源

主要农作物的播种面积、产量及化肥使用情况均来源于《宁夏统计年鉴(2009—2017)》; 利用 CROPWAT8.0 软件计算所需数据来源于联合国粮农组织的 CROP 数据库、CLIMATE2.0 数据库(<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/en/>); 宁夏固原市气候数据(月最高气温、月最低气温、平均湿度、平均风速、日照时数)来源于《宁夏统计年鉴(2009—2017)》和中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>); 固原市主要农作物(马铃薯、油料、玉米、瓜果类、蔬菜、小麦)产量数据来源于《宁夏统计年鉴(2009—2017)》。

4 固原市主要农作物生产水足迹计算与分析

4.1 主要农作物种植面积现状分析

根据《宁夏统计年鉴(2009—2017)》所统计的宁夏固原市的主要农作物播种面积及其变化趋势以及 2017 年各主要农作物播种面积所占比重分别见图 1 和 2。

由图 1 可以看出: 2009—2017 年, 固原市主要

作物年均播种面积按大小排列为: 马铃薯、玉米、小麦、蔬菜、油料作物以及瓜果类。2009—2016 年, 马铃薯的种植面积一直位居第 1, 但呈现逐年下降趋势; 小麦的播种面积在 2010 年最大, 自此之后也呈现不断减少的趋势; 玉米的播种面积呈平稳增长趋势; 油料作物与蔬菜种植面积变化趋势都是呈现先增长后下降趋势, 不同的是油料作物从 2012 年开始出现明显下降趋势, 而蔬菜从 2016 年开始呈现下降趋势, 在此之前均为稳定上升趋势; 瓜果类的种植面积最小且变化趋势不明显。

由图 2 可以看出: 2017 年玉米的种植面积最大, 为 $8.98 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占总种植面积的 36%; 马铃薯种植面积仅次于玉米, 为 $7.21 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占总种植面积的 29%; 小麦为 $4.17 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占总种植面积的 17%; 蔬菜种植面积为 $3.19 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占总种植面积的 13%; 油料作物的种植面积为 $1.61 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占总种植面积的 6%; 瓜果的种植面积为 $0.01 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占总种植面积的 0.1%。宁夏固原市粮食作物播种面积占总种植面积的 81%, 远高出其他作物的种植面积; 经济作物占总播种面积的 19%, 其中主要为蔬菜。由此可以得出宁夏固原市农业是以粮食作物为主、经济作物为辅的种植结构。

4.2 主要农作物水足迹分析

4.2.1 主要农作物蓝水足迹分析 根据公式(1)和(3), 借助 CROPWAT8.0 软件对作物的蓝水足迹进行计算, 计算结果如表 1 所示。

由表 1 可以得出: 2015 年固原市的蓝水足迹最高, 这也表明 2015 年灌溉用水量最高。其次为 2011 年, 2013 年最低。2015 年各主要作物中, 瓜果的蓝水足迹最低, 为 $0.0075 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占 2015 年固原市总蓝水足迹的 0.065%; 马铃薯的蓝水足迹最高, 为 $4.3937 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占 2015 年总蓝水足迹的 38.28%, 这主要是由于马铃薯的种植面积为所有作物中最大, 因此所用的灌溉水量最多; 其次是玉米为 $2.5108 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占 2015 年总蓝水足迹的 21.87%; 小麦的蓝水足迹为 $1.7428 \times 10^8 \text{ m}^3$, 油料作物的蓝水足迹为 $1.5800 \times 10^8 \text{ m}^3$, 蔬菜的蓝水足迹为 $1.2435 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占比分别为 15.18%、13.77%、10.83%。2011 年各主要作物中, 瓜果的蓝水足迹最低, 为 $0.0091 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占 2011 年总蓝水足迹的 0.084%; 马铃薯的蓝水足迹最高为 $3.9614 \times 10^8 \text{ m}^3$, 所占比重为 36.72%; 其次是小麦为 $2.9330 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占比为 27.19%; 玉米是 $1.2380 \times 10^8 \text{ m}^3$, 油料作物是 $1.8373 \times 10^8 \text{ m}^3$, 蔬菜是 $0.8085 \times 10^8 \text{ m}^3$, 分别占 2015 年总蓝水足迹的 11.48%、17.03%、

7.49%。

4.2.2 主要农作物绿水足迹分析 根据公式(2)

和(4),借助 CROPWAT8.0 软件对作物的绿水足迹进行计算,计算结果如表 2 所示。

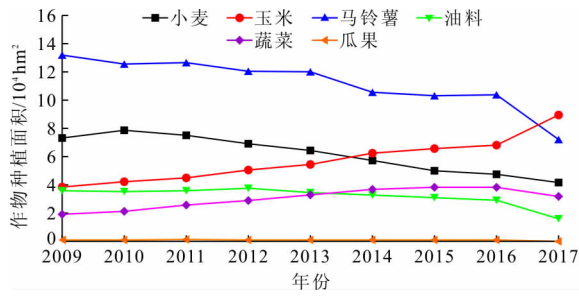


图1 宁夏固原市主要农作物多年种植面积变化趋势

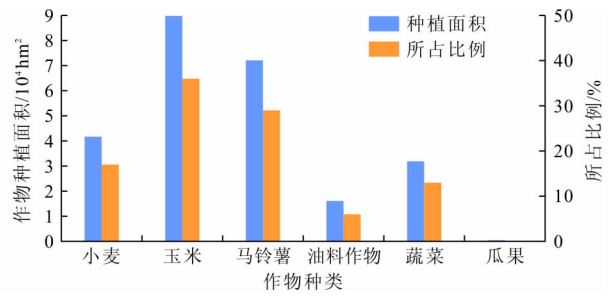


图2 2017年宁夏固原市主要农作物种植面积所占比例

表1 宁夏固原市 2009 - 2017 年各主要农作物蓝水足迹

10⁸ m³

年份	小麦	玉米	马铃薯	油料作物	蔬菜	瓜果	合计	排序
2009	3.5751	0.8147	3.3360	1.5568	0.4774	0.0017	9.7617	4
2010	3.3290	1.0020	3.4275	1.3654	0.4564	0	9.5802	5
2011	2.9330	1.2380	3.9614	1.8373	0.8085	0.0091	10.7872	2
2012	2.6138	0.9440	2.7417	2.7417	0.7950	0.0001	9.8362	3
2013	2.7475	0.5523	1.7457	1.1116	0.5085	0	6.6656	9
2014	2.0198	1.5578	2.9689	1.5389	1.0225	0.0023	9.1103	7
2015	1.7428	2.5108	4.3937	1.5800	1.2435	0.0075	11.4782	1
2016	1.8380	1.8036	3.2714	1.3178	1.0038	0	9.2346	6
2017	1.3092	1.9517	1.8618	0.7083	0.8386	0	6.6696	8

表2 宁夏固原市 2009 - 2017 年各主要农作物绿水足迹

10⁸ m³

年份	小麦	玉米	马铃薯	油料作物	蔬菜	瓜果	合计	排序
2009	0.6933	0.8493	2.9637	0.8240	0.1966	0.0170	5.5440	8
2010	1.3133	1.0270	3.1736	0.9287	0.4005	0.0193	6.8623	4
2011	0.8751	1.0051	3.0077	0.8539	0.2700	0.0234	6.0353	7
2012	0.7111	1.3894	3.4717	0.5952	0.3826	0.0211	6.5711	5
2013	0.9356	2.1250	4.8433	1.4432	0.8471	0.0240	10.2183	1
2014	1.0076	1.8543	3.3502	1.1056	0.7234	0.0252	8.0663	2
2015	0.9568	1.0343	1.7158	0.5457	0.4516	0.0129	4.7172	9
2016	0.7055	1.8672	2.8982	0.8312	0.7100	0.0187	7.0309	3
2017	0.6402	2.4789	2.0161	0.4553	0.4835	0.0032	6.0773	6

由表2可以看出:2013年固原市总绿水足迹最高,这与农作物的种植面积密切相关。

由图1统计可知,2013年固原市农作物种植面积为2009-2017年中最大。绿水足迹主要是指作物在生长发育过程中吸收和利用的有效降水量,这也表明2013年固原市自然降水量最高。其次为2014年,2015年最低。2013年各主要作物中,瓜果的绿水足迹最低,为0.0240×10⁸ m³,占2013年总绿水

足迹的0.23%;马铃薯的绿水足迹最高,为4.8433×10⁸ m³,占2013年的47.40%,这同样是由于马铃薯的种植面积为最大;其次是玉米为2.1250×10⁸ m³,占2013年绿水足迹的20.80%;油料作物是1.4432×10⁸ m³,占比为14.12%,蔬菜与小麦的绿水足迹相差较小,分别为0.8471×10⁸和0.9356×10⁸ m³,占比分别为8.30%和9.16%。2014年各主要作物中,瓜果的绿水足迹最低,为0.0252×10⁸

m^3 , 占比为 0.31%; 马铃薯的绿水足迹最高, 为 $3.3502 \times 10^8 \text{ m}^3$, 所占比例为 41.53%; 其次玉米为 $1.8543 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占比为 22.99%; 油料作物、小麦与蔬菜所占比例位列第 3、第 4、第 5 位, 分别为 13.71%、12.49%、8.97%。

4.2.3 主要农作物蓝、绿、灰水足迹多年变化趋势分析 宁夏固原市 2009–2017 年主要农作物蓝、绿、灰、总水足迹变化趋势见图 3 及表 3。

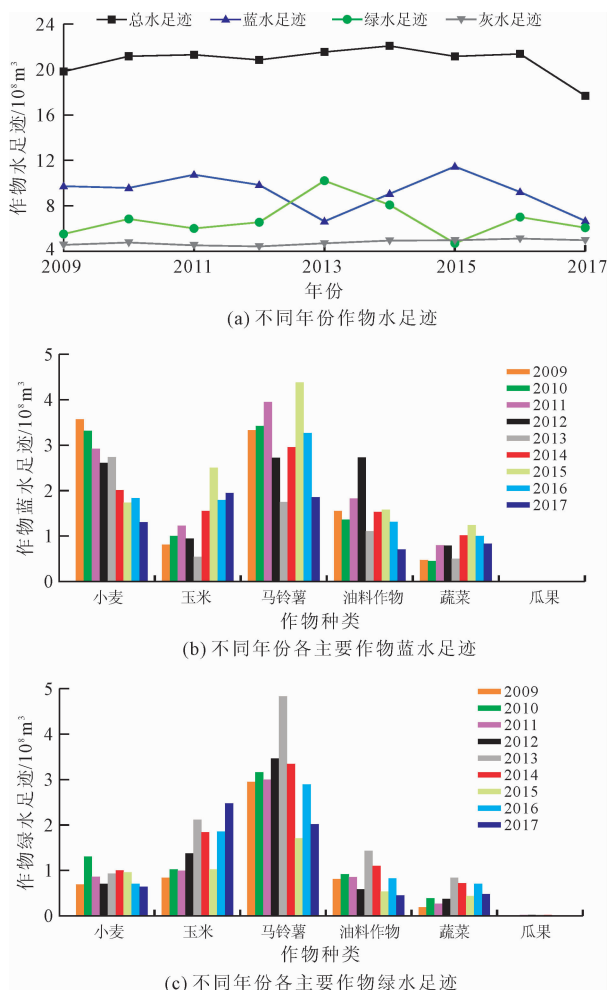


图3 宁夏固原市 2009–2017 年主要农作物水足迹变化趋势

由图 3(a) 和表 3 可知: 固原市总水足迹以 2016 年为分界, 之前趋势波动起伏但稳定在 $21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右, 之后 2017 年骤降至 $17.717 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。对于蓝水足迹来说, 2013 年最低, 为 $6.6656 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2015 年最高, 为 $11.4782 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。蓝水足迹在 2009–2012 年保持稳定波动趋势, 2013 年比 2012 年下降了约 32%, 2014–2015 年又连续增长了 72% 以上, 而从 2016–2017 年又呈现下降趋势。对于绿水足迹来说, 2009–2012 年也是保持稳定波动趋势, 但均低于蓝水足迹, 这表明在农业用水中自然降水量

少于灌溉用水; 2013 年绿水足迹达到最大, 而蓝水足迹最小, 说明 2013 年可利用的自然降水量最多, 而灌溉用水量最少; 2013–2015 年, 绿水足迹的变化趋势则与蓝水足迹相反, 呈下降趋势且下降至最低点 $4.7172 \times 10^8 \text{ m}^3$, 这是由于 2015 年的降水量是最小的。而 2016 又升高至 $7.0309 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2017 年又略有下降。这表明在满足农作物一定需水量的前提下, 自然降水量多的时候灌溉用水有所减少, 自然降水量少的时候就得增加灌溉用水量, 二者此消彼长。对于灰水足迹来说, 所消耗的水量小于蓝水足迹和绿水足迹, 但多年保持稳定增长趋势。除 2011–2012 年和 2017 年灰水足迹略微下降外, 其他年份灰水足迹均呈增长趋势。这说明近年来固原市农业生产中化肥的使用率有所增加。

由图 3(b) 作物的蓝水足迹分析可以看出, 同种作物在不同年份的蓝水足迹也不相同。对于小麦来说, 2009 年蓝水足迹最大, 其余年份呈现逐年下降趋势, 说明由于小麦种植面积的减少, 利用的灌溉水也随之减少; 对于玉米和马铃薯来说, 两种作物 2015 年的蓝水足迹都达到最高, 表明所需要的灌溉用水量最多, 2013 年最低。油料作物 2012 年的蓝水足迹达到最大, 蔬菜在 2015 年达到最大, 这是由于 2012 年油料的种植面积达到最大, 2015 年蔬菜的种植面积达到最大。瓜果类由于种植面积很少, 计算的蓝水足迹接近于 0, 故不进行分析。

由图 3(c) 作物的绿水足迹分析可得, 同种作物在不同年份的绿水足迹也不相同。对于小麦来说, 2010 年绿水足迹达到最大, 这是因为 2010 年小麦的种植面积为最大。其余年份变化不大。对于玉米和马铃薯来说, 两种作物 2013 年的绿水足迹均为最高, 表明可利用的自然降水量最多, 2015 年最低或较低, 这正好与同年蓝水足迹相反。对于油料作物与蔬菜来说, 同样在 2013 年绿水足迹达到最大值, 原因是 2013 年的降水为最大值。

综上所述, 为满足作物一定需水量的要求, 当所利用的灌溉水量低时, 需要可利用的有效降水量就高, 反之可利用的有效降水量低; 对于不同年份来说, 蓝水足迹与绿水足迹保持波浪式发展趋势, 此消彼长, 互相补充; 对于不同的作物, 由于种植面积以及可利用的降水量不同, 绿水足迹与蓝水足迹变化趋势也不尽相同; 灰水足迹虽数量上远低于蓝水和绿水足迹, 但呈现逐年增长趋势, 说明固原市为提高粮食产量增加了化肥的使用量, 从而用于减少土壤和水体污染所消耗的淡水资源量就会增多, 造成水

资源利用率降低。

表3 宁夏固原市 2009—2017 年主要农作物蓝、

年份	绿、灰、总水足迹			10^8 m^3
	蓝水足迹	绿水足迹	灰水足迹	
2009	9.7617	5.5440	4.56	19.866
2010	9.5802	6.8623	4.78	21.223
2011	10.7872	6.0353	4.51	21.332
2012	9.8362	6.5711	4.46	20.867
2013	6.6656	10.2183	4.70	21.584
2014	9.1103	8.0663	4.94	22.117
2015	11.4782	4.7172	4.99	21.185
2016	9.2346	7.0309	5.14	21.406
2017	6.6696	6.0773	4.97	17.717

4.2.4 主要农作物蓝、绿、灰水足迹占比分析 宁夏固原市 2009—2017 年主要农作物的蓝水足迹占作物生产总水足迹的比例为 44%，绿水足迹占比为 33%，灰水足迹占比为 23%。蓝水足迹在作物生产水足迹中占优势，所占比例高于绿水和灰水足迹，这表明固原市农作物的种植主要来源于灌溉水，呈现出以蓝水为主、绿水为辅的农作物生产用水格局。灰水足迹占作物生产水足迹的比例相对较高，表明目前化肥的使用已成为固原市水环境恶化的重要原因之一。

4.3 讨论

宁夏固原市经济发展是以农业为主，农作物的种植结构对于宁夏固原市农业水资源合理分配具有重要的影响。本文对宁夏固原市主要农作物的水足迹进行了初步计算，基于水足迹理论分析了绿水、蓝水及灰水足迹所占比重以及各个水足迹多年变化趋势，探讨了各个水足迹在固原市农作物种植过程中的影响，对宁夏固原市农业水资源利用有一定的参考价值。

建议在农业灌溉用水充分的条件下，建立节水型农业种植模式，减少高耗水农作物的种植，提高自然降水的利用率，最大限度地提高氮肥利用效率、减少氮肥在使用过程中的损失，但是由于缺乏更加详细的经济数据和氮肥使用数据，针对固原市的灰水足迹分析还存在一定的不足之处，其讨论结果还存在一定程度的局限性，将来对宁夏固原市主要农作物水足迹的研究还需要更为详细的水资源资料和其他经济相关数据，以便获得更好的结果来反映该地区的实际状况。

5 结论

本文在水足迹理论的基础上，借助 CROPWAT8.0 软件，利用《宁夏统计年鉴》和《宁夏水资源公报》等资料，对宁夏固原市主要作物的绿水足迹和蓝水足迹进行了计算，并对固原市的灰水足迹进行了研究，得到以下结论：

(1) 宁夏固原市 2009—2017 年主要农作物平均种植面积按面积大小排列为：马铃薯 > 玉米 > 小麦 > 蔬菜 > 油料作物 > 瓜果类。表明固原市农作物种植主要以粮食作物为主，经济作物为辅。

(2) 分析 2009—2017 年宁夏固原市主要农作物的蓝水、绿水、灰水足迹和各个水足迹多年增长趋势及其所占比重，结果表明：蓝水足迹占比最大，绿水足迹次之，说明固原市农作物生长需水主要来自灌溉水，其次是自然降水，自然降水的利用率相对较低；在满足作物一定需水量的要求时，当蓝水足迹高时，绿水足迹则降低，反之绿水足迹升高。蓝水与绿水足迹此消彼长，但整体趋势保持稳定发展。

(3) 对固原市的灰水足迹进行计算分析，得到灰水足迹虽占比最少，变化幅度也不大，但连年保持增长的趋势。这表明固原市为保证农作物的产量而大量使用化肥，对水环境与水生态安全造成了一定的影响。

参考文献：

- [1] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade[J]. Water Science & Technology, 2002, 49(11): 203—209.
- [2] 冯变变, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 山西省主要粮食作物生产水足迹研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(3): 133—137.
- [3] 马凤才, 戴尚君实. 黑龙江省主要粮食作物“水足迹”分析[J]. 农业经济, 2018(5): 13—15.
- [4] 付强, 刘烨, 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, 48(6): 184—192.
- [5] 杨裕恒, 曹升乐, 付雅君, 等. 基于农作物水足迹的济南市农业用水评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3): 228—233.
- [6] 宋智渊, 冯起, 张福平, 等. 敦煌 1980—2012 年农业水足迹及结构变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(6): 133—138.
- [7] 韩宇平, 李新生, 黄会平, 等. 京津冀作物水足迹时空分布特征及影响因子分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 26—34.

(下转第 103 页)

- agent for high-temperature applications [J]. SPE Journal, 2011, 16(3): 559–574.
- [6] 张磊. 碳酸盐岩油藏微乳酸化体系研究[J]. 石油化工应用, 2019, 38(4): 51–54+76.
- [7] 许志赫. 乙酸在酸化工作液中的作用[J]. 钻井液与完井液, 2000, 17(5): 13–15.
- [8] 刘朝霞, 张贵才, 孙铭勤. 一种高温盐酸酸化缓蚀体系的研究与评价[J]. 石油与天然气化工, 2004, 33(6): 430–432+3.
- [9] 姚远, 袁志华. 适用于高温碳酸盐岩储层稠化缓速酸液体系研究[J]. 能源化工, 2018, 39(2): 50–54.
- [10] ZAKARIA A S, NASR – EL – DIN H A. A novel polymer-assisted emulsified-acid system improves the efficiency of carbonate matrix acidizing[J]. SPE Journal, 2016, 21(3): 1061–1074.
- [11] 吴德宽, 刘波. 鄂北丘陵山区表层地下水富水性等级划分探析——以广水寿山地区为例[J]. 资源环境与工程, 2015, 29(6): 830–834.
- [12] 李智民, 刘云彪, 赵德君, 等. 鄂北严重缺水地区地下水富集模式与找水实践[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(6): 899–903.
- [13] 卞学军, 王宇驰, 梁晓艳. 鄂北丘陵山区变质岩–岩浆岩区地下水富集规律与供水模式研究[J]. 资源环境与工程, 2018, 32(1): 78–83.
- [14] FINŠGAR M, JACKSON J. Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: A review [J]. Corrosion Science, 2014, 86: 17–41.
- [15] 齐宁, 李柏杨, 方明君, 等. 基于碳酸盐岩酸化溶蚀形态的酸液最优注入速度界限[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(5): 117–122.
- [16] 张军. 咪唑啉类缓蚀剂缓蚀机理的理论研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2008.

(上接第96页)

- [8] 李红颖, 秦丽杰, 王晔旻. 长春市玉米生产水足迹时序变化及影响因素研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2017, 49(2): 120–126.
- [9] 李虔辉. 西北干旱区域水资源管理——以固原市为例[J]. 河南科技, 2013(13): 181.
- [10] 赵芮. 基于水足迹的宁夏中部干旱带扬黄灌区种植业结构优化[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.
- [11] 金谦, 桂东伟, 高霄鹏, 等. 新疆主要农作物生产水足迹研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 243–249.
- [12] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard [M]. London, UK: Earth Scan, 2011.
- [13] 闫滨, 黄万霞, 刘羽婷. 考虑时间维度的灰水足迹核算与评价——以浑河大伙房水库上游段为例[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(7): 40–45.
- [14] 李亚婷, 朱荣, 虎芳芳, 等. 宁夏中部干旱带主要粮食作物生产水足迹分析[J]. 农业科学研究, 2016, 37(2): 20–24.
- [15] 李亚婷. 基于水足迹的宁夏中部干旱带农业结构优化[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [16] 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, 31(12): 202–203+213.
- [17] 王勤勤, 刘俊国, 赵丹丹. 京津冀地区主要农作物生产水足迹研究[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 22–27+33.
- [18] 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.
- [19] 苏明涛, 张郁, 靳英华. 吉林省主要农作物的生产水足迹研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 26–30.