

中部典型农业区浏阳市主要农作物生产水足迹研究

方梦林¹ 王润^{1, 2*} 严宇男¹ 陈思^{1, 2}

(1. 湖北大学资源环境学院, 湖北武汉 430062;

2. 湖北大学水资源管理与水政策研究中心, 湖北武汉 430062)

【摘要】对县级市浏阳市开展主要农作物生产水足迹的研究是研究村镇层面水资源和水环境承载力的一项重要内容。通过利用水足迹的理论和方法, 运用 CROPWAT 模型计算蒸散发量及其有效降水量, 结合气象、农作物系数及面积产量、化肥使用量和土壤等主要数据核算主要农作物水足迹, 以 2018 年为参考年份, 对浏阳市早稻、中稻、晚稻、油菜和蔬菜等主要农作物开展了生产水足迹的计算和分析。结果表明, 浏阳市早稻、中稻、晚稻、油菜和蔬菜的单位质量水足迹分别为 1310、1390、1250、3310、380m³/t。根据此计算结果, 研究在主要指标区域、农作物主要消费区与虚拟水和区域水资源管理三个方面重点开展了比较研究和类比分析。研究工作丰富了从下至上开展水足迹研究的方法, 并为小流域水资源水环境管理策略提升提供了有益研究参考。

【关键词】水足迹 农作物 农业用水效率 浏阳市

【中图分类号】:S565 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2022)10-2308-10

DOI:10.11870/cjlyzyyhj202210018

对村镇发展潜力与约束的科学认识是“乡村振兴”战略与规划的重要实施基础, 这也是村镇建设资源承载力研究的问题^[1]。在我国, 农业用水占总用水量的 65%以上, 其中农田灌溉占农业用水的 90%~95%。随着农业产量的不断增长和社会经济的不断发展, 对水资源的需求也不断增长, 而农业用水量中占比大, 对其效率的评估是农业用水管理的重要组成部分。精准量化区域农作物对水资源的需求可为农业生产水资源高效利用提供基础, 而水足迹为此提供了有效的工具。水足迹(WaterFootprint)是荷兰学者 Hoekstra 在虚拟水理论的基础上, 借鉴生态足迹的概念提出的, 指的是一个国家、一个地区或一个人, 在一定时间内消费的所有产品和服务所需要的水资源数量^[3]。自水足迹提出以来, 国内外学者对农作物水足迹进行了大量研究, 大致可分为实验研究和实证研究两类。

实验研究主要从水足迹概念和理论出发, 运用实验手段, 开展验证、模型量化以及各部分精细区分等。如 Hoekstra 和 Chapagain 对全球的棉花、春小麦和水稻等特定农作物的水足迹进行实验研究, 核算其水足迹的规模和组成结构^[5~7];金建新等^[8]基于 CROPWAT 模型, 通过实验田处理得出玉米的蒸腾蒸发量值和实测值比较接近, 说明模型该模拟具有一定的准确度;Hoekstra^[9]从土壤水分平衡的角度出发, 提出通过每天计算绿水和蓝水在每个土壤和植被层分量, 区分绿色和蓝色蒸发及其蒸腾的物理方法, 准确的评估了灌溉效率, 并精确估计作物生产的绿水和蓝水足迹。相较于实验研究, 实证研究数目多, 提供了作物种类多

¹收稿日期:2021-10-06;修回日期:2021-12-21

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD1100102)

作者简介:方梦林(1996~), 女, 硕士研究生, 主要从事村镇水资源承载力研究. E-mail:2546579541@qq.com

***通讯作者** E-mail:rwang@hubu.edu.cn

样、分布地区广泛以及应用延伸不断创新的研究案例。如操信春等^[10]基于水足迹理论,从水资源利用效率、水资源产出效益和环境效益三方面出发,对处理稻田水资源利用效率进行综合评价,表明不同的灌溉方式,水资源利用效率不同,为农业用水效率评价提供了新视角;刘巍等^[11]分析黑龙江省粮食水足迹的变化规律,表明省内粮食蓝水足迹、绿水足迹的空间分布也存在明显差异;马静等^[12]核算了我国各区域主要农产品的水足迹,并分析了区域的农产品生产和消费关系,表明人的消费结构,特别是膳食结构对水资源消耗的影响非常显著;卓拉等^[13]基于生产与消费实体水,建议从全产业链视角下,建立农业生产虚拟水补偿制度,在保障虚拟水输入地区粮食安全和水资源安全的基础上,最大化虚拟水输出地区的生态和经济效益,实现虚拟水输出地区水资源可持续高效利用。

国内外已有较多关于农作物水足迹的研究,研究区域广泛并提供了许多开展比较的研究案例。我国国土面积大而水资源禀赋不均,人口、经济发展和生产技术等因素的水平区域差异显著,而作物在各生长时间、不同地理范围内生产过程中产生的水资源消耗量^[14]的大小受气候、土壤类型和水管理实践的显著影响,这导致水足迹具有明显的变异性。这一变异性决定了农作物没有基准水消耗量(benchmark),即无法赋予某一品种的农作物最佳或者最少水足迹值。依据前人研究提供的多重视角,研究中小流域层面以及县域主要农作物的灌溉需水变化规律,制定水分高效管理策略,可以在开展水足迹理论和方法支撑下的农作物生产水足迹计算基础上,通过开展多方面的比较,获得对农作物以及农业需水的深层次理解,为制定进一步提升区域水资源和水环境承载力提供参考依据。

本研究选取洞庭湖流域的典型农业区浏阳市作为研究区(图1)。区内水系发育丰富,年均地表径流量约44.59亿 m^3 ,人均占有3842 m^3 ,比全国人均占有量多1000多 m^3 。区内主要水系浏阳河发源于湘赣交界的山区,年均降水量1680mm左右,年际和年内分布不均,变化较大,汛期径流量占全年的65%^[15],5、6月份雨量特别大,7~9月和11~次年1月这两个时间段易出现季节性干旱。

理论上讲本市的农业水资源是相对丰沛的,依靠降水资源能够维持农业生态系统的水量平衡。浏阳市农业灌溉大多采取传统大畦漫灌、深灌、串灌和串排的方式,造成水资源的大量浪费,农田水利用率为0.5^[14]。再加上水资源的时间和空间分布不均,区内上下游以及工农业用水矛盾已经凸显,水资源供需处于紧张平衡中。因此有必要对占比较大的农业用水部分进行深入剖析,开展农作物水足迹研究。本文根据浏阳市周围的六个气象站点逐日气象资料以及浏阳市的土壤系数和作物系数等数据,计算水稻、油菜和蔬菜需水量及其实际灌溉用水量,分析浏阳市主要农作物需水量与实际灌溉用水量及其之间的差值。

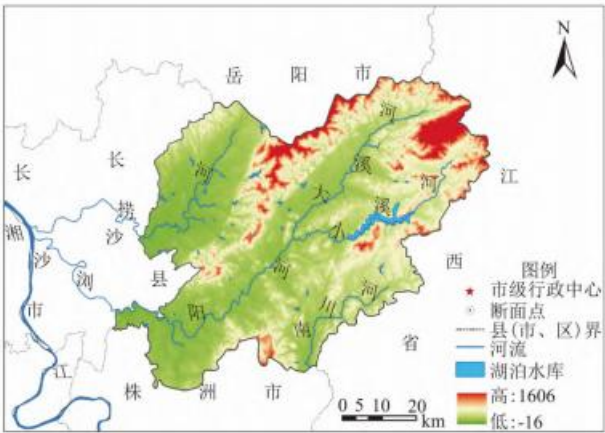


图1 浏阳市水系图

1 资料与方法

1.1 研究区概况

浏阳市 (27° 51' N~28° 34' N, 113° 10' E~114° 15' E) 地处湖南省东部罗霄山脉北段, 属中亚热带季风湿润气候, 年平均气温为 17.5℃, 年平均年降水量 1680mm, 年平均日照时数为 1594.81h。相对湿度 78.86%, 平均风速 1.85m/s, 全年无霜期 266d 左右。境内发育有浏阳河、捞刀河、南川河三条水系, 汇纳 1300 多条支流, 总长约 2200 余千米, 分别汇入湘江。浏阳市境内地表水约 44.59 亿 m³。其中, 浏阳河多年平均水量 29.27 亿 m³, 占全市 80%。本文选取的 6 个代表站点分别为长沙市、长沙县、株洲市、宜春市、修水县和平江县, 根据浏阳市周围的 6 个站点获取其气象数据。

1.2 水足迹量化方法

作物生产水足迹是区域生产单位作物产品所消耗的水资源量, 包括蓝水足迹 (作物生长过程所消耗的地下水或地表水)、绿水足迹 (作物生长过程所消耗的储藏在土壤中的有效降水) 和灰水足迹 (用于稀释农业生产所排放到水体中的污染物, 使水体达到当地环境排放标准所需水资源量), 作物生产水足迹根据 Hoekstra 等^[9] 提出的量化方法进行计算: 首先, 利用 CROPWAT 模型计算作物生育期的蒸发蒸腾量, 然后结合灌溉定额和作物单位面积产量数据推算作物生产水足迹。

1.2.1 农作物需水量

$$\begin{cases} ET_{green} = \min(ET_c, P_e) \\ ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_e) \end{cases}$$

式中: ET_{green} 为绿水的蒸散发量, mm; ET_{blue} 为蓝水的蒸散发量, mm; ET_c 为作物生育期蒸散量, mm; P_e 为作物生育期内有效降水量, mm。

$$\begin{cases} CWU_{green} = 10 ET_{green} \\ CWU_{blue} = 10 ET_{blue} \end{cases}$$

式中: CWU_{green} 为农作物绿水需水量, m³/hm²; CWU_{blue} 为农作物蓝水需水量, m³/hm²; ET_{green} 和 ET_{blue} 同上; 系数 10 是将水深 (mm) 转化为单位陆地面积的水量 (m³/hm²) 的转换系数。

1.2.2 农作物生长的蓝水足迹和绿水足迹

$$\begin{cases} WF_{crop} = WF_{green} + WF_{blue} = W_{green}/Y + W_{blue}/Y \\ W_{green} = 10 \min(ET_c, P_e) \\ W_{blue} = IR \end{cases}$$

式中: WF_{crop} 为作物生产水足迹, m³/kg; WF_{green} 为作物生产绿水足迹, m³/kg; WF_{blue} 为作物生产蓝水足迹, m³/kg; W_{green} 为作物单位面积消耗的绿水资源量, m³/hm²; W_{blue} 为作物单位面积消耗的蓝水资源量, m³/hm²; 系数 10 同上; P_e 同上; IR 为作物单位面积消耗的灌溉水量, m³/hm²; Y 为作物单位面积产量, kg/hm²。作物单位面积消耗的绿水资源量:

$$W_{green} = 10\min(ET_c, P_e)$$

式中:ETc 和 Pe 同上,mm。农作物蒸散发量采用联合国粮农组织 (FAO) 推荐公式计算。计算公式为:ETc=Kc×ET0 式中:Kc 为作物参考系数;ET0 为参考作物蒸散量, mm, 采用 CROPWAT 模型计算得出, 计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.48\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

式中:Rn 为作物表面的净辐射量, MJ/(m²·d⁻¹);G 为土壤热通量, MJ/(m²·d⁻¹);T 为平均气温, °C;U2 为离地面 2m 高处的风速, m/s;es 为饱和水气压, kPa;ea 为实测水气压, kPa;es-ea 为饱和水气压与实际水气压的差额, kPa;Δ 为饱和水气压与温度相关曲线的斜率, kPa/°C;γ 为湿度计常数, kPa/°C。公式是由联合国粮农组织 FAO 推荐并修正, 它忽略了作物类型、作物发育和管理措施等因素, 仅考虑气象参数对农作物需水的影响。

其中, Pe 根据美国农业部土壤保持局提出的方法计算:

$$P_{e(dec)} = \begin{cases} P_{dec} \times \frac{(125 - 0.6 \times P_{dec})}{125} & x \leq (250/3) \text{ mm} \\ 125/3 + 0.1 \times P_{dec} & x > (250/3) \text{ mm} \end{cases}$$

式中:Pdec 为旬降水量, mm;Pe(dec)为旬有效降水量, mm。作物单位面积消耗的蓝水资源量 Wblue=IR 式中:IR 为作物单位面积消耗的灌溉水量, m³/hm²。

作物单位面积蓝水消耗 IRi 利用作物 i 灌溉水消耗量占区域种植业灌溉水消耗的比例推求, 见下式:

$$IR^i = \frac{IR_A \times \partial_i}{A_i}$$

式中:IRi 为作物 i 单位面积的灌溉水量, m³/hm²;IRA 为浏阳市农田灌溉用水总量, m³;Ai 为作物 i 的种植面积, hm²。

$$\partial_i = \frac{I_Q^i \times A_i}{\sum_{i=1}^n [I_Q^i \times A_i]}$$

式中:IiQ 为浏阳市作物 i 的净灌溉定额, m³/hm²;Ai 同上。

1.2.3 农作物灰水足迹

水能够同时稀释多种污染物, 在核算稀释污

染物的需水量取决于所需稀释水量最大的污染物。由于磷肥较难溶解，且溶解的磷容易被土壤中的胶粒所吸附，形成比较稳定的物质，在土壤中不易被释放和移动，钾离子能被土壤吸附，也不易流动。氮肥的使用容易污染水体且在化肥的使用中比例最高，对水体污染程度最大。所以在核算灰水足迹时选用稀释淋失氮的需水量，将氮肥施用量的 7.49%~22.50%作为淋失氮^[17]；水体中污染物浓度标准采用《地表水环境质量标准》中的三类水质标准中氮含量，即 10mg/L；由于自然本底浓度估计值很低且数据难获取，故采用《水足迹评价手册》取值，设为 0。

$$WF_{grey} = \frac{(\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{nat})}{Y}$$

式中:WFgrey 为作物灰水足迹, m³/kg; α 为淋溶率, 农作物化肥负荷进入地表水的比例; AR 为农作物每公顷农田的化肥施用量, kg/hm²; Cmax 为环境中的最大允许浓度, kg/m³; Cnat 为环境中自然本底浓度, kg/m³; Y 为作物单位面积产量, kg/hm²。

1.2.4 农业虚拟水流动核算方法

农作物生产是虚拟水的基础, 农作物在生育期内将区域水资源转换成农产品所包含的虚拟水。农作物虚拟水主要向本区域消费提供保障, 多余的农产品进行对外输出。区域消费包括内部产品的供给与外部产品输入。考虑到浏阳市统计数据中缺乏农产品的储存数据, 农业虚拟水流动的计算过程基于区域农产品储存量不变、本地输入农产品和输出农产品单位质量水足迹相等假设条件下进行, 具体方法为:

$$VWF = VW_{pro} - VW_{con}$$

式中:VWF 为虚拟水流动量; VWpro 为区域虚拟水生产量, m³; VWcon 为区域虚拟水消费量, m³。

$$VW = \sum_i^n V_i \times P_i$$

式中:VW 为农产品虚拟水含量, m³; Vi 为第 i 种产品单位质量虚拟水含量, m³/kg; Pi 为第 i 种产品的消费量, kg。

1.3 数据来源

本文采用的气象数据来自中国气象数据网和全国温室系统数据网, 选取浏阳市周边的 6 个站点 2018 年逐日地面气象观测数据, 包括日最高气温、日最低气温、日平均相对湿度、日平均风速、日降水量和日照时数等数据。水稻、蔬菜和油菜播种面积及其产量数据来自于《长沙市统计年鉴》和《浏阳市统计年鉴》。化肥使用数据来自《全国农产品成本收益汇编》。土壤数据来自世界土壤数据库中国数据集。

2 结果与分析

2.1 农作物需水量与用水量

作物需水量是指作物在生长发育时所需要消耗的水量; 作物净灌溉需水量是生育期内必须依靠灌溉来补充的水量, 等于生育期内作物需水量与有效降水量之差; 实际用水量是指各水源工程为农作物提供的包括

输水损失在内的用水量之和，包括有效供水量和漏损水量。浏阳市主要农作物需水量如表 1，结果显示农作物绿水需水量:早稻为 4086m³/hm²，中稻为 5204m³/hm²，晚稻为 3738m³/hm²，油菜 2087m³/hm²，蔬菜为 3280m³/hm²;蓝水需水量:早稻为 1253m³/hm²，中稻为 2980m³/hm²，晚稻为 3148m³/hm²，蔬菜为 570m³/hm²;其中中稻和晚稻蓝绿水需水量都较大，而油菜蓝水需水量为 0。除晚稻外，其他农作物的蓝水用水量都高于净灌溉需水量。早、中、晚稻和油菜绿水用水量所占比例高于蓝水，蔬菜的绿水用水量低于蓝水。

表 1 作物净灌溉需水量、作物需水量与实际用水量(m³/hm²)

作物	净灌溉需水				蓝水实际用水		
	量	绿水需水量	蓝水需水量	总需水量	绿水实际用水	量	实际用水总量 W
	Irr. Req	CWUgreen	CWUblue	CWU	量 Wgreen	Wblue	
早稻	1186	4086	1253	5353	4086	1631.90	5731.90
中稻	3070	5204	2980	8184	5204	3151.20	8355.20
晚稻	3220	3738	3148	6886	3738	3151.15	6889.15
油（	10	2087	0	2582	2087	1293.93	3875.93
蔬菜	872	3280	570	3850	3280	3714.51	6994.51
总量	8358	18904	7951	26855	18395	12942.69	31846.69

2.2 农作物蓝水足迹与绿水足迹

浏阳市 2018 年这 3 种农作物的种植面积为 140160hm²，占总种植面积的 82.51%，农田灌溉用水总量为 40185 万 m³，其中，水稻年总耗水量和单位质量水足迹都较高，其中中稻两项数值在水稻中最高，分别为 27563.80 万 m³，1050m³/t，另外，中稻种植面积也是水稻中最大的，总耗水量在水稻里最高;蔬菜的单位质量水足迹最低，为 220m³/t，蔬菜年耗水总量最大，为 27831.16 万 m³;油菜虽然年总耗水量最小，为 11507.64 万 m³，但其单位质量水足迹最高，为 2370m³/t。

表 2 主要农作物蓝水足迹和绿水足迹

农作物	年总耗水量(万 m ³ /a)			作物总产量_ (t/a)	单位质量农作物耗水量(m ³ /t)		
	蓝水	绿水	总量		蓝水	绿水	总量
早稻	2997.80	7531.70	10529.50	109393	270	690	960
中稻	10395.81	17168.00	27563.80	261281	400	660	1050
晚稻	6088.02	7221.82	13309.84	139104	440	520	960
油（	3841.68	7665.96	11507.64	48543	790	1580	2370
蔬菜	14780.04	13051.12	27831.16	1281437	120	100	220

2.3 农作物灰水足迹

利用每种农作物氮肥施用量，通过农作物灰水足迹公式计算得到农作物灰水足迹及单位面积灰水足迹值，结果见表 3。

表 3 主要农作物灰水足迹

农作物	单位面积氮肥量 (kg/hm ²)	作物总产量 (t/a)	总灰水 足迹 (万 m ³ /a)	单位质量 灰水足迹 (m ³ /t)
早稻	116.25	109393	3828.76	350
中稻	144.15	261281	8622.27	330
晚稻	116.40	139104	4030.01	290
油菜	85.20	48543	4563.04	940
蔬菜	202.50	1281437	14095.80	110

由表 3 可知,2018 年浏阳市主要农作物灰水足迹总量为 35143.89 万 m³(约为年均农业用水量的 81.6%):其中早稻灰水足迹最小为 3828.76 万 m³,蔬菜灰水足迹最大,为 14095.80 万 m³,说明农作物单位面积氮肥施用总量越大,其灰水足迹总量越大。从单位质量灰水足迹来看,油菜的水足迹最大,为 940m³/t,蔬菜的水足迹最小,为 110m³/t,说明单位质量灰水足迹与产量密切相关。

3 水足迹核算基础上的比较分析

3.1 水足迹计算结果的横向比较分析

浏阳市水稻平均水足迹为 1316m³/t,比全国平均水平(生产单位质量水稻所需水量为 1592m³/t)及世界平均水平(生产单位质量水稻所需水量为 2628m³/t)低得多,但是其绿水占比要低于世界平均水平,灰水足迹占比约为世界平均水平的 2 倍,是发达国家的 2~4 倍;浏阳市油菜单位质量水足迹(3310m³/t)虽然低于世界平均水平(4300m³/t)和美国(5883m³/t),但其绿水足迹占比相较于世界平均水平和发达国家要低得多,而蓝水足迹和灰水足迹占比极高^[18];浏阳市蔬菜单位质量水足迹为 380m³/t,其中 3 种足迹占比分别为 23.6%、31.6%、42.1%,蓝水和灰水足迹占比较世界平均水平和发达国家高。从以上结果可以发现浏阳市油菜和蔬菜的蓝水足迹、灰水足迹明显高于世界平均水平和发达国家,而绿水使用占比低,这与作物生产的气候条件及用水效率、农业生产技术水平和管理等因素有关,浏阳市需要提高农作物生产用水效率,缓解水资源紧缺的压力。推进测土配方技术的普及,按需合理使用化肥,增加有机肥和水溶肥的使用,减少农业生产污染。

江苏省作为东部农业发达区,经济条件和农业环境好,农业现代化发展较为完善,而浏阳市作为县域经济与县域综合发展全国百强前十,经济发展状况在中部地区较好,成立了较多专业种植合作社、农机合作社和综合农事服务社,农业发展环境较好,通过与农业发达区的江苏省对比,有利于浏阳市寻找农业发展的不足。通过查阅资料文献^[19],江苏省水稻单位质量水足迹为 961m³/t,其中蓝水足迹为 177m³/t,绿水足迹为 594m³/t,灰水足迹为 190m³/t,与江苏省对比,浏阳市的水稻水足迹和单位质量水足迹普遍高于江苏,水稻的水足迹占比分别为 47.3%、28.1%和 24.5%,绿水使用占比与江苏省的 61.8%相比较低。但是浏阳市农业种植的气象条件较好,降水明显多于江苏省,分析其原因发现,江苏省水稻生育期内的蒸散发量较浏阳低,有效降水量又相对较高,导致净灌溉需水量较少,加之绿水利用效率较高,灌溉用水量减少;在农作物单位面积水足迹保持不变的情况下,农作物单位面积产量越高,生产单位产量农作物的水足迹就越低,江苏省的单位粮食产量较浏阳市高,这也是其单位质量水足迹低的一个重要原因。与东部农业发达地区相比,浏阳市作物种植密度较低,绿水相对于东部地区需求量要低,加之灌溉设施较为陈旧,渗漏严重,水资源管理方式较为原始,在灌溉过程中导致大量水资源浪费,绿水使用率低,蓝水浪费严重,导致其单位农业用水量较高。

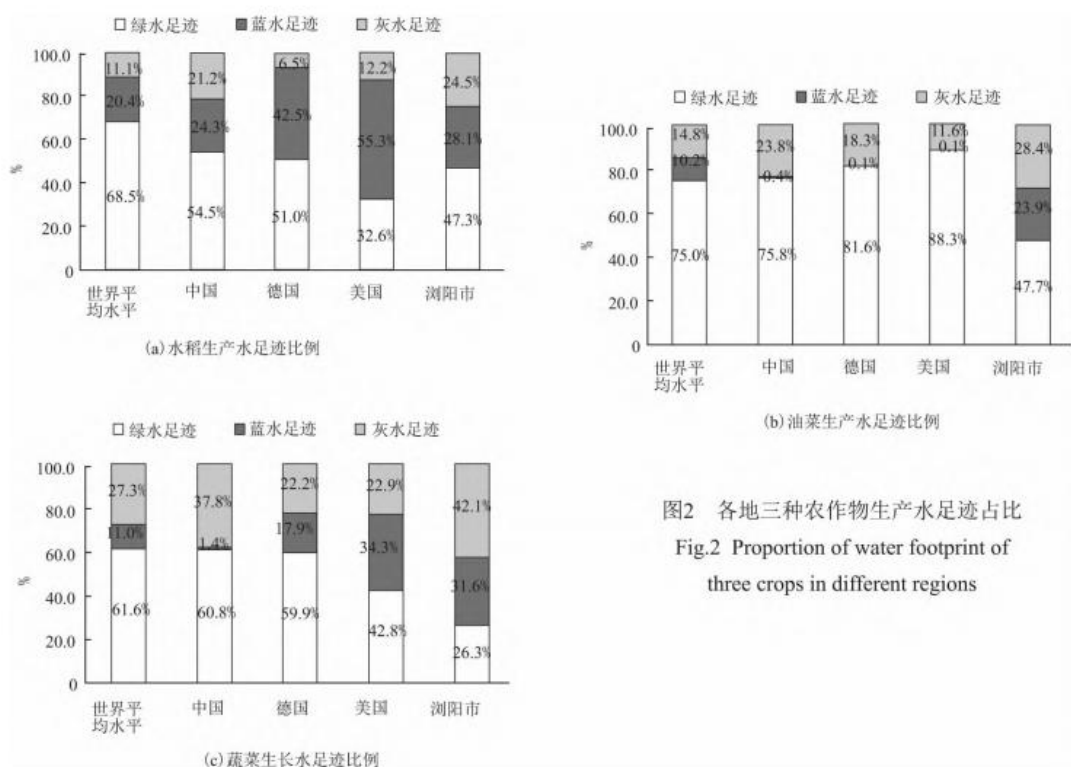


图2 各地三种农作物生产水足迹占比
Fig.2 Proportion of water footprint of three crops in different regions

表 4 浏阳市水稻水足迹与湖南省平均值的比较

(单位: m^3/hm^2)

农作物	湖南省			浏阳市		
	Wgreen	hblue	h	Wgreen	Wblue	W
早稻	3144.38	2553.87	5698.25	4086	1631.90	5731.90
中稻	3771.93	3594.12	7366.05	5204	3151.20	8355.20
晚稻	3327.95	2702.97	6030.92	3738	3151.15	6889.15

与湖南省整体对比, 由于浏阳市的水稻生产水足迹普遍高于湖南省平均水平。主要原因是绿水占作物需水量的比例较高, 这一比例反映了有效降水的利用率, 绿水的利用程度越高, 所需要的灌溉用水就越少。作物绿水需水量的分布与作物总需水量是一致的。与湖南省整体情况相比, 浏阳市的绿水利用比例较高, 这与浏阳市的农业开发强度及降水情况密切相关, 浏阳市农业与中部地区相比较为发达, 作物种植密度也较高, 绿水需求量较大, 利用程度较好。浏阳市其他的农作物, 比如棉花、玉米和小麦等农作物对绿水需用量比例较高, 有效降水基本上可以满足其生育期内生长需要。但是根据湖南省农作物水足迹现状来看, 单位质量水足迹远远高于全国的平均水平, 主要是因为其水资源丰富, 作物生长期间在充分利用雨水的情况下, 也进行了大量的灌溉补水, 结果导致单位质量作物用水率低。这些农作物其实只要充分利用绿水资源, 提高绿水利用效率, 可以减少蓝水需水量, 节约水资源。

3.2 虚拟水输出分析

浏阳市在行政区划上属于长沙市。作为主要农业区, 浏阳市也是为长沙市区及周边提供蔬菜和其他农产品的主要地区。因为有农产品较多的输出, 因此有关农产品虚拟水的方方面面就不容忽视。在进入虚拟水问题之前, 有必要进一步了解一下浏阳市涉及到的水资源情况。水系方面浏阳市通过浏阳河与长沙县和长沙市区相连, 通过捞刀河与长沙县相连。据《浏阳市水资源综合规划—2018》, 浏阳市域内水资源消费量

2017、2018 年分别为 6.74 和 6.93 亿 m³，其中农业用水(灌溉用水加其他农牧业用水)分别为 4.87 亿 m³、4.30 亿 m³，农业用水占总用水量的份额分别为 72%和 62%。考虑农产品虚拟水的输出，根据《浏阳市统计年鉴》中农产品消费量和农作物产量，以及浏阳市贸易数据，计算得出浏阳市主要农产品满足本地需求后，剩余的大约 20%供给浏阳市农作物和畜牧业生产，其余的 80%都供给长沙市区和周边的长沙县、望城等县区。以 2018 年为例，3 种主要农作物水稻、油菜和蔬菜，以农产品虚拟水输出到浏阳市以外的长沙市域的总量约为 4 亿 m³(绿水和蓝水总和)。如果加上灰水部分，虚拟水的总量达到 5.67 亿 m³。这两个虚拟水量占到 2018 年农业用水量的 93%和 132%。

表 5 浏阳市输出水足迹（80%剩余农作物生产水足迹）（万 m³）

农作物	绿水	蓝水	灰水	蓝绿水总和	蓝绿灰水总和
水稻	12498.61	7419.36	6482.92	19917.97	26400.88
油菜	932.20	466.10	554.60	1398.30	1952.90
蔬菜	8590.54	10308.65	9449.60	18899.20	28348.80
总量	22021.36	18194.11	16487.11	40215.47	56702.58

沙市区关系中，浏阳市作为上游区和主要农产品供应输出区，一方面为下游提供水资源，即物理水，另一方面也为下游通过贸易流输出虚拟水。作为同一流域的上下游，上游为下游输出的虚拟水越多，下游也就越有责任共同保护流域水资源的可持续开发和利用，即“谁受益，谁负责”的原则也在这里适用。从目前出台的《长沙市水资源规划 2018—2020》看，规划更多强调了下游的长沙市工业和城市发展用水，对上游赋予水资源利用空间、考虑上游未来提供更多更优质农产品需水以及共同承担上游水资源保护上考虑较少。“以水定产，量水而行”的科学内涵不仅应包含以水资源承载力为上限的种植结构优化和以工程节水、农艺节水和生物节水为主要抓手的产中节水措施，也应重视产后的虚拟水流动调控与管理。管理节水的内涵和外延可由此拓展。

3.3 对区域村镇水资源保障能力和水环境承载力提升的启示

浏阳市市域面积 5007km²。按照平均降水量 1680mm 计算，区域内获得的年降水总量约为 84 亿 m³。按照浏阳市分区水资源统计可以得知，浏阳市域多年平均水资源总量合计为 44.59 亿 m³，可以粗略估算市域内植物蒸腾以及区内水面蒸散发总量为 39.41 亿 m³(这部分中包括了植物截留、下渗以及储存的变化量)。这一部分中包括主要农作物绿水足迹的 5.26 亿 m³，占总绿水部分的 13.3%。市域水资源总量中，浏阳河、捞刀河和南川河水系工农业和城镇生活用水的分区总量分别为 3.5 亿、2.4 亿和 0.9 亿 m³，总用水量 6.8 亿 m³，其中 71%是农业用水。水足迹计算显示，除主要农作物生产绿水足迹 5.26 亿 m³外，蓝水足迹和灰水足迹分别为 3.8 亿和 3.5 亿 m³。区域降水总量未来除受到气候变化影响有增加趋势外，波动幅度也随之增加^[20]。浏阳市作为农业区和为下游以及长沙市区提供饮用水的水源地，绿水部分随着农业发展，包括农产品更加丰富，以及区域生态环境的进一步改善，区域绿水部分会由目前的 46.9%趋向增加。全球陆地方面，植物蒸腾和蒸散发占到降水总量的 64.6%。降水量一定时，储存在土壤中的绿水越多，存储在江河湖泊、湿地和地下水中的蓝水越少，即可利用水资源的量越少，造成工农业和生活各需水的加剧竞争状态。另外需要注意的是，灰水作为提供达到水质排放标准的稀释水和处理过程中用水，农业方面国际参考指标为蓝水与灰水比例为 43:57^[21]，灰水足迹要高于蓝水足迹。水资源规划是用来协调各种水资源利用冲突，是支持和提高水资源运行管理的重要工具，核算农作物的具体需水量及其水足迹是对农业用水进行精细化管理的第一步。浏阳市种植的主要农作物中，净灌溉需水总量约为 22027.03 万 m³，但由于浏阳市灌溉系统及水资源管理较为落后，实际灌溉用水总量比净灌溉需水总量多 16076.31 万 m³。这些农作物需水量及其水足迹的核

算可以实现和维持农业高效率用水提供理论依据,对浏阳市水资源规划中农业水资源配置具有重大意义。从绿水需求量出发,绿水的利用程度与当地降水强度及其农业发展程度关系紧密,农业较为发达的地区,作物种植密度高,对绿水资源的需求量也多。由于湖南省为大陆性亚热带季风湿润气候,光热水资源丰富且基本同步,浏阳市降水丰沛,有较好的先天条件,是天然的宜农区域,在农作物生产过程中,绿水足迹的比例高于蓝水,体现出绿水在作物生产中具有重要地位,为了充分利用绿水资源,应确保绿水使用率高的农作物播种面积不减少,通过调整农作物的种植结构,增加绿水足迹比例高的农作物种植面积,提高绿水的利用效率,减少灌溉用水量,降低蓝水对环境的影响,让农作物的需水量可以更多地依靠绿水资源。

从村镇水资源承载力提升路径上讲,由于农业发展和农村环境面临的水资源问题在流域内更加突出,所以一方面要从更小尺度上,比如村镇层面分析当前水资源和水环境状况和改善路径,这点包括比如加强村集体所属的山塘、水井以及其他水利设施的利用和管理;另一方面要从农业生产水足迹上做文章,更高效地利用蓝水资源,合理控制灰水足迹,

4 结论和讨论

通过对浏阳市主要农作物水稻、油菜、蔬菜的需水量及作物生产水足迹的核算,揭示了不同的农作物在其生育期内对绿水、蓝水资源的不同需求特点,结论如下:

(1)浏阳市早稻、中稻、晚稻、油菜和蔬菜水足迹总量分别为 14358.26 万 m^3 、36186.07 万 m^3 、17339.85 万 m^3 、16070.68 万 m^3 、41926.96 万 m^3 ,除蔬菜外,其余农作物的绿水利用比例都高于蓝水,其中,早稻对绿水利用效率最高,但水稻用水规模最大,超过总用水量的一半,在今后发展中,要适当调整早中晚稻的种植结构和控制种植规模,降低浏阳市的水资源压力。

(2)浏阳市早稻、中稻、晚稻、油菜和蔬菜的单位质量水足迹分别为 1310、1390、1250、3310、380 m^3/t 。油菜虽然灌溉需水量低,但其单位质量油菜所需水量最高,在今后需要考虑减少其种植面积或者提高产量,以降低其单位质量水足迹和总用水量。

(3)与发达国家和我国东部地区相比,浏阳市主要农作物的绿水足迹占比低,绿水资源利用率低,蓝水足迹和灰水足迹占比皆高于发达国家,存在过度灌溉和过度施肥现象;与湖南省相比,浏阳市的绿水利用比例较高且低于蓝水,这与浏阳市的农业开发强度及降水情况密切相关。

浏阳市作为农产品输出区,相对于长沙市,浏阳市水资源丰富,经济较之为落后,长沙市第一产业比重小,且对农业生产用水的投入不够重视,农产品生产向浏阳市转移和集中的现象,在未来一段内将长期存在,可能有增强趋势,这对浏阳市水资源可持续发展带来隐患,为了扭转这一态势,应尽快实施农作物生产虚拟水补偿政策,从农作物虚拟水输入区的长沙市征收,补偿给虚拟水输出区浏阳市,促进浏阳市农业基础设施建设,提高农业水资源利用效率,促进流域可持续发展。

作为讨论和前瞻,对于一个相对地域范围较小区域内农业生产水足迹的研究,一方面丰富了水足迹的研究案例,对于形成区域和品种的参照值提供了参考;另一方面也帮助区域通过对比和比较,有目的地减少农作物生产水足迹。另外,通过水足迹以及虚拟水的计算,可以更全面更深刻地了解区域水资源从降水到为区域外输水的水循环的组成部分以及各组分数量,从转化的角度前瞻性地理解区域水资源,更好地规划管理利用水资源。

参考文献:

- [1] 段学军,王雅竹,康珈瑜,等. 村镇建设资源环境承载力的理论基础与测算体系 [J]. 资源科学, 2020, 42(7):1236—1248.
- [2] 逢焕成. 我国节水灌溉技术现状与发展趋势分析 [J]. 中国土壤与肥料, 2006(5):1—6.
- [3] C J V R SMARTY, P GREEN, J SALISBURY, et al. GlobalWater Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth [J]. Science, 2000, 289(5477) .
- [4] A Y HOEKSTRA. Human appropriation of natural capital: Acomparison of ecological footprint and virtual water foot print analysis [J]. Ecological Economics, 2009, 68: 1963—1974.
- [5] A K CHAPAGAIN, A Y HOEKSTRA, H H G SAVENIJE, et al. The water footprint of cotton consumption: An assessmentof the impact of worldwide consumption of cotton products on thewater resources in the cotton producing countries [J]. Ecological Economics, 2005, 60(1) : 186—203.
- [6] A K CHAPAGAIN, A Y HOEKSTRA. The blue, green andgrey water footprint of rice from production and consumption perspectives [J]. Ecological Economics, 2011, 70 (4) : 749 —758.
- [7] M M MEKONNEN, A Y HOEKSTRA. A global and high—resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat [J]. Hydrol. Earth Syst. Sci, 2010, 14: 1259—1276.
- [8] 金建新, 桂林国, 何进勤, 等. 基于 CROPWAT 模型的宁南灌区春玉米非充分灌溉制度研究 [J]. 西北农业学报, 2016, 25(10):1465—1471.
- [9] A Y HOEKSTRA. Green—blue water accounting in a soil water balance [J]. Advances in Water Resources, 2019, 129(Jul.):112—117.
- [10] 操信春, 崔思梦, 吴梦洋, 等. 水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价 [J]. 水利学报, 2020, 51(10):1189—1198.
- [11] 刘巍, 李雨晴, 付强, 等. 黑龙江省粮食水足迹时空分布规律与影响因素分析 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(8):214—222, 335.
- [12] 马静, 汪党献, 来海亮, 等. 中国区域水足迹的估算 [J]. 资源科学, 2005(5):96—100.
- [13] 卓拉, 栗萌, 吴普特, 等. 黄河流域作物生产与消费实体水—虚拟水耦合流动时空演变与驱动力分析 [J]. 水利学报, 2020, 51(9):1059—1069.
- [14] A Y HOEKSTRA, A K CHAPAGAIN, M M ALDAYA, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard [M] London: Earthscan, 2011.
- [15] 长沙市 2018 年水资源公报 [Z]. 长沙:长沙市水利局, 2020. 07.
- [16] 浏阳市水资源综合规划 [Z]. 长沙:浏阳市水务局, 2018. 12.

[17]王丹阳,李景保,叶亚亚,等.一种改进的灰水足迹计算方法[J].自然资源学报,2015,30(12):2120—2130.

[18] M M MEKONNEN, A Y HOEKSTRA. National water foot print accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption[J]. UNESCO—IHE Institute for Water Education, 2017.

[19]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.

[20] 于泽兴,胡国华,陈肖,等.降水变化和人类活动对浏阳河流域径流的影响 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(11):6—11.

[21] J J BOGARDI, B M FEKETE, C J V R SMARTY. Planetary boundaries revisited: A view through the ‘water lens’ [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5 (6) :581—589.