

# 新疆 2000—2012 年主要农作物虚拟水含量计算与分析

张 润<sup>1,2</sup>, 刘志辉<sup>2,3,4</sup>, 秦 艳<sup>1,2</sup>, 郭小云<sup>1,2</sup>, 聂 敏<sup>1,2</sup>, 苏向明<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 教育部绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学 干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046; 4. 干旱半干旱区可持续发展国际研究中心, 乌鲁木齐 830046)

**摘 要:**从农作物虚拟水角度出发,基于彭曼公式结合 CROPWAT 软件计算、分析了新疆 2000—2012 年主要农作物的单位质量农作物虚拟水含量和农作物的虚拟水总量。结果表明:新疆主要农作物虚拟水含量从高到低为:棉花、小麦、玉米、薯类、蔬菜;从 2000—2012 年,各类作物的单位质量虚拟水含量呈下降趋势,但各类农作物虚拟水总量大体上均呈现上升趋势,主要农作物虚拟水含量下降与新疆各地区采取节水灌溉技术、提高单位面积产量密切相关,虚拟水总量大幅度增加主要是因为农作物的种植面积的提升和产量大幅度的提升。从虚拟水视角对农作物政策和结构进行调整,为新疆实施水资源管理提供决策,同时对于新疆的生态保护具有重要意义。

**关键词:**虚拟水; 新疆; 主要农作物

**中图分类号:**TV213.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)04-0265-04

## Calculation and Analysis of Major Crop Virtual Water in Xinjiang from 2000 to 2012

ZHANG Run<sup>1,2</sup>, LIU Zhihui<sup>2,3,4</sup>, QIN Yan<sup>1,2</sup>, GUO Xiaoyun<sup>1,2</sup>, NIE Min<sup>1,2</sup>, SU Xiangming<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xi-jiang University, Urumqi 830046, China;

3. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 4. International Center for Desert Affairs-Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** From the perspective of virtual water of crops, the amount of virtual water per unit weight of major crops and the total amount of virtual water of major crops were calculated and analyzed based on Penman formula combining CROPWAT software from 2000 to 2012 in Xinjiang. The results showed that the virtual water of major crops was ranked from high to low as cotton, wheat, corn, potato, vegetable; the amount of virtual water per unit weight of major crops in Xinjiang decreased, but the total amount of virtual water generally showed the upward trend. The former was closely related with each region of Xinjiang adopting water-saving irrigation technology and increased yield per unit area, and the later was mainly due to the expansion of planting area and the great improvement of yield. From the perspective of virtual water, we can adjust the farming policy and crop planting structure, and provide decision for implement of water resource management, having the important significance for ecological protection in Xinjiang.

**Keywords:** virtual water; Xinjiang; major crops

虚拟水是 Tony Allan 提出的新概念<sup>[1-2]</sup>,虚拟水战略<sup>[3-5]</sup>是指贫水国家或地区通过贸易的方式从富水国家或地区购买水密集型农产品(尤其是粮食)来获得水和粮食安全。2003 年来,虚拟水战略作为一种解决水资源短缺地区水资源安全的新思路引进到中国。虚拟水战略成为水资源匮乏的国家和地区平衡水赤字战略性手段,是缓解水危机和水安全的一种有效调控措施。相对于实体水运输和跨流域调水工

程而言,具有更易操作性、更为便捷求成本较低的特点,为缓解经济发展与资源短缺之间的矛盾提供了一条新思路。

虚拟水战略是水资源社会化管理的体现,是水资源管理进入到最高层次而寻求的解决方案,虚拟水战略将自然资源的稀缺上升到为社会资源的稀缺高度,通过制度及结构的调整来解决水作为自然资源区域性稀缺的问题,促进了水资源管理观念和制度创新。

收稿日期:2014-06-26

修回日期:2014-08-26

资助项目:水利部公益性行业科研专项(2013011103);国家自然科学基金重点项目(41130531);国家自然科学基金面上项目(41171023)

第一作者:张润(1989—),男,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为水文学与水资源。E-mail:zhangrundili@163.com

通信作者:刘志辉(1957—),男,新疆石河子人,教授,博士生导师,主要从事水文学与水资源,资源环境与空间决策支持等研究。E-mail:lzh@xju.edu.cn

新疆实施虚拟水战略的意义<sup>[6]</sup>:第一,当前新疆水资源与浪费、短缺与污染、短缺与管理粗放多重问题交织。因此,“开源节流并重,节流优先,治污为本”依然是当前及今后新疆水资源管理始终要坚持的原则。第二,新疆具有独特的地缘优势,与比邻国家形成了资源优势互补关系,且具有较明显的技术比较优势。因此要充分发挥这种潜在优势,鼓励、支持技术密集型产品的生产和出口,充分利用资源之间的替代效益,以缓和水资源紧缺现状。第三,新疆生态环境十分脆弱,正确运用虚拟水战略不但不影响当地的社会经济发展,而且有助于生态环境的恢复和重建。同时当前新疆跨越式发展战略为虚拟水战略的实施提供了宽松的政策环境和体制保障。中国虚拟水研究起步较晚,特别是对新疆等干旱区的虚拟水缺乏深入研究,大多数研究集中在虚拟水战略意义探讨<sup>[7-9]</sup>,而对定量分析和实际应用方面的研究较少。本文计算和分析了新疆 2000—2012 年主要农作物的单位质量虚拟水含量和主要农作物的虚拟水总量,旨在通过对各主要农作物的虚拟水含量及其变化过程的分析,为农作物结构调整和水资源管理提供依据。

## 1 研究区概况

新疆位于欧亚大陆腹地内陆干旱区,气候属典型大陆性干旱气候,干燥少雨,蒸发强烈。山区降水丰沛,98%的水资源形成于山区,而平原区和沙漠区,降水量除少量补给地下水外很少或不产生地表径流,是径流的散失区和无流区。新疆多年平均年降水总量为 2 544 亿  $\text{m}^3$ ,折合年降水深 154.8 mm,为全国平均降水深的 23%<sup>[10]</sup>。其中,山区降水量占全疆降水总量的 81.1%,平原区占 18.9%。多年平均地表水资源量为 789 亿  $\text{m}^3$ ,地下水水资源量为 331 亿  $\text{m}^3$ ,水资源总量为 840 亿  $\text{m}^3$ 。新疆水资源主要由降水、高山冰雪融水补给,由河流经山区排泄到平原。通过水循环,蒸发消耗或消失于沙漠之中。新疆面积广阔,山地、荒漠和绿洲交错,是典型的山地—绿洲—荒漠生态系统,生态系统脆弱。其中,绿洲是受干旱区自然和人文因素双重影响的自然生态系统,比一般生态系统更脆弱<sup>[11]</sup>。

新疆是农业大省,水资源主要用于农业生产,工业产品的虚拟含水量相对于农产品而言数量较少,生产流程较为复杂,计算难度大,暂忽略不计,所以把农作物虚拟水含量的计算作为新疆虚拟水计算中的重要部分。

## 2 研究方法

农作物产品生产需要的水资源主要取决于农作

物的类型、生长区域的自然地理条件、灌溉条件和管理方式等。因此农产品的虚拟水计算就是对特定地点农产品需水量的一种体现<sup>[12]</sup>。

### 2.1 农作物中的虚拟水计算方法

根据联合国粮农组织(FAO)的作物需水量和作物产量资料,计算在不同国家或地区每种农作物的虚拟含水量。

$$\text{SWD}(n, c) = \frac{\text{CWR}(n, c)}{\text{CY}(n, c)}$$

式中:SWD( $n, c$ )——区域  $n$  作物  $c$  的虚拟含水量( $\text{m}^3/\text{t}$ );CWR( $n, c$ )——区域  $n$  作物  $c$  生长期内每公顷的需水量( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ );CY( $n, c$ )——区域  $n$  作物  $c$  的产量( $\text{t}/\text{hm}^2$ )。

作物需水量 CW 是作物整个生长期内累积的土壤蒸发量  $\text{ET}_c$ ( $\text{mm}/\text{d}$ )计算获得:

$$\text{ET}_c = \text{ET}_0 \times k_c$$

式中:ET<sub>c</sub>——区域  $n$  作物  $c$  生长期内土壤蒸发量( $\text{mm}/\text{d}$ ); $k_c$ ——作物系数,是说明实际作物相对于参考作物的覆盖度和表面粗糙度的差异,是实际作物与参考作物的物理和生理等各种因素的不同的综合反映。

参考作物的需水量根据联合国粮农组织的推荐可采用修正的标准彭曼公式计算  $\text{ET}_0$ <sup>[13]</sup>:

$$\text{ET}_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273}(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

式中: $R_n$ ——作物表面的净辐射量( $\text{MJ}/\text{m}$ ); $G$ ——土壤热流量( $\text{MJ}/\text{m}$ ); $T$ ——平均气温( $^{\circ}\text{C}$ ); $U_2$ ——离地面两米高出风速( $\text{m}/\text{s}$ ); $e_a$ ——饱和状态下的蒸气压力( $\text{kPa}$ ); $e_d$ ——实际蒸气压力( $\text{kPa}$ ); $\Delta$ ——蒸气压力曲线斜率( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ); $\gamma$ ——干湿度常量( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ )。

### 2.2 数据资料

农作物虚拟水含量是通过使用联合国粮农组织推荐的 CROPWAT 8.0 软件、CROP 数据、CLIMATE 数据库来计算的。CROPWAT 8.0 软件采用联合国粮农组织推荐的修正彭曼公式,使用在 CROP 数据库、CLIMATE 数据库中提取相关地区的气候、土壤系数计算出参考作物的需水量,然后运用彭曼公式,引入不同作物参考系数  $K_c$  对数值进行修正,进而得到所选作物的需水量。然后再利用相关的统计年鉴提取作物单位面积产量,从而得出所求作物单位质量虚拟水含量,主要农作物的种植面积和产量数据来自 2001—2013 年新疆统计年鉴。

## 3 结果与分析

### 3.1 作物需水量与单位面积产量

选取新疆本地种植结构比例和耕地面积较大的

农作物,有小麦、玉米、棉花、薯类、蔬菜,通过 CROP-WAT 8.0 软件计算出各地区主要农作物的需水量,求出新疆主要农作物平均需水量,计算结果如表 1 所示;

表 1 新疆主要农作物需水量							mm
地区	春小麦	冬小麦	春玉米	夏玉米	棉花	薯类	蔬菜
哈密	659.4	710.7	813.2	450.6	1014.3	782.4	570.5
吐鲁番	590.4	671.8	851.1	472	1055.5	823.8	583.2
若羌	685.2	885.9	925.4	522.5	1170.1	885.7	660.2
和田	524.8	686.6	713.5	394.8	905.5	688.1	514.6
喀什	539.6	621.1	747.2	396.9	917.3	718.5	529.9
库车	508.3	593.2	721.9	402.2	902	698.4	699.9
乌鲁木齐	448.4	432.7	601.1	389.8	832	650.4	443.2
伊宁	450.2	691.5	591.1	376.3	823.2	635	444.1
精河	469.4	471.8	596.6	375.5	824.4	646.4	460.3
和布克赛尔	451.6	463.4	576.6	360.6	794.5	620.8	463.1
阿勒泰	511.5	482.7	639.2	393	877.5	688.4	497.3
富蕴	458.5	404.2	562.6	316.9	742.4	599.9	446.5
平均需水	524.8	593	695	404.3	904.9	703.2	526.1

表 2 新疆主要农作物的单位面积产量						kg/hm <sup>2</sup>
年份	小麦	玉米	棉花	薯类	蔬菜	
2000	4837	7798	1482	28336	41318	
2001	5027	7761	1390	28897	38642	
2002	5154	7552	1589	30223	41103	
2003	5361	8065	1543	30054	46448	
2004	5257	7675	1554	29216	49522	
2005	5260	7643	1690	32111	48807	
2006	5409	7792	1607	33567	51281	
2007	5666	7487	1627	30576	49983	
2008	4507	7635	1808	29878	37617	
2009	5469	7343	1791	33455	52760	
2010	5567	6448	1697	27710	57130	
2011	5349	7111	1757	25414	57845	
2012	5333	6919	2058	23543	53953	

3.2 虚拟水含量与虚拟水总量

用单位面积农作物需水量除以该农作物的单位面积产量,可以得到单位质量农作物的虚拟水含量,计算结果如图 1 所示;最后,用单位质量农作物的虚拟水含量与总产量相乘可得到生产农作物的虚拟水含量,计算结果如图 2 所示。因为统计年鉴相只有小麦、玉米的相关数据,冬小麦和春玉米的单位面积需水量大,故小麦、玉米部分分别取冬小麦和春玉米的单位面积需水量值。

由图 1 可以看出,新疆主要农作物单位虚拟水含量,从高到低顺序为:棉花、小麦、玉米、薯类、蔬菜。棉花的单位虚拟水含量远大于其他农作物,以 2012 年为例,生产 1 kg 的棉花需要 4.397 0 m<sup>3</sup> 的水,而生

产 1 kg 小麦、玉米分别需要 1.111 9,1.004 5 m<sup>3</sup> 的水,所以生产棉花的耗水量是小麦的近 4 倍,玉米的 4 倍,说明棉花的耗水量最大,薯类和蔬菜的耗水量较小。从农作物单位虚拟式含量变化的时间序列来看,小麦、玉米、薯类、蔬菜各年份的虚拟水含量较为稳定,变化不大;棉花的虚拟水含量波动较大,总体呈下降趋势,从最高虚拟含水量的 6.510 1 m<sup>3</sup>/kg 下降到 4.397 0 m<sup>3</sup>/kg,这与政府重视农业节水灌溉政策,采取先进的滴灌技术和提高单位面积产量有关。

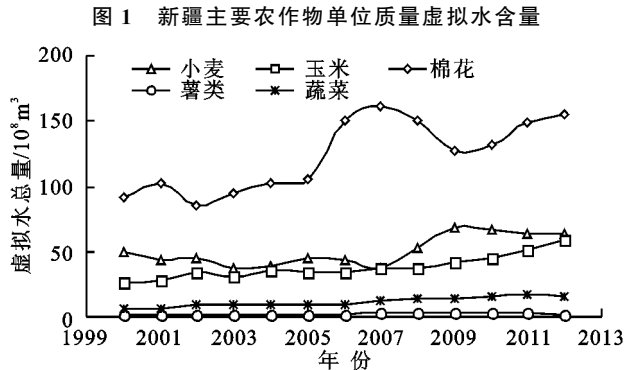
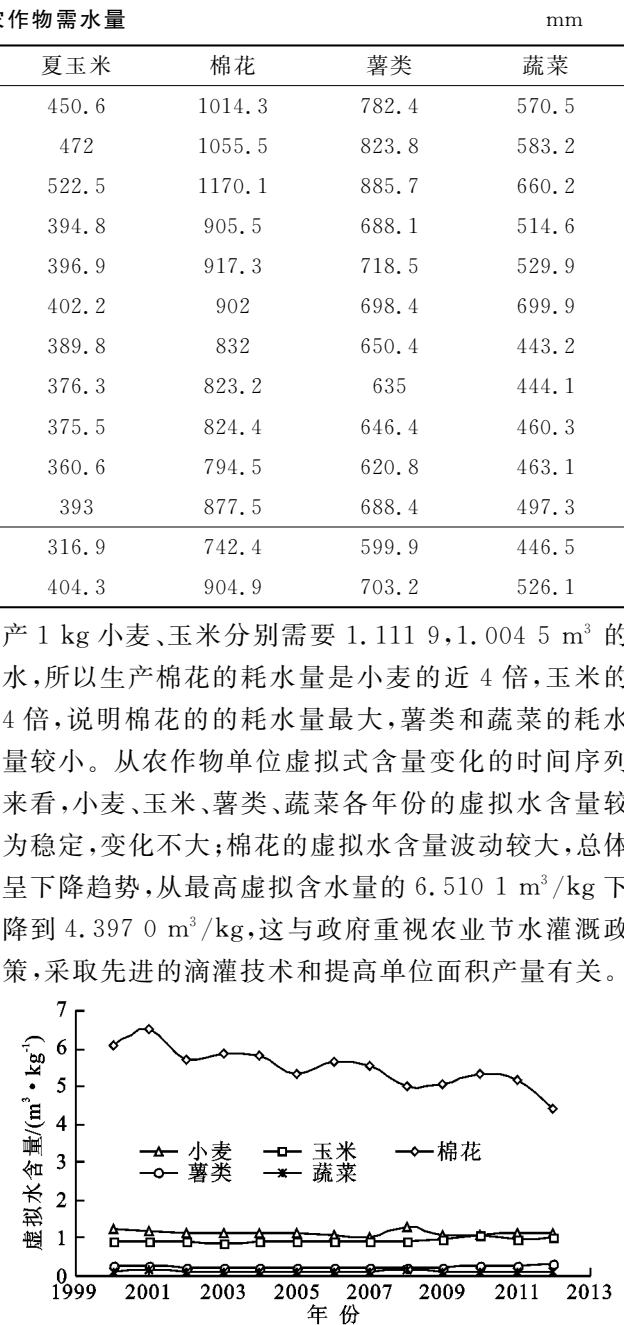


图 2 新疆主要农作物虚拟水总量

由图2可以看出,新疆主要农作物虚拟水总量,从高到低顺序为:棉花、小麦、玉米、蔬菜、薯类。棉花的虚拟水总量最大,一方面是因为单位虚拟水含量最高,另一方面是因为棉花是新疆的主要经济作物,种植面积大最大,产量较高。从农作物的虚拟水总量的时间序列来看,各类农作物虚拟水总量大体上均呈现上升趋势,其中棉花增幅最大,小麦、玉米次之,虽然农作物单位质量虚拟水含量有所下降,但农作物种植面积的扩大和产量的提高,使虚拟水总量仍保持上升趋势,其中棉花最为显著。说明各项农作物的用水规模都在不断扩大,棉花是用水大户。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

(1) 新疆主要农作物单位虚拟水含量,从高到低顺序为:棉花、小麦、玉米、薯类、蔬菜。从高到低为:棉花、小麦、玉米、薯类、蔬菜,棉花的单位虚拟水含量远大于其他农作物。(2) 新疆主要农作物虚拟水总量,从高到低顺序为:棉花、小麦、玉米、蔬菜、薯类,棉花的虚拟水总量远大于其他农作物。(3) 从时间序列来看,新疆主要农作物单位虚拟水含量大体上呈下降趋势,然而虚拟水总量呈上升趋势;主要农作物虚拟水含量下降与新疆各地区采取节水灌溉技术、提高单位面积产量密切相关,虚拟水总量大幅度增加主要是因为农作物的种植面积的扩大和产量大幅度的提升。

### 4.2 讨论

依据2000—2012年新疆主要农作物虚拟水分析的结论,可以做出相应的水资源管理决策:(1) 对农作物种植结构进行调整,适当减少高耗水作物如棉花的种植,适当增加蔬菜、薯类等低耗水农作物的种植面积。(2) 加强农产品的虚拟水贸易,新疆处于西北边缘,可以利用资源优势 and 地缘优势,出口低耗水农作物,进口高耗水农作物。

棉花的种植在新疆农业结构中占有很大的比例,也产生着巨大经济效益;减少棉花的种植比例,势必会影响当地经济收入来源。我们如何控制农作物的种植面积、减少高耗水农作物的种植,又要保证经济稳步发展,有待进一步研究。

虚拟水战略在新疆的实施,有利于生态环境的改

善。应用虚拟水战略调整农业种植结构和进出口贸易,解决粮食和农产品供应,平衡区域水资源利用赤字,并将节约下来的有限实体水转向生态环境恢复保护以及低耗水高效益产业,既可以保障经济的稳步发展,又可以增加生态环境用水,保障生态安全,使达到人地和谐。

### 参考文献:

- [1] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible [C]//Priorities for Water Resources Allocation and Management. London: ODA,1993:13-26.
- [2] Allan J A. Overall perspectives on countries and regions [C]// Rogers P, Lydon P. Water in the Arab World: perspectives and prognoses, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1994: 65-100.
- [3] Hoekstra A Y. Virtual Water: An introduction [C]// Hoekstra A Y. Value of Water Research Series No. 12, Netherlands: UNESCO-IHE, 2003. 13-23.
- [4] 程国栋. 虚拟水:中国水资源安全战略的新思路[J]. 中国科学院院刊, 2003, 4(1): 15-17.
- [5] 徐中民, 龙爱华, 张志强. 虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 861-869.
- [6] 刘荣霞, 夏建新, 张鹏鹏, 等. 新疆虚拟水战略研究[C]//中国可持续发展研究会. 2012 中国可持续发展论坛 2012 年专刊(一). 2013.
- [7] 王志良, 杨婷. 宁夏水资源可持续利用的理性思考[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 278-281.
- [8] 邢海虹. 基于 GIS 的陕南水源区农产品虚拟水空间差异分析[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 300-304.
- [9] 王新华, 张志强, 龙爱华, 等. 虚拟水研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2005(1): 27-30.
- [10] 罗岩, 王新辉, 沈永平, 等. 新疆内陆干旱区水资源的可持续利用[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 283-287.
- [11] 沈浩, 朱海涌. 浅析新疆生态环境现状, 问题及对策[J]. 干旱环境监测, 2008, 22(3): 161-164.
- [12] 田贵良. 虚拟水贸易论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [13] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[R]. FAO, Rome, 1998.