

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0030

黄会平,李新生,韩宇平,等.京津冀居民膳食虚拟水消费差异及影响因素分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):20-28.
HUANG H P, LI X S, HAN Y P, et al. The differences of residents' dietary virtual water consumptions and their influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 20-28. (in Chinese)

京津冀居民膳食虚拟水消费差异及影响因素分析

黄会平^{1,2}, 李新生¹, 韩宇平^{1,3}, 贾冬冬¹, 李昕阳¹

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450046; 2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 郑州 450046;
3. 河南省水环境治理与模拟重点实验室, 郑州 450046)

摘要:虚拟水消费变化对水资源需求有很大影响,分析居民膳食虚拟水消费及其差异性对于构建健康的消费模式有重要意义。核算并分析2000—2015年京津冀居民膳食虚拟水的消费情况,并对造成虚拟水消费差异的影响因素进行分析。结果表明:北京、天津、河北年均居民膳食虚拟水消费为98.33亿、57.44亿和240.02亿 m^3 ,虚拟水消费量呈明显的上升趋势,给区域水资源安全保障带来更大压力;人均居民膳食虚拟水消费区域差异明显,整体表现为城镇高于农村,北京市高于天津市高于河北省。居民膳食虚拟水消费多样性指数整体呈现上升趋势,城乡差异显著,城镇居民高于农村居民,但城乡差距逐渐缩小;肉类、食用油等单位质量虚拟水含量高的产品消费量不同是造成人均膳食虚拟水消费差异的重要原因,而且粮食生产力提高对于减少居民人均膳食虚拟水消费也有重要作用。根据研究结果,建议通过提高产品水产用水效率、构建合理的消费结构、引导健康的饮食消费习惯等对膳食虚拟水消费需求进行调控。

关键词:水资源;虚拟水;消费模式;通径分析

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The differences of residents' dietary virtual water consumptions and their influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region

HUANG Hui ping^{1,2}, LI Xinsheng¹, HAN Yuping^{1,3}, JIA Dongdong¹, LI Xinyang¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Support Engineering, Zhengzhou 450046, China;
3. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The characteristics of virtual water consumption have great impacts on water resources demand, therefore, it is of significance to investigate virtual water consumption and its differences of resident diet to build a healthy consumption model. This paper analyzed the residents' dietary virtual water consumption in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2015, and explored their influencing factors. Results showed that: The average annual dietary virtual water consumption during 2000-2015 was 9.833 billion, 5.744 billion and 24.002 billion in Beijing, Tianjin and Hebei, respectively. The virtual water consumption also showed an obvious increasing trend, which could bring critical pressure to the regional water resources security; The residents' dietary virtual water consumption per capita was higher in Beijing than those of Tianjin and Hebei, and was higher in urban than

收稿日期:2018-12-11 修回日期:2019-01-24 网络出版时间:2019-01-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190126.1458.008.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401402);国家自然科学基金(51679089;51709107)

作者简介:黄会平(1979—),女,河南许昌人,讲师,博士,主要从事水资源与地理信息系统研究。E-mail:13526882916@163.com

通信作者:韩宇平(1975—),男,宁夏彭阳人,教授,博士生导师,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:han0118@163.com

that of rural areas; The consumption diversity index of residents' dietary virtual water consumption also showed an upward trend, and it was higher in urban than that of rural areas as well. However, the gap was becoming narrowing gradually with time; The difference from consumption of high virtual water, such as meat and edible oil, was the main reasons for virtual water consumption. The improvement of grain productivity plays an important role in reducing the virtual water consumption per capita. The regulations of virtual water remand can be used to improve the efficiency of water consumption, construct a more reasonable consumption structure, and guide healthy consumption habits.

Key words: water resources; virtual water; consumption pattern; path analysis

水是人类活动和社会生产不可或缺的资源,水资源供需矛盾逐渐成为社会经济可持续发展的瓶颈。产品生产必然伴随着水资源的消耗,居民消费及其结构变化从消费端引导产品生产结构的变化,最终对水资源的可持续利用产生压力^[1]。从消费需求角度研究人类对水资源的利用状况,对解析不同消费模式对水资源的影响、探索水资源可持续利用方式具有一定的现实意义^[2]。

虚拟水表示产品在生产过程中所消耗的水资源量^[3],对其贸易和流动进行调控被认为是缓解水资源问题的新途径之一^[4-5]。从消费需求角度探究虚拟水消费对于区域水资源的影响是虚拟水研究的重要内容。如龙爱华等^[2]、刘俊国等^[6]、Hoekstra 和 Mekonnen^[7]分别研究了省级、国家和全球等不同区域尺度的消费水足迹;尚海洋等^[8]对不同消费模式下的虚拟水消费状况进行了对比分析;孙才志等^[9]分析了我国膳食水足迹及其驱动因子;杨鑫等^[1]研究了居民收入对食品虚拟水消费的影响。但目前对虚拟水消费差异性影响因素的相关研究还比较少。区域人口规模、消费模式和消费数量决定了产品的消费需求,而消费需求量、产品消费种类和单位产品虚拟水含量共同决定虚拟水消费的总量。不同区域在自然条件、经济水平、生活习惯和宗教信仰等因素的影响下形成不同的消费结构和模式^[2]。在生活水平提高、水资源利用效率不断提升及气候变化的背景下,区域消费结构、消费模式和产品单位质量虚拟水含量同样发生变化。

京津冀是我国典型的资源型缺水地区^[10],同时也是我国水资源承载压力、水资源安全保障难度最大的地区^[11]。京津冀三个地区资源环境差异明显,在区域生产条件、城镇与农村人口结构和经济水平等因素的差异下形成了不同的消费模式。本文以京津冀为研究对象,分析了城镇居民和农村居民膳食虚拟水消费差异及不同区域的膳食虚拟水消费差异,利用通径分析和贡献率探讨了区域膳食虚拟水消费差异的影响因素。研究结果有助于从消费需求

角度为虚拟水消费、调控和区域水资源可持续利用决策提供有益参考。

1 数据和方法

1.1 数据来源

本文研究时段为 2000—2015 年,各作物种植面积和产量、城乡居民主要产品消费量来源于各区域统计年鉴,农业用水数据来源于各区域水资源公报,气象数据来源于国家气象科学数据网(<http://data.cma.cn/>)。

1.2 虚拟水消费量化方法

居民日常饮食消费产品种类繁多,主要包括农作物、畜牧产品和部分农业衍生产品。虚拟水消费量是居民消费产品所包含虚拟水量的总和,计算公式为

$$W_V = \sum_i^n V_i \times P_i \quad (1)$$

式中: W_V 为总的虚拟水消费量(m^3); V_i 为第 i 种产品单位质量虚拟水含量(m^3/kg); P_i 为第 i 种产品的消费量(kg)。

1.2.1 农作物虚拟水含量计算方法

作物单位质量虚拟水含量($W_{V, crop}$)可以用作物生长发育期内的耗水量除以作物产量获得,作物耗水根据不同来源可以分为蓝水和绿水,蓝水来源于灌溉,绿水来源于降水^[12]。考虑京津冀水资源短缺的大背景下,农业种植过程中灌溉难以充分满足作物蓝水需求,为更准确地表示生产条件变化下作物虚拟水含量,结合用水数据,文中采用的作物单位质量虚拟水含量计算方法为^[13]

$$W_{V, crop} = W_{green} / Y_c + W_{blue} / Y_c \quad (2)$$

$$W_{green} = 10 \min(ET_c, P_{eff}) \quad (3)$$

$$W_{blue} = W_{IC} \quad (4)$$

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

式中: $W_{V, crop}$ 为作物单位质量虚拟水含量(m^3/t); W_{green} 为作物单位面积消耗的绿水资源量(m^3/hm^2); W_{blue} 为作物单位面积消耗的蓝水资源量(m^3/hm^2);

Y_c 表示某作物的单位面积产量(t/hm^2); 10 为转化系数,将单位由水深(mm)转化为单位面积水量(m^3/hm^2); K_c 为作物系数; P_{eff} 为有效降水量^[14],采用美国农业部土壤保持局(USDA-SCS)的方法进行计算; ET_0 为潜在蒸散发量,采用 Penman-Monteith 公式计算; W_{IC} 为作物单位面积消耗的灌溉水量(m^3/hm^2),作物单位面积蓝水消耗量 $W_{IC,i}$ 可以利用作物 i 蓝水消耗需求量占作物种植蓝水消耗需求总量的比例进行推求,公式为

$$W_{IC,i} = W_I \alpha_i / A_i \quad (6)$$

$$\alpha_i = \frac{(ET_c^i - P_{eff}^i) \times A_i}{\sum_{i=1}^n [(ET_c^i - P_{eff}^i) \times A_i]} \quad (7)$$

式中: W_I 为区域灌溉用水总量(m^3); α_i 为作物 i 蓝水消耗需求量占区域蓝水消耗需求总量的比例^[15]; A_i 为作物 i 的播种面积(hm^2)。 ET_c^i 为作物 i 生育期的潜在蒸发蒸腾量(mm),当作物生育期有效降水量大于作物需水量时, α_i 为零。

由于区域粮食消费数据没有细分,文中粮食单位质量虚拟水含量推求公式为

$$W_{V,grain} = (\sum_{i=1}^n W_{V,i} \times m_i) / \sum_{i=1}^n m_i \quad (8)$$

式中: $W_{V,grain}$ 为粮食单位质量虚拟水含量(m^3/kg); m_i 为粮食作物 i 的产量(kg)。

1.2.2 畜牧和农业衍生品虚拟水含量计算方法

畜类活体的虚拟水含量取决于其整个生长过程中消耗的淡水资源量,包括饲养所用的作物包含的虚拟水含量、日常饮用用水和清洁圈舍和卫生所产生的服务用水^[16]。畜牧产品的虚拟水含量则取决于牲畜的种类和在加工这种产品所消耗的水。农业衍生品虚拟水含量取决于原料本身所包含的虚拟水和生产加工过程中投入的水量。相关产品的虚拟水含量(蓝水和绿水)计算难度较大,由此文中涉及的所有畜牧和农业衍生品单位质量虚拟水含量直接采用文献^[17-18]中中国地区数据成果,见表 1。

表 1 畜牧及部分农业衍生品单位质量虚拟水含量

Tab. 1 Virtual water of livestock and agricultural products

单位: m^3/kg			
产品	虚拟水含量	产品	虚拟水含量
猪肉	5.455	禽蛋	2.482
牛肉	13.290	水产品	3.111
羊肉	5.799	食糖	1.671
家禽	3.117	酒	0.270
牛奶	1.072	食用油	7.087

1.3 虚拟水消费多样性指数

消费结构多样性指数是以不同消费类别虚拟水

的比例作为测算消费结构与水资源利用效率(虚拟水消费量)之间关系的指标^[19]。本文采用 Shannon-Weaver 公式度量虚拟水消费水平为

$$H = - \sum_{i=1}^n [p_i \ln p_i] \quad (9)$$

式中: H 表示虚拟水消费多样性指数; p_i 表示各类虚拟水消费比例,消费类别包括粮食、蔬菜、水果、肉类、油类、蛋类、食糖、奶类和酒类。各种食物产品虚拟水消费比例差值越小,多样性越高。

1.4 虚拟水消费差异影响因素分析

本研究采用相关性和通径分析确定各因素对人均虚拟水消费的影响程度。通径分析是数量遗传学家 Sewall Wright 于 1921 年提出的一种多元统计技术,它以多元回归模型为基础,分析多个自变量与因变量之间的线性关系。通径系数表示相关变量间的因果关系,直接通径、间接通径和总通径系数表示自变量对因变量的直接、间接和综合影响^[20-21]。为了更好地解析人均膳食虚拟水消费时间尺度上的变化和区域差异,本文采用贡献率方法,进一步分析各影响因子对人均虚拟水消费的影响。

膳食虚拟水消费差异主要体现为消费总量和人均消费量两个方面。对于不同区域,人口对消费总量起决定性作用,因此本文仅针对人均膳食虚拟水消费量影响因素进行分析。人均虚拟水消费量取决于产品消费数量和产品单位质量虚拟水含量,影响因素复杂多样,本文选取粮食(X_1)、肉类(X_2)、食用油(X_3)、瓜果(X_4)、蔬菜(X_5)和蛋奶(X_6)的年人均消费量,以及单方水粮食生产率(X_7)、年人均居民收入(X_8)和消费多样性指数(X_9)作为影响虚拟水消费差异的主要因素。各产品人均消费量主要受居民生活水平影响,产品单位质量虚拟水含量主要受区域生产条件影响,产品消费多样性一定程度上反映产品消费的结构变化。人均居民膳食虚拟水消费量可以表示为

$$Y = f(C_1, C_2, \dots, C_n; P_1, P_2, P_3) \quad (10)$$

式中: C_i 是产品消费数量,归于产品消费因素(X_1, X_2, \dots, X_6); P_1, P_2, P_3 分别是产品生产条件(X_7)、居民收入水平(X_8)、消费多样性水平(X_9),这三个影响因素归于经济—环境因素。通过多元线性回归,得到影响因子 C_1, C_2, \dots, C_n 和 P_1, P_2, P_3 的弹性系数(a_i, b_i)。影响因子 C_1, C_2, \dots, C_n 和 P_1, P_2, P_3 对虚拟水消费差异性的贡献率可计算为^[15,22]:

$$\delta_i = a_i \times \frac{\Delta C_i / \Delta Y}{C_i / Y} \quad (11)$$

$$\gamma_i = b_i \times \frac{\Delta P_i / \Delta Y}{P_i / Y} \quad (12)$$

2 结果与分析

2.1 作物单位质量虚拟水含量

作物生产是区域虚拟水生产和消费的基础,作物中蕴含的虚拟水一部分直接供给人类消费,另一部分作为饲料供给畜产品生产或者成为农业衍生品的基础原料,作物单位质量虚拟水含量变化直接影响居民虚拟水消费量。表 2 为居民主要消费农产品 2000—2015 年单位质量虚拟水含量变化,可以看出作物单位质量虚拟水含量为豆类>粮食>瓜果>蔬菜,豆类产品单位质量虚拟水含量远高于其它三种作物,蔬菜单位质量虚拟水含量远低于其它作物。从虚拟水角度考虑,在水资源短缺的情况下,豆类产品在该区域无种植优势。

2000—2015 年,北京、天津和河北粮食作物单位质量虚拟水含量年均均为 1.035、0.906 和 0.746 m^3/kg ,分别以-27、-9.4 和-17.6 m^3/t 的年速率变化;瓜果单位质量虚拟水含量年均均为 0.313、0.263 和 0.324 m^3/kg ,分别以-4.9、1.9 和-10.3

m^3/t 的年速率变化;豆类单位质量虚拟水含量年均均为 2.296、3.058 和 2.178 m^3/kg ,分别以 52.8、16.1 和-66 m^3/t 的年速率变化;蔬菜单位质量虚拟水含量年均均为 0.101、0.076 和 0.050 m^3/kg ,分别以-1.5、-0.6 和-0.7 m^3/t 的年速率变化。气象条件和农业生产投入共同影响作物单位质量虚拟水含量,受气象条件不确定性影响,京津冀作物单位质量虚拟水含量呈现上下波动状态,2000—2015 年整体呈现出明显的下降趋势,这与持续的农业投入密切相关,同时也显示区域水资源利用效率的提高。

河北省粮食、蔬菜和瓜果单位质量虚拟水含量低于北京和天津,需求程度较高的粮食和蔬菜产品单位质量虚拟水含量均表现出下降趋势。豆类单位质量虚拟水含量北京、天津呈现略增长趋势而河北省呈现下降趋势,这与北京、天津作物种植结构调整有关,两地豆类种植面积均大幅度减少,间接地影响豆类作物在农业投入和配套设施方面的分配,从而影响作物单位质量虚拟水含量的变化。

表 2 京津冀 2000—2015 年作物单位质量虚拟水含量

Tab. 2 Virtual water of crops in Beijing-Tianjin-Hebei during 2000 to 2015

单位: m^3/kg

年份	北京				天津				河北			
	粮食	瓜果	豆类	蔬菜	粮食	瓜果	豆类	蔬菜	粮食	瓜果	豆类	蔬菜
2000	1.018	0.347	2.188	0.137	1.151	0.220	3.660	0.075	0.837	0.379	2.928	0.053
2001	1.207	0.343	1.836	0.143	0.764	0.209	2.107	0.066	0.832	0.366	2.482	0.052
2002	1.185	0.323	1.932	0.138	0.790	0.247	2.347	0.064	0.816	0.356	2.576	0.051
2003	1.304	0.381	2.538	0.091	0.861	0.245	2.106	0.076	0.839	0.357	2.349	0.056
2004	1.369	0.388	1.908	0.083	1.029	0.299	2.996	0.090	0.924	0.415	2.458	0.057
2005	1.115	0.313	2.038	0.088	0.992	0.301	3.150	0.090	0.799	0.370	2.390	0.051
2006	0.982	0.264	1.932	0.085	0.912	0.257	3.525	0.083	0.718	0.313	1.967	0.047
2007	1.085	0.301	2.568	0.084	1.030	0.273	3.851	0.092	0.742	0.320	2.108	0.049
2008	1.011	0.342	1.942	0.077	1.020	0.307	3.774	0.090	0.782	0.379	2.110	0.051
2009	0.912	0.266	2.317	0.091	0.961	0.280	3.392	0.082	0.731	0.366	2.313	0.050
2010	0.997	0.287	2.475	0.089	0.803	0.243	3.011	0.068	0.721	0.304	2.156	0.048
2011	0.935	0.273	2.166	0.088	0.871	0.237	3.067	0.072	0.656	0.262	1.760	0.045
2012	0.820	0.312	2.387	0.104	0.951	0.344	3.527	0.084	0.684	0.280	1.958	0.052
2013	0.831	0.265	2.552	0.098	0.787	0.242	3.283	0.066	0.677	0.275	2.033	0.048
2014	0.984	0.289	3.337	0.110	0.769	0.244	3.029	0.060	0.580	0.213	1.499	0.040
2015	0.797	0.315	2.616	0.114	0.798	0.262	2.098	0.063	0.597	0.227	1.756	0.042
年均	1.035	0.313	2.296	0.101	0.906	0.263	3.058	0.076	0.746	0.324	2.178	0.050

2.2 京津冀居民膳食虚拟水消费变化

居民膳食虚拟水消费变化主要体现为虚拟水消费总量的变化(表 3)、人均虚拟水消费量和结构的变化(图 1),前者反映出区域膳食虚拟水消费规模,

后者反映膳食虚拟水消费群体差异。北京、天津和河北 2000—2015 年年均居民虚拟水消费量为 98.33 亿、57.44 亿和 240.02 亿 m^3 ,居民膳食虚拟水消费量呈上升趋势,居民膳食虚拟水消费规模表

现出河北>北京>天津。北京和天津城镇虚拟水消费占主体地位,且呈增长趋势。河北随着人口结构变化,城镇虚拟水消费呈上升趋势,并逐渐占据消费的主体地位,农村虚拟水消费呈下降趋势。

表 3 京津冀地区 2000—2015 年虚拟水消费量

Tab. 3 Virtual water consumption in the Beijing-Tianjin-Hebei during 2000 to 2015 单位:亿 m³

年份	北京		天津		河北	
	城镇	农村	城镇	农村	城镇	农村
2000	—	—	35.63	12.47	73.54	149.44
2001	—	—	31.77	10.56	79.30	144.59
2002	—	—	31.47	10.91	87.93	141.52
2003	—	—	35.93	11.14	100.02	139.17
2004	68.33	12.63	38.36	11.89	108.32	137.98
2005	70.51	10.60	39.13	11.50	111.12	129.74
2006	69.82	9.66	39.58	11.46	108.71	120.38
2007	88.37	10.23	39.33	11.97	108.74	116.48
2008	87.73	10.06	43.17	12.21	118.63	117.87
2009	80.25	10.94	47.78	12.81	123.49	111.52
2010	90.69	10.44	49.77	11.81	119.57	112.86
2011	94.47	11.11	53.52	10.67	123.71	112.32
2012	92.40	11.14	61.96	11.58	128.81	116.00
2013	101.15	12.16	59.51	10.68	150.58	132.44
2014	109.10	12.70	62.05	11.66	135.52	115.79
2015	93.68	11.59	65.02	11.87	145.66	118.55
年均	87.21	11.11	45.87	11.57	113.98	126.04

注:—表示数据缺失。

为研究居民膳食虚拟水消费区域和群体差异,本文选取 2000—2005、2006—2010 和 2011—2015 年 3 个时间段进行分析。

从居民年均膳食虚拟水消费量分析:北京城镇居民为 561.94、554.01 和 540.30 m³/a,农村居民为 417.00、385.29 和 406.89 m³/a;天津城镇居民

474.07、480.79 和 505.57 m³/a,农村居民为 424.12、453.29 和 425.11 m³/a;河北城镇居民为 382.76、384.00 和 386.68 m³/a,农村居民 305.78、287.73 和 314.00 m³/a。可以看出,京津冀居民在三个时间段内年均膳食虚拟水消费量比较稳定,同一区域消费群体相同时,人均虚拟水消费时间序列上无显著变化。

从消费群体分析:居民虚拟水消费整体表现为城镇居民>农村居民,其中城镇居民与农村居民虚拟水消费量天津差异幅度最小,北京差异幅度最大。考虑地域因素居民虚拟水消费表现为北京城镇>天津城镇>河北城镇,天津农村>北京农村>河北农村,虚拟水消费区域差异性较为明显,2011—2015 年人均虚拟水消费北京城镇居民比河北城镇居民高 153.62 m³/a,比河北农村居民高 226.30 m³/a。

从消费结构分析:京津冀粮食、肉类和食用油是居民虚拟水消费的主体,占膳食虚拟水消费量的 70%~90%,城镇和农村居民消费差异明显,城镇居民肉类虚拟水消费比重较大,农村居民粮食虚拟水消费比重较大。随着生活水平的提高和消费习惯的改变,居民膳食虚拟水消费中粮食消费所占比重逐渐下降,肉类虚拟水消费农村地区所占比重呈上升趋势而城镇地区呈下降趋势,食用油和蛋类虚拟水消费所占比例则略有上升,奶和瓜果虚拟水消费农村地区呈现出上升趋势而城镇地区无明显变化。这种消费结构的变化反映出区域消费模式逐渐趋于均衡,城镇和农村虚拟水消费结构差异逐渐变小,人们的饮食消费选择逐渐丰富。

2.3 京津冀居民膳食虚拟水消费多样性分析

利用 Shannon-Weaver 公式计算了京津冀居民膳食虚拟水消费多样性指数(图 2)。结果表明,京津冀居民膳食虚拟水消费城乡差异显著,城镇居

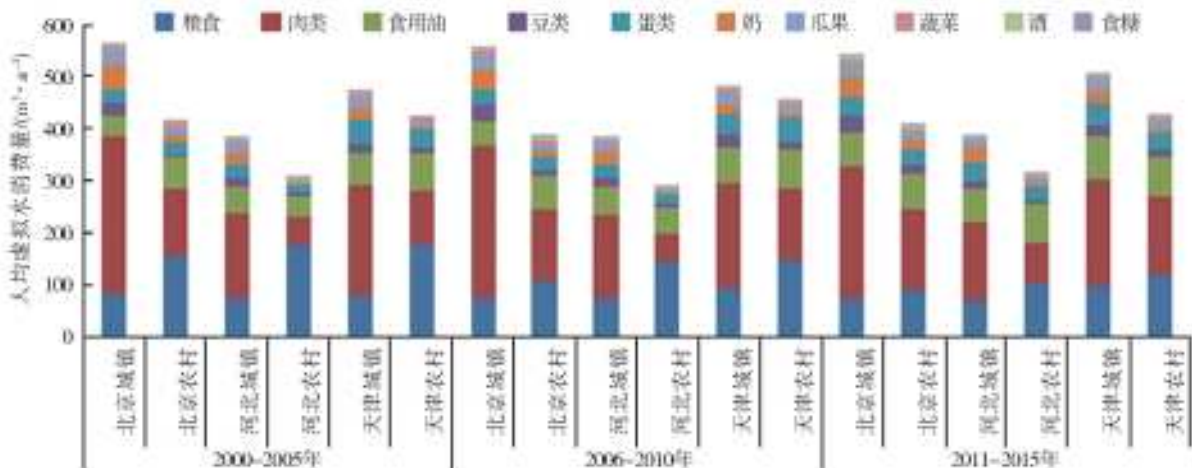


图 1 京津冀居民 2000—2015 年人均虚拟水消费量

Fig. 1 Virtual water consumption from resident in Beijing-Tianjin-Hebei region in different periods

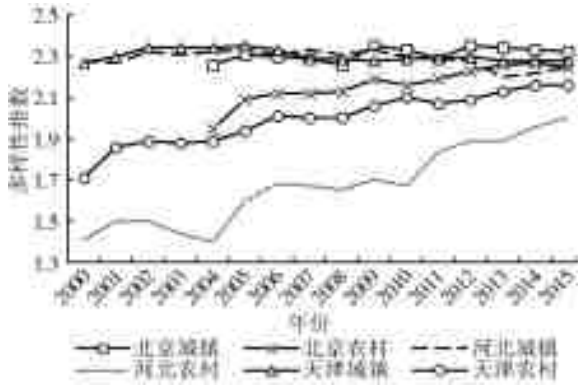


图2 京津冀城乡居民虚拟水消费多样性指数

Fig. 2 Diversity index of virtual water consumption from urban and rural citizens in Beijing-Tianjin-Hebei region during 2000 to 2015

民明显高于农村,表明城镇居民虚拟水消费比较均衡,消费水平高于农村,消费结构更为合理。京津冀城镇居民虚拟水消费多样性较为一致,而农村居民

虚拟水消费多样性表现出明显的区域差异,北京农村>天津农村>河北农村。从时间序列角度分析,城镇居民消费结构比较稳定,农村居民消费结构变化显著,与城市居民消费结构差异逐渐缩短。农村居民饮食消费多样性的改变,来源于消费产品的丰富和结构的调整,如对粮食消费的减少,肉类、蛋、奶和蔬菜等消费的增加,饮食消费趋于多样化。

2.4 京津冀居民膳食虚拟水消费影响因素分析

影响区域人均虚拟水消费量的影响因素复杂多样,如气象条件和生产投入影响消费产品的单位质量虚拟水含量,消费产品的种类和数量影响消费模式,而居民收入直接影响居民消费水平等。本文依据通径分析,探讨1.4节部分列出的9个因素和人均虚拟水消费量的直接通径系数、间接通径系数及总的影响,结果见表4。

表4 人均膳食虚拟水消费影响因素通径分析

Tab. 4 Path analysis of influencing factors of virtual water consumption (per capita)

影响因素	直接通径系数	间接通径系数									总影响	
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉		合计
X ₁	0.286		-0.500	-0.005	-0.141	-0.052	-0.197	-0.056	-0.048	0.091	-0.908	-0.622
X ₂	0.667	-0.214		-0.002	0.150	0.057	0.190	0.118	0.063	-0.079	0.283	0.950
X ₃	0.131	-0.011	-0.011		0.020	0.027	0.006	-0.067	0.013	-0.030	-0.053	0.078
X ₄	0.166	-0.243	0.604	0.016		0.055	0.204	0.056	0.066	-0.088	0.670	0.836
X ₅	0.089	-0.166	0.425	0.039	0.102		0.151	0.102	0.019	-0.069	0.603	0.692
X ₆	0.232	-0.243	0.546	0.004	0.146	0.058		0.048	0.057	-0.083	0.533	0.765
X ₇	-0.284	0.056	-0.278	0.031	-0.033	-0.032	-0.039		0	0.015	-0.280	-0.564
X ₈	0.092	-0.148	0.458	0.019	0.118	0.019	0.143	-0.001		-0.060	0.548	0.640
X ₉	-0.099	-0.263	0.530	0.039	0.148	0.062	0.194	0.043	0.056		0.809	0.710

各影响因素的直接通径系数绝对值从大到小依次为:X₂、X₁、X₇、X₆、X₄、X₃、X₉、X₈和X₅。其中,肉类消费量对人均膳食虚拟水消费的直接影响最大,直接通径系数为0.667,远高于其它影响因素,主要原因是肉类单位质量虚拟水含量较高和所占消费比例较大;粮食消费量、单方水粮食生产率、蛋奶消费量等也有较大的直接影响,单方水粮食生产率和消费多样性指数对人均虚拟水消费量直接通径系数为负值,而蔬菜消费量、居民年均收入和消费多样性指数对人均虚拟水消费直接影响较小。粮食消费量和消费多样性指数的间接影响最为显著。总影响因素表明肉类、瓜果、蛋奶消费影响程度在各影响因子中处于前三位,而粮食消费量与单方水粮食生产率对人均虚拟水消费总影响系数为负值。

利用式(11)和(12)推求人均虚拟水消费量的产品消费因素和社会-环境因素的贡献水平。为消除偶然性,选取天津城镇2006—2010年和2011—

2015年时间段,天津农村2011—2015年和天津城镇2011—2015年,河北城镇2011—2015年和天津城镇2011—2015年三组不同形态下的消费模式进行分析(表5)。结果表明,人均居民膳食虚拟水消费量天津城镇2011—2015年较2006—2010年高5.16%,肉类消费量增长了5.05%,产生的贡献率达30.72%;产品消费因素贡献率高达91.07%,单方水粮食生产率是减少人均虚拟水消费量的主要驱动力,贡献率为-63.57%;居民年均收入变幅最大为57.83%,产生的贡献率却仅有32.04%;居民消费多样性指数变化幅度较小,减少0.43%,贡献率达10.75%。人均居民虚拟水消费天津城镇2011—2015年较天津农村2011—2015年高出18.93%,农村和城镇居民影响因素差异明显,其中肉类消费量相差33.34%,贡献率达63.65%;粮食消费差异为-19.72%,贡献率-2.54%;收入水平相差95.78%,贡献率仅为14.45%;农村和城镇居民消

费多样性相差 8.02%，贡献度为-54%。人均居民虚拟水消费天津城镇 2011—2015 年较河北城镇 2011—2015 年高出 30.75%，肉类消费差异 41.95%，贡献率达 49.30%；粮食消费差异较小，但粮食生产条件差异-23.57%，贡献率为 20.68%；消费多样性指数贡献率为-7.37%。通过三组实际状态下的消费模式可以看出，人均虚拟水消费差异主要是由肉类、蛋奶等

单位质量虚拟水含量高的食品消费量差异引起的，生产条件和消费水平提高可以在一定程度减少虚拟水消费量。因此，为降低区域水资源安全保障难度，达到水资源可持续健康发展，可以采用提高产品用水效率、构建合理的膳食结构、提倡居民增加蔬菜、水果的绿色消费模式等调控措施，既益于居民饮食健康，又能减少虚拟水消费量。

表 5 人均虚拟水消费影响因素贡献率

Tab. 5 The contributions of influence factors to virtual water consumption (per capita)

影响因素	弹性系数	2006—2010 年天津城镇		2011—2015 年天津农村		2011—2015 年河北城镇		
		2011—2015 年天津城镇		2011—2015 年天津城镇		2011—2015 年天津城镇		
		变化率/%	贡献率/%	变化率/%	贡献率/%	变化率/%	贡献率/%	
产品消费因素	肉类	0.361	5.05	30.72	33.34	63.65	41.95	49.30
	粮食	0.024	16.27	7.71	-19.72	-2.54	5.11	0.41
	其他			91.07		86.61		21.55
社会-环境因素	粮食生产条件	-0.270	12.15	-63.57	0	0	-23.57	20.68
	收入水平	0.029	57.83	32.04	95.78	14.45	35.72	3.32
	消费多样性	-1.275	-0.43	10.75	8.02	-54.00	1.78	-7.37
其他因素			-13.40		-8.18		12.11	

2.5 研究结果的不确定性分析

本文研究过程中需要确定农作物、畜产品和农业衍生品的单位质量虚拟水含量，其农作物单位质量虚拟水的确定较容易，而畜产品和农业衍生品的确定较困难。北京、天津居民膳食消费中，农作物产品很大程度上依赖于外地输入，而本研究计算过程采用的是本地作物的单位质量虚拟水含量，因此区域虚拟水消费量计算是有误差的，但因为目前区域之间缺乏具体的产品输入输出数据，京津冀区域居民膳食虚拟水消费中，河北省农村居民粮食虚拟水消费比例较高，但河北省农业虚拟水是输出状态，按照产地计算是可行的；北京、天津城市居民肉类、蛋类、奶类虚拟水所占比例很高，这部分数据核算采用的是 Hoekstra 关于单位质量水足迹中中国部分数据，来源地和消费地数值是一样的，因此计算过程中，北京和天津城镇居民膳食虚拟水存在数据误差，但城镇居民粮食虚拟水消费量所占比例较小，因此这种方法可以探讨膳食虚拟水消费的整体影响因素状况，结果具有一定的参考价值。本文应用定额法计算动物食品的虚拟水含量，由于生产技术的进步和气象条件波动的影响，饲料粮和饲草的喂养比例每年都在变化，因此使用定额法可能无法准确描述年际的波动。此外研究中所需的资料来自于多个数据源而且存在部分数据缺失情况，虽然本研究已经尽力对缺失数据尽量推求和还原保证数据的可靠性，但由于数据统计口径和统计误差问题，仍然会对

数据量化和分析结果产生影响；对居民人均膳食虚拟水消费影响因素进行分析时，仅选取了部分主要的影响因素，仍有许多因素未考虑在内，如肉类、蛋奶等虚拟水含量仅是依靠前人的计算基础上进行引用，未能体现其在生产条件不断改善下虚拟水含量的变动。

3 结论

(1)2000—2015 年，北京、天津和河北粮食作物单位质量虚拟水含量年均均为 1.035、0.906 和 0.746 m^3/kg ；瓜果单位质量虚拟水含量年均均为 0.313、0.263 和 0.324 m^3/kg ；豆类单位质量虚拟水含量年均 2.296、3.058 和 2.178 m^3/kg ；蔬菜单位质量虚拟水含量年均 0.101、0.076 和 0.050 m^3/kg 。京津冀作物单位质量虚拟水含量在研究时段内整体呈现明显的下降趋势。

(2)2000—2015 年，北京、天津和河北年均居民膳食虚拟水消费量为 98.33 亿、57.44 亿和 240.02 亿 m^3 ，居民膳食虚拟水消费量呈现上升趋势，从而对区域水资源安全保障提出更高的要求。

(3)人均居民膳食虚拟水消费整体表现为城镇居民>农村居民，人均居民膳食虚拟水消费表现为北京城镇>天津城镇>河北城镇，天津农村>北京农村>河北农村。京津冀居民膳食虚拟水消费多样性指数整体呈现上升趋势，城乡差异显著，城镇居民

明显高于农村,但城乡差距逐渐缩小。

(4)肉类,食用油等高单位质量虚拟水含量消费量的差异是造成虚拟水消费差异的主要原因,粮食生产力的提高对于减少居民人均虚拟水消费有重要的作用。提高产品用水效率,提倡绿色消费,增加蔬菜、水果的消费所占比例,构建合理的消费结构,建立健康的消费习惯和消费模式是虚拟水消费需求调控的基本手段。

参考文献(References):

- [1] 杨鑫,穆月英.不同地区城镇居民收入对食品消费水足迹的影响:基于QUAIDS模型[J].资源科学,2018,40(5):1026-1039. (YANG X, MU Y Y. Impact of urban residential income on consumptive water footprints of food in different regions based on QUAIDS modeling [J]. Resources Science, 2018, 40(5): 1026-1039. (in Chinese)) DOI:10.18402/resci.2018.05.15.
- [2] 龙爱华,张志强,徐中民,等.甘肃省水资源足迹与消费模式分析[J].水科学进展,2005(3):418-425. (LONG A H, ZHANG Z Q, XU X M, et al. Analysis of water footprint and consumption pattern in Gansu Province [J]. Advances in Water Science, 2005(3): 418-425. (in Chinese))
- [3] ALLAN J A. Overall perspectives on countries and regions. In rogers, P. and Lydon, P. edits. Water in the Arab world: Perspectives and prognoses[M]. Massachusetts, Harvard University Press, 1994: 65-100.
- [4] 王玉宝,吴普特,孙世坤,等.我国粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响[J].农业机械学报,2015,46(10):208-215. (WANG Y B, WU P T, SUN S K, et al. Impact of virtual water flows of grain on water resources and regional economy in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 208-215. (in Chinese)) DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.027
- [5] 田贵良,王希为.农产品贸易驱动下中国与湄公河沿岸国家的虚拟水流动关系研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(2):16-23. (TIAN G L, WANG X W. Study on the virtual water trade pattern of China and the Mekong countries under the driving of agricultural trade[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 16-23. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1002-5634.2018.02.003.
- [6] LIU J, SAVENIJE H H G. Food consumption patterns and their effect on water requirement in China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2008, 5(1): 27-50. DOI:10.5194/hess-12-887-2008.
- [7] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity[J]. Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America (PNAS). 2012, 109(9): 3232-3237.
- [8] 尚海洋,徐中民,王思远.不同消费模式下虚拟水消费比较[J].中国人口·资源与环境,2009,19(4):50-54. (SHANG H Y, XU Z M, WANG S Y. The comparison of virtual water consumption among various consumption patterns[J]. China Population Resources and Environment, 2009, 19(4): 50-54. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1002-2104.2009.04.010.
- [9] 孙才志,刘淑彬.中国膳食水足迹区域差异及驱动因素分析[J].人民黄河,2017,39(9):39-45,50. (SUN C Z, LIU S B. Impacts of driving factors and the regional difference of dietary water footprint in China [J]. Yellow River, 2017, 39(9): 39-45, 50. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2017.09.009.
- [10] 封志明,刘登伟.京津冀地区水资源供需平衡及其水资源承载力[J].自然资源学报,2006,21(5):689-699. (FENG Z M, LIU D W. A study on water resources carrying capacity in Jingjinji region[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5): 689-699. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1000-3037.2006.05.002.
- [11] 赵勇,翟家齐.京津冀水资源安全保障技术研发集成与示范应用[J].中国环境管理,2017,9(4):113-114. (ZHAO Y, ZHAI J Q. Water resources security technology R&D integration and demonstration application in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. Environmental Conformity Assessment, 2017, 9(4): 113-114. (in Chinese)) DOI:10.16868/j.cnki.1674-6252.2017.04.113.
- [12] NOVO P, GARRIDO A, VARELAORTEGA C. Are virtual water "flows" in Spanish grain trade consistent with relative water scarcity? [J]. Ecological Economics, 2009, 68(5): 1454-1464. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.10.013
- [13] 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):651-660,669. (WU P T, SUN S K, WANG B Y, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 651-660, 669. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20160740.
- [14] DÖLL P, SIEBERT S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resources Research, 2002, 38(4): 8-1-8-10.
- [15] SUN S, WU P, WANG Y, et al. 2013. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation

- district of China[J]. Science of the Total Environment, 444(2): 498. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2012. 12. 016
- [16] 曹建廷,李原园,张文胜,等. 农畜产品虚拟水研究的背景、方法及意义[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 829-834. (CAO J T, LI Y Y, ZHANG W S, et al. Research background, methodological issues and significance on virtual water of crop and livestock production[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(6): 829-834. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791, 2004. 06. 025.
- [17] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products[J]. Ecosystems, 2012, 15(3): 401-415. DOI: 10. 1007/s10021-011-9517-8.
- [18] CASTILLO R M, FENG K, HUBACEK K, et al. Uncovering the green, blue, and grey water footprint and virtual water of biofuel production in Brazil: A Nexus Perspective[J]. Sustainability, 2017, 9(11): 2049. DOI: 10. 3390/su9112049.
- [19] XU Z, CHENG G, CHEN D, et al. Economic diversity, development capacity and sustainable development of China[J]. Ecological Economics, 2002, 40(3): 369-378. DOI: 10. 1016/S0921-8009(02)00005-8.
- [20] 蔡甲冰,刘钰,许迪,等. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 83-90. (CAI J B, LIU Y, XU D, et al. Sensitivity analysis on water deficit indicator of winter wheat based on path analysis theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 83-90. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2008. 01. 014.
- [21] 孙世坤,王玉宝,吴普特,等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 142-148. (SUN S K, WANG Y B, WU P T, et al. Spatial variability and attribution analysis of water footprint of wheat in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(13): 142-148. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2015. 13. 020.
- [22] 杨青,朱瑞祥,张捷,等. 陕西省农业机械化对农业生产贡献率的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6): 64-67. (YANG Q, ZHU X R, ZHANG J, et al. Mechanization profit portion estimation in plant products industry in Shaanxi Province [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(6): 64-67. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1002-6819. 2000. 06. 016.

(上接第 19 页)

- [26] 丁之勇,鲁瑞洁,刘畅,等. 环青海湖地区气候变化特征及其季风环流因素[J]. 地球科学进展, 2018, 33(3): 281-292. (DING Z Y, LU R J, LIU C, et al. Climate change characteristics and monsoon circulation factors around Qinghai Lake [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(3): 281-292. (in Chinese))
- [27] 陈建龙,刘永峰,钱鞠,等. R/S 分析法与 GM(1,1) 灰色模型相结合的鸳鸯池水库入库径流量预测[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 148-153, 158. (CHEN J L, LIU Y F, QIAN J, et al. R/S analysis combined with GM(1,1) grey model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(5): 148-153, 158. (in Chinese))
- [28] 陈彦光. 基于 Matlab 的地理数据分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. (CHEN Y G. Analysis of geographic data based on MATLAB[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese))