

江苏省内部农产品虚拟水流动分析与评价

邱娅柳¹, 刘 喆², 操信春^{1, 2*}

(1. 南京市高淳区水资源管理中心, 江苏 南京 211300; 2. 河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:虚拟水概念的引入为更好地解决水资源短缺问题提供了新的视角。以江苏省为例,以虚拟水理论为基础,结合江苏省实际情况对1999—2017年江苏省内部的农产品(粮食、油料、棉花)虚拟水流入、流出情况进行量化与评价,并从区域的角度对3类农产品的节水效益进行分析研究,为解决江苏省水资源问题提供理论依据。结果显示:农产品虚拟水流动情况在各地级市之间分布不均匀,出现集中现象,且随着农产品贸易量的增加,由农产品贸易引起的虚拟水流动量也逐年增大,在研究年份内虚拟水流动量增长了约3.9倍,农产品虚拟水由苏中、苏北地区随着农产品流入苏南地区。区域内部的粮食、棉花贸易均为江苏省带来了虚拟水资源的损耗,仅有油料贸易为江苏省节约了虚拟水资源,研究显示江苏省内部的农作物贸易会造成省内部每年0.05亿m³虚拟水资源的损耗,意味着江苏省内部的虚拟水资源并未得到充分地利用。

关键词:农产品;虚拟水流动;节水效益;江苏省

中图分类号:S279

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2021)06-0001-07

Analysis and evaluation of virtual water flow of agricultural products in Jiangsu Province

QIU Yaliu¹, LIU Zhe², CAO Xinchun^{1, 2*}

(1. Gaochun District Water Resources Management Center, Nanjing City, Nanjing 211300, China;

2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The introduction of virtual water concept provides a new perspective concept of. Taking Jiangsu Province as an example, based on virtual water theory, combined with the actual situation of Jiangsu Province, the inflow and outflow of virtual water of agricultural products (grain, oil, cotton) in Jiangsu Province from 1999 to 2017 were quantified and evaluated, and the water-saving benefits of three types of agricultural products were analyzed and studied from regional perspective, providing a theoretical basis for solving the water resources problem in Jiangsu Province. The result showed that the distribution of virtual water flow of agricultural products was uneven and concentrated among prefecture-level cities. With the increase of agricultural trade, the momentum of virtual water flow caused by agricultural trade was also increasing year by year. The momentum of virtual water flow increased by about 3.9 times in the study year. The virtual water of agricultural products flowed from middle and northern Jiangsu into southern Jiangsu. The trade of grain and cotton within the region brought the loss of virtual water resources, and only oil trade had saved virtual water resources for Jiangsu Province. Research showed that crop trade within Jiangsu Province caused the loss of 0.05 million m³ virtual water resources per year, which meant that virtual water resources within Jiangsu Province were not fully utilized.

收稿日期:2020-12-16

基金项目:国家自然科学基金(51979074);南京市水利科技项目(202002)

作者简介:邱娅柳(1984—),女,工程师,主要从事农业水利相关的研究与管理工作。E-mail:157487062@qq.com

通信作者:操信春(1986—),男,教授,博士,主要从事农业节水理论与政策研究工作。E-mail:caoxinchun@hhu.edu.cn

Key words: agricultural products; virtual water flow; water – saving benefit; Jiangsu Province

中国是世界上人口最多的发展中国家,保障粮食安全和水资源安全,对实现我国社会稳定和国民经济的可持续发展具有重大意义,虚拟水概念的引入为解决这一问题提供了新思路^[1]。虚拟水的概念在 1993 年被英国学者约翰·安东尼·艾伦首次提出,用于计算食品和消费品在生产及销售过程中的用水量,又称为“嵌入水”或“外生水”^[2]。虚拟水的相关概念包括虚拟水含量、虚拟水流出、虚拟水流入、虚拟水平衡等被相继提出^[3]。随着对虚拟水研究的不断深入,虚拟水的概念逐渐与国际贸易相结合,形成了虚拟水贸易的概念^[4]。虚拟水贸易是指一个国家或地区(尤指贫水国或地区)通过商品贸易的方式从另一国家或地区购买水资源密集型产品来获得水和粮食的安全^[5]。目前国内外已有很多学者从虚拟水的角度分析研究农产品贸易,并对我国部分省区、流域等的虚拟水贸易进行了进一步的研究与分析^[6-27],研究发现,虚拟水贸易对缓解一些国家与地区的水资源短缺有着积极作用^[28]。

江苏省位于中国大陆东部沿海中心,是著名的鱼米之乡,农业生产条件得天独厚,农产品、林木、畜禽种类繁多,粮食、棉花、油料等农产品几乎遍布全省^[29]。但随着江苏省经济的飞速发展和生态环境建设规模的扩大,同时水管理的不到位,导致水资源的浪费和污染问题日益凸显。本研究以虚拟水理论为基础,结合江苏省各地级市的实际情况,对 1999—2017 年江苏省区域间农产品(粮食、油料、棉花)虚拟水流入、流出情况进行了量化与评价,并从区域的角度对这 3 类农产品的节水效益进行了分析研究,旨在为解决江苏省水资源问题提供理论依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 评价区域与数据来源

选取江苏省为研究对象,对江苏省内 13 个地级市之间的农产品(粮食、油料、棉花)虚拟水流动进行量化评价。计算数据来源于《中国统计年鉴》(1999—2017 年)、《江苏省统计年鉴》(1999—2017 年)、《江苏省水资源公报》(1999—2017 年)等数据资料。

1.2 研究方法

本研究主要采用理论与实际相结合的方法,首先了解虚拟水相关的理论知识,后分析现有的虚拟

水流动计算体系与方法,最后结合江苏地区的实际情况,明晰农产品用水及贸易过程,从农产品调运量及农产品虚拟水含量两个角度出发,尝试建立适合江苏省尺度农产品的虚拟水流动计算方法。

(1)农产品贸易计算方法。根据全国范围内人均作物需求量一致的假设前提,首先计算一年中江苏省各地区农产品贸易量:

$$T'_k = G_k - P_{Ok}P_G \quad (1)$$

式中: k 为市区序号, $k=1,2,\dots,13$; T'_k 为第 k 市的农产品贸易量,万 t,当 $T'_k > 0$,则代表该市为输出区,反之为输入区; G_k 为第 k 市的农产品产量,万 t; P_{Ok} 为第 k 市的人口数,万人; P_G 为所研究年份的全国农产品人均占有量,kg/人。

若该年份内,江苏省整体为输出区,即各市总输出量之和大于总输入量之和,则该年份内输入区输入量等于其净输入量,即输入量均来自江苏省内其他输出区, $T'_k = T_{k入}$, $T_{k入}$ 为第 k 市的农产品净输入量,万 t;该年份内输出区的净输出量为:

$$T_{K出} = T'_k \left(1 - \frac{T_{总出} - T_{总入}}{T_{总出}}\right) \quad (2)$$

式中: $T_{K出}$ 为第 k 市的农产品净输出量,万 t; $T_{总出}$ 为该年份的农产品输出总量,万 t; $T_{总入}$ 为该年份的农产品输入总量,万 t。

若该年份内,江苏省整体为输入区,即各市总输出量之和小于总输入量之和,则该年份内输出区输出量等于其净输出量,即输出量均输送至江苏省内其他输入区, $T'_k = T_{k出}$;该年份内输出区的净输出量为:

$$T_{K入} = T'_k \left(1 - \frac{T_{总入} - T_{总出}}{T_{总入}}\right) \quad (3)$$

(2)农产品虚拟水流动评估方法。根据全国范围内人均作物需求量一致的假设前提,对于农产品虚拟水输出区,其所流出的虚拟水量为:

$$W_{j,out} = W_{FPj} T_{j,out} \quad (4)$$

式中: $W_{j,out}$ 为第 j 市的虚拟水输出量,亿 m^3 ; j 表示农产品虚拟水输出城市的序号; W_{FPj} 为第 j 市的单位农产品产量耗水量, m^3/kg ; $T_{j,out}$ 为第 j 市的农产品净输出量。

对于农产品虚拟水输入区有:

$$W_{i,in} = W_{FPi} T_{i,in} \quad (5)$$

式中: $W_{i,in}$ 为第 i 市的虚拟水输入量,亿 m^3 ; i 为农产品虚拟水输入区的序号; W_{FPi} 为第 i 市的单位农产品

产量耗水量, m^3/kg ; $T_{i,\text{in}}$ 为第 i 市的农产品净输入量。

2 农产品虚拟水流动评价

2.1 农产品虚拟水流动情况

1999—2017 年江苏省各地级市农产品虚拟水流动量如表 1 所示,农产品虚拟水流动情况在各地级市之间分布不均匀,出现集中现象。

江、常州、苏州地区在研究年份内基本均为虚拟水输入区,其中,苏州的虚拟水输入量最大,2012 年达到 7.3 亿 m^3 ,南京与无锡的虚拟水输入量近似,在 2016 年均达到输入量最大值,约 4.5 亿 m^3 。镇江在研究年份内有虚拟水输出区到虚拟水输入区的转变,且转变后虚拟水输入量最小,最大输入量仅约 0.8 亿 m^3 。农产品虚拟水输出量在研究年份内总体呈波动增长趋势且增长率较大。除镇江外,常

表 1 江苏省各地级市农产品虚拟水流动量 单位:亿 m^3

年份	南京	无锡	镇江	常州	苏州	扬州	泰州	南通	连云港	淮安	盐城	徐州	宿迁
1999	-1.1	-1.1	0.1	0.0	-0.6	0.4	0.5	0.6	0.8	-2.3	1.8	0.4	0.9
2000	-1.5	-1.4	0.0	-0.1	-1.2	0.3	0.4	0.1	1.3	0.2	1.6	-0.1	0.7
2001	-1.8	-1.7	0.0	-0.3	-1.8	0.3	0.6	0.5	0.7	0.9	2.3	-0.1	0.9
2002	-2.1	-2.1	0.0	-0.4	-2.2	0.4	0.7	0.5	0.8	1.4	2.6	-0.3	1.0
2003	-2.1	-2.2	-0.2	-0.7	-2.4	0.5	1.3	1.2	1.2	1.5	3.7	-1.8	0.2
2004	-2.4	-2.5	-0.2	-0.8	-3.1	0.4	0.9	0.6	1.3	1.9	3.1	0.0	1.6
2005	-2.8	-2.9	-0.4	-1.2	-3.5	0.8	1.2	0.6	1.3	2.4	3.9	-0.4	1.6
2006	-2.7	-2.9	-0.3	-1.2	-3.7	0.8	1.0	0.7	1.3	2.2	3.7	0.3	1.8
2007	-2.9	-2.9	-0.3	-1.3	-4.4	0.8	1.1	0.8	1.7	2.4	4.8	-0.1	1.8
2008	-3.7	-3.7	-0.2	-1.4	-5.8	1.0	1.3	0.9	2.0	3.2	5.4	0.5	2.1
2009	-3.4	-4.3	-0.2	-1.4	-5.3	1.0	1.2	0.9	1.8	2.7	4.6	0.8	2.0
2010	-3.8	-3.7	-0.2	-2.1	-6.0	1.0	1.2	0.8	2.0	3.0	5.7	1.0	2.2
2011	-4.1	-3.9	-0.4	-1.7	-6.5	1.3	1.4	0.6	2.2	3.3	6.0	1.2	2.3
2012	-4.3	-4.2	-0.4	-1.9	-7.3	1.4	1.5	0.5	2.5	3.6	6.0	1.4	2.7
2013	-4.2	-4.1	-0.5	-2.1	-6.7	1.4	1.5	0.4	2.4	3.8	6.2	0.9	2.6
2014	-4.2	-4.0	-0.4	-1.8	-6.6	1.3	1.4	0.3	2.3	3.7	5.9	1.1	2.6
2015	-4.4	-4.3	-0.6	-2.3	-6.9	1.4	1.5	0.2	2.6	4.0	6.8	1.0	2.8
2016	-4.5	-4.5	-0.8	-2.2	-7.0	1.4	1.4	-0.1	2.8	4.2	7.1	1.2	3.2
2017	-4.3	-4.3	-0.6	-2.4	-7.2	1.2	1.4	-0.1	2.8	4.2	7.5	1.3	2.8

表 1 显示,在研究年份内,扬州、泰州、南通、连云港、淮安、盐城、宿迁地区均多为虚拟水输出区,其中,盐城的虚拟水输出量最大,2017 年达到 7.5 亿 m^3 ,淮安的虚拟水输入量位居第二,在 2017 年输出量最大达到 4.2 亿 m^3 。南京、无锡、镇

州、徐州、淮安地区均有虚拟水输入区、输出区的转变,常州、淮安两地均在 1999 年发生转变,前者由虚拟水输出区转变为虚拟水输入区,随后输入量逐渐增大,后者由虚拟水输入区转变为虚拟水输出区,随后输出量逐渐增大。徐州在 2007 年前有多次虚

拟水输入区、输出区的转变,最后稳定为虚拟水输出区且输出量逐渐增大。

图 1 给出了 1999 年和 2017 年江苏省各行政区的农产品虚拟水流动情况,图中以不同颜色代表不同城市,外部栏的大小表示每个城市的农产品虚拟水量占江苏省的农产品虚拟水总量的百分比。农产品虚拟水输出区用颜色相同无间隔的条形链接表示,农产品虚拟水输入区用白色区域表示,该白色区域将外栏与不同颜色的链接分隔开。连接线的厚度表示虚拟水传输的不同体积。标签均为江苏省各行政区名称的缩写,如: NJ 代表南京, WX 代表无锡。

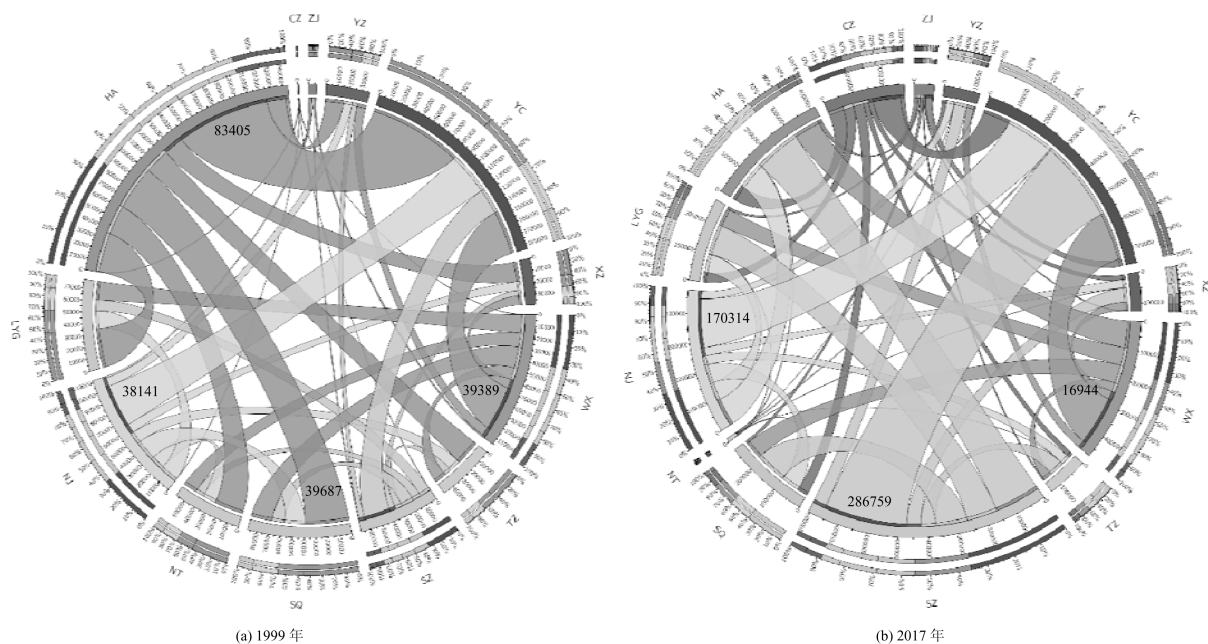


图 1 江苏省各区间农产品虚拟水流动情况(单位:万 m^3)

图 1(a)显示,镇江、常州、扬州、泰州、南通、连云港、盐城、徐州、宿迁地区在 1999 年内均为农产品虚拟水输出区,其中盐城的虚拟水输出总量最大,占该年分总虚拟水流动量的 34%;淮安是该年份虚拟水输入量最大的城市,占 1999 年总虚拟水流动量的 45%,其中从盐城输入的虚拟水量就高达 83 405 万 m^3 ,从宿迁输入虚拟水量约 39 687 万 m^3 ,南京、无锡两地的虚拟水输入总量均较大且输入量近似,均达到该年份虚拟水流动总量的 21%,其中南京从盐城市输入的虚拟水量约 38 141 万 m^3 ,无锡从盐城市输入的的虚拟水量约 39 389 万 m^3 。镇江、常州两地虽为虚拟水输出区但输出量均较小。由图 1(b)中可知,2017 年镇江、常州、南通由 1999 年的虚拟水输出区转变为虚拟水输入区,而淮安则由虚拟水输入区转变为虚拟水输出区且输出

量较大,占该年份虚拟水流动总量的 29%。扬州、泰州、连云港、盐城、徐州、宿迁地区始终为虚拟水输出区,其中盐城的虚拟水输出量最大,约占 2017 年虚拟水流动总量的 36%,为苏州输送虚拟水量高达 286 759 万 m^3 ,为南京、无锡两地输出虚拟水量分别约 170 314 万 m^3 、169 440 万 m^3 。苏州是 2017 年内输入量最大的输入区,其输入总量占总虚拟水流动量的 38%。泰州、徐州虽为虚拟水输出区但输出量均较小,均占总体虚拟水流动量的 6% 左右。研究数据显示,在 1999—2017 年间,江苏省内部的虚拟水流动量增长了约 3.9 倍。

2.2 区域间农产品虚拟水流动情况

图 2 给出了研究时段内江苏省区域间农产品虚拟水流动变化过程。从图 2 可看出,江苏省 3 个区域(苏南、苏中、办北)之间的农产品虚拟水流动变化趋势相似且较为稳定。

由图 2 可知,研究时段内,苏南地区均为农产品虚拟水输入区,苏中、苏北地区均为农产品虚拟水输出区。1999 年苏南地区的农产品虚拟水输入量约为 2.7 亿 m^3 ,1999—2019 年以平均每年约 0.932 亿 m^3 的速率增长,2017 年达到约 18.7 亿 m^3 ,约为 1999 年农产品虚拟水输入量的 6.9 倍;苏北地区 1999 年的农产品虚拟水输出量约为 1.6 亿 m^3 ,与苏南地区农产品虚拟水输入量变化情况相似但增长率更大,研究年份内以平均每年约 0.942 亿 m^3 的速率增长,2017 年达到农产品输出量最大值约

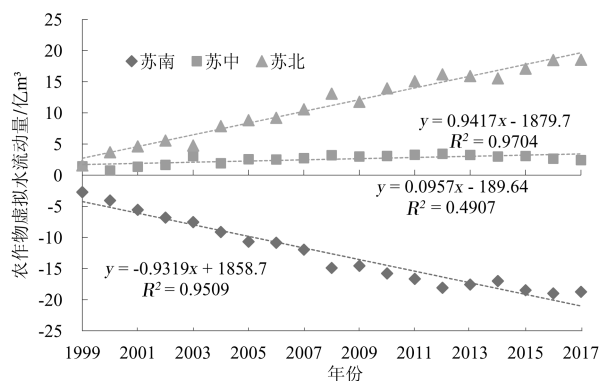


图2 江苏省区域间农产品虚拟水流动量

18.5 亿 m^3 , 是1999年输出量的11.6倍; 苏中地区的农产品虚拟水输出量变化情况较为稳定, 增长率较小, 从1999年的1.4 亿 m^3 以平均每年约0.095 亿 m^3 的速率增长, 2017年输出量约为2.4 亿 m^3 , 仅为1999年输出量的1.7倍, 在研究年份内存在小幅度波动。

2.3 农产品虚拟水节水效益评价

在区域节水方面, 如果一个地区的农产品进口量大于出口量, 那么这个地区就有一个净的虚拟水进口, 这便节省了区域内的水资源来满足自己的农产品消费需求^[30]。本研究取3类农产品为研究对象, 分别为: 粮食、棉花、油料, 以2个区域单位农产品产量耗水量差值与贸易量的乘积计算出2个地区区间的农产品虚拟水节损情况。

2.3.1 粮食虚拟水节损量

图3显示了1999—2017年期间江苏省内部区域贸易所产生的区域水资源的节约与损耗, 由图可知, 在研究年份内, 苏北向苏南输送的粮食量约为每年534.70万t, 而苏北地区每年生产534.70万t的粮食所需要的消耗虚拟水量约5.50 亿 m^3 , 而苏南地区若要每年生产534.70万t的粮食所需要消耗的虚拟水量约4.90 亿 m^3 , 故在苏北与苏南的粮食贸易过程中, 造成了江苏省内部每年虚拟水资源量约0.60 亿 m^3 的损失。在苏中地区与苏南地区的粮食贸易过程中, 虽然2个区域贸易量相对较小, 约每年136.30万t, 但每年却为江苏省内部节约了0.52 亿 m^3 的虚拟水资源。就整体而言, 在1999—2017年内江苏省内部间的粮食贸易会造成江苏省虚拟水资源损耗, 损耗量约为0.08 亿 m^3/a 。

2.3.2 棉花虚拟水节损量

由图4可知, 在1999—2017年期间, 苏北向苏南输送的棉花量约为每年8.52万t, 苏北地区每年生产8.52万t的棉花所需要的消耗虚拟量约为

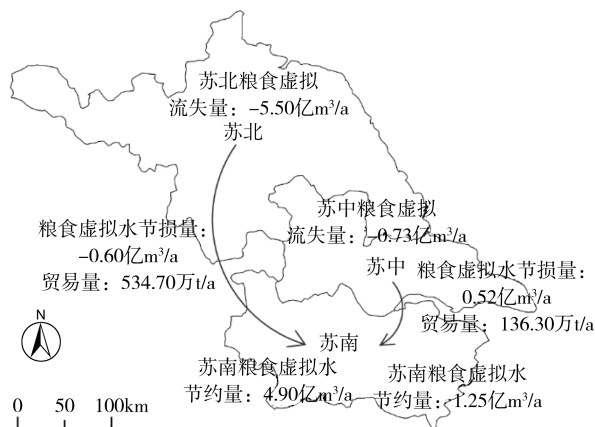


图3 江苏省粮食虚拟水节损情况

0.17 亿 m^3 , 而苏南地区若要每年生产8.52万t的棉花所需要消耗的虚拟水量约为0.16 亿 m^3 。在苏北与苏南的棉花贸易过程中造成了江苏省内部虚拟水资源的损耗, 总体每年损耗了虚拟水量约0.01 亿 m^3 。苏中地区与苏南地区的棉花贸易与粮食贸易情况较为类似, 虽然2个区域的棉花贸易量相对较小, 仅每年0.61万t, 但却基本实现了虚拟水资源的有效利用, 并未造成江苏省内部的虚拟水资源浪费。但就整体而言, 在1999—2017年内江苏省内部间的棉花贸易还是会造成江苏省虚拟水资源损耗, 但损耗量相对较少, 约为0.01 亿 m^3/a 。

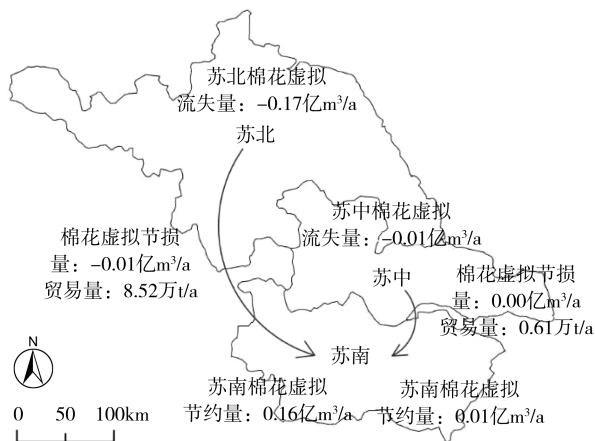


图4 江苏省棉花虚拟水节损情况

2.3.3 油料虚拟水节损量

图5为江苏省区域间油料虚拟水节损情况图。由图可知, 与区域间粮食、棉花贸易量不同, 油料的贸易量主要以苏南地区—苏中地区为主, 在1999—2017年期间, 苏北向苏南输送的油料量较小, 约为每年5.21万t, 苏北地区每年生产5.21万t的油料所需要的消耗虚拟水量约为0.04 亿 m^3 , 故在苏北与苏南的油料贸易过程中, 并未造成江苏省内部虚拟水资源的损耗。苏中地区与苏南地区的油料贸

易相对较大,约每年 14.73 万 t,苏中地区每年生产 14.73 万 t 的油料所需要的消耗虚拟水量约为 0.07 亿 m^3 ,而苏南地区若要每年生产 14.73 万 t 的油料所需要消耗的虚拟水量约为 0.11 亿 m^3 ,因此,苏中地区与苏南地区的油料贸易为江苏省内部每年节约了 0.04 Mm^3 的虚拟水资源。就整体而言,江苏省内仅有油料贸易为江苏省节约了虚拟水资源,但节约量仅为 $0.04 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$,不及粮食与棉花贸易所造成虚拟水损耗量,约 $0.09 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$,因此,江苏省内部的农作物贸易会造成省内虚拟水资源的损耗,损耗量约为 $0.05 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 。

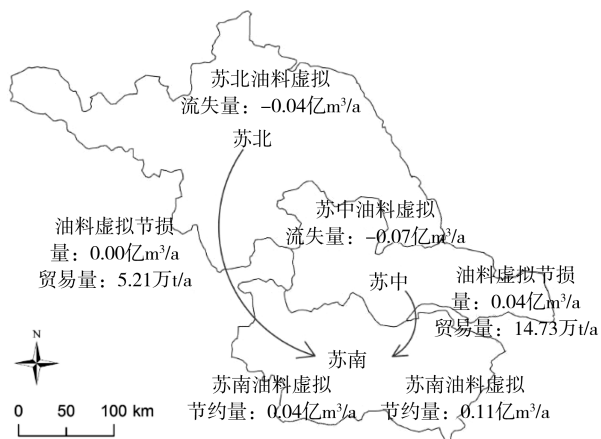


图5 江苏省油料虚拟水节损情况

3 结 论

由于江苏省内的水资源和耕地资源空间分布不对称,导致了省内各行政区之间、各区域之间的农产品调运及虚拟水的流动。在 1999—2017 年间,随着农产品贸易量的增加,由农产品贸易引起的虚拟水流动量也逐年增大,与农产品贸易情况类似,虚拟水由苏中、苏北地区随着农产品流入苏南地区。农产品虚拟水流动情况在各地级市之间分布不均匀,出现集中现象,南通、盐城、徐州等地多为虚拟水输出区,南京、无锡、镇江、常州、苏州地区在研究年份内基本均为虚拟水输入区,其中苏州农产品的虚拟水输入量最大,盐城的农产品虚拟水输出量最大;在研究时段内,苏南地区均为农产品虚拟水输入区,苏北、苏中地区均为农产品虚拟水输出区,3 个区的农产品虚拟水输入量均整体呈逐年增长趋势,且苏南地区与苏北地区的农产品虚拟水流动量增长率较大。

江苏省由于水资源和耕地资源时空分布不均匀,导致部分城市无法承担农产品的生产任务,必须通过从其他城市的农产品补给来满足自身的农

产品需求,这便导致其他城市的农产品产量以及水资源消耗量的增加。江苏省区域间农产品虚拟水节损量显示,粮食、棉花贸易均为江苏省带来了虚拟水资源的损耗,共造成虚拟水损耗量约 $0.09 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$,江苏省内仅有油料贸易为江苏省节约了虚拟水资源,但节约量仅为 $0.04 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$,因此,江苏省内部的农作物贸易会造成省内虚拟水资源的损耗,损耗量约为 $0.05 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$,意味着江苏省内部的虚拟水资源并未得到充分利用。

参考文献:

- [1] 孙才志,陈丽新,刘玉玉. 中国省级间农产品虚拟水流动适宜性评价[J]. 地理研究, 2011, 30(4):612-621.
- [2] 王克强,刘红梅,刘静. 虚拟水研究文献综述[J]. 软科学, 2007(6):11-14.
- [3] 刘宝勤,封志明,姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展[J]. 资源科学, 2006(1):120-127.
- [4] 刘康. 虚拟水贸易:缓解中国水资源短缺的新途径[N]. 中国县域经济报, 2017-11-16.
- [5] 刘红梅,王克强,刘静. 虚拟水贸易及其影响因素研究[J]. 经济经纬, 2008(2):50-53.
- [6] T Oki, Kanae S. Virtual water trade and world water resources[J]. Water Science Technology, 2004, 49(7): 203-209.
- [7] YANG H, WANG L, ABBASPOUR KC, et al. Virtual water trade: an assessment of water use efficiency in the international food trade[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, (NO.3):443-454.
- [8] LIU Junguo, JIMMY Williams, ALEXANDER Zehnder, et al. GEPIC - modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale[J]. Agricultural Systems, 2007, 94(2):478-493.
- [9] HOEKSTRA Arjen, ASHOK Chapagain. The water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities[J]. Ecological Economics, 2007, 64(1):143-151.
- [10] DABROWSKI JM, MASEKOAMENG E, ASHTON PJ. Analysis of virtual water flows associated with the trade of maize in the SADC region: importance of scale[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009(10):1967-1977.
- [11] ALDAYA MM, ALLAN JA, HOEKSTRA AY. Strategic importance of green water in international crop trade[J]. Ecological Economics, 2010, 69(4):887-894.
- [12] MEKONNEN MM, HOEKSTRA AY. A global and high

- resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(7):1259-1276.
- [13] FADER M, GERTEN D, THAMMER M, et al. Internal and external green – blue agricultural water footprints of nations, and related water and land savings through trade[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(5):1641-1660.
- [14] DALIN C, RINALDO A, HANASAKI N, et al. Evolution of the global virtual water trade network[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(16):5989-5994.
- [15] YOO SH, TAEGON Kim, IM JB, et al. Estimation of the international virtual water flow of grain crop products in Korea[J]. *Paddy and Water Environment*, 2012, 10(2):83-93.
- [16] KONAR M, DALIN C, HANASAKI N, et al. Temporal dynamics of blue and green virtual water trade networks[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(7):10-12.
- [17] KONAR M, HUSSEIN Z, HANASAKI N, et al. Virtual water trade flows and savings under climate change[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(8):3219-3234.
- [18] KONAR M, CAYLOR K. Virtual water trade and development in Africa[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2013, 10(6):7291-7324.
- [19] LAMASTRA L, PIER MP, PIERLUIGI T, et al. Virtual water trade of agri – food products: Evidence from Italian – Chinese relations[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 599/600:474-482.
- [20] ZHUO L, MEKONNEN MM, HOEKSTRA AY. The effect of inter – annual variability of consumption, production, trade and climate on crop – related green and blue water footprints and inter – regional virtual water trade: A study for China (1978 – 2008)[J]. *Water Research*, 2016(94):73-85.
- [21] SUN Shikun, WANG Yubao, ENGEL BA, et al. Effects of virtual water flow on regional water resources stress: A case study of grain in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 550:871-879.
- [22] KONAR M, REIMER JJ, HUSSEIN Z, et al. The water footprint of staple crop trade under climate and policy scenarios[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(3):35006.
- [23] 马超, 许长新, 田贵良. 中国农产品国际贸易中的虚拟水流动分析[J]. *资源科学*, 2011, 33(4):729-735.
- [24] 杨雅雪, 赵旭, 杨井. 新疆虚拟水和水足迹的核算及其影响分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(S1):228-232.
- [25] 王乐, 郭生练, 刘德地, 等. 气候变化下汉江流域虚拟水贸易分析[J]. *水文*, 2018, 38(1):14-20.
- [26] 赵亮, 骆媛媛, 臧秀娟. 流域农产品虚拟水贸易的发展评价——以鄱阳湖流域为例[J]. *南昌工程学院学报*, 2018, 37(3):85-90.
- [27] 刘宁, 沙景华, 张宏亮, 等. 京津冀地区农产品虚拟水与区域可持续发展关系研究[J]. *资源与产业*, 2016, 18(3):80-85.
- [28] LIU Jing, SUN Shikun, WU Pute, et al. Evaluation of crop production, trade, and consumption from the perspective of water resources: a case study of the Hetao irrigation district, China, for 1960 – 2010[J]. *Science of The Total Environment*, 2015(505):1174-1181.
- [29] 李裕瑞. 江苏省粮食生产空间格局变化研究[D]. 南京:南京农业大学, 2008.
- [30] LIU Wenfeng, ANTONELLI Marta, KUMMU Matti, et al. Savings and losses of global water resources in food – related virtual water trade[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2018, 6(1):e1320.