

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.010

# 淮河流域农业灰水足迹效率的时空分布与驱动模式

陈岩<sup>1,2</sup>, 童国平<sup>1</sup>, 王蕾<sup>3</sup>

(1. 南京林业大学经济管理学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学生态文明与乡村振兴研究中心, 江苏 南京 210037; 3. 南京信息工程大学教师发展与教学评估中心, 江苏 南京 210044)

**摘要:**运用灰水足迹效率测算模型对淮河流域35个地级市的农业灰水足迹效率进行了测度和时空分布研究,采用Kaya恒等式和LMDI分解模型将农业灰水足迹效率驱动因素分解为农业经济效应、化肥强度效应、灰水产出规模效应、农业环境效应和耕地资源效应等5个因素,并对淮河流域各地级市农业灰水足迹效率的驱动模式进行了分类。结果表明:2000—2015年,淮河流域35个地级市的农业灰水足迹效率都有显著的提升,从各省分布情况来看,山东省的农业灰水足迹效率最高,其次是安徽省和江苏省,河南省最低;农业灰水足迹效率驱动因素中,农业经济效应、灰水产出规模效应和耕地资源效应为正向效应,化肥强度效应和农业环境效应为负向效应,其中农业经济效应是提升农业灰水足迹效率最关键的驱动因素;淮河流域35个地级市的农业灰水足迹效率的驱动模式可以划分为农业经济效应单因素驱动模式I、灰水规模产出效应单因素驱动模式II、双因素驱动模式III和三因素驱动模式IV共4类,对于不同驱动模式的地区需要采取不同的治理措施。

**关键词:**农业灰水足迹;灰水足迹效率;驱动模式;淮河流域

中图分类号:TV213.4;F323.213 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)06-0060-07

**Spatial-temporal distribution and driving models of agricultural grey water footprint efficiency in the Huai River Basin** // CHEN Yan<sup>1,2</sup>, TONG Guoping<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>3</sup> (1. College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Research Center of Ecological Civilization and Rural Revitalization, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Teachers and Teaching Development Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The spatial and temporal distribution of agricultural gray water footprint efficiency of 35 prefecture-level cities in Huai River Basin was studied by using the gray water footprint efficiency calculating model. Kaya identity and LMDI model were employed to decompose the driving factors of agricultural gray water footprint efficiency into five aspects: agricultural economic effect, fertilizer intensity effect, gray water output scale effect, agricultural environmental effect, and cultivated land resource effect. A classification study of driving models of agricultural gray water footprint efficiency in every city in Huai River Basin was conducted. The results show that the agricultural gray water footprint efficiency of 35 prefecture-level cities in Huai River Basin has been significantly improved during 2000-2015. According to the distribution of each province, the agricultural gray water footprint efficiency of Shandong Province is the highest, followed by Anhui Province and Jiangsu Province, with Henan Province being the lowest. Among the driving factors of agricultural gray water footprint efficiency, agricultural economic effect, gray water output scale effect and cultivated land resource effect are positive, while chemical fertilizer intensity effect and agricultural environment effect are negative. Among them, agricultural economic effect is the most critical driving factor to improve the efficiency of agricultural gray water footprint. The driving models of agricultural gray water footprint efficiency of 35 prefecture-level cities in Huai River Basin can be divided into 4 categories: single-factor driving model I dominated by agricultural economic effect, single-factor driving model II dominated by gray water scale output effect, two-factor driving model III and three-factor driving model IV. Different governance measures should be taken in regions with different driving models.

**Key words:** agricultural grey water footprint; efficiency of grey water footprint; driving model; Huai River Basin

基金项目:教育部人文社科基金(20YJA630006);国家自然科学基金青年科学基金(71403122);江苏省自然科学基金青年项目(BK20140980)

作者简介:陈岩(1977—),女,副教授,博士,主要从事环境管理与生态经济研究。E-mail: sanchen007@163.com

我国人均水资源量是世界平均水平的 1/6,严重的水污染加剧了我国水资源短缺状况。在我国水环境污染中,农村水污染物排放量占全国水污染物排放量的 50% 以上,农村水污染已成为导致水环境恶化的主要原因<sup>[1]</sup>。对流域农业污水排放效率和驱动因素进行研究,可以为流域的农业水污染治理提供重要的基础。传统的流域水污染状况评价和效率研究中通常采用单因子指数法、综合污染指数法等来分析流域的污染情况。2002 年荷兰学者 Hoekstra 首次提出了水足迹(water footprint)的概念<sup>[2]</sup>,水足迹分为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹<sup>[3]</sup>;蓝水足迹和绿水足迹的研究起步相对较早,研究成果比较丰富<sup>[4-8]</sup>;"灰水足迹"的概念于 2008 年提出<sup>[5]</sup>,是指"在现有标准水质条件下,将污染负荷稀释至特定水质标准及以上需要的淡水体积"<sup>[6]</sup>。传统水资源研究大多未考虑将水资源消耗和水污染指标进行结合来分析评价水资源利用情况,灰水足迹可以分析用水量和污水排放量之间的定量关系,从用水量角度评价水污染状况,为污水排放量与水资源利用量之间的相互研究提供了一个新的研究视角和方法。目前,国内外对灰水足迹的研究已经取得较多的研究成果,范围涉及农业<sup>[7]</sup>、工业<sup>[8]</sup>、省域<sup>[9-10]</sup>和特定区域<sup>[11]</sup>灰水足迹的测算评价。而农业灰水足迹研究主要集中在特定农作物和不同区域的灰水足迹核算,主要包括水稻<sup>[12]</sup>、小麦<sup>[13]</sup>、玉米、蔬菜、水果<sup>[14]</sup>等种植业灰水足迹测算;另外,畜牧业和渔业生产活动灰水足迹也不可忽视,一些学者对于农场动物<sup>[15]</sup>、畜牧业<sup>[16]</sup>和渔业养殖<sup>[17]</sup>等灰水足迹进行了测算和时空演变规律分析。在灰水足迹测算的基础上,部分学者对灰水足迹的影响因素进行了研究,主要集中在城市灰水足迹<sup>[18]</sup>、人均灰水足迹<sup>[19-20]</sup>、各个省市灰水足迹<sup>[21]</sup>等影响因素的研究方面;而农产品灰水足迹的影响因素研究较少,主要认为化肥施用量和农产品产量是影响灰水足迹的重要因素<sup>[22]</sup>,而氮流失的增长造成的稀释水量增加是农业土地利用系统灰水足迹增长的关键因素<sup>[23]</sup>。

本研究从种植业、畜牧业和水产养殖业 3 个农业生产部门来核算淮河流域 35 个地级市的农业灰水足迹量,分析了淮河流域农业灰水足迹效率的时空分布与驱动模式,以期为促进流域农业的可持续发展提供参考。

## 1 研究区概况

淮河流域是我国七大流域之一,位于东经 111°55'~121°25'、北纬 30°55'~36°36'之间。淮河流域包括湖北、河南、安徽、江苏、山东 5 省 40 多个

地级市,流域面积 26.96 万 km<sup>2</sup>,多年平均降水量约 875 mm,降水量空间差异较大,由流域下游向上游呈弧形递减,多年平均总水资源量约 794 亿 m<sup>3</sup>,人均水资源量仅为全国的 1/5。淮河流域处于中纬度地区、南北气候过渡带和海陆过渡带,降水时间集中,6—8 月的降水量占全年降水量的 50% 以上,12 月至次年 2 月降水量不到全年降水量的 10%。由于降水年际变化大,易涝易灾,且流域人口密度大,耕地率高,严重的水污染使得淮河流域严重的缺水状况雪上加霜。

淮河流域是我国水污染状况最严重的区域之一,作为我国主要的产粮区,耕地面积 1 266 万 hm<sup>2</sup>,粮食产量占全国粮食总产量的 1/6。流域内农业生产过程中农药、化肥的使用量大,耕地平均化肥施用强度为 776.6 kg/hm<sup>2</sup>,远大于我国生态乡镇建设制定的化肥施用强度上限标准<sup>[24]</sup>,更超过一些发达国家的化肥施用环境安全上限水平。流域的化肥有效利用率只有 30%~35%,大量的农业化肥、分散式畜禽水产养殖产生的污染物、农村居民生活固体垃圾和废水污水等在降雨过程中,经农田排水、地表径流、地下渗漏等多种方式进入地表地下水体,农村面源污染已成为流域新的污染源,直接影响到淮河流域的生态系统平衡<sup>[25]</sup>。淮河水利委员会及流域内各地方政府积极采取污染治理措施,淮河流域水质得到了一定的改善<sup>[26]</sup>,但是由于流域人口集聚,农业集约化程度高,水产和畜牧养殖发展迅速,农业面源污染问题依然非常严峻<sup>[27]</sup>。

为了便于研究,本文对淮河流域边缘部分县市进行了取舍(将面积不足县市面积一半的区域去掉),所以研究区域选定为河南、安徽、江苏和山东 4 省的 35 个地级市。

## 2 研究方法和数据来源

### 2.1 农业灰水足迹和效率测度模型

a. 农业灰水足迹测度模型。通过种植业、畜牧业和水产养殖业 3 个农业生产部门来测算流域农业灰水足迹,测度模型为

$$F_a = F_p + F_b + F_f \quad (1)$$

式中: $F_a$ 为农业灰水足迹,m<sup>3</sup>; $F_p$ 、 $F_b$ 、 $F_f$ 分别为种植业、畜牧业和水产养殖业灰水足迹,m<sup>3</sup>。灰水足迹衡量的是污染物稀释至标准水质所需要的淡水资源量,测算过程主要参考文献[13]。正常情况下,污水中包含多种形式的污染物,其中最大的污染物决定了最终的灰水足迹。

b. 农业灰水足迹效率测度模型。采用单位农业灰水足迹产出的农业 GDP 作为农业灰水足迹的

效率:

$$g = M/F_a \quad (2)$$

式中:  $g$  为农业灰水足迹的效率, 元/ $\text{m}^3$ ;  $M$  为农业 GDP, 元。

## 2.2 基于 Kaya 恒等式的驱动因素分解

日本学者 Kaya<sup>[28]</sup> 针对碳排放变化提出了 Kaya 恒等式, 该恒等式已经在能源及其他领域得到广泛应用。本文将扩展后的 Kaya 恒等式用于农业灰水足迹效率变化的影响因素研究, 对农业灰水足迹效率进行驱动因素分解。

a. 农业灰水足迹效率的影响因素。为了对农业灰水足迹效率进行驱动因素分解, 需要明确农业灰水足迹效率的影响因素。农业经济发展水平、化肥的施用强度、灰水足迹产出水平、化肥对水环境的作用以及耕地面积等是 5 个主要影响农业灰水足迹效率的因素, 分别将它们定义为影响农业灰水足迹效率的 5 个驱动效应, 即农业经济效应、化肥强度效应、灰水产出规模效应、农业环境效应和耕地资源效应。

b. Kaya 恒等式的扩展。扩展后的农业灰水足迹效率 Kaya 恒等式为

$$g = abcde \quad (3)$$

其中  $a = M/P$      $b = C/A$      $c = P/F_a$   
 $d = L/C$      $e = A/L$

式中:  $a$  为农业经济效益, 即单位农产品产量的农业经济效益, 反映农业经济发展水平对农业灰水足迹效率的影响,  $a$  越大, 说明农业经济发展水平对农业灰水足迹效率提升起着越积极的作用;  $b$  为化肥强度效应, 即单位耕地面积施用的化肥量, 反映化肥施用强度对农业灰水足迹效率的影响,  $b$  越大, 说明化肥施用强度越大, 对农业灰水足迹效率提升的积极作用越大;  $c$  为灰水产出规模效应, 即单位农业灰水足迹带来的农产品产量, 反映灰水足迹产出水平对农业灰水足迹效率的影响,  $c$  越大, 说明灰水足迹产出水平对农业灰水足迹效率的提升影响力度越大;  $d$  为农业环境效应, 即人均化肥施用量的倒数, 反映化肥环境效应对农业灰水足迹效率的负面影响,  $d$  越大, 说明人均化肥施用量越小, 对农业灰水足迹效率的提升越有利;  $e$  为耕地资源效应, 即人均耕地面积, 反映耕地资源使用状况对农业灰水足迹效率的影响,  $e$  越大, 说明人均耕地资源的拥有量对农业灰水足迹效率的提升有着越积极的促进作用;  $P$  为农产品产量, 万 t;  $C$  为化肥施用量, t;  $A$  为耕地面积,  $\text{hm}^2$ ;  $L$  为农业劳动力数量, 人。

## 2.3 LMDI 分解模型

因素分解法通过将研究对象拆分成若干个相关

因子来分析不同因子对研究对象的影响程度<sup>[29]</sup>, 主要包括拉式分解模型 (AMD) 和对数平均迪氏指数分解模型 (LMDI)<sup>[30-32]</sup>, 其中 LMDI 分解模型因为能够很好地克服交叉项问题, 分解不产生残差, 解释效果较合理, 在资源环境等多个领域的应用广泛。本文采用 LMDI 分解模型对淮河流域农业灰水足迹效率变化的各影响因素进行定量化分析。根据 LMDI 分解模型, 农业灰水足迹效率从基期到第  $t$  年的变化值称为总效应  $\Delta G$ , 计算公式如下:

$$\Delta G = g_t - g_0 = \Delta G_a + \Delta G_b + \Delta G_c + \Delta G_d + \Delta G_e \quad (4)$$

其中

$$\Delta G_a = \frac{g_t - g_0}{\ln g_t - \ln g_0} \ln \left( \frac{a_t}{a_0} \right)$$

$$\Delta G_b = \frac{g_t - g_0}{\ln g_t - \ln g_0} \ln \left( \frac{b_t}{b_0} \right)$$

$$\Delta G_c = \frac{g_t - g_0}{\ln g_t - \ln g_0} \ln \left( \frac{c_t}{c_0} \right)$$

$$\Delta G_d = \frac{g_t - g_0}{\ln g_t - \ln g_0} \ln \left( \frac{d_t}{d_0} \right)$$

$$\Delta G_e = \frac{g_t - g_0}{\ln g_t - \ln g_0} \ln \left( \frac{e_t}{e_0} \right)$$

式中:  $\Delta G_a$  为农业经济效应贡献值;  $g_t$ 、 $g_0$  分别为第  $t$  年的农业灰水足迹效率和基期的农业灰水足迹效率;  $\Delta G_a$ 、 $\Delta G_b$ 、 $\Delta G_c$ 、 $\Delta G_d$ 、 $\Delta G_e$  分别为农业经济效应、化肥强度效应、灰水产出规模效应、农业环境效应和耕地资源效应贡献值。若驱动效应贡献值  $\Delta G_a$ 、 $\Delta G_b$ 、 $\Delta G_c$ 、 $\Delta G_d$ 、 $\Delta G_e$  为正值, 则表示各驱动效应的变化促进淮河流域农业灰水足迹效率的增加, 称为正向驱动效应, 若驱动效应贡献值为负值, 则称为负向驱动效应。某驱动效应贡献值与总效应的比值称为该驱动效应的贡献率, 若某驱动效应贡献率为正值, 则表示该驱动效应促进农业灰水足迹效率值的增加, 为负值则表示该驱动效应会使农业灰水足迹效率降低。

## 2.4 驱动模式分类

为了对淮河流域各地区的农业灰水足迹效率的驱动因素进一步分析, 按照 LMDI 分解模型计算得到的驱动效应贡献率来对各地区进行驱动模式分类, 以驱动效应贡献率绝对值 50% 为标准来找出主导驱动因素。淮河流域各地区的农业灰水足迹效率的驱动模式可以划分为单因素驱动、双因素驱动、三因素驱动、四因素驱动和综合驱动效应 5 种类型。

## 2.5 数据来源

以淮河流域内河南、安徽、江苏和山东 4 省 35 个地级市为研究区域范围, 以 2000—2015 年的中间 4 个节点 (2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年) 作为时间范围来研究淮河流域农业灰水足迹效率问题。

农业灰水足迹和效率的测算数据主要来自各省和地级市的统计年鉴和农业统计年鉴,以及国家统计局发布的 2000—2015 年国民经济和社会发展统计公报。

3 结果与分析

3.1 淮河流域农业灰水足迹效率及时空分布

运用式(1)(2)计算淮河流域的 35 个地级市 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年 4 个时间节点的农业灰水足迹效率值,结果见图 1。在灰水足迹测算中,各类污染物排放达标标准采用 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中规定的Ⅲ类水标准,COD、氮和磷污染物的排放达标质量浓度分别为 20 mg/L、1 mg/L 和 0.05 mg/L,自然本底质量浓度值参考文献[13]设为 0 mg/L。

从图 1 可以看出,在时间分布上,淮河流域内 35 个地级市的灰水足迹效率有逐渐上升的趋势,说明从 2000—2015 年淮河流域各个地级市的农业灰水足迹效率都有一定的提升。从淮河流域内的各省分布来看,山东省的农业灰水足迹效率最高,其次是安徽省和江苏省,河南省最低。空间分布特征为淮河沂沭泗水系的山东地区农业灰水足迹效率普遍比较高,干流水系的中、下游次之,上游最低,呈现出从

内陆上游地区向东部下游沿海地区逐渐递增的特征。

3.2 淮河流域农业灰水足迹效率的驱动模式

通过 LMDI 分解模型计算出 2000—2015 年淮河流域 35 个地级市农业灰水足迹效率的农业经济效应、化肥强度效应、灰水产出规模效应、农业环境效应和耕地资源效应的贡献值,按照不同地区驱动效应的贡献率划分出 3 种类型的驱动模式,详见表 1。

从表 1 可以看出,淮河流域各区域的农业灰水足迹效率主导驱动因素不同,因此以贡献率绝对值 50% 为标准来找出主导驱动效应,可以具体细分为 4 种主导驱动模式,即以农业经济效应为主导的单因素驱动模式Ⅰ和以灰水产出规模效应为主导的单因素驱动模式Ⅱ,农业经济效应和农业环境效应共同作用的双因素驱动模式Ⅲ,以及以农业经济效应、农业环境效应和耕地资源效应共同作用的三因素驱动模式Ⅳ。4 种模式分布情况如图 2 所示。

a. 单因素驱动模式Ⅰ。模式Ⅰ是以农业经济效应为主导的驱动模式,包括河南省的郑州、洛阳和平顶山,安徽省的合肥,江苏省的南通、盐城、扬州、泰州、宿迁以及山东省的淄博、枣庄、济宁、泰安、日照和临沂,共 15 个地级市。此种模式属于农业经济导向型发展模式,农业经济效应对于灰水足迹效率

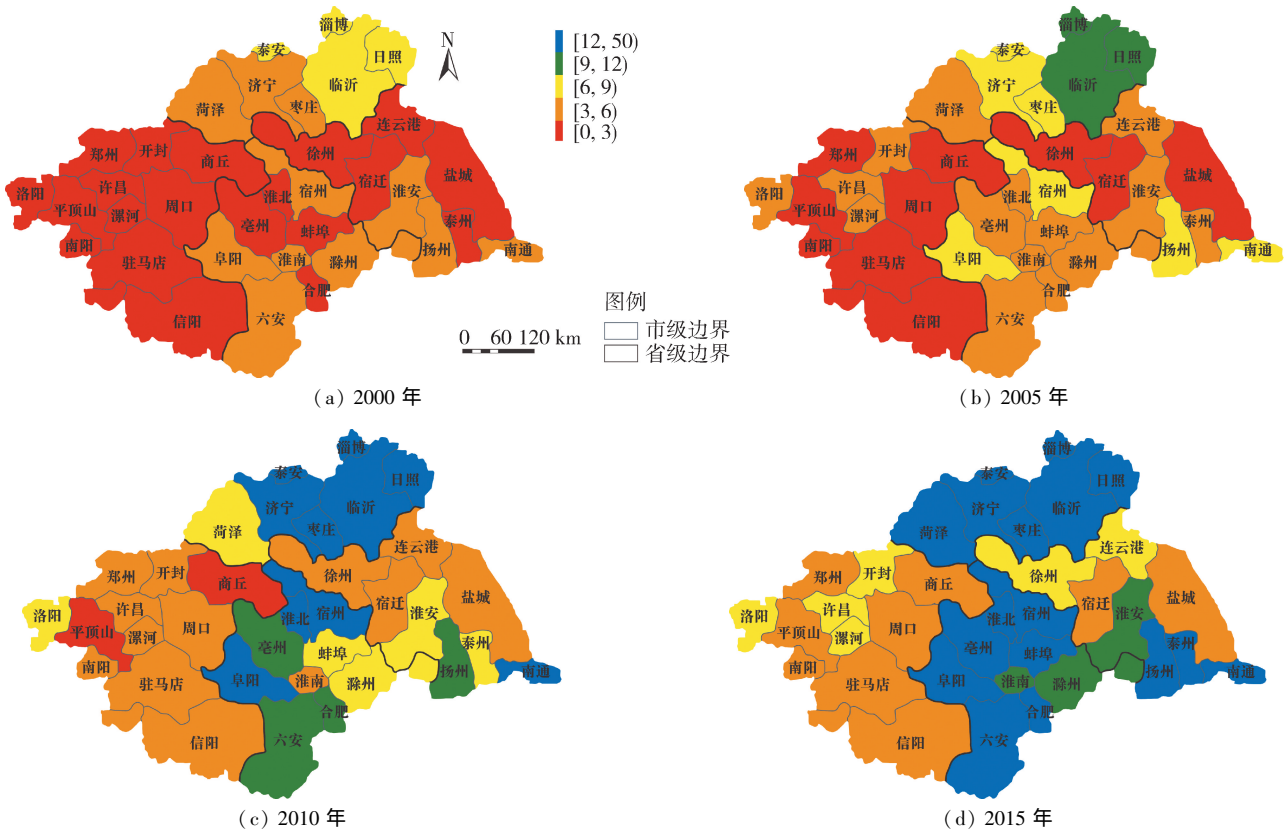


图 1 淮河流域 35 个地级市农业灰水足迹效率时空分布  
Fig.1 Spatial-temporal distribution of agricultural grey water footprint efficiency of 35 cities in Huai River Basin from 2000 to 2015



表 1 淮河流域 35 个地级市农业灰水足迹效率的驱动模式划分

Table 1 Driving effect model division of agricultural grey water footprint efficiency changes of 35 cities in the Huai River Basin

类型	模式	地级市	驱动效应的贡献率/%				
			农业经济效应	化肥强度效应	灰水产出规模效应	农业环境效应	耕地资源效应
单因素驱动效应	模式 I	郑州市	74.2	-0.2	25.8	-33.5	33.7
		洛阳市	80.4	10.6	19.6	-34.3	23.7
		平顶山市	65.5	31.4	34.5	-45.7	14.3
		合肥市	62.9	-41.9	37.1	21.7	20.1
		南通市	60.9	-7.9	39.1	-12.0	19.8
		盐城市	72.4	-7.0	27.6	-22.0	28.9
		扬州市	82.8	7.1	17.2	-30.4	23.3
		泰州市	55.2	-20.5	44.8	7.9	12.6
		宿迁市	80.3	21.2	19.7	-43.6	22.5
		淄博市	64.9	-15.8	35.1	-15.0	30.7
		枣庄市	75.1	-2.3	24.9	-15.3	17.6
		济宁市	82.9	-16.9	17.1	-22.7	39.6
		泰安市	81.9	-4.1	18.1	-37.1	41.2
		日照市	72.9	-30.8	27.1	20.3	10.4
		临沂市	72.0	-25.7	28.0	0.6	25.1
	模式 II	漯河市	43.8	20.3	56.2	-36.1	15.9
		淮北市	47.5	6.5	52.5	-36.8	30.3
		阜阳市	34.3	-0.7	65.7	-40.3	41.1
		徐州市	58.8	-15.5	76.0	-3.8	19.3
双因素驱动效应	模式 III	开封市	92.4	35.1	7.6	-80.8	45.6
		许昌市	85.7	42.5	14.3	-83.5	41.0
		商丘市	143.6	154.6	-43.6	-252.0	97.4
		周口市	68.6	30.3	31.4	-66.7	36.4
		南阳市	57.4	29.9	42.6	-69.8	39.9
		驻马店市	57.0	16.9	43.0	-64.2	47.3
		淮安市	77.3	49.7	22.7	-69.5	19.8
		连云港市	79.6	10.5	20.4	-50.9	40.4
三因素驱动效应	模式 IV	亳州市	43.1	-7.4	56.9	-83.1	90.5
		宿州市	53.0	-2.5	47.0	-61.6	64.1
		蚌埠市	54.8	-10.9	45.2	-71.9	82.7
		淮南市	54.3	-2.9	45.7	-63.3	66.2
		滁州市	79.3	-47.0	20.7	-69.3	116.4
		六安市	50.9	-49.7	49.1	-51.4	101.1
		信阳市	95.3	-23.3	-5.8	-98.5	121.8
		菏泽市	54.1	1.0	45.9	-64.4	63.4

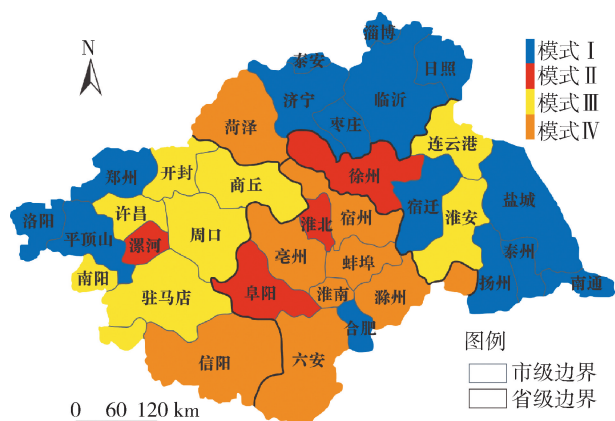


图 2 淮河流域 35 个地级市农业灰水足迹效率的驱动模式分布

Fig. 2 Distribution of driving pattern types of agricultural grey water footprint efficiency of 35 cities in the Huai River Basin

是正向驱动作用。这些地区在淮河流域内农业经济发展水平较高,单位农产品的农业经济效益高,这与农产品的种植结构和单位面积的产量都有直接关系。此种模式应该继续保持农业经济效应的主导模式,调整农作物种植结构,增加单位面积产量。

b. 单因素驱动模式 II。模式 II 的主导驱动因素是灰水产出规模效应,包括河南省的漯河,安徽省的淮北、阜阳和江苏的徐州 4 个地级市。这种主导驱动模式的发展相对来说是一种良性的发展,可以继续保持这种农业生产力发展和生态良好的绿色发展模式。

c. 双因素驱动模式 III。模式 III 是主要以农业经济效应和农业环境效应双重驱动的模式,包括河南省的开封、许昌、商丘、周口、南阳和驻马店以及江苏省的淮安和连云港,共 8 个地级市。这些地区单位农产品的农业经济效益高,农产品种植结构利于

提高农业经济发展水平;同时这些地区的农业环境效应都是负值,对于灰水足迹效率起到负向作用。所以这些地区的农业污染特征属于粗放式农业发展阶段,就是农业经济发展水平较高,但是水资源环境保护水平较低。这种模式地区应该转变农业发展方式,通过农业创新来促进经济产值的增加和环境的保护,实现社会经济系统和资源环境系统相辅相成、相互促进的双重目标。

d. 三因素驱动模式Ⅳ。此模式主要支配因素由农业经济效应、农业环境效应和耕地资源效应三者共同决定,主要包括安徽省的亳州、宿州、蚌埠、淮南、滁州和六安,河南省的信阳和菏泽。这些地区特征是农业经济发展水平较高,同时农业环境效应的负向贡献率也较大,不过这种模式与模式Ⅲ相比,耕地资源效应对于灰水足迹效率的正向贡献率较高,这些地区的人均耕地面积较大,此种模式优于模式Ⅲ。这些区域需要走农业经济 and 环境保护协调发展的道路,充分发挥耕地资源效应和农业经济效应,以先进农业技术手段来代替农业化肥作用,或者提高化肥等的吸收率,降低化学污染物对水资源的污染。

## 4 结 论

a. 淮河流域 35 个地级市的农业灰水足迹效率有逐渐提升的趋势;从各省分布情况来看,山东省的农业灰水足迹效率最高,其次是安徽省和江苏省,河南省最低,空间分布特征是沂沭泗水系的山东地区普遍较高,干流水系的中、下游次之,上游最低。

b. 农业经济效应、灰水产出规模效应和耕地资源效应为正向效应,化肥强度效应和农业环境效应为负向效应,其中农业经济效应正向贡献率最大,是影响农业灰水足迹效率最主要的驱动因素,农业环境效应负向影响较大。

c. 根据农业灰水足迹效率驱动因素的贡献值大小,淮河流域 35 个地级市的驱动模式划分为 4 类:以农业经济效应主导的单因素驱动模式Ⅰ,以灰水产出规模效应主导的单因素驱动模式Ⅱ,以农业经济效应和农业环境效应共同作用的双因素驱动模式Ⅲ,以农业经济效应、农业环境效应和耕地资源效应共同作用的三因素驱动模式Ⅳ。

d. 应将河南省种植业作为水污染重点治理产业,充分发挥农业经济效应的正向驱动效应,依靠农业技术进步给农业发展转型提供强大动力,有效减少化肥农药等投入,进一步降低化肥强度效应来促进化肥利用效率的提高,最终提高农业灰水足迹效率。

## 参考文献:

[1] 沈丰菊. 我国农业废水处理技术的应用现状与发展趋

势[J]. 农业工程技术, 2011, 32(1): 16-19. (SHEN Fengju. Application status and development trend of agricultural wastewater treatment technology in China[J]. Agricultural Engineering Technology, 2011, 32(1): 16-19. (in Chinese))

[2] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade [J]. Global Environmental Change, 2005, 15(1): 45-56.

[3] 尚海洋,宋妮妮. 碳足迹与水足迹的概念、研究方法和应对政策比较[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 15-21. (SHANG Haiyang, SONG Nini. Carbon footprint and water footprint: comparison of concepts, methods, and policy responses[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 15-21. (in Chinese))

[4] 任晓晶,白雪,刘丹,等. 水足迹评价方法对比及案例研究[J]. 水利经济, 2018, 36(6): 14-19. (REN Xiaojing, BAI Xue, LIU Dan, et al. Comparison and case study of assessment methods for water footprints [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(6): 14-19. (in Chinese))

[5] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Globalization of water: sharing the planet's freshwater resources [M]. Oxford: Black-Well Publishing, 2008.

[6] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011.

[7] 付永虎,刘黎明,起晓星. 基于灰水足迹的洞庭湖区粮食生产环境效应评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 152-160. (FU Yonghu, LIU Liming, QI Xiaoxing. Environmental effects evaluation for grain production based on grey water footprint in Dongting Lake area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(10): 152-160. (in Chinese))

[8] 吴兆磊,吴兆丹,祖晓倩. 基于灰水足迹视角的浙江省工业出口结构优化研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 40-45. (WU Zhaolei, WU Zhaodan, ZU Xiaoqian. Optimization of industrial export structure in Zhejiang Province in the perspective of grey water footprint [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2018, 39(2): 40-45. (in Chinese))

[9] 孙才志,韩琴,郑德凤. 中国省际灰水足迹测度及荷载系数的空间关联分析[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 86-97. (SUN Caizhi, HAN Qin, ZHENG Defeng. The spatial correlation of the provincial grey water footprint and its loading coefficient in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 86-97. (in Chinese))

[10] 孙克,聂坚. 基于引力模型的省域灰水足迹空间关联网络分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 29-36. (SUN Ke, NIE Jian. Spatial correlation network analysis of

- provincial grey water footprint based on gravity model[J]. Water Resources Protection, 2019, 35 ( 6 ): 29-36. ( in Chinese ) )
- [ 11 ] 刘红光,陈敏,唐志鹏. 基于灰水足迹的长江经济带水资源生态补偿标准研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019,28(11):2553-2563. ( LIU Hongguang, CHEN Min, TANG Zhipeng. Study on ecological compensation standards of water resources based on grey water footprint: a case of the Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28 ( 11 ): 2553-2563. ( in Chinese ) )
- [ 12 ] CHAPAGAIN A M, HOEKSTRA A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives [ J ]. Ecological Economics, 2011, 70(4):749-758.
- [ 13 ] 韩宇平,贾冬冬,黄会平,等. 基于通径分析的海河流域冬小麦水足迹及影响因素[J]. 水资源保护, 2019, 35 ( 1 ): 6-13. ( HAN Yuping, JIA Dongdong, HUANG Huiping, et al. Water footprint of winter wheat and its influencing factors in Haihe River Basin based on path analysis[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1):6-13. ( in Chinese ) )
- [ 14 ] 何立新,练继建,王书吉. 河北省主要农作物 2005—2014 年灰水足迹变化[J]. 水利水电技术, 2016, 47 ( 12 ): 143-148. ( HE Lixin, LIAN Jijian, WANG Shuji. Variation of grey water footprint of main crops in Hebei Province from 2005 to 2014 [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47 ( 12 ): 143-148. ( in Chinese ) )
- [ 15 ] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products [ J ]. Ecosystems, 2012, 15(3):401-415.
- [ 16 ] 侯希明. 吉林省畜牧业生产水足迹及其影响因素研究 [ D ]. 长春:东北师范大学, 2016.
- [ 17 ] 欧阳佚亭,宋国宝,陈景文. 中国淡水池塘养殖鱼类排污的灰水足迹及污染负荷研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40 ( 3 ): 317-322. ( OUYANG Yiting, SONG Guobao, CHEN Jingwen. Grey water footprint and pollution loadings of freshwater pond-cultured fish in China [ J ]. Environmental Pollution and Control, 2018, 40(3):317-322. ( in Chinese ) )
- [ 18 ] 洗超凡,潘雪莲,甄泉,等. 城市生态系统污染氮足迹与灰水足迹综合评价[J]. 环境科学学报, 2019, 39(3):985-995. ( XIAN Chaofan, PAN Xuelian, ZHEN Quan, et al. Integrated assessments of nitrogen pollution footprints and grey water footprints in the urban ecosystem[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39 ( 3 ): 985-995. ( in Chinese ) )
- [ 19 ] 孙才志,白天骄,吴永杰,等. 要素与效率耦合视角下中国人均灰水足迹驱动效应研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9):1490-1502. ( SUN Caizhi, BAI Tianjiao, WU Yongjie, et al. Driving effect of per capita grey water footprint in China from the perspective of factor and efficiency coupling [ J ]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9):1490-1502. ( in Chinese ) )
- [ 20 ] 白天骄,孙才志. 中国人均灰水足迹区域差异及因素分解[J]. 生态学报, 2018, 38 ( 17 ): 6314-6325. ( BAI Tianjiao, SUN Caizhi. Regional inequality and factor decomposition of the per capita grey water footprint in China [ J ]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 ( 17 ): 6314-6325. ( in Chinese ) )
- [ 21 ] 韩琴,孙才志,邹玮. 1998—2012 年中国省际灰水足迹效率测度与驱动模式分析[J]. 资源科学, 2016, 38 ( 6 ): 1179-1191. ( HAN Qin, SUN Caizhi, ZOU Wei. Grey water footprint efficiency measure and its driving pattern analysis on provincial scale in China from 1998 to 2012 [ J ]. Resources Science, 2016, 38 ( 6 ): 1179-1191. ( in Chinese ) )
- [ 22 ] 张鑫,李磊,甄志磊,等. 时空与效率视角下汾河流域农业灰水足迹分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4):1502-1510. ( ZHANG Xin, LI Lei, ZHEN Zhilei, et al. Analysis of agricultural grey water footprint in Fenhe River Basin based on the perspective of space-time and efficiency [ J ]. China Environmental Science, 2019, 39 ( 4 ): 1502-1510. ( in Chinese ) )
- [ 23 ] 付永虎,刘黎明,袁承程. 农业土地利用系统氮足迹与灰水足迹综合评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32( 增刊 1 ): 312-319. ( FU Yonghu, LIU Liming, YUAN Chengcheng. Comprehensive evaluation for nitrogen footprint and gray water footprint of agricultural land use system [ J ]. Journal of Agricultural Engineering, 2016, 32 ( Sup1 ): 312-319. ( in Chinese ) )
- [ 24 ] 刘钦普. 淮河流域化肥施用空间特征及环境风险分析 [ J ]. 生态环境学报, 2015, 24 ( 9 ): 1512-1518. ( LIU Qinqu. Distribution and environmental risk assessment of fertilizer application on farmland in Huai River Basin [ J ]. Ecology and Environment Sciences, 2015, 24 ( 9 ): 1512-1518. ( in Chinese ) )
- [ 25 ] 宋宇. 新常态下淮河流域农业面源污染来源分析[J]. 环境保护与循环经济, 2015, 35 ( 11 ): 12-14. ( SONG Yu. Source analysis of agricultural non-point source pollution in Huaihe River Basin under the new normal [ J ]. Environmental Protection and Circular Economy, 2015, 35(11):12-14. ( in Chinese ) )
- [ 26 ] 党伟,焦利民. 淮河上游水质污染特征及其综合评价[J]. 水土保持研究, 2018, 25 ( 5 ): 358-363. ( DANG Wei, JIAO Limin. Water pollution characteristics and their comprehensive assessment in the upper reaches of the Huai River [ J ]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5):358-363. ( in Chinese ) )

( 下转第 85 页 )

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(19): 131-139. (in Chinese))
- [14] 王圆圆, 扎西央宗. 利用条件植被指数评价西藏植被对气象干旱的响应[J]. 应用气象学报, 2016, 27(4): 435-444. (WANG Yuanyuan, ZHAXI Yangzong. Assessing vegetation response to meteorological drought in Tibet autonomous region using vegetation condition index[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(4): 435-444. (in Chinese))
- [15] 李新尧, 杨联安, 聂红梅, 等. 基于条件植被指数的陕西省农业干旱时空动态[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1172-1180. (LI Xinyao, YANG Lianan, NIE Hongmei, et al. Assessment of temporal and spatial dynamics of agricultural drought in Shaanxi Province based on vegetation condition index[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1172-1180. (in Chinese))
- [16] 王文, 王鹏, 崔巍. 长江流域陆地水储量与多源水文数据对比分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 759-768. (WANG Wen, WANG Peng, CUI Wei. A comparison of terrestrial water storage data and multiple hydrological data in the Yangtze River basin[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 759-768. (in Chinese))
- [17] 荣艳淑, 巩琳, 卢寿德. 云南 2009—2014 年持续性气象水文干旱特征及成因分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 22-29. (RONG Yanshu, GONG Lin, LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 22-29. (in Chinese))
- [18] 曹艳萍, 南卓铜, 程国栋. GRACE 重力卫星监测新疆干旱特征[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 87-92. (CAO Yanping, NAN Zhuotong, CHENG Guodong. GRACE gravity satellite monitoring of drought characteristics in Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(8): 87-92. (in Chinese))
- [19] 马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 951-961. (MA Zhuguo, FU Congbin, YANG Qing, et al. Drying trend in northern China and its shift during 1951-2016[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 951-961. (in Chinese))
- [20] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [21] 阚增辉. 基于 GRACE 卫星的中国区域陆地水储量变化及干旱特征研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [22] 孙倩, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 2003—2012 年新疆陆地水储量时空变化[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1650-1656. (SUN Qian, TIYIP Tashpolat, DING Jianli, et al. Temporal-spatial changes of water storage in Xinjiang, China during 2003-2012[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(6): 1650-1656. (in Chinese))
- [23] ZHANG Yafeng, HE Bin, GUO Lanlan, et al. The relative contributions of precipitation, evapotranspiration, and runoff to terrestrial water storage changes across 168 river basins[J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124-194. (收稿日期: 2019-11-14 编辑: 彭桃英)

(上接第 66 页)

- [27] 宋大平, 左强, 刘本生, 等. 农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评估研究: 以淮河流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1219-1231. (SONG Daping, ZUO Qiang, LIU Bensheng, et al. Estimation of spatio-temporal variability and health risks of nitrogen emissions from agricultural non-point source pollution: a case study of the Huaihe River Basin, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(6): 1219-1231. (in Chinese))
- [28] KAYA Y. Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: interpretation of proposed scenarios[R]. Paris: IPCC Energy and Industry Subgroup Strategies Working Group, 1989.
- [29] ANG B W, ZHANG F Q, CHOI K. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition[J]. Energy, 1998, 23(6): 489-495.
- [30] ANG B W, LIU F L. A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation[J]. Energy, 2001, 26(6): 537-547.
- [31] 聂志萍, 吴梦芝, 马海良. 基于 LMDI 和脱钩理论的我国生活用水影响因素研究[J]. 水利经济, 2019, 37(5): 11-15. (NIE Zhiping, WU Mengzhi, MA Hailiang. Affecting factors for domestic water use in China based on LMDI and decoupling theory[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(5): 11-15. (in Chinese))
- [32] 章恒全, 覃颖聪, 张陈俊. 中国产业用水量变化驱动效应分解与差异分析[J]. 水利经济, 2019, 37(6): 1-7. (ZHANG Hengquan, QIN Yingcong, ZHANG Chenjun. Decomposition and difference analysis of dynamic driving effect of industrial water use in 31 provinces and cities of China[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(6): 1-7. (in Chinese)) (收稿日期: 2020-02-04 编辑: 熊水斌)