

DOI: 10.5846/stxb201910292274

李胜楠, 王远, 罗进, 蒋培培, 陈华阳. 福建省灰水足迹时空变化及驱动因素. 生态学报, 2020, 40(21): 7952-7965.

Li S N, Wang Y, Luo J, Jiang P P, Chen H Y. Spatio-temporal variations and driving factors of grey water footprint in Fujian Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7952-7965.

福建省灰水足迹时空变化及驱动因素

李胜楠^{1,2,3}, 王 远^{1,2,*}, 罗 进^{1,2}, 蒋培培^{1,2}, 陈华阳^{1,2}

1 福建师范大学地理研究所, 福州 350007

2 福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福州 350007

3 自然资源部资源环境承载力评价重点实验室, 北京 101149

摘要: 灰水足迹是稀释水污染物至达标需要的淡水体积, 是评价水污染程度与水环境质量的重要方法, 对灰水足迹进行核算与分析, 可以促进福建省提高水环境质量, 构建可持续的水生态环境。借鉴 Hoekstra 等提出的灰水足迹核算方法, 对福建省及各地市 2001—2017 年的灰水足迹进行核算, 对其时空变化特征进行评价并使用对数平均迪式指数分解法 (Logarithmic Mean Divisia Index Method, LMDI) 模型对灰水足迹变动的驱动因素进行分解。结果表明: a) 总氮是决定灰水足迹总量的主要污染物, 非点源污染是灰水足迹的最主要来源但占比由 68.25% 降至 63.35%; b) 福建省灰水足迹总量降低了 9.58%, 且各项指标都呈下降趋势, 在空间上, 灰水足迹总量及剩余灰水足迹东南多西北少, 人均灰水足迹及灰水足迹强度东少西多; c) 福建省灰水足迹变动的驱动因素中, 经济因素是最大正向驱动因素, 产生 2932.96 亿 m³ 的贡献量, 技术因素是最大负向驱动因素, 产生 -2630.31 亿 m³ 的贡献量。最后, 针对福建省水污染问题提出建议: a) 开展非点源污染防治专项; b) 加快速度提高城镇生活污水处理水平; c) 优化产业结构, 提高灰水足迹效率; d) 切实落实生态补偿制度, 调动各市水环境保护积极性; e) 加强环境监管力度, 加大技术投入。

关键词: 灰水足迹; 时空变化; LMDI; 驱动因素; 福建省

Spatio-temporal variations and driving factors of grey water footprint in Fujian Province

LI Shengnan^{1,2,3}, WANG Yuan^{1,2,*}, LUO Jin^{1,2}, JIANG Peipei^{1,2}, CHEN Huayang^{1,2}

1 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Fujian Provincial Key Laboratory for Subtropical Resources and Environment, Fuzhou 350007, China

3 Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Natural Resources of People's Republic of China, Beijing 101149, China

Abstract: The grey water footprint is the amount of freshwater required to assimilate the load of water pollutants in order to meet ambient water quality standards and it is an effective method to evaluate the degree of water pollution and the quality of water. By accounting and analyzing of grey water footprint, it will contribute to improve the water environment and promote sustainable water ecology in Fujian province. We accounted the grey water footprint of Fujian province and 9 local cities from 2001 to 2017 by reference to the grey water footprint accounting method proposed by Hoekstra et al, analyzed the spatio-temporal variations, and applied the Logarithmic Mean Divisia Index Method (LMDI) to investigate the contributions of five driving factors. The results showed as follows. a) The total nitrogen (TN) was considered as the major pollutant of total grey water footprint of Fujian province. Non-point pollution was the major resource of grey water footprint but its

基金项目: 福建省公益类重点项目 (2019R1002-7)

收稿日期: 2019-10-29; 修订日期: 2020-05-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: y.wang@fjnu.edu.cn

proportion have decreased from 68.25% to 63.35%. b) The total grey water footprint decreased by 9.58%, and there was a downtrend of all other indicators. The total grey water footprint and the remaining grey water footprint amount was more in the southeast than that in the northwest, while the west amount was more than that in the east for the per capita grey water footprint and grey water footprint intensity. c) Among the driving factors of Fujian's grey water footprint, the economic factor was dominantly positive, making a contribution of 293.296 billion m^3 , while the technical factor was the most negative one, making -263.031 billion m^3 contribution. Therefore, we suggest that: a) launching a project to prevent and control non-point pollution; b) Speeding up the enhancement of urban sewage treatment technique; c) Optimizing the industrial structure and improving the efficiency of grey water footprint; d) Implying a mechanism for ecological compensation, fully mobilizing the initiative of all quarters to protect water environment; and e) Strengthening the supervision of environment and taking efforts to achieve the integration of technological advance and economic rationality.

Key Words: grey water footprint; spatial-temporal variation; LMDI; driving factor; Fujian province

水资源是人类生产生活不可或缺的重要自然资源。随着工业化、城镇化的发展,人类对水环境的影响越来越大,水污染问题直接影响人民生活质量和经济社会发展。对水污染进行量化、评价是解决水污染问题的重要环节。

Hoekstra 和 Chapagain^[1]于2008年首次提出灰水足迹概念,其定义为以水环境质量标准为基准,将水污染物稀释至无害所需的淡水体积^[2]。从研究区域上看,我国灰水足迹的研究主要集中在水污染问题比较严重的北方地区,尤其是河南省^[3]、山东省^[4]等农业较为发达的地区,而东南沿海地区的相关研究相对较少。从研究对象上看,灰水足迹已经在农业方面得到广泛应用,包括宏观上对种植业^[5]、畜牧业^[6],以及微观上针对某种农作物产品^[7]或某种畜禽^[8]的研究;在工业方面,Gerbens Leenes^[9]等对钢铁、水泥等工业产品的灰水足迹进行研究,Melody Blythe Johnson^[10]等对葡萄酒厂的灰水足迹进行核算,与农业相比,灰水足迹在工业和第三产业的应用较少。区域整体的灰水足迹多采用点源、非点源污染的灰水足迹相加而得^[11-12]或选取两者中的较大值^[13-14]。

对数平均迪式指数分解法(Logarithmic Mean Divisia Index Method, LMDI)是对影响因素进行分解分析的一种方法,具有完全分解无残差的优点^[15],多用于碳排放的因素分解,近年来也用作水污染驱动因素研究。韩琴^[11]等利用 LMDI 模型定量分析了多种驱动因素对中国省际灰水足迹效率的影响。张智雄^[16]等分析了多种因素对中国人均灰水足迹的驱动作用,得出资本深化效应和灰水足迹强度效应是最主要的两个驱动因素。在研究尺度上,目前研究多为全国范围或区域间差异,对微观尺度上的区域内部灰水足迹总量、结构及时空差异,以及影响这些时空差异的驱动因素的相关研究较为缺乏。为此,本研究以国家生态文明试验区福建省为例,通过对全省及各地市 2001—2017 年的灰水足迹进行核算,对灰水足迹总量、结构和各项指标的时空变化进行评价,同时在时间尺度和空间尺度,使用扩展的 LMDI 模型定量分析人口因素、经济因素、城乡结构因素、技术因素、产业结构因素对福建省灰水足迹的驱动效应,以期丰富和拓展该领域的研究。

1 研究区域概况

福建省地处中国东南沿海,与浙江省、江西省、广东省相邻,与台湾省隔台湾海峡相望,位于北纬 23°31'—28°18',东经 115°50'—120°43'之间,属亚热带季风气候,地势西北高东南低,河流多自西向东入海。福建省地跨闽江、晋江、九龙江、汀江四大水系,2017 年水资源总量 1055.62 亿 m^3 ,排全国第九^[17]。福建省水资源具有总量较为丰富、时空分布不均的特点。时间上年际差异大,2017 年水资源总量是 2016 年的 49.95%;空间上东少西多,其中龙岩市 2001—2017 年水资源总量是厦门市的 22.18 倍。福建省水环境质量总体较好,但近年来主要流域优质水比例下降,部分湖库富营养化,个别饮用水水源地水质未能稳定达标,部分小流域污染严重^[18]等问题仍然存在。

2 研究方法与数据来源

2.1 灰水足迹核算

本研究中灰水足迹(单位:亿 m^3)核算以《水足迹评价手册》^[2]为依据,并考虑污染源排放的污染物在进入水体的过程中会有损失,计算公式为:

$$\text{GWF} = \frac{L}{C_{\max} - C_{\text{nat}}} \quad (1)$$

$$L = \alpha D \quad (2)$$

式中,GWF 为灰水足迹; L 为进入水体的污染物质; $C_{\max}$ 为环境最大容许浓度; C_{nat} 为受纳水体的自然本底浓度; α 为入河系数; D 为污染物排放量。

由于各污染物的排放量与水质标准不同,且稀释过程可在同一水体中进行,因此灰水足迹由最大值决定,其计算公式为:

$$\text{GWF} = \text{MAX}(\text{GWF}_1, \text{GWF}_2, \dots, \text{GWF}_i) \quad (3)$$

式中:GWF 为灰水足迹; GWF_i 为第 i 种污染物的灰水足迹。

结合各污染物排放量、环境敏感性和数据可获取性,本研究以总氮(Total Nitrogen, TN)、总磷(Total Phosphorus, TP)和化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)作为主要污染物。本研究均以一年为时间单位。

2.1.1 点源污染灰水足迹

点源污染指污染物通过直接连接地表水体的下水系统直接排入水体中造成的污染,主要来自工业、第三产业和城镇生活。点源污染的灰水足迹总量为:

$$\text{GWF}_{\text{poi}} = \text{MAX}(\text{GWF}_{\text{poi-TN}}, \text{GWF}_{\text{poi-TP}}, \text{GWF}_{\text{poi-COD}}) \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \text{GWF}_{\text{poi-TN}} &= \text{GWF}_{\text{ind-TN}} + \text{GWF}_{\text{urb-TN}} + \text{GWF}_{\text{ser-TN}} \\ \text{GWF}_{\text{poi-TP}} &= \text{GWF}_{\text{ind-TP}} + \text{GWF}_{\text{urb-TP}} + \text{GWF}_{\text{ser-TP}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{GWF}_{\text{poi-COD}} = \text{GWF}_{\text{ind-COD}} + \text{GWF}_{\text{urb-COD}} + \text{GWF}_{\text{ser-COD}}$$

式中: GWF_{poi} 为点源污染灰水足迹; $\text{GWF}_{\text{poi-TN}}$ 、 $\text{GWF}_{\text{poi-TP}}$ 、 $\text{GWF}_{\text{poi-COD}}$ 分别表示点源污染以 TN、TP、COD 为污染物的灰水足迹; $\text{GWF}_{\text{ind-TN}}$ 、 $\text{GWF}_{\text{urb-TN}}$ 、 $\text{GWF}_{\text{ser-TN}}$ 为工业、城镇生活、第三产业来源以 TN 为污染物的灰水足迹; $\text{GWF}_{\text{poi-TP}}$ 、 $\text{GWF}_{\text{poi-COD}}$ 同理。

2.1.2 非点源污染灰水足迹

非点源污染种类繁多,农业非点源污染是最主要的非点源污染^[19]。造成农业非点源污染的途径包括种植业、畜牧养殖业、水产养殖业、农村居民生活等。本研究核算的各途径污染物来源,种植业取化肥,畜牧业取畜禽粪尿,水产养殖取淡水渔业的污染物排放,农村居民生活取人粪尿、生活污水和生活垃圾。

$$\text{GWF}_{\text{non}} = \text{MAX}(\text{GWF}_{\text{non-TN}}, \text{GWF}_{\text{non-TP}}, \text{GWF}_{\text{non-COD}}) \quad (6)$$

$$\text{GWF}_{\text{non-TN}} = \text{GWF}_{\text{pla-TN}} + \text{GWF}_{\text{liv-TN}} + \text{GWF}_{\text{aqu-TN}} + \text{GWF}_{\text{rur-TN}}$$

$$\text{GWF}_{\text{non-TP}} = \text{GWF}_{\text{pla-TP}} + \text{GWF}_{\text{liv-TP}} + \text{GWF}_{\text{aqu-TP}} + \text{GWF}_{\text{rur-TP}} \quad (7)$$

$$\text{GWF}_{\text{non-COD}} = \text{GWF}_{\text{pla-COD}} + \text{GWF}_{\text{liv-COD}} + \text{GWF}_{\text{aqu-COD}} + \text{GWF}_{\text{rur-COD}}$$

式中: GWF_{non} 为非点源污染灰水足迹; $\text{GWF}_{\text{non-TN}}$ 、 $\text{GWF}_{\text{non-TP}}$ 、 $\text{GWF}_{\text{non-COD}}$ 分别表示非点源污染以 TN、TP、COD 为污染物的灰水足迹; $\text{GWF}_{\text{pla-TN}}$ 、 $\text{GWF}_{\text{liv-TN}}$ 、 $\text{GWF}_{\text{rur-TN}}$ 、 $\text{GWF}_{\text{aqu-TN}}$ 为种植业、畜牧业、淡水养殖业、农村生活来源以 TN 为污染物的灰水足迹; $\text{GWF}_{\text{poi-TP}}$ 、 $\text{GWF}_{\text{poi-COD}}$ 同理。

由于同一水体可同时稀释多种污染物,该区域同种污染灰水足迹的最大值即为区域内灰水足迹,即 GWF_{reg} 。

$$GWF_{reg} = \max \begin{pmatrix} GWF_{poi-TN} + GWF_{non-TN} \\ GWF_{poi-TP} + GWF_{non-TP} \\ GWF_{poi-COD} + GWF_{non-COD} \end{pmatrix} \quad (8)$$

2.2 灰水足迹评价指标

灰水足迹强度是区域内灰水足迹与该地区国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)的比值(单位: m^3 /万元),即单位 GDP 的灰水足迹,其公式为:

$$GWFI = \frac{GWF}{GDP} \quad (9)$$

式中:GWFI 为灰水足迹强度;GWF 为灰水足迹;GDP 为以 2001 年为基准年的国内生产总值。

人均灰水足迹是区域内灰水足迹与该地区常住人口的比值(单位: m^3 /人),其公式为:

$$GWFP = \frac{GWF}{P} \quad (10)$$

式中,GWFP 为人均灰水足迹; P 为常住人口。

剩余灰水足迹是区域内灰水足迹与该地区水资源量的差值,可评价区域水资源可持续性,其公式为:

$$RGWF = GWF - WR \quad (11)$$

式中,RGWF 为剩余灰水足迹;WR 为水资源总量。

2.3 灰水足迹变化的 LMDI 指数分解

本研究采用 LMDI 模型进行分解。首先利用人类活动对环境影响的 $I = PAT$ 恒等式^[20-21],构建影响灰水足迹总量的恒等式:

$$GWF = PAT = P \cdot \frac{GDP}{P} \cdot \frac{GWF}{GDP} \quad (12)$$

式(12)中 A 、 T 进一步拓展:

$$GWF = P \cdot \frac{GDP}{P_i} \cdot \frac{P_i}{P} \cdot \frac{GWF}{GDP_i} \cdot \frac{GDP_i}{GDP} = P \cdot W \cdot U \cdot E \cdot S \quad (13)$$

式中,GWF 为灰水足迹; P 为常住人口; A 为人均 GDP; T 为灰水足迹强度;GDP 为以 2001 年为基准年的国内生产总值; W 为人均 GDP; U 为城乡结构; E 为灰水足迹强度; S 为产业结构; i 为城镇或乡村。其中城乡 GDP 计算方法基于张应禄^[22]的研究并加以调整:

$$\text{农村 GDP} = \text{第一产业 GDP} - \text{农村地域内的二、三产业乡镇企业增加值} \quad (14)$$

$$\text{城镇 GDP} = \text{区域 GDP} - \text{农村 GDP} \quad (15)$$

根据 LMDI 分解方法^[23],在加法分解形式下:

$$\Delta G = \Delta G_P + \Delta G_W + \Delta G_U + \Delta G_E + \Delta G_S \quad (16)$$

式中, ΔG 为灰水足迹变动量; ΔG_P 、 ΔG_W 、 ΔG_U 、 ΔG_E 、 ΔG_S 分别表示人口因素、经济因素、城乡结构因素、技术因素、产业结构因素变动对灰水足迹变动的贡献量。

2.4 数据来源

本研究以《地表水环境质量标准基本项目标准限值》(GB 3838—2002)^[24]为水质标准依据,使用Ⅲ类水的污染物浓度为环境最大容许浓度,其中 COD 的浓度标准为 20 mg/L,TP 为 0.2 mg/L,TN 仅对湖泊、水库的浓度制定标准,为 1 mg/L,本研究使用此标准,自然本底浓度以 0 计^[1]。

不同来源的污染物排放量、排污系数等相关数据来自《福建统计年鉴》、各市统计年鉴、《全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策》^[25]、《生活源产排污系数及使用说明》^[26]、《中国渔业统计年鉴》、《第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册》^[27]。

其中,复合肥中氮磷钾比例取 1:0.8:0.7^[28];工业废水以氨氮(NH_3-N)代替 TN,各市缺失的数据根据各市

工业废水排放量和福建省工业废水排放量之比,将福建省总量按比例分配;工业废水中 TP 浓度参考俞是聃^[29]通过废水监测数据分析发现的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 TP 浓度存在的显著线性关系,表达式为:

$$y = 0.543x + 0.417 \quad (R^2 = 0.5951) \quad (17)$$

式中, x 为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度, y 为 TP 浓度,单位为 mg/L ; R 为回归系数。

部分数据,如家兔^[30]、农村生活污水排放量^[31]及污染物含量^[31]、农村生活垃圾产生量^[32]及污染物含量^[33]、农村人粪尿中污染物排放量^[34]等,来自有关学者的研究。

福建省和厦门市第二、三产业乡镇企业增加值数据来自《中国乡镇企业年鉴》和《中国乡镇企业及农产品加工业年鉴》,部分年份的数据通过拟合方程(福建省 $R^2=0.99$,厦门市 $R^2=0.80$)补充,其余地市按其第二、三产业 GDP 等比例分配。平潭综合试验区 2011 年成立,部分数据单独统计,在核算时归入福州市。各污染源产生的污染物的入河系数如表 1 所示。

表 1 各污染源入河系数

Table 1 River influencing factors of various pollution sources

排放类型 Type of emission sources	污染源名称 Emission sources	入河系数 River influencing factors	参考文献 References
点源 Point sources	城镇生活	0.6—0.9	游武,高洪 ^[35]
	工业	0.9	游武,高洪 ^[35]
	第三产业	0.6—0.9	游武,高洪 ^[35]
非点源 Non-point sources	种植业	氮肥	钱秀红 ^[34] ,张广纳等 ^[36] ,付永虎等 ^[37]
		磷肥	钱秀红 ^[34] ,张广纳等 ^[36] ,付永虎等 ^[37]
	畜禽养殖	粪	国家环境保护总局自然生态保护司 ^[25]
		尿	国家环境保护总局自然生态保护司 ^[25]
	农村生活	淡水养殖	福建省流域水环境容量研究组 ^[38]
		污水	张广纳等 ^[36]
		垃圾	张广纳等 ^[36]
		粪尿	钱秀红 ^[34]

3 福建省灰水足迹时空变化

3.1 灰水足迹总量及结构

福建省的总灰水足迹由 TN 决定,2001—2017 年呈现出先增后减趋势(图 1),灰水足迹从 1947.19 亿 m^3 降至 1760.64 亿 m^3 ,降幅 9.58%。结合国民经济和社会发展规划来看,福建省灰水足迹经历了上升、波动、下降和快速下降四个阶段。“十五”期间是上升阶段,该时期国民经济快速发展,工业污染物排放量、农业化肥施用量和畜禽养殖量大幅增加,导致灰水足迹上升。“十一五”期间是先降后升的波动阶段,2006—2007 年福建省多市加大环境监管力度,加快工业企业技术改造,集中整治工业聚集区的环境违法问题,灰水足迹开始下降,但 2007—2010 年,随着城镇化水平的提高使城镇生活污染物排放量增大,点源污染是该阶段灰水足迹增长的主要原因,工业污染物排放量也在快速下降之后开始缓慢上升。“十二五”期间是下降阶段,党的十八大以来关于生态文明建设的战略部署,将实行最严格水资源管理制度作为生态文明建设的重要内容,福建省通过实施大水网建设和强化水资源管理,提高全省水资源利用效率和效益。2016 年以来的“十三五”前期为快速下降阶段,在此阶段,国家《关于全面推行河长制的意见》、《水污染防治行动计划》等相关文件的出台,水生态文明城市建设的持续推进,福建省各源头污染防治的有效开展,重点行业清洁改造、工业集聚区污染集中治理的强化,使得水生态环境质量得到极大的改善。

对福建省灰水足迹进行结构变化分析(图 1),在“十五”到“十三五”前期四个时间段内,非点源污染占比高于点源污染,分别为 68%、66%、64%、64%,呈下降趋势。城镇生活和种植业来源分别是福建省点源、非点

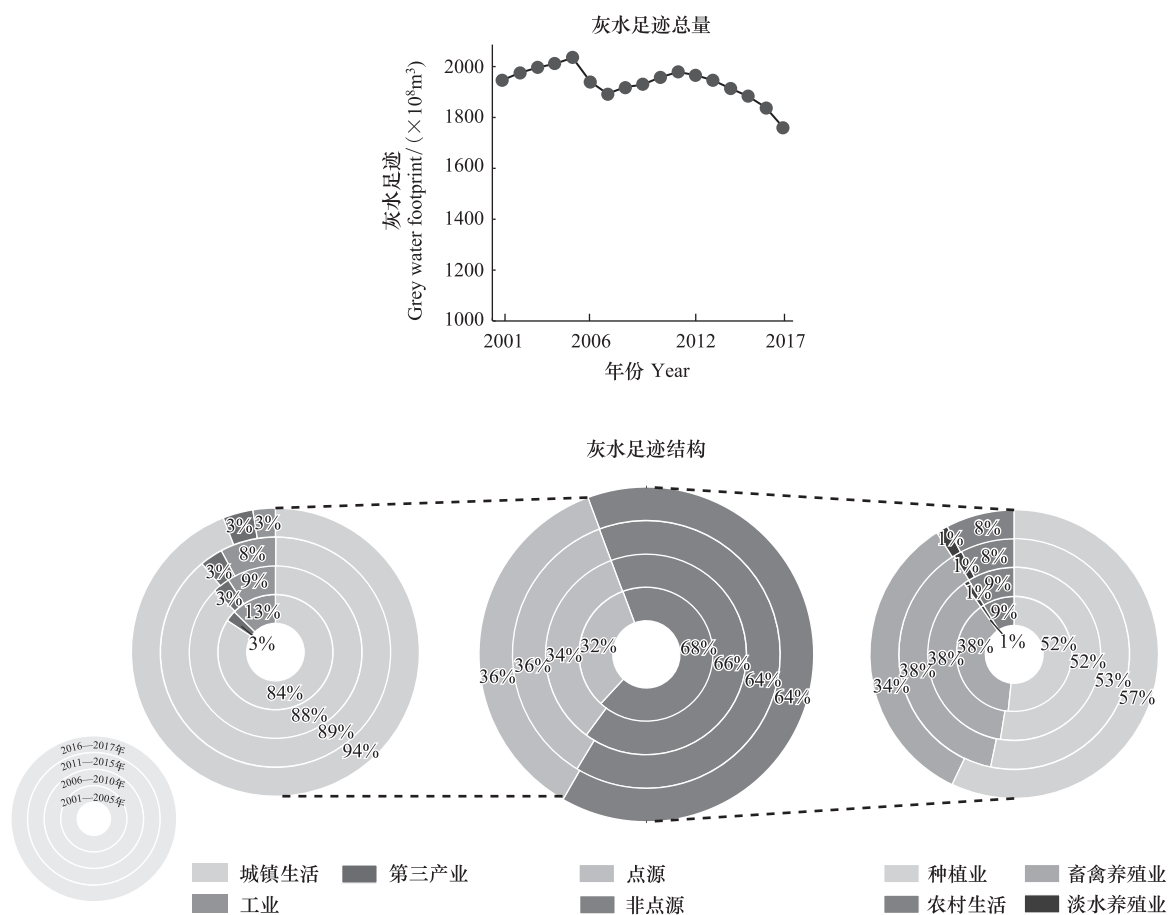


图1 福建省灰水足迹总量及其组成结构变化

Fig.1 Varies of grey water footprint and its structure in Fujian Province

源污染中最大的污染源。点源污染灰水足迹中,第三产业灰水足迹占比稳定,约为3%;城镇生活灰水足迹和区域灰水足迹变动一致,呈先上升后下降趋势,说明前期随着城镇化率的增加和城镇居民生活水平的提高,排放的污染物增多,灰水足迹增加,但之后随着城市污水处理设施的建设完善,灰水足迹逐渐下降。工业源灰水足迹占比下降显著,说明福建省对工业废水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 治理取得了显著效果,但由于仅以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 代替 TN 计算工业污染的灰水足迹,其结果可能会有所偏差。

从空间格局上看,福建省灰水足迹西北低东南高(图2)。漳州市灰水足迹总量较高,但2001—2017年下降了65.19亿 m^3 ,降幅16.08%,居全省首位,漳州市2002年提出从农业优先到工业立市的战略转移,产业转型和绿色农业发展极大地减少了灰水足迹的产生量;三明市是福建省的老工业区,工业污染物排放量大,“十一五”时期三明市通过关停、减产合成氨制造企业以及福建三钢集团技术改造等有效方式,全市工业 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放量下降51.92%,2001—2017年灰水足迹降幅为12.08%,居全省第二;厦门市是研究期内灰水足迹唯一正增长的地区,增加7.79亿 m^3 ,增幅6.96%,城市人口大幅增长导致生活污水增加是主要原因。

对福建省各市的灰水足迹结构进行空间分析(图2),可见内陆三市和漳州市非点源污染占比较高,在“十三五”前期均达70%以上,沿海城市非点源污染占比相对较少。自“十五”时期至“十三五”前期,厦门市非点源污染占比最少且下降明显,由33.66%降至15.31%;三明市近年来积极推动工业污染治理,点源污染占比由31.29%降至25.17%;南平市是福建省生猪养殖的重点区域,随着养殖规模的扩大,畜禽养殖业的灰水足迹总量不断增加,非点源污染占比由75.87%升至85.49%,但2017年起南平市集中开展的畜禽养殖污染治理效果明显,非点源污染治理存在良好预期。

3.2 剩余灰水足迹

剩余灰水足迹可以反映各地区的污染物在水体中累积的水平及水生态环境的可持续性。福建省剩余灰水足迹在 2001—2017 年期间呈下降趋势但波动较大(图 3),说明福建省水环境问题有所好转,但水环境可持续性仍存在挑战。

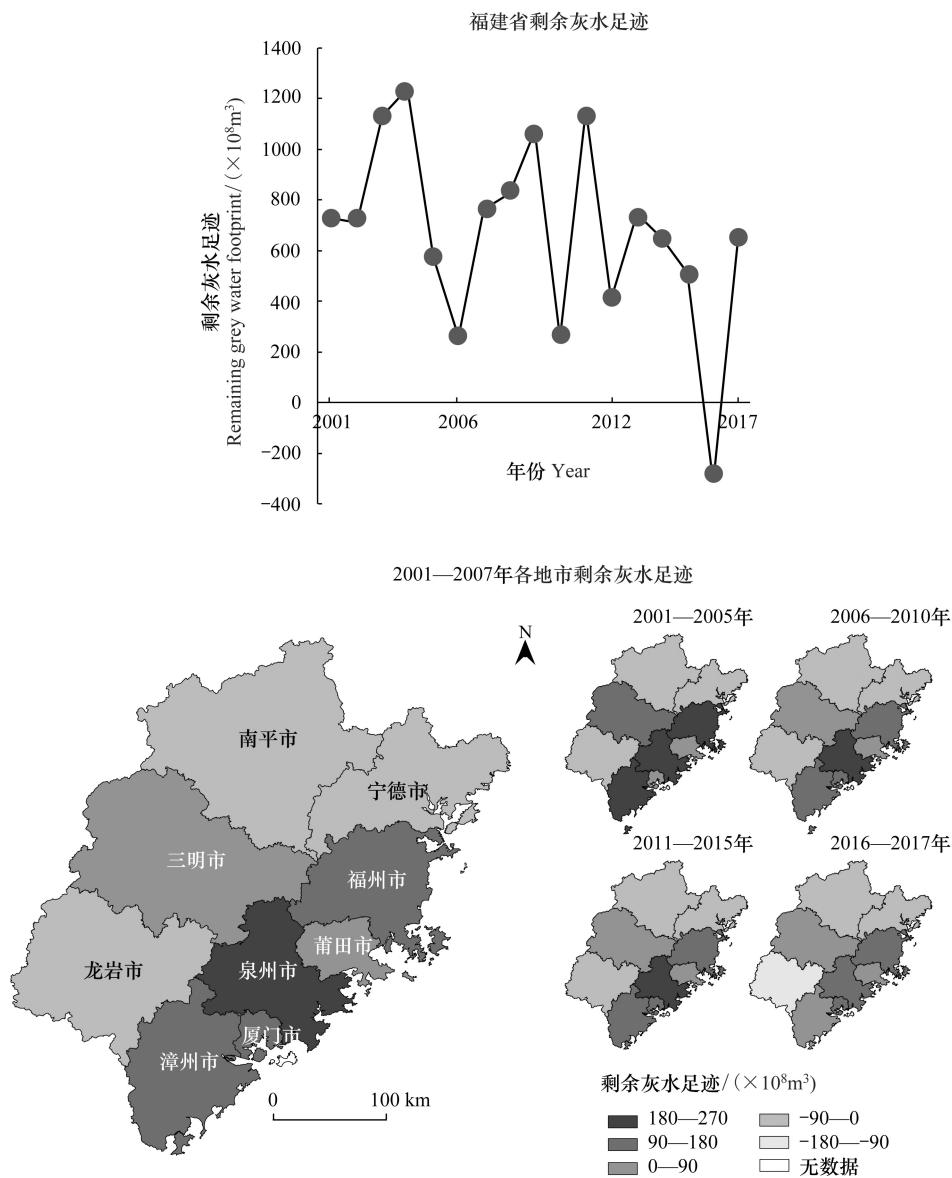


图 3 福建省剩余灰水足迹时空变化

Fig.3 Spatio-temporal changes of remaining grey water footprint in Fujian Province

剩余灰水足迹在空间分布上呈现西北低东南高的特征(图 3),南平市、龙岩市、宁德市的剩余灰水足迹均为负值,区域的水污染程度在当地水资源承载力范围内,水环境具有一定的可持续性,但余地较小,情况仍不容乐观。其余 7 市剩余灰水足迹均为正值,厦门市和莆田市由于区域水资源总量少(表 2),资源承载力低,剩余灰水足迹呈现增加的趋势,经济发展与水环境保护之间矛盾突出。

3.3 人均灰水足迹

2001—2017 年福建省常住人口呈线性增长,人均灰水足迹总体变化趋势和灰水足迹总量一致。在以五年计划划分的时间段内呈现出增长、波动、下降、快速下降的特征(图 4),由 2001 年的 5652.22m^3 降至 2017 年

的 4501.76m³,降幅为 20.3%,再次表明进入新千年以来特别是“十二五”计划以来福建省水环境污染治理成效明显。

表 2 福建省各市 2001—2017 年平均水资源总量/(亿 m³)
Table 2 Average water resources of different cities in Fujian Province from 2001 to 2017

	地区 Areas								
	龙岩市	南平市	漳州市	宁德市	泉州市	福州市	三明市	莆田市	厦门市
水资源总量 Total water resources	290.53	224.63	185.79	149.22	122.92	105.97	94.57	35.34	13.10

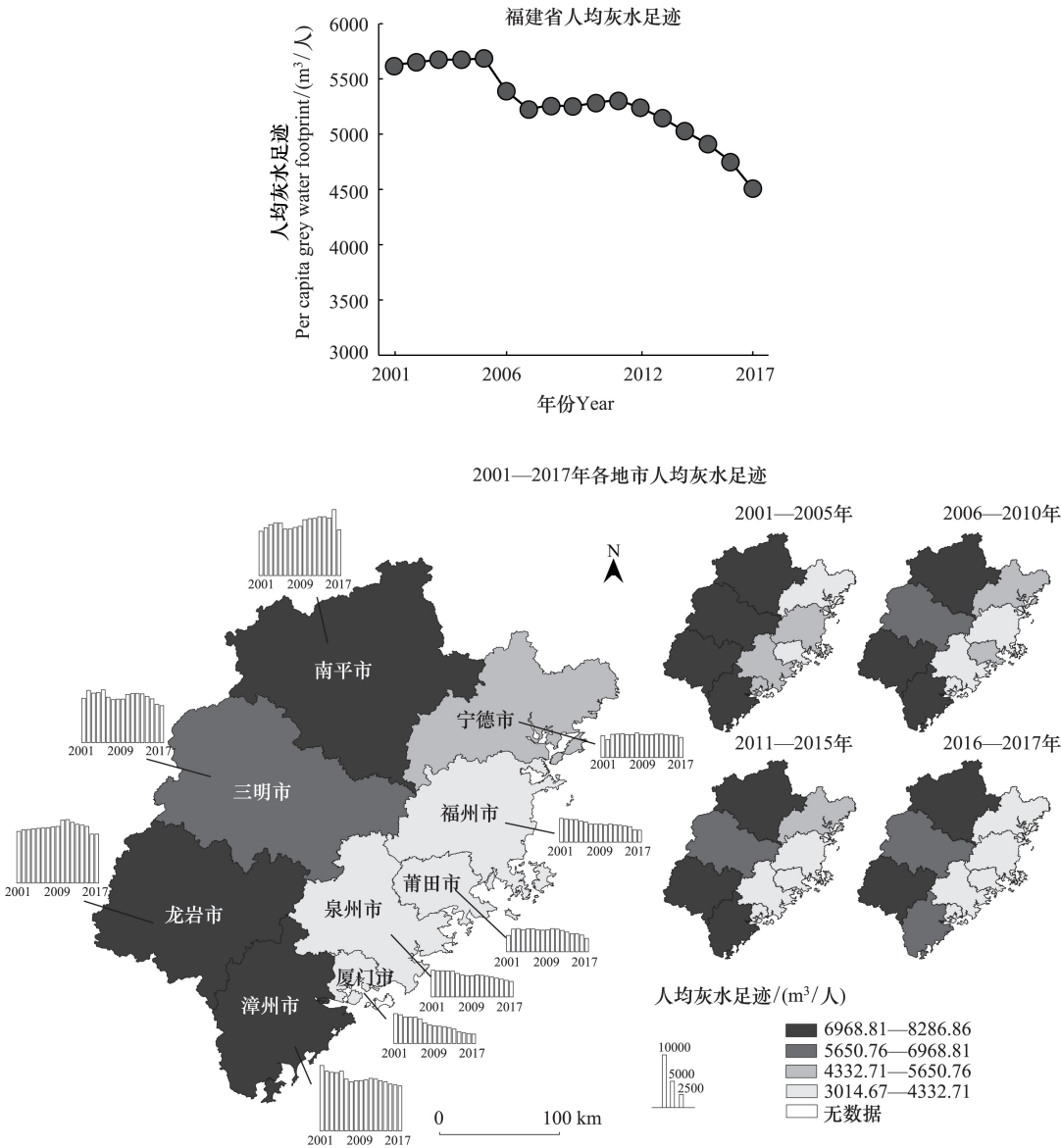


图 4 福建省人均灰水足迹时空变化
Fig.4 Spatio-temporal changes of per capita grey water footprint in Fujian Province

福建省人均灰水足迹区域差别显著(图 4),沿海市(除漳州市)小于内陆市,与灰水足迹总量的空间分布规律相反,与福建省人口分布及变化特征相吻合(表 3),内陆地区的常住人口不断减少,而沿海地区特别是厦门市、福州市、泉州市人口富集,导致福州市和泉州市灰水足迹总量多但人均少,内陆地区总量少但人均高。在

研究期内,各市人均灰水足迹同样保持下降趋势,其中福州及闽三角的厦门、泉州、漳州降幅均超过了全省平均降幅,分别为 27.6%、41.6%、24.2%和 24.3%。这表明了省内经济发达和城市化水平高的地区的水资源利用率和城镇污水处理等环境基础设施的综合服务能力和水平提升较大。

表 3 福建省各市常住人口 2001—2017 年增长率

地区 Areas	地区 Areas									
	福建省	福州市	厦门市	莆田市	三明市	泉州市	漳州市	南平市	龙岩市	宁德市
增长率 Growth rate	13.53%	18.58%	83.11%	5.97%	-0.77%	17.05%	10.87%	-4.96%	-1.86%	-2.68%

3.4 灰水足迹强度

灰水足迹强度是单位 GDP 的灰水足迹,灰水足迹强度越低,表明单位灰水足迹产生的 GDP 越高,即灰水足迹的效率越高。2001—2017 年,福建省灰水足迹强度逐年下降(图 5),降幅 84.17%,灰水足迹效率显著提高,这与该时期福建省产业结构调整,工业废水处理技术快速升级相关。

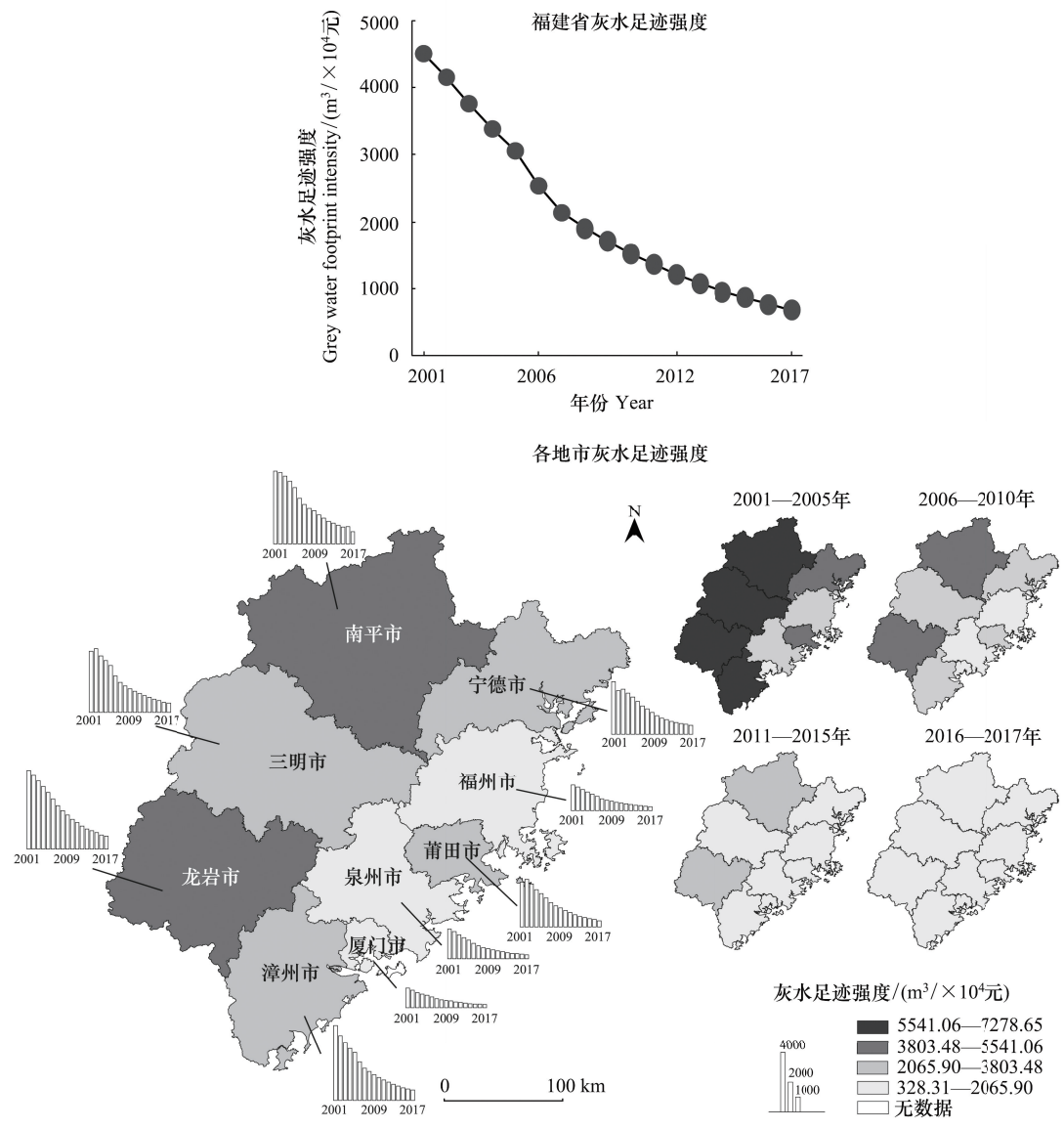


图 5 福建省灰水足迹强度时空变化
Fig.5 Spatio-temporal changes of grey water footprint intensity in Fujian Province

全省灰水足迹强度在空间上西高东低(图5),省内差别较大,区域内经济发展程度及经济增长的生态质量不均衡。各市灰水足迹强度降幅均在80%—90%之间,其中龙岩市降幅最大、厦门市下降最少,与区域的灰水足迹总量、结构和经济发展程度相关。但尽管如此,龙岩市灰水足迹强度仍显著高于福建省平均水平,而厦门市则低于全省平均水平。这表明龙岩灰水足迹强度仍具有较大降幅空间。

3.5 人均-强度灰水足迹指标

综合分析人均灰水足迹与灰水足迹强度,可判断灰水足迹的水污染-效率类型。将福建省及四个时间段的灰水足迹强度从大到小赋值为1—40,人均灰水足迹从小到大赋值为1—40(图6)。研究期内,福建省整体水污染-效率类型有所好转,“十二五”期间由高污染低效率进入高污染高效率类型,“十三五”前期进入低污染高效率类型,说明福建省在一定程度上兼顾了环境保护和经济发展。各市水污染-效率类型均有好转,并且区域性特征明显,福州市、泉州市和厦门市的效率提升最快,在“十一五”期间进入了低污染高效率类型,莆田市和宁德市也在“十二五”期间进入了低污染高效率类型,这与莆田市制造业发展和宁德市新型工业(新能源科技)发展有关。内陆三市及漳州市效率提升较慢,在“十二五”和“十三五”期间由高污染低效率转型为高污染高效率,该区域的产业结构中农业占比较大,非点源污染严重,而农业的产业增加值较低,加之人口流失等问题,导致污染-效率类型转型困难。

4 福建省灰水足迹变化驱动因素分解分析

4.1 福建省灰水足迹变化驱动因素逐年分解分析

分析福建省灰水足迹各驱动因素的累积贡献量(图7),经济因素、城乡结构因素和人口因素对灰水足迹总量变化具有促进作用,其中经济因素的影响最大,经济增长伴随着水环境污染问题;技术因素和产业结构因素对灰水足迹总量的变动有抑制作用,技术因素的削减量最大,说明清洁生产技术和污水处理技术升级是目前福建省水环境污染治理的主要措施。

总体来看,经济增长是灰水足迹的主要正向驱动因素,这与其他学者对灰水足迹驱动因素分解^[11]以及碳排放驱动因素分解^[39]的相关研究结果一致,说明经济增长是碳排放、大气污染、水污染等一系列环境污染的主要驱动力,经济发展的过程迫切需要将环境污染成本纳入考量。本研究中经济因素对灰水足迹的贡献量呈现先增长后下降的趋势(图8),表明以牺牲环境为代价的粗放型发展方式正在逐步转型为绿色发展为导向的高质量发展方式,经济发展的灰水足迹效率不断提高;城乡结构因素的正向贡献量较小且呈下降趋势,随着福建省城乡差异的逐步减小,其对灰水足迹变化的影响也在减弱;人口因素对灰水足迹的驱动作用较小;产业结构因素起负向驱动作用,应加强优化产业结构调整,大力发展新农业、新工业;技术因素作为累计负向贡献量最大的因素,有巨大的减排潜力,可以通过技术升级

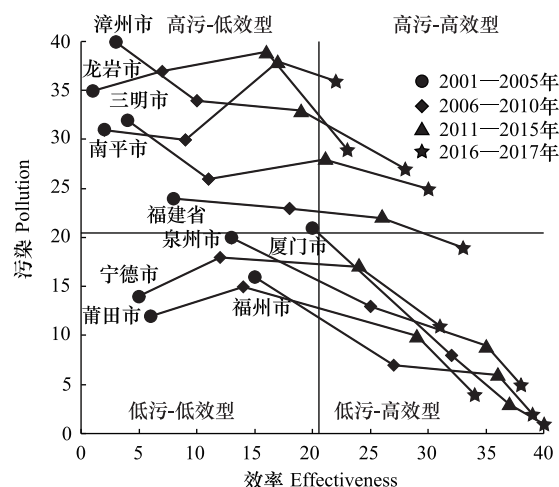


图6 福建省各市水污染-效率类型

Fig. 6 Water pollution-efficiency types for different cities in Fujian Province

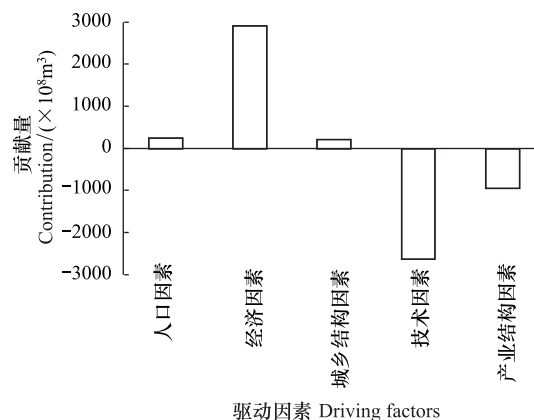


图7 福建省灰水足迹驱动因素累计贡献量

Fig. 7 Cumulative contribution of driving factors of grey water footprint in Fujian Province

减少污染物产生量和排放量,完善污水处理系统,进一步提高灰水足迹效率。

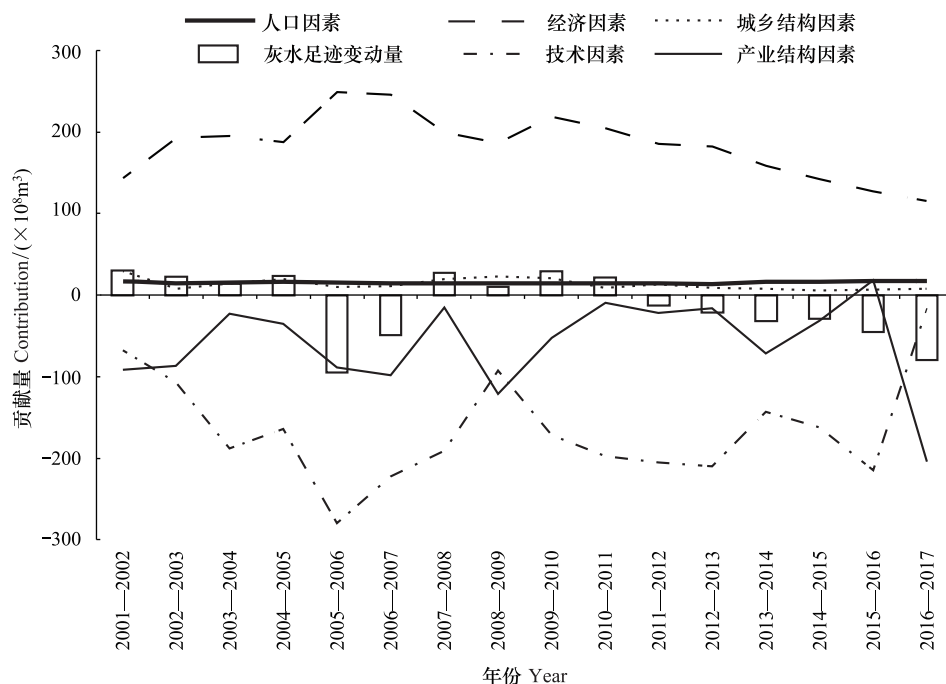


图 8 2001—2017 年福建省灰水足迹变动驱动因素分解

Fig.8 Decomposition of driving factors for the change of grey water footprint in Fujian Province from 2001 to 2017

4.2 各市灰水足迹变化驱动因素分解分析

对福建省各市灰水足迹的驱动因素进行分解分析(图 9)。经济增长是各市灰水足迹变动的主要正向驱动因素;常住人口流失对三明市、南平市、龙岩市、宁德市的灰水足迹变动起负向驱动作用,人口因素对厦门市灰水足迹正向贡献量为 76.05m^3 ,仅次于经济发展因素,厦门市应重视人口因素的正向驱动,加强城镇生活污水治理力度;泉州市、漳州市和福州市城乡结构因素的正向驱动作用相对较强;技术因素是最主要的负向驱动因素,其中漳州市、泉州市和福州市的技术因素负向贡献量较高;泉州市和漳州市产业结构调整负向驱动力较强,表明泉州市工业的快速发展和漳州市从农业向工业的战略转变取得了较好的水环境保护效益。漳州市灰水足迹负向变动量最大,表明在这一时期漳州市的战略调整成果显著,在经济发展的同时兼顾工业污染物减排和生态农业的发展;厦门市是唯一在研究期间灰水足迹变动为正的地区,水环境可持续性降低。

5 结论及建议

本研究对福建省水污染的时空变化进行定量分析,结合 LMDI 方法建立了灰水足迹总量变化的因素分解模型,对人口、经济、城乡结构、技术、产业结构 5 个因素的驱动效应进行了测度和分析,得出以下结论:

1) TN 是影响福建省灰水足迹总量的主要污染物,其中点源污染的 TN 主要来自城镇生活废水,占比 87.80%,非点源污染的 TN 主要来自种植业,占比 52.97%。

2) 2001—2017 年福建省灰水足迹及各项指标都有所下降,各市灰水足迹强度降幅超过 80%,污染-效率类型均有所好转。全省水环境质量有所改善,呈现灰水足迹总量及剩余灰水足迹东南高(福州、泉州、漳州等市)西北低(宁德、南平、龙岩等市),人均灰水足迹及灰水足迹强度东低(宁德、福州、莆田、泉州、厦门等市)西高(南平、三明、龙岩、漳州等市)的空间特征。

3) 经济因素是最大正向驱动因素,产生 2932.96 亿 m^3 的贡献量;技术因素是最大负向驱动因素,产生 -2630.31 亿 m^3 的贡献量。推动经济高质量绿色发展、提高节能减排生产技术与污染物处理技术是降低灰水

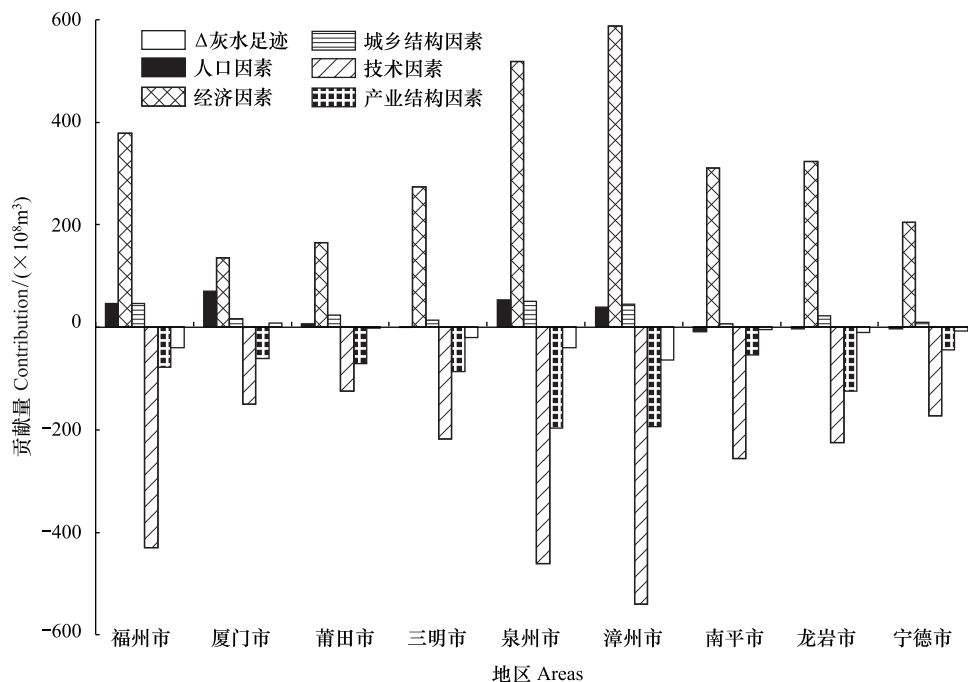


图9 2001—2017年福建省各市灰水足迹驱动因素分解

Fig.9 Decomposition of driving factors of grey water footprint in different cities of Fujian Province from 2001 to 2017

足迹的关键。

结合本研究的结论,对福建省水环境可持续发展提出以下建议:1)推动产业转型升级。结合区域特点和优势,推广绿色农业发展、新型工业化、区域特色旅游等,推动经济高质量发展。2)开展非点源污染专项防治。合理科学施用化肥农药,严控化肥施用量;安装农村沼气设施,提高畜禽粪尿的再利用率;加快推进农村生活污水集中处理,提高水资源循环利用;在全省推广绿色生态农业的样板经验。3)提高城镇生活污水处理水平。加快完善城镇生活污水处理系统,提高污水处理能力。4)落实生态补偿制度。福建省2017年建立了全流域生态补偿长效机制^[40]。通过生态补偿制度,下游受益者如福州、莆田、泉州等市提供资金,让上游保护者如南平、三明、龙岩等市得到合理补偿,加大水环境治理资金投入,鼓励减少水污染物排放,调动全省水环境保护积极性。5)加强环境监管力度,对污染物排放不合格的企业单位严格执罚,支持、推进清洁生产技术和污水处理技术升级,减少水污染物排放量。

由于数据的不可获得性,本研究在污染源核算中没有考虑集中式处理设施产生的污染、重金属水污染物(如汞、镉等)、部分水污染物直接排放入海的影响,并对水质标准和入河系数进行了统一化处理。没有考虑水体自净化能力以及流域上下游之间污染物的传递,可能导致针对淡水环境的分析有所偏差。在今后的研究中,可以构建水文模型以更加精确地计算进入水体的污染物质,对流域尺度下丰水期、枯水期的灰水足迹开展更加深入和全面的研究。

参考文献 (References):

- [1] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources. Oxford: Wiley-Blackwell, 2008: 4-4.
- [2] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Aldaya M M. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. London: Earthscan, 2011: 30-40.
- [3] 曹连海, 汪孝斌, 李宇翔, 张海朋. 河南省农田灰水足迹估算和治理对策. 人民黄河, 2016, 38(11): 65-70, 74-74.
- [4] 杨凡. 山东省地市灰水足迹测度与空间格局分析. 节水灌溉, 2017, (2): 69-75.
- [5] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 119(1): 181-197.

- 2011, 15(5): 1577-1600.
- [6] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 2012, 15(3): 401-415.
- [7] 张宇, 李云开, 欧阳志云, 刘建国. 华北平原冬小麦-夏玉米生产灰水足迹及其县域尺度变化特征. *生态学报*, 2015, 35(20): 6647-6654.
- [8] Allocca V, Marzano E, Tramontano M, Celico F. Environmental impact of cattle grazing on a karst aquifer in the southern Apennines (Italy): quantification through the grey water footprint. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 830-837.
- [9] Gerbens-Leenes P W, Hoekstra A Y, Bosman R. The blue and grey water footprint of construction materials: steel, cement and glass. *Water Resources and Industry*, 2018, 19: 1-12.
- [10] Johnson M B, Mehrvar M. An assessment of the grey water footprint of winery wastewater in the Niagara Region of Ontario, Canada. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 623-632.
- [11] 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. *资源科学*, 2016, 38(6): 1179-1191.
- [12] 贺志文, 向平安. 湖南省灰水足迹变化特征及其驱动因子分析. *中国农村水利水电*, 2018, (10): 19-26.
- [13] 曾昭, 刘俊国. 北京市灰水足迹评价. *自然资源学报*, 2013, 28(7): 1169-1178.
- [14] 姚懿真, 杨贵羽, 汪林, 贾玲, 校昱. 基于 IPAT 模型的河北省灰水足迹分析及预测. *水利水电技术*, 2017, 48(11): 36-42.
- [15] Ang B W, Zhang F Q, Choi K H. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition. *Energy*, 1998, 23(6): 489-495.
- [16] 张智雄, 孙才志. 中国人均灰水生态足迹变化驱动效应测度及时空分异. *生态学报*, 2018, 38(13): 4596-4608.
- [17] 中华人民共和国水利部. 2017 年中国水资源公报. 北京: 中华人民共和国水利部, 2018.
- [18] 福建省环境保护厅. 福建省“十三五”环境保护规划. 福州: 福建省环境保护厅, 2016.
- [19] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [20] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth. *Science*, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [21] Ehrlich P R, Holdren J P. A bulletin dialogue on the ‘Closing Circle’, Critique: one-dimensional ecology. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 1972, 28(5): 16-27.
- [22] 张应禄. 中国城乡经济差距与一体化研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [23] Ang B W, Liu F L, Chew E P. Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis. *Energy Policy*, 2003, 31(14): 1561-1566.
- [24] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [25] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 23-29.
- [26] 环境保护部华南环境科学研究所. 生活源产排污系数及使用说明. 广州: 环境保护部华南环境科学研究所, 2010.
- [27] 全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数测算项目组. 第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册. 北京: 中国水产科学研究院, 2009.
- [28] 刘聪. 中国农业化肥面源污染的成因及负外部性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [29] 俞是昶. 工业废水中氨氮与总磷相关关系探讨. *理化检验-化学分册*, 2002, 38(9): 469-469, 471-471.
- [30] 文斌, 傅祥超, 范康, 刘宁, 白林, 范成强, 刘汉中, 何贵明, 岳铁军. 兔粪堆肥技术初步研究. *畜牧与兽医*, 2010, 42(10): 15-19.
- [31] 李文腾. 农村环境污染控制及对策研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [32] 王卫平. 九龙江流域水环境容量变化模拟及污染物总量控制措施研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [33] 陈玉成, 杨志敏, 陈庆华, 王莉玮, 赵中金, 刘德绍. 基于“压力-响应”态势的重庆市农业面源污染的源解析. *中国农业科学*, 2008, 41(8): 2362-2369.
- [34] 钱秀红. 杭嘉湖平原农业非点源污染的调查评价及控制对策研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [35] 游武, 高洪生. 九龙江北溪水体营养盐来源及污染负荷分析. *福建工程学院学报*, 2012, 10(6): 617-620.
- [36] 张广纳, 邵景安, 王金亮, 倪九派, 谢德体. 三峡库区重庆段农村面源污染时空格局演变特征. *自然资源学报*, 2015, 30(7): 1197-1209.
- [37] 付永虎, 刘黎明, 起晓星, 袁承程, 刘升蛟. 基于灰水足迹的洞庭湖区粮食生产环境效应评价. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 152-160.
- [38] 福建省流域水环境容量研究组. 九龙江流域水环境容量研究. 福州: 福建省流域水环境容量研究组, 2010.
- [39] 王锋, 吴丽华, 杨超. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究. *经济研究*, 2010, 45(2): 123-136.
- [40] 中国政府网. 福建: 生态补偿, 共护一江清水. (2018-07-17) [2019-04-07]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-07/17/content_5306981.htm.