

中国“四化”建设对水足迹强度的影响分析

孙才志^{1,2}, 张灿灿¹, 郜晓雯¹

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029;

2. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 大连 116029)

摘要: 采用2000—2016年中国30省市(不包括香港、澳门、台湾、西藏四省区)的数据, 构建四化指标体系, 计算四化发展指数, 进行地区四化水平评价, 通过OLS和GMM回归模型考察四化发展对水足迹强度的影响, 同时设置四化之间的交互项来识别四化指标之间的相互作用。主要结论如下: 首先, 从四化水平的地域发展差异上来看, 中国四化水平总体上呈现出东部优于中部、中部优于西部的格局, 水足迹强度的分布与之类似, 说明四化水平发展与水足迹强度之间可能存在相关关系; 其次, 计量模型显示四化水平的提升对于水足迹强度的改善有积极影响, 但每一化对于水足迹强度改善的影响大小不一; 第三, 以交互项衡量的四化相互作用对于水足迹强度的影响作用为正, 表明四化发展对水足迹强度的改善效果逐渐趋于收敛。因此, 优先提升落后地区的四化水平, 以四化水平的提升推动水足迹强度的降低, 能够有效降低我国总体水足迹强度水平。

关键词: 水资源; 工业化; 信息化; 城镇化; 农业现代化; 四化交互; 计量回归

水足迹^[1]是指一个国家、一个地区或一个人在一定时间内消费的所有产品和服务所需要的水资源数量, 这一概念的提出使得准确衡量人类对水资源的利用成为可能。国外学者对于水足迹的研究主要集中于单个产品水足迹数量的测算^[2-4]、水足迹与水安全问题^[5]、地区水足迹评估^[6,7]等, 国内学者对于水足迹的研究则侧重于农畜产品及工业产品水足迹的测算^[8-10]、膳食水足迹相关研究^[11,12]、省际水足迹核算与水资源评价^[13-17]、水足迹结构分析^[18,19]、区域水足迹空间差异分析^[20-22]等。水足迹强度表示的是单位GDP所消耗的水足迹数量, 体现了地区水资源的综合利用效率, 是衡量区域发展过程中水资源利用方式的重要指标, 提示地区科技水平和水资源利用效率, 是反映经济发展与水资源利用代价的重要参考指标。

目前对于水足迹强度的研究多集中于时空差异变化、空间关联格局、足迹强度对水资源利用效率的影响、水资源强度与经济水平的耦合关系等。孙才志等^[23,24]利用基尼系数和锡尔指数、探索性空间数据分析方法对中国省际水足迹强度的空间变化规律与空间分布格局分别作出了相应的研究; 赵良仕等^[25,26]基于空间计量收敛模型对中国省际人均GDP差异收敛与水足迹差异收敛进行了实证分析, 并对中国省际水足迹强度的空间自相关关系作出了进一步的探讨; 王博等^[27]和杨凡等^[28]基于ESDA(探索性空间数据分析方法), 通过构建空间集聚图, 分别对辽河流域和江苏省的水足迹强度空间格局特征进行了空间自相关分析; 雷玉桃等^[29]通过构建水足迹模型和水足迹强度模型, 测算出2004—2013年我

收稿日期: 2018-12-14; 修订日期: 2020-01-28

基金项目: 国家社会科学基金项目(19AJY010)

作者简介: 孙才志(1970-), 男, 山东烟台人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源评价与管理。

E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

国主要省份的水足迹及水足迹强度,并在此基础上对水足迹强度进行对比,此外还基于ESDA方法,使用Moran's I 系数和LISA指数进行我国区域水足迹强度的全局和局部自相关分析;盖美等^[30]采用核密度估计模型、基尼系数、锡尔指数分析辽宁省人均水足迹和水足迹强度的动态演变规律;张玲玲等^[31]基于水足迹理论,对中国31个省市2002—2014年的水足迹强度进行测算,同时使用空间计量方法探究中国水足迹强度时空格局变化特征,结果显示中国水足迹强度空间集聚具有跃迁性。

尽管国内学者对水足迹强度的时空差异和收敛关系作出了诸多探讨,但在目前的研究中,研究方法多以ESDA和空间自相关计量模型为主,且对水足迹强度驱动效应的研究尚不多见。围绕四化与水资源关系,孙才志等^[32]利用OLS和GMM模型对我国30个省份的水资源绿色效率驱动因素进行具体分析,但该文献未考虑四化的相互作用,结论尚有改进之处。当前中国发展速度较快,四个现代化建设极大地促进了中国的经济社会发展,中国共产党第十八次全国代表大会提出坚持推进工业化、信息化、城镇化和工业现代化建设,同时推动四化良性互动,相互协调、同步发展,但在当前的水资源研究中,四化对水足迹的影响机制作用研究尚属空白,且现有研究中对于四化和资源环境的耦合分析,较少有将四化相互作用考虑其中的。鉴于此,本文将四化建设与水足迹强度统一起来,研究四化建设对水足迹强度的影响作用,采用中国30个省份2000—2016年^①的面板数据,将人均GDP、每万人拥有专利数、污染治理投资额占财政预算比例作为控制变量,分别代表经济、社会、生态治理因素,将四化作为核心解释变量,将水足迹强度作为因变量,构建相关计量模型,利用最小二乘法(OLS)和广义矩估计(GMM)模型对水资源领域的五化协同发展作出定量的探究,同时,还将四化交互作用考虑在内,探究四化交互作用之后水足迹强度的变化,考虑四化交互项之后的情况也更加符合实际情况,最后根据相应结论给出政策建议。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

结合已有研究成果,本研究认为,四化发展过程中有可能会彼此之间的相互作用,例如,工业化的发展能够带动农业机械水平的提高,对农业现代化带来积极影响,从而间接导致农业现代化对水足迹强度的作用有可能会发生变化。此外,除四化因素外,仍有许多因素能够对水足迹强度产生影响,为使研究结果更加可靠,将工业化、信息化、城镇化、农业现代化作为核心解释变量,同时在考虑相关因素的基础上,从经济、社会、生态三个方面各选取一个控制变量,构建如下计量模型:

$$WFI_{(i,t)} = \alpha_{(i,t)} + \beta_1 IND_{(i,t)} + \beta_2 INF_{(i,t)} + \beta_3 URB_{(i,t)} + \beta_4 AGR_{(i,t)} + \beta_5 IIUA_{(i,t)} + \gamma_1 rjGDP_{(i,t)} + \gamma_2 PAT_{(i,t)} + \gamma_3 PCP_{(i,t)} + \varepsilon_{(i,t)} \quad (1)$$

式中: WFI 表示水足迹强度; IND 表示工业化水平; INF 表示信息化水平; URB 表示城镇化水平; AGR 表示农业现代化水平; $IIUA$ 表示四化交互项,用来捕捉四化互动作用对于

①有别于传统的“四化”即工业化、农业现代化、国防现代化和科技化,本文中所涉及的“四化”均为工业化、信息化、城镇化、农业现代化的简称,考虑到我国工业化建设、农业现代化建设自1954年即已提出,城镇化与信息化建设在《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十个五年规划的建议》中曾有明确表述,虽然将工业化、信息化、城镇化与农业现代化一同表述的说法在2012年中共十八大报告中首次出现,但是四化建设早已开始,因此,本文的时间序列确定为2000—2016年。

水足迹强度的影响，四化互动作用使用其乘积表示，即 $IIUA_{i,t} = IND_{i,t} \times INF_{i,t} \times URB_{i,t} \times AGR_{i,t}$ ；该模型中的控制变量包括人均GDP ($rjGDP$)、每万人专利拥有数 (PAT)、污染治理投资额占财政预算比例 (PCP)； ε 为误差项； i 表示省份； t 表示年份； α 为固定效应值； β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 为待估计系数； γ_1 、 γ_2 、 γ_3 分别表示人均GDP、每万人专利拥有数、污染治理投资额占比对水足迹强度的弹性系数。

考虑四化互动作用后，四化指标的弹性系数为：

$$\zeta_{IND} = \beta_1 + \beta_5 \times INF \times URB \times AGR \quad (2)$$

$$\zeta_{INF} = \beta_2 + \beta_5 \times IND \times URB \times AGR \quad (3)$$

$$\zeta_{URB} = \beta_3 + \beta_5 \times IND \times INF \times AGR \quad (4)$$

$$\zeta_{AGR} = \beta_4 + \beta_5 \times IND \times INF \times URB \quad (5)$$

式中： ζ_{IND} 、 ζ_{INF} 、 ζ_{URB} 、 ζ_{AGR} 分别表示工业化、信息化、城镇化、农业现代化建设对于水足迹强度的弹性系数。

1.2 指标选取

本文实证分析所涉及的指标如下：

(1) 解释变量。本文中主要的解释变量为各地区四化指数。由于四化指标体系尚未统一，本文中的四化指标体系采用课题组统一使用的指标体系^[32]，该指标体系借鉴现有的相关研究成果，并结合我国当前四化建设的实际情况，选取适宜的四化指标（表1），同时使用投影寻踪法计算四化各指标权重，该方法具有稳健性、抗干扰性和准确度高等优

表1 四化指标的选取

Table 1 The selection of "four modernizations" index

一级指标	二级指标	计算方法	权重
工业化水平	工业劳动生产率	工业增加值/第二产业就业人数/(元/人)	0.0041
	工业就业比例	第二产业就业人数/就业总人数/%	1.0316
	工业产出比例	第二产业增加值/地区生产总值/%	0.0226
	工业固体废物综合利用率		0.0153
	科技投入比例	R&D经费支出占地区生产总值的比例/%	0.0056
信息化水平	固定电话普及率	固定电话/总人口数/(户/万人)	0.0090
	移动电话普及率	移动电话/总人口数/(户/万人)	0.0108
	互联网普及率	宽带互联网接入数/总人数/(户/万人)	0.0163
	年末邮电局总数		0.9386
城镇化水平	邮电业务指数	邮电业务总量/总人口数/(元/人)	0.4998
	人口城镇化率	城镇人口/总人口/%	0.9356
	城镇居民恩格尔系数	城镇居民食品支出/消费支出/%	0.1622
	就业城镇化率	城镇就业人数/就业总人数/%	0.3335
	建成区绿化覆盖率	绿化覆盖率/城区面积/%	0.1946
农业现代化水平	每万人拥有公共交通工具	公共交通运营车标台数/(城区人口+城区暂住人口)/标台	0.1453
	农业劳均经济产出	农林牧渔业总产值/第一产业从业人数/(元/人)	0.0671
	农业机械化水平	农业机械总动力/耕地面积/(kW/hm ²)	0.1900
	有效灌溉率	实际灌溉面积/灌溉总面积/%	1.0734
	农村居民恩格尔系数	农村居民食品支出/消费支出/%	0.0002
	城乡居民收入比	城镇居民家庭人均可支配收入/农村居民家庭人均纯收入/%	0.0013

点。另外,为了探究四化相互作用对于水足迹强度的影响,使用四化指数的乘积作为四化交互项参与回归模型的计算,从而测度四化相互作用对于水足迹强度的影响。

(2) 被解释变量。水足迹强度 ($WFI, 10^4 \text{ m}^3/\text{万元}$),通常由单位GDP的水资源消耗量得到。其中,水足迹数量的计算采用分账户的计算方法,具体如下:

$$WF = WF_{agr} + WF_{ind} + WF_{gray} + WF_{live} + WF_{eco} \quad (6)$$

式中: WF_{agr} 为农畜产品水足迹; WF_{ind} 为工业产品水足迹; WF_{gray} 为污染水足迹; WF_{live} 为生活水足迹; WF_{eco} 为生态水足迹。

(3) 控制变量。考虑变量显著性对模型稳健性的影响,本文在解释变量之外再次选取三个控制变量:人均GDP、每万人拥有的专利数、污染治理投资额占财政预算比例,三个控制变量分别代表经济、社会、生态三个方面,以求进一步研究水足迹强度的驱动因素。

1.3 数据来源

选取2000—2016年中国30个省市(由于部分数据获取困难,香港、澳门、台湾、西藏四省区的相关内容本研究暂不涉及)的面板数据,基础数据主要来源于《中国水资源公报》《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》以及各省市统计年鉴等,为消除通货膨胀等因素对GDP的影响,研究期内GDP数据均采用以2000年为基期的地区GDP指数进行重新计算调整。本研究数据处理采用软件为Stata 13.0。

2 结果分析

2.1 水足迹强度与四化水平分析

表2给出各省份研究期间水足迹强度水平,由于篇幅限制,此处仅列出2000年、2004年、2008年、2012年、2016年省份水足迹强度数据。由表可知,研究期间,我国省际水足迹强度均出现减小的变化趋势,而水足迹强度在一定程度上是反映水资源利用效率的重要指标,这表明我国整体水资源利用效率有显著提升。各省份水足迹强度下降速度不一,经济发达省份水足迹强度较低,但下降速度较慢,较为落后的省份水足迹强度在研究前期较为偏高,但研究期内下降速度较快,说明经济发展水平不同的省份其水足迹强度的收敛速度是不同的。

限于篇幅,表3给出中国30省份2016年四化建设水平,由表可知,我国各省份四化建设水平存在较大差距,整体来看,四化建设水平较高的省份主要集中于东部沿海地区,而中西部地区四化建设水平仍有待提高,四化建设水平与我国“梯度化”的区域经济发展格局相对应,即东部地区优于中部地区,中部地区优于西部地区。以变异系数来看,农业现代化变异系数最大,为0.3928,表明我国各省份之间农业现代化建设差距较大,东部地区经济发达省份农业现代化指数较高,经济发展能够为农业现代化提供相应的基础条件,例如肥料、农业机械等,同时这些省份经济发展对于土地和劳动力等资源的挤占,也使得农业生产更加趋于现代化;城镇化发展指数的变异系数较小,为0.0616,表明我国各省份之间城镇化建设水平差距较小。以四化发展的时间变化来看,工业化发展水平较高的省份有由东向西转移的趋势,这主要是由于地区产业升级的原因,导致东部工业向西部地区转移,从而促进了西部地区的工业化建设水平,相比于东部地区,中西部省份需要提高工业化发展质量;信息化建设水平逐年提高,与我国“梯

表2 中国30省份水足迹强度水平

Table 2 Water footprint intensity level in 30 provincial-level regions in China in some years ($10^4 \text{ m}^3/10^4 \text{ yuan}$)

地区	2000年	2004年	2008年	2012年	2016年
北京	0.0675	0.0417	0.0312	0.0244	0.0204
天津	0.0804	0.0509	0.0323	0.0211	0.0160
河北	0.2573	0.1817	0.1373	0.1021	0.0815
山西	0.2866	0.1917	0.1157	0.0971	0.0742
内蒙古	0.3867	0.3072	0.2200	0.1405	0.0926
辽宁	0.1563	0.1239	0.0855	0.0583	0.0511
吉林	0.2925	0.2523	0.1591	0.1088	0.0900
黑龙江	0.4251	0.3244	0.2588	0.1894	0.1171
上海	0.0816	0.0529	0.0374	0.0281	0.0207
江苏	0.1890	0.1194	0.0800	0.0537	0.0537
浙江	0.1476	0.0860	0.0565	0.0407	0.0277
安徽	0.4383	0.3245	0.2261	0.1534	0.1077
福建	0.1840	0.1289	0.0834	0.0589	0.0446
江西	0.4787	0.3266	0.2326	0.1577	0.1290
山东	0.2304	0.1377	0.0927	0.0661	0.0638
河南	0.3522	0.2482	0.1812	0.1301	0.0867
湖北	0.3569	0.2343	0.1658	0.1121	0.0690
湖南	0.4239	0.3039	0.1944	0.1299	0.0876
广东	0.1606	0.1022	0.0617	0.0494	0.0421
广西	0.5175	0.3410	0.2163	0.1482	0.1457
海南	0.3314	0.2381	0.1811	0.1343	0.1108
重庆	0.3287	0.2344	0.1535	0.0885	0.0601
四川	0.4919	0.3290	0.2051	0.1305	0.0747
贵州	0.6439	0.4657	0.2914	0.1638	0.1087
云南	0.3530	0.2614	0.2030	0.1444	0.0896
陕西	0.3675	0.2665	0.1839	0.1302	0.1140
甘肃	0.3707	0.2658	0.2038	0.1548	0.0915
青海	0.3267	0.2381	0.1700	0.0915	0.0459
宁夏	0.4099	0.2875	0.2613	0.1956	0.2080
新疆	0.3254	0.2498	0.2066	0.1783	0.1607

表3 2016年中国30省份四化建设水平

Table 3 The level of "four modernizations" in 30 provincial-level regions in China in 2016

地区	工业化	信息化	城镇化	农业现代化
北京	0.1751	28.1971	0.9923	0.4273
天津	0.3116	16.0886	1.0952	0.4115
河北	0.2114	15.1391	0.9769	0.4401
山西	0.2076	13.8021	0.9628	0.2400
内蒙古	0.3402	14.5587	0.9600	0.2145
辽宁	0.2633	15.0734	1.0202	0.1575
吉林	0.2464	11.2702	0.9449	0.1322
黑龙江	0.0146	14.9412	0.9630	0.2262
上海	0.2409	24.8383	1.1338	0.6130
江苏	0.2822	21.5043	1.0659	0.5023
浙江	0.2923	21.8065	1.0682	0.4285
安徽	0.1861	13.7927	0.9583	0.4348
福建	0.2585	19.8678	1.0403	0.4934
江西	0.2005	13.4863	0.9946	0.3777
山东	0.2407	19.9455	1.0125	0.4143
河南	0.2085	21.1613	0.9270	0.3899
湖北	0.1988	13.3222	0.9727	0.3511
湖南	0.1900	12.1148	0.9582	0.4426
广东	0.2683	35.8555	1.0830	0.4575
广西	0.1766	12.9448	0.9306	0.2334
海南	0.3128	10.1636	0.9974	0.2599
重庆	0.2097	15.1917	1.0146	0.1865
四川	0.1862	27.7883	0.9591	0.2660
贵州	0.1381	11.3967	0.8722	0.1751
云南	0.1369	12.2015	0.9133	0.1794
陕西	0.2387	16.0077	0.9954	0.2188
甘肃	0.1608	12.4825	0.8793	0.1753
青海	0.2072	8.4218	0.9556	0.2309
宁夏	0.1454	12.3838	0.9719	0.2518
新疆	0.1943	10.1851	0.9163	0.5063
最大值	0.3402	35.8555	1.1338	0.6130
最小值	0.0146	8.4218	0.8722	0.1322
平均值	0.2148	16.5311	0.9845	0.3279
方差	0.0040	37.8211	0.0037	0.0166
标准差	0.0636	6.1499	0.0606	0.1288
变异系数	0.2962	0.3720	0.0616	0.3928

度化”的区域经济发展格局总体相吻合，但其中也有“逆梯度化”的现象，例如，四川信息化水平高于许多东部省份，这表明中西部地区在发展上能够赶超东部省份。

2.2 四化对水足迹强度的计量回归分析

在计量回归之前，需要对上述各个变量进行多重共线性检验，计算结果如表4所示，结果显示各变量的方差膨胀因子 VIF 值均小于经验值 10，表明本研究所选取的各个变量之间不存在多重共线性问题，对于回归模型计算中的整体效应和回归系数可以较准确地估计，且核心解释变量四化指数的 VIF 值远

表4 各解释变量的方差膨胀因子VIF值

Table 4 Variance expansion factor VIF value of each explanatory variable

变量	IND	INF	URB	AGR	rjGDP	PAT	PCP	IUA	Mean VIF
VIF值	3.92	1.71	2.52	2.37	6.73	4.39	1.30	6.51	3.68

小于经验值10,表明在回归计算中该四项解释变量的弹性系数估计仍较为准确,因此可以进行下一步的实验研究。表5给出各主要变量的统计描述结果,由表可知,中国省际水足迹强度的变异系数为0.6443,说明中国省际水足迹强度的时空差异明显,研究期间内水足迹强度有十分显著的改善,但地区间水足迹强度的差异依然较大。控制变量中,万人专利拥有数的变异系数较大,表明研究期间,万人专利拥有数变化较大,地区间万人专利拥有数尚有较大差距。

表5 主要变量的统计描述情况

Table 5 Statistical description of the main variables

变量	均值	标准差	变异系数	最小值	最大值	样本数/个
Y	0.1732	0.1116	0.6443	0.0160	0.6439	510
IND	0.1599	0.0591	0.3698	0.0146	0.3402	510
INF	14.8186	8.2815	0.5589	1.2647	72.3543	510
URB	0.7781	0.2239	0.2878	0.2612	1.1588	510
AGR	0.2807	0.1171	0.4170	0.0870	0.6130	510
rjGDP	2.1493	1.5700	0.7305	0.2742	8.9392	510
PAT	4.2551	7.1897	1.6897	0.1299	46.2853	510
PCP	7.6167	3.7483	0.4921	1.2994	23.5310	510
IUA	0.7108	0.8007	1.1265	0.0044	4.7668	510

表6给出利用OLS统计回归模型的计量结果。表中显示,人均GDP的系数显著为负,表明人均GDP与水足迹强度二者之间存在负相关关系,人均GDP的提高可以降低水足迹强度,但人均GDP系数绝对值较小,说明人均GDP对于水足迹强度的降低作用还十分有限;万人专利数的系数不显著为正,表明万人专利数作为社会发展水平的一个评价方面,对于水足迹强度的影响作用尚不明显,应着力加快专利技术的成果转化,促使专利技术能够对水足迹强度降低产生一定的积极影响;污染治理投资额占比对于水足迹强度的影响不显著为负,说明污染治理投资额占比对于水足迹强度的降低作用并不明显。工业化、城镇化、农业现代化对水足迹强度的影响均显著为负,说明这三者在推进过程中能够有效降低水足迹强度,而信息化对水足迹强度的影响系数则不显著,说明信息化并未对水足迹强度的变化产生较为明显的影响。

OLS能够成立的最重要的条件是数据均符合严格外生性,即解释变量与扰动项不相关;其次,OLS假定扰动项的协方差矩阵与n阶单位矩阵成正比。否则,无论样本容量多大,OLS估计量也不会收敛到真实的总体参数。但是在实际问题中,省市之间有很强的异质性,省际间的经济发展水平、万人专利拥有数量、污染治理投资额占比对于水足迹强度的作用存在差异,同时我国省际四化发展水平差异较大,这些地区性的差异因素在OLS回归中没有体现出来。在实证模型中,解释变量可能与水足迹强度存在相互影响,从而引发内生性问题,上述问题可能会导致OLS回归模型估计不准确,因此本文在此使用GMM模型进行回归估计,GMM方法一方面可以解决回归过程中严格外生性假定

表6 各省份四化对水足迹强度的OLS回归结果

Table 6 OLS regression results of water footprint intensity of four modernizations in each provincial-level region

解释变量	1	2	3	4	5	6
<i>rjGDP</i>	-0.0751*** (0.0121)	-0.0362* (0.0186)	-0.0361* (0.0188)	-0.0161 (0.0123)	-0.0140 (0.0113)	-0.0195** (0.0091)
<i>PAT</i>	0.0063*** (0.0014)	0.0036** (0.0015)	0.0036** (0.0015)	0.0018 (0.0011)	0.0021* (0.0012)	0.0006 (0.0008)
<i>PCP</i>	-0.0014 (0.0024)	-0.0013 (0.0018)	-0.0013 (0.0018)	-0.0037*** (0.0014)	-0.0032** (0.0013)	-0.0014 (0.0011)
<i>IND</i>		-0.9845*** (0.3813)	-0.9854*** (0.3837)	-0.4852* (0.2721)	-0.4531* (0.2692)	-0.4316** (0.2028)
<i>INF</i>			-0.0002 (0.0012)	-0.0001 (0.0007)	-0.0001 (0.0007)	-0.0015 (0.0011)
<i>URB</i>				-0.2289*** (0.0338)	-0.2199*** (0.0302)	-0.2476*** (0.0246)
<i>AGR</i>					-0.1988* (0.1061)	-0.6409*** (0.1847)
<i>IIUA</i>						0.0776*** (0.0161)
<i>hausman</i>	11.54 (0.0092)	7.16 (0.1276)	7.31 (0.1983)	10.36 (0.1103)	12.24 (0.0930)	31.83 (0.0001)
模型	FE	RE	RE	RE	RE	FE
常数项	0.3182*** (0.0270)	0.4030*** (0.0359)	0.4055*** (0.0390)	0.4852*** (0.0339)	0.5185*** (0.0405)	0.6318*** (0.0594)
R^2	0.5105	0.6088	0.6090	0.7533	0.7622	0.8200
F (wald值)	13.33 (0.0000)	85.24 (0.0000)	85.59 (0.0000)	184.21 (0.0000)	196.33 (0.0000)	37.01 (0.0000)
观测值	510	510	510	510	510	510

注：圆括号内为标准误差，*、**、***分别表示在10%、5%、1%的水平上显著，下同。

产生的异方差和内生性问题，同时又可以解决扰动项不符合球形扰动的正态分布问题^[33]。

表7为GMM回归统计结果。GMM所有回归都通过了弱工具变量检验，且GMM用解释变量的滞后值作为工具变量，结果比OLS更为可靠。由回归结果可知，人均GDP、污染治理投资额占比以及四化对水足迹强度均有十分显著的降低作用，而万人专利拥有数对水足迹强度的改善作用尚不明显，表明万人专利拥有数对水资源利用的提升作用仍有待加强。加入交互项这一变量后，农业现代化对于水足迹强度的作用由不显著变为十分显著。基于此，有以下发现：

(1) 四化各子变量对于水足迹强度降低的影响作用存在差异。首先，工业化对于水足迹强度的降低起积极的正向作用。在GMM回归中，无论是否加入其他三化的影响，工业化对于水足迹强度降低的作用都是十分显著的，这有可能是因为在我国工业化过程中，以可持续发展为战略思想的发展方式淘汰了一批高耗能高污染产业，产业结构的升级改造使得中国工业化进程中更加注重对能源资源的利用效率。第二，信息化对水足迹强度降低的促进作用较为有限。信息化回归系数在四化中为最小，这可能是由于以信息技术和信息产业为代表的高新技术产业对于水资源的利用效率较高，使得水资源的利用效率大幅度的提升，从而对水足迹强度有一定的改善作用；但是由于我国传统产业在产业结构中仍然占有较大比例，供给侧改革任重道远，同时信息化受到滞后效应的影响，其滞后一期甚至二期值对于当期水足迹强度仍有所影响，因此，信息化对于水足迹强度

表7 各省份四化对水足迹强度的GMM回归结果

Table 7 GMM regression results of water footprint intensity of four modernizations in each provincial-level region

解释变量	1	2	3	4	5	6
<i>rjGDP</i>	-0.0571*** (0.0040)	-0.0273*** (0.0048)	-0.0274*** (0.0047)	-0.0113*** (0.0031)	-0.0110*** (0.0032)	-0.0145*** (0.0032)
<i>PAT</i>	0.0023*** (0.0006)	0.0014** (0.0006)	0.0017*** (0.0006)	0.0003 (0.0005)	0.0004 (0.0005)	-0.0004 (0.0005)
<i>PCP</i>	-0.0033*** (0.0008)	-0.0008 (0.0007)	-0.0007 (0.0007)	-0.0029*** (0.0007)	-0.0027*** (0.0008)	-0.0020*** (0.0007)
<i>IND</i>		-0.9281*** (0.1076)	-0.9104*** (0.1056)	-0.5724*** (0.0868)	-0.5545*** (0.0861)	-0.6439*** (0.0781)
<i>INF</i>			-0.0010** (0.0004)	-0.0012*** (0.0003)	-0.0011*** (0.0003)	-0.0022*** (0.0005)
<i>URB</i>				-0.2259*** (0.0256)	-0.2256*** (0.0256)	-0.2304*** (0.0249)
<i>AGR</i>					-0.0336 (0.0269)	-0.1135*** (0.0365)
<i>IIUA</i>						0.0358*** (0.0090)
常数项	0.3065*** (0.0100)	0.3762*** (0.0132)	0.3868*** (0.0136)	0.5018*** (0.0179)	0.5046*** (0.0182)	0.5412*** (0.0224)
R^2	0.6030	0.6775	0.6832	0.7495	0.7506	0.7608
wald	395.54 (0.0000)	718.29 (0.0000)	770.64 (0.0000)	1257.68 (0.0000)	1268.66 (0.0000)	1520.87 (0.0000)
Root MSE	0.0652	0.0588	0.0583	0.0518	0.0517	0.0506
观测值	480	480	480	480	480	480

的降低作用较为有限。第三，城镇化有助于水足迹强度的下降。无论是否将四化交互因素考虑在内，城镇化都能够显著降低水足迹强度，城镇化的推进过程中，人口集中供水，能够有效避免水资源的浪费，同时城镇生态生活用水统一调配管理，有效监控水资源利用。第四，农业现代化能够对水足迹强度的降低有明显的促进作用。在加入四化交互作用后，农业现代化对于水足迹强度的改善作用在统计上变得十分显著，这可能是由于农业现代化在四化协同发展的条件下，受到工业化带来的机械化、城镇化带来的农产品商品化、信息化带来的农业管理高效化等作用，使得农业现代化的推进对水足迹强度的下降起到明显的改善作用。

(2) 四化建设水平的提高对于水足迹强度的下降有明显的促进作用。无论是否考虑四化交互作用，四化对于水足迹强度的降低作用都十分显著，但是加入四化交互作用这一影响因素后，其中一化对于水足迹强度的影响作用与其他三化相关，四化过程的推进有利于实现水足迹强度的降低，提高水资源利用效率水平。另外，四化水平的提高对于水足迹强度的降低效应逐渐趋于收敛。由表7中回归6显示的结果可知，四化交互项IIUA在回归中的估计系数十分显著为正，表明随着四化建设水平的提高，由于四化交互作用的影响，四化发展对于水足迹强度的降低作用逐渐趋于收敛。因此发达地区的四化水平较高，水足迹强度下降的空间有所收窄，而落后地区的四化水平较低，当提升其中某一化水平时，对于整体水足迹强度的改善帮助较大。

2.3 不同分位水平下四化对水足迹强度的影响

为论证四化的推进过程在降低水足迹强度时相互之间是否存在影响作用，本文对四

化两两互动对于水足迹强度的弹性系数进行计算，使用某一化在不同分位点上的值测算另一化对于水足迹强度的边际影响，此时将其余两化的值固定在均值水平上。具体的计算结果如表8所示。

表8 不同分位水平下中国四化建设对足迹强度的弹性系数

Table 8 Elastic coefficients of four modernizations to water footprint intensity on various percentiles in China

弹性系数		1%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	99%
ζ_{IND}	<i>INF</i>	-0.6284	-0.6044	-0.5930	-0.5642	-0.5398	-0.5056	-0.4496	-0.4239	-0.2817
	<i>URB</i>	-0.6031	-0.5979	-0.5895	-0.5361	-0.5172	-0.5072	-0.4957	-0.4874	-0.4767
	<i>AGR</i>	-0.6030	-0.5888	-0.5836	-0.5715	-0.5445	-0.4845	-0.4665	-0.4503	-0.4297
ζ_{INF}	<i>IND</i>	-0.0017	-0.0016	-0.0015	-0.0013	-0.0010	-0.0007	-0.0003	-0.0001	0.0001
	<i>URB</i>	-0.0018	-0.0017	-0.0016	-0.0010	-0.0008	-0.0007	-0.0006	-0.0005	-0.0004
	<i>AGR</i>	-0.0018	-0.0016	-0.0015	-0.0014	-0.0011	-0.0005	-0.0003	-0.0001	0.0001
ζ_{URB}	<i>IND</i>	-0.2212	-0.2194	-0.2177	-0.2135	-0.2071	-0.2009	-0.1937	-0.1911	-0.1869
	<i>INF</i>	-0.2272	-0.2223	-0.2199	-0.2140	-0.2090	-0.2020	-0.1905	-0.1852	-0.1560
	<i>AGR</i>	-0.2220	-0.2191	-0.2180	-0.2155	-0.2100	-0.1976	-0.1939	-0.1906	-0.1864
ζ_{AGR}	<i>IND</i>	-0.0879	-0.0830	-0.0784	-0.0667	-0.0490	-0.0318	-0.0118	-0.0045	0.0071
	<i>INF</i>	-0.1047	-0.0910	-0.0845	-0.0681	-0.0542	-0.0347	-0.0028	-0.0118	0.0928
	<i>URB</i>	-0.0903	-0.0873	-0.0825	-0.0521	-0.0413	-0.0356	-0.0291	-0.0243	-0.0182

由表中数据分析可知，首先，城镇化与其他三化分别互动时，对于水足迹强度的下降均有十分明显的积极作用。当工业化、信息化、农业现代化在1%、5%、…、95%、99%等不同分位水平上依次取值时，城镇化水平对水足迹强度的影响始终为负，同时当城镇化在不同分位点上依次取值时，工业化、信息化、农业现代化对水足迹强度的弹性系数也始终为负，这表明城镇化建设的推进能够有效降低水足迹强度。

其次，工业化在与其他三化互动时对水足迹强度有一定的改善作用。当其他三化在不同分位点上依次取值时，工业化对水足迹强度影响的弹性系数始终为负；但是当工业化在不同分位点上依次取值时，农业现代化与工业化之间的互动对水足迹强度的影响由积极作用转变为消极作用，原因可能是工业化发展过程中工业为农业的现代化提供了技术、机械等支持，使得工业化发展初期，农业现代化得以迅速提高；随着农业现代化水平的提高，工业化为农业现代化所提供的支持逐渐趋于饱和，此时，农业现代化对于水足迹强度的积极影响逐渐趋于收敛。

第三，信息化与工业化、农业现代化互动后，其对水足迹强度的弹性系数由负转正。表明信息化在与工业化、农业现代化两两互动时，初期能够促进水足迹强度的下降，但是随着时间的推移，最终对水足迹强度的改善表现出消极影响。农业现代化与其他三化互动时，随着城镇化水平的提高，农业现代化对足迹强度的弹性系数始终为负，表明城镇化的发展能够有效降低农业现代化对于水资源的消耗，可能的原因是由于城镇化的发展，对于农业用地的挤占迫使农业缩小经营范围，同时农业生产方式向更加集约化的方向发展，农业生产内容也向城镇需求靠拢，故而城镇化与农业现代化的互动能够降低水足迹强度。

3 结论

本文基于多元指标体系测度省际四化发展水平，对中国省际四化发展水平的地域差

异进行了简单分析,并对四化建设和水足迹强度之间的耦合关系进行了初步的考察,进一步将四化交互作用纳入分析框架,考察了四化及其交互作用对于水足迹强度的影响。本研究主要结论如下:

(1) 中国省际四化建设水平与省际水足迹强度的地域差异基本一致。经济发展程度较高的地区,其四化水平也较高,总体来看,四化建设水平呈现出由东向西逐渐降低的空间梯度格局。水足迹强度的省际分布也基本与四化水平的分布相类似,整体上呈现出由东向西逐渐降低的空间梯度格局。

(2) 四化各子变量对于水足迹强度降低的影响作用存在差异。其中,工业化的发展对于水足迹强度降低的促进作用最大,信息化对于水足迹强度降低的促进作用最弱,无论是否加入四化交互作用,四化各子变量对于水足迹强度的影响作用在统计学意义上都十分显著。因此,应着重强调工业化建设对于水资源的利用效率,加快信息化以及高新技术产业对于水资源节约的成果转化,以进一步加强四化建设对于水足迹强度降低的促进作用。

(3) 加入四化交互作用之后,其中一化对于水足迹强度的影响作用与其他三化相关。本研究计量模型结果显示,四化交互项在统计意义上对于水足迹强度有增加作用,且其估计系数十分显著为正,表明随着四化建设水平的提高,由于四化交互作用的影响,四化发展对于水足迹强度的降低作用逐渐趋于收敛。因此发达地区的四化水平较高,水足迹强度下降的空间有所收窄,而落后地区的四化水平较低,当提升其中某一化水平时,对于整体水足迹强度的改善帮助较大。

参考文献(References):

- [1] 吴兆丹, UPMANU LALL, 王张琪, 等. 基于生产视角的中国水足迹地区间差异: “总量—结构—效率”分析框架. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(12): 85-94. [WU Z D, UPMANU L, WANG Z Q, et al. Regional differences of water footprints in China based on production perspective: Analysis framework of "total-structure-efficiency". China Population, Resources and Environment, 2015, 25(12): 85-94.]
- [2] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, SAVENIJE H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. Ecological Economics, 2006, 60(1): 186-203.
- [3] GERBENS L W, HOEKSTRA A Y. The water footprint of sweeteners and bio-ethanol. Environment International, 2011, 70: 749-758.
- [4] ERCIN A E, ALDAYA M M, HOEKSTRA A Y. Corporate water footprint accounting and impact assessment: The case of the water footprint of a sugar-containing carbonated beverage. Water Resource Management, 2011, 25(2): 721-741.
- [5] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M, CHAPAGAIN A K, et al. Global monthly water scarcity: Blue water footprints versus blue water availability. Plos One, 2012, 7(2): 632-688.
- [6] JENERETTE G D, WU W L, GOLDSMITH S, et al. Contrasting water footprints of cities in China and the United States. Ecological Economics, 2006, 57(3): 346-358.
- [7] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products. Ecosystems, 2012, 15(3): 401-415.
- [8] 盖力强, 谢高地, 李士美, 等. 华北平原小麦、玉米作物生产水足迹的研究. 资源科学, 2010, 32(11): 2066-2071. [GAI L Q, XIE G D, LI S M, et al. A study on production water footprint of winter-wheat and maize in the North China Plain. Resources Science, 2010, 32(11): 2066-2071.]
- [9] 邓晓军, 谢世友, 崔天顺, 等. 新疆棉花消费水足迹及其对生态环境影响的研究. 水土保持研究, 2009, 16(2): 176-178, 185. [DENG X J, XIE S Y, CUI T S, et al. Research of the water footprint of cotton consumption and its effect on ecological environment in southern of Xinjiang. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(2): 176-178, 185.]
- [10] 秦丽杰, 靳英华, 段佩利. 吉林省西部玉米生产水足迹研究. 地理科学, 2012, 32(8): 1020-1025. [QIN L J, JIN Y H, DUAN P L. Production water footprint of maize in the west of Jilin province. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(8): 1020-1025.]
- [11] 秦文彦, 唐珍珠, 秦丽杰. 长春市膳食水足迹研究. 环境科学与管理, 2013, 38(10): 63-68. [QIN W Y, TANG Z Z, QIN

- L J. Dietary water footprint in Changchun city. *Environmental Science and Management*, 2013, 38(10): 63-68.]
- [12] 秦丽杰, 梅婷. 吉林市不同收入水平的城市居民膳食水足迹研究. *东北师大学报: 自然科学版*, 2013, 45(4): 135-140. [QIN L J, MEI T. Dietary water footprint of urban residents in different income levels in Jilin city. *Journal of North-east Normal University: Natural Science Edition*, 2013, 45(4): 135-140.]
- [13] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 西北四省(区)2000年的水资源足迹. *冰川冻土*, 2003, 25(6): 692-700. [LONG A H, XU Z M, ZHANG Z Q. Estimate and analysis of water footprint in Northwest China, 2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(6): 692-700.]
- [14] 韩舒, 师庆东, 于洋, 等. 新疆1999—2009年水足迹计算与分析. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 364-370. [HAN S, SHI Q D, YU Y, et al. Calculation and analysis of water footprint in Xinjiang from 1999 to 2009. *Arid Land Geography*, 2013, 36(2): 364-370.]
- [15] 吴兆丹, 赵敏, 田泽, 等. 多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较: 基于“总量—相关指标—结构”分析框架. *自然资源学报*, 2017, 32(1): 76-87. [WU Z D, ZHAO M, TIAN Z, et al. Regional comparison of water footprint in China based on the multi-regional input-output analysis: In the analytical framework of "amount-relative index-structure". *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(1): 76-87.]
- [16] 潘文俊, 曹文志, 王飞飞, 等. 基于水足迹理论的九龙江流域水资源评价. *资源科学*, 2012, 34(10): 1905-1912. [PAN W J, CAO W Z, WANG F F, et al. Evaluation of water resource utilization in the Jiulong River Basin based on water footprint theory. *Resources Science*, 2012, 34(10): 1905-1912.]
- [17] 董璐, 孙才志, 邹玮, 等. 水足迹视角下中国用水公平性评价及时空演变分析. *资源科学*, 2014, 36(9): 1799-1809. [DONG L, SUN C Z, ZOU W, et al. Assessment and spatial-temporal evolution of water consumption fairness from a water footprint perspective in China. *Resources Science*, 2014, 36(9): 1799-1809.]
- [18] 王晓萌, 黄凯, 杨顺顺, 等. 中国产业部门水足迹演变及其影响因素分析. *自然资源学报*, 2014, 29(12): 2114-2126. [WANG X M, HUANG K, YANG S S, et al. Temporal variability and influencing factors of sectoral water footprint in China. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(12): 2114-2126.]
- [19] 李泽红, 董锁成, 李宇, 等. 武威绿洲农业水足迹变化及其驱动机制研究. *自然资源学报*, 2013, 28(3): 410-416. [LI Z H, DONG S C, LI Y, et al. Dynamic analysis on agricultural water footprint and its driving mechanism in Wuwei Oasis. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(3): 410-416.]
- [20] 余灏哲, 韩美. 基于水足迹的山东省水资源可持续利用时空分析. *自然资源学报*, 2017, 32(2): 474-483. [YU H Z, HAN M. Spatial-temporal analysis of sustainable water resources utilization in Shandong province based on water footprint. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(2): 474-483.]
- [21] 张凡凡, 张启楠, 李福夺, 等. 中国水足迹强度空间关联格局及影响因素分析. *自然资源学报*, 2019, 34(5): 934-944. [ZHANG F F, ZHANG Q N, LI F D, et al. The spatial correlation pattern of water footprint intensity and its driving factors in China. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(5): 934-944.]
- [22] 刘梅, 许新宜, 王红瑞, 等. 基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 1022-1034. [LIU M, XU X Y, WANG H R, et al. Water footprint and spatial-temporal analysis of Hebei province based on virtual water theory. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 1022-1034.]
- [23] 孙才志, 刘玉玉, 陈丽新, 等. 基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局. *生态学报*, 2010, 30(5): 1312-1321. [SUN C Z, LIU Y Y, CHEN L X, et al. The spatial-temporal disparities of water footprints intensity based on Gini Coefficient and Theil Index in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1312-1321.]
- [24] 孙才志, 陈栓, 赵良仕. 基于ESDA的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析. *自然资源学报*, 2013, 28(4): 571-582. [SUN C Z, CHEN S, ZHAO L S. Spatial correlation pattern analysis of water footprint intensity based on ESDA Model at provincial scale in China. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(4): 571-582.]
- [25] 赵良仕, 孙才志, 邹玮. 基于空间效应的中国省际经济增长与水足迹强度收敛关系分析. *资源科学*, 2013, 35(11): 2224-2231. [ZHAO L S, SUN C Z, ZOU W. Convergence between economic growth and water footprint intensity at the provincial scale in China. *Resources Science*, 2013, 35(11): 2224-2231.]
- [26] 赵良仕, 孙才志, 郑德凤. 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析. *生态学报*, 2014, 34(5): 1085-1093. [ZHAO L S, SUN C Z, ZHENG D F. A spatial econometric analysis of water footprint intensity convergence on a provincial scale in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(5): 1085-1093.]
- [27] 王博, 汤洁, 侯克怡. 基于ESDA的流域水足迹强度时空格局特征解析. *统计与决策*, 2014, (23): 103-106. [WANG B, TANG J, HOU K Y. Analysis of temporal and spatial pattern characteristics of watershed water footprint intensity based on ESDA. *Statistics & Decision*, 2014, (23): 103-106.]
- [28] 杨凡, 张玲玲. 基于水足迹强度的江苏省水资源利用效率分析. *环境保护科学*, 2017, 43(2): 95-101. [YANG F,

- ZHANG L L. Spatial pattern analysis of water resource utilization efficiency based on water footprint intensity of cities in Jiangsu province. *Environmental Protection Science*, 2017, 43(2): 95-101.]
- [29] 雷玉桃, 苏莉. 中国水足迹强度区域差异的空间分析. *生态经济*, 2016, 32(8): 29-35. [LEI Y T, SU L. Spatial analysis of the regional differences of water footprint intensity in China. *Ecological Economy*, 2016, 32(8): 29-35.]
- [30] 盖美, 吴慧歌, 曲本亮. 辽宁省水足迹强度差异及空间关联格局分析. *地域研究与开发*, 2017, 36(1): 148-152. [GAI M, WU H G, QU B L. Disparities and spatial correlation pattern analysis of water footprint intensity in Liaoning province. *Areal Research and Development*, 2017, 36(1): 148-152.]
- [31] 张玲玲, 沈家耀. 中国水足迹强度时空格局演变与驱动因素分析. *统计与决策*, 2017, (17): 143-147. [ZHANG L L, SHEN J Y. Temporal and spatial pattern evolution and driving factors analysis of China's water footprint intensity. *Statistics & Decision*, 2017, (17): 143-147.]
- [32] 孙才志, 郜晓雯, 赵良仕. “四化”对中国水资源绿色效率的驱动效应研究. *中国地质大学学报: 社会科学版*, 2018, 18(1): 57-67. [SUN C Z, GAO X W, ZHAO L S. Driving effect of "four modernizations" on green efficiency of water utilization in China. *Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition*, 2018, 18(1): 57-67.]
- [33] 陈强. *高级计量经济学及Stata应用(第二版)*. 北京: 高等教育出版社, 2014: 13-14, 135-146. [CHEN Q. *Advanced Econometrics and Stata Applications (Second Edition)*. Beijing: Higher Education Press, 2014: 13-14, 135-146.]

Impact of China's "four modernizations" on water footprint intensity

SUN Cai-zhi^{1,2}, ZHANG Can-can¹, GAO Xiao-wen¹

(1. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China; 2. Marine Economics and Sustainable Development Research Center, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: This paper adopts the data of 30 provincial-level regions in China from 2000 to 2016 (in which the data of Hong Kong, Macao, Taiwan, and Tibet are not collected), builds the "four-modernization" (industrialization, informatization, urbanization, agricultural modernization) index system, calculates the four-modernization index, and conducts regional four-modernization evaluation. Through the OLS and GMM regression models, the influence of the development of the four modernizations on the water footprint intensity is investigated, and the interaction between the four modernizations is set to identify the interaction between the four indicators. The main conclusions of this study are as follows: Firstly, from the perspective of regional development differences at the level of four modernizations, the level of China's four modernizations generally shows that the eastern region is better than the central region, and the central region is better than the western region. The distribution of water footprint intensity is similar. There may be a correlation between the level of development and the intensity of water footprint. Secondly, the econometric model shows that the improvement of the four modernizations has a positive impact on the improvement of water footprint intensity, but the impact of each modernization is different. Thirdly, the influence of the four-modernization interaction on the water footprint intensity is positive, indicating that the improvement effect of the four-modernization development on the water footprint intensity gradually converges. Therefore, priority is given to raising the level of the four modernizations in the backward areas. The improvement of the level of the four modernizations promotes the reduction of water footprint intensity and can effectively reduce the overall water footprint intensity level in China.

Keywords: water resources; industrialization; informatization; urbanization; agricultural modernization; four-modernization interaction; quantitative regression