

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.02.01

# 黄河流域水资源利用与经济发展脱钩分析

## ——基于水量和水质视角

杨燕燕, 王永瑜, 徐绮阳  
(兰州财经大学 统计学院, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** 在促进经济增长的同时减少水资源消耗和水环境污染是实现黄河流域生态保护和高质量发展的重要途径。基于水足迹理论与方法测算黄河流域的水资源消耗和水环境污染状况,运用 Tapio 脱钩指数模型对水量足迹、水质足迹与经济发展脱钩程度进行分析。结果表明:2000-2019年黄河流域水量足迹整体呈现上升趋势,其中农业生产用水最多;水环境污染得到系统治理,水质足迹呈现波动下降态势。水量足迹、水质足迹与经济发展多处于相对脱钩和弱脱钩状态,水质脱钩优于水量脱钩,但均未达到最佳脱钩状态。黄河流域各区域之间无论是水量足迹、水质足迹或是两者与经济发展脱钩的状态均存在显著差异。其中,水量足迹和水质足迹排名由大到小依次为下游、中游、上游;水量足迹与经济发展脱钩状态表现为上游和下游地区优于中游地区,水质足迹与经济发展脱钩状态由高到低依次为下游、中游、上游。应通过加强农业节水力度和水污染防治并实施区域差异化管理来实现黄河流域水资源与经济发展强脱钩。

**关键词:** 水量足迹; 水质足迹; 脱钩指数模型; 黄河流域

**中图分类号:** TV213.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2022)02-0001-10

## Decoupling analysis of water utilization and economic development in the Yellow River Basin: Based on quantity and quality of water resources

YANG Yanyan, WANG Yongyu, XU Qiyang

(School of Statistics, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** Reducing water consumption and water environment pollution while promoting economic growth is an important way to achieve ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. Based on the water footprint theory and method, we measured the water consumption and water environment pollution, and used the Tapio decoupling index model to examine the degree of decoupling of water quantity (quality) footprint and economic development in the Yellow River Basin. The results showed that the water quantity footprint presented an overall upward trend from 2000 to 2019, with the greatest water demand seen in agricultural production. Water environment pollution had been systematically addressed and the water quality footprint fluctuated in a downward trend. Water quantity (quality) footprint and economic development were mostly in relative and weak decoupling status, and the decoupling status of water quality was better than that of the water quantity, but neither was optimally decoupled. Water quantity footprint, water quality footprint and the decoupling of the two from economic development were significantly differentiated from region to region in the Yellow River Basin. The water quantity footprint and water quality footprint in descending order were as follows: downstream, midstream and upstream. The water footprint was better decoupled from economic development in the upstream and downstream areas than that in the midstream, and the order of decoupling of water quality footprint from high to low was: downstream, midstream and upstream. It is suggested that water conservation in agriculture, water pollu-

收稿日期:2021-07-09; 修回日期:2021-11-09

基金项目:甘肃省哲学社会科学规划基金项目(19YB019);兰州财经大学科研创新团队支持计划项目(2020LC03);甘肃省教育厅“双一流”科研重点项目(GSSYLXM-06);甘肃省优秀研究生“创新之星”项目(2021CXZX-699)

作者简介:杨燕燕(1993-),女,甘肃庆阳人,博士研究生,研究方向为水资源核算。

通讯作者:王永瑜(1965-),男,甘肃民勤人,博士,教授,博士生导师,研究方向为环境经济统计与分析研究。

tion prevention and differentiated regional management should be implemented in order to achieve strong decoupling of water resources and economic development in the Yellow River Basin.

**Key words:** water quantity footprint; water quality footprint; decoupling index model; the Yellow River Basin

## 1 研究背景

水资源是满足人类基本生活需要的基础性自然资源,也是实现经济社会持续健康发展的战略性经济资源<sup>[1]</sup>。随着中国经济的快速发展、人口增长、城市化进程的加快,水资源短缺、水环境污染、水资源与经济发展相互制约等问题日益凸显<sup>[2-3]</sup>。要从根本上促进经济社会健康可持续发展,重点是打破经济发展与资源环境之间的联系,即实现水资源利用和水环境污染与经济发展脱钩。

“脱钩”一词源于物理学,表示两个或两个以上物理量之间的背离程度。随后被经济发展与合作组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)引入环境经济学领域<sup>[4]</sup>,以描述经济增长与资源消耗、环境污染之间的非同步变化程度<sup>[5]</sup>。从脱钩理论视角出发研究水资源利用与经济发展之间的关系,能够较好地反映资源环境压力与经济发展矛盾所处的具体阶段,从本质上揭示区域经济社会健康可持续发展的程度<sup>[6]</sup>。近年来学者们广泛地运用脱钩模型对水资源与经济发展之间的关系进行分析,研究成果较为丰富。从研究内容上看,以农业用水<sup>[7]</sup>、工业用水<sup>[8]</sup>、生活用水<sup>[9]</sup>、水资源总量<sup>[10]</sup>、水足迹<sup>[11-12]</sup>等为切入点分析其水资源消耗与经济发展关系的研究较多,但较少关注水质与经济发展的关系。且在指标选择上,化学需氧量、氨氮排放量等并不能真实有效地反映水环境污染状况以及水环境污染对水资源量的影响<sup>[13-14]</sup>。从研究对象上看,针对单一国家<sup>[15]</sup>、具体省份<sup>[16-17]</sup>和城市<sup>[18-19]</sup>等行政区域的研究为大多数,也有部分学者关注流域尺度<sup>[20-21]</sup>,但对黄河流域水资源与经济发展脱钩情况进行分析与评价的研究相对较少。

黄河流域在我国经济高质量发展和生态环境安全方面具有十分重要的地位,近40年来经济社会高速发展,与之相伴的则是水资源消耗不断增加、生产生活污水大量排放<sup>[22]</sup>。在推动黄河流域绿色发展,促进人与自然和谐共生的过程中不仅要关注水量问题,也应关注水质状况。现阶段关于该流域的水资源研究主要集中在水资源可持续发展状况<sup>[23]</sup>、优化配置战略调整<sup>[24-25]</sup>、提高水资源利用效率<sup>[26]</sup>等方面,尚未有从水量足迹和水质足迹视角同时分析水

资源利用情况以及水资源与经济发展脱钩程度等问题的研究。基于此,本文以黄河流域为研究对象,基于水足迹理论与方法对该流域2000-2019年的水量和水质状况进行科学测度,以此为基础,运用Tapio脱钩指数模型分别对水资源利用、水环境污染与经济发展之间的脱钩关系进行考察,并从流域整体视角、区域比较视角进行全面细致的分析,以期为黄河流域在水资源足量与优质的前提下实现经济高质量发展提供决策参考。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区域概况

黄河流域发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓,从西到东依次流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古等9个省(自治区),全长5464 km,流域总面积为 $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的作用。2000-2019年黄河流域地区生产总值从 $2.41 \times 10^{12}$ 元增加至 $24.60 \times 10^{12}$ 元;人均生产总值从6065元增加至58231元,剔除价格因素变化后的年均增长率分别为17.19%、9.92%,经济社会发展向好。研究期间年末常住人口从 $39664 \times 10^4$ 人增加至 $42180 \times 10^4$ 人,增长了1.06倍;用水总量从 $1203.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加至 $1262.48 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中农业生产用水占比最高,工业生产用水次之,生活用水相对较少。但水资源短缺是黄河流域现阶段最大的矛盾,多年平均水资源总量为 $647 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,不到长江流域的7%;水资源开发利用率高达80%,远超40%的生态警戒线。在2019年监测的137个水质断面中,I~III类水质断面占73.0%,劣V类占8.8%,总体表现为轻度污染。近年来,随着人口规模的扩大和城市化进程的加快,黄河流域用水需求不断增长,水资源短缺现象日益明显,水环境污染现象较为突出。在黄河流域生态保护和高质量发展战略的背景下,研究水资源利用与经济社会协调发展的关系十分必要。

### 2.2 数据来源

本文的研究区范围为黄河流经的9个省(自治区),研究时段为2000-2019年。数据主要来源于2001-2020年《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国水资源公报》《新中国农业60年统计资

料》《全国规模化畜牧养殖业污染情况调查技术报告》以及各省(自治区)2001-2020年统计年鉴。

在水量足迹测算中,农业生产用水量的计算方法是用“自下而上法”将农产品产量与单位产品所含虚拟水量相乘,且农产品主要包括粮食、棉花、油料等7大类农作物产品和猪肉、羊肉、牛肉等7大类动物产品。各类农产品的虚拟水量、进出口虚拟水量以及进口再出口的产品和服务所含虚拟水量测算依据已有研究成果<sup>[3]</sup>。GDP年增长率的测算以2000年为基准年进行平减;水质足迹的测算采用全国平均氮肥淋失率7%作为种植业的氮肥淋失率;选取《污水综合排放标准》<sup>[27]</sup>中的一级排放标准作为污染物浓度达标排放标准,化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、总氮(total nitrogen, TN)和氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )的排放达标浓度分别为0.06、0.015和0.015  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,同时将受纳水体的自然本底浓度假设为0。

### 2.3 研究方法

2.3.1 水量足迹计算模型及评价指标 水足迹为某一国家、地区或个体在考察期间内消费的所有产品和服务(包含人类生活所必需的食物含水、生活用水和生态环境用水等)所需要的水资源总量<sup>[28]</sup>,主要包括实体水和虚拟水两部分。其计算公式为:

$$WFP = IWFP + EWFP \quad (1)$$

$$IWFP = WFP_{agr} + WFP_{ind} + WFP_{dom} + WFP_{eco} - FW_e \quad (2)$$

$$EWFP = FW_i - FW_{re-export} \quad (3)$$

式中: $WFP$ 为总体水足迹,表示区域实际水资源消耗总量, $10^8 \text{ m}^3$ ;  $IWFP$ 为内部水足迹,表示本地居民用于生产所需产品和服务而消耗的水资源量, $10^8 \text{ m}^3$ ;  $EWFP$ 为外部水足迹,表示本地居民消费但由其他地区提供的进口虚拟水量, $10^8 \text{ m}^3$ 。 $WFP_{agr}$ 、 $WFP_{ind}$ 、 $WFP_{dom}$ 、 $WFP_{eco}$ 分别为农业、工业、生活、生态环境用水量, $10^8 \text{ m}^3$ , $FW_e$ 、 $FW_i$ 分别为出口到其他地区的虚拟水量、从其他地区进口的虚拟水量, $10^8 \text{ m}^3$ ; $FW_{re-export}$ 表示从其他地区进口再出口的产品和服务所含虚拟水量, $10^8 \text{ m}^3$ 。

在水量足迹计算结果的基础上,根据水足迹评价指标详细分析黄河流域水资源利用状况。水足迹评价指标中,人均水足迹( $WFP_{pc}$ )用于描述平均人口占有水量足迹情况( $10^8 \text{ m}^3$ );水资源稀缺度( $WS$ )表示水资源短缺程度(%);水资源自用率( $WSS$ )反映黄河流域在自身发展过程中所消耗的水资源量在总体水足迹中所占比重(%);水资源经济效益

( $WUE$ )表明单位水资源消耗所带来的效益( $\text{元}/\text{m}^3$ )。计算公式分别为:

$$WFP_{pc} = WFP/TP \quad (4)$$

$$WS = (WFP/RWC) \times 100\% \quad (5)$$

$$WSS = (IWFP/WFP) \times 100\% \quad (6)$$

$$WUE = GDP/WFP \quad (7)$$

式中: $TP$ 为人口总数; $RWC$ 为水资源可利用总量, $10^8 \text{ m}^3$ ; $GDP$ 为区域国内生产总值, $10^8$ 元。

2.3.2 水质足迹计算模型 灰水足迹是指将污染物负荷稀释至符合水环境质量标准时所需要的水资源量,主要从水量角度研究水污染问题。为了便于与水量足迹进行比较,本文采用灰水足迹来表示水质足迹。参考韩琴等<sup>[29]</sup>测算黄河流域灰水足迹的分类方法,本文水质足迹主要包括农业水质足迹、工业水质足迹和生活水质足迹3部分。

(1)农业水质足迹。农业生产过程中产生的水污染主要来源于残留的化肥和农药以及畜禽粪便的随意排放,因此本文从农作物种植和畜禽养殖两方面评价农业水质足迹。

①种植业水质足迹。本文选取氮肥作为种植业水污染物测量指标,依据氮肥淋失率确定进入水体的氮含量并计算种植业水质足迹,计算公式如下:

$$GWF_{pla} = \frac{\alpha \cdot Appl}{C_{max} - C_{nat}} \quad (8)$$

式中: $GWF_{pla}$ 为种植业水质足迹, $10^8 \text{ m}^3$ ; $\alpha$ 为氮肥淋失率; $Appl$ 为种植业的氮肥施用量, $\text{kg}$ ; $C_{max}$ 为污染物水质标准浓度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $C_{nat}$ 为水资源的自然本底浓度, $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

②畜禽养殖业水质足迹。本文选取具有代表性的畜禽(猪、牛、羊、家禽)对养殖业污染负荷进行计算。废水中含有多种形式的污染物,畜禽养殖业的水质足迹由单位粪便中所占比重较大的化学需氧量(COD)和总氮(TN)所决定,考虑到水体可以同时稀释该两种污染物,故本文以COD和TN为标准分别测算水质足迹,选取两者中的较大值衡量本部分水质足迹,具体计算公式如下:

$$GWF_{bre} = \max(GWF_{bre(\text{COD})}, GWF_{bre(\text{TN})}) \quad (9)$$

$$GWF_{bre(i)} = \frac{L_{bre(i)}}{C_{max} - C_{nat}} \quad (10)$$

$$L_{bre(i)} = \sum_{h=1}^4 [N_h \cdot D_h \cdot (f_h \cdot p_{hf} \cdot \beta_{hf} + u_h \cdot p_{hu} \cdot \beta_{hu})] \quad (11)$$

式中: $GWF_{bre}$ 为畜禽养殖业水质足迹, $10^8 \text{ m}^3$ ; $GWF_{bre(\text{COD})}$ 和 $GWF_{bre(\text{TN})}$ 分别为COD和TN的水质足

迹,  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $L_{bre(i)}$  为 COD 或 TN 的排放量, kg;  $N_h$  为所选 4 类畜禽数量;  $D_h$  为畜禽饲养周期;  $f_h$  和  $u_h$  分别为畜禽的日排粪量和日排尿量, kg;  $p_{hf}$  和  $p_{hu}$  分别为单位粪便和尿液的污染物含量, kg/kg;  $\beta_{hf}$  和  $\beta_{hu}$  分别为单位粪便和尿液的污染物流失率。

③ 农业水质足迹。根据农作物种植和畜牧养殖的水质足迹计算结果, 并考虑计算的特殊性, 农业水质足迹可用如下公式表示:

$$GWF_{agr} = \max(GWF_{bre(COD)}, GWF_{pla} + GWF_{bre(TN)}) \quad (12)$$

式中:  $GWF_{agr}$  为农业水质足迹,  $10^8 \text{ m}^3$ 。

(2) 工业水质足迹。由于工业废水属于点源污染, 产生的废水直接排入水体, 可通过污水中所含的主要污染物(COD 与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ) 排放量直接测算工业水质足迹, 计算公式如下:

$$GWF_{ind} = \max(GWF_{ind(COD)}, GWF_{ind(\text{NH}_4^+-\text{N})}) \quad (13)$$

$$GWF_{ind(i)} = \frac{L_{ind(i)}}{C_{\max} - C_{\text{nat}}} - W_{ed} \quad (14)$$

式中:  $GWF_{ind}$  为工业水质足迹,  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $GWF_{ind(i)}$  为 COD 或  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  对应的工业水质足迹,  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $L_{ind(i)}$  为工业生产中 COD 或  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  两类主要污染物的排放量, kg;  $W_{ed}$  为工业废水排放量,  $10^8 \text{ m}^3$ 。

(3) 生活水质足迹。生活污水排放也属于点源污染, 且污水中的主要污染物与工业污水相同, 因此生活水质足迹与工业水质足迹计算方法一致。

(4) 区域总水质足迹。将农业水质足迹、工业水质足迹和生活水质足迹相加, 即可得到区域总水质足迹。具体计算公式如下:

$$TGWF = GWF_{agr} + GWF_{ind} + GWF_{dom} \quad (15)$$

式中:  $TGWF$  为区域总水质足迹,  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $GWF_{dom}$  为生活水质足迹,  $10^8 \text{ m}^3$ 。

2.3.3 Tapio 脱钩指数模型 Tapio 脱钩指数模型被认为是目前研究水资源与经济增长协调关系的最佳方法<sup>[10]</sup>, 因此本文采用此模型分析黄河流域水量足迹、水质足迹与经济发展协调情况, 公式如下:

$$D_{WG} = \frac{\Delta WFP}{\Delta GDP} = \frac{(WFP_t - WFP_{t-1})/WFP_{t-1}}{(GDP_t - GDP_{t-1})/GDP_{t-1}} \quad (16)$$

$$D_{CG} = \frac{\Delta GWF}{\Delta GDP} = \frac{(GWF_t - GWF_{t-1})/GWF_{t-1}}{(GDP_t - GDP_{t-1})/GDP_{t-1}} \quad (17)$$

式中:  $D_{WG}$  和  $D_{CG}$  为水资源脱钩指数, 前者描述了水资源利用与经济发展的脱钩情况, 后者描述了水环境污染与经济发展的脱钩情况。 $\Delta WFP$  和  $\Delta GWF$  分别为水量足迹和水质足迹的年增长率, %;  $WFP_t$ 、 $GWF_t$ 、 $WFP_{t-1}$  和  $GWF_{t-1}$  分别为第  $t$  期和第  $t-1$  期的

水量足迹和水质足迹,  $10^8 \text{ m}^3$ ;  $\Delta GDP$  为 GDP 年增长率, %;  $GDP_t$  和  $GDP_{t-1}$  分别为第  $t$  期和第  $t-1$  期的区域国内生产总值,  $10^8$  元。

本文根据 Wu 等<sup>[30]</sup>、Zhang 等<sup>[31]</sup> 的研究划分出 3 个大类、10 个子类脱钩状态, 具体脱钩判断标准如图 1 所示。

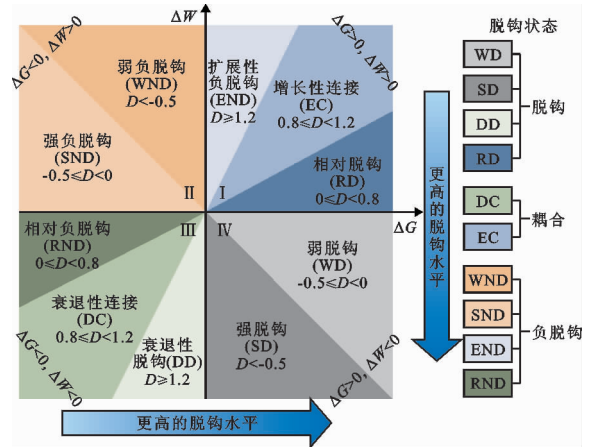


图 1 基于 Tapio 脱钩指数模型的脱钩类型示意图

对于图 1 说明如下:

(1) 当经济增长率相对较高时, 出现脱钩状态。主要有相对脱钩(relatedly decoupling, RD)、衰退性脱钩(decline decoupling, DD)、弱脱钩(weak decoupling, WD)、强脱钩(strong decoupling, SD)状态, 其中第四象限为最理想的状态, 该状态  $\Delta W < 0$ 、 $\Delta G > 0$ , 脱钩指数为负, 即在经济增长的同时, 用水量(或水污染)在下降。

(2) 当经济增长和用水量(或水污染)以相同的速度增加时, 出现耦合状态, 包括增长性连接(expansive coupling, EC)和衰退性连接(decline coupling, DC)。

(3) 当水资源利用(或水环境污染)增长率相对较高时, 出现负脱钩状态, 此时经济增长对水资源依赖性较强。主要有相对负脱钩(relatedly negative decoupling, RND)、扩展性负脱钩(expansive negative decoupling, END)、弱负脱钩(weak negative decoupling, WND)、强负脱钩(strong negative decoupling, SND)4 种状态, 其中第二象限为最不利的状态, 该状态  $\Delta W > 0$ 、 $\Delta G < 0$ , 脱钩指数为负, 即经济处于衰退状态, 但用水量(或水污染)却在增加。

## 3 结果与分析

### 3.1 黄河流域水量足迹和水质足迹构成与评价

3.1.1 水量足迹构成与评价 2000-2019 年黄河流域水量足迹构成及相关指标如表 1 所示。由表 1

可以看出,黄河流域总体水足迹呈现波动增大趋势,2000 年总体水足迹为  $3\,964.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,2019 年总体水足迹为  $6\,746.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,总体增加了  $2\,782.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,年均增长率为 2.84%。进一步分区域进行分析可知,2000-2019 年黄河流域各省(自治区)年均水量足迹差异显著,上、中、下游地区的水量足迹排名由大到小依次为下游、中游、上游。

具体来看,黄河流域下游年均水量足迹为  $1\,734.79 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占黄河流域年水量足迹的 63.63%,主要是因为山东省是我国粮食主产区之一,水资源消耗巨大,其次是因为山东省位于东部沿海,水产品丰富;中游地区年均水量足迹为  $669.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,所占比重为 24.56%;下游地区年均水量足迹为  $321.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,所占比重为 11.81%。

表 1 2000-2019 年黄河流域水量足迹构成与评价指标

| 年份   | 农业生产用水/ $10^8 \text{ m}^3$ | 工业生产用水/ $10^8 \text{ m}^3$ | 居民生活用水/ $10^8 \text{ m}^3$ | 生态环境用水/ $10^8 \text{ m}^3$ | 进口虚拟水量/ $10^8 \text{ m}^3$ | 出口虚拟水量/ $10^8 \text{ m}^3$ | 内部水足迹/ $10^8 \text{ m}^3$ | 外部水足迹/ $10^8 \text{ m}^3$ | 总体水足迹/ $10^8 \text{ m}^3$ | 人均水足迹/ $10^8 \text{ m}^3$ | 水资源匮乏度/% | 水资源自用率/% | 水资源经济效益/(元· $\text{m}^{-3}$ ) |
|------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------|----------|-------------------------------|
| 2000 | 3640.07                    | 196.51                     | 123.00                     | 33.30                      | 39.61                      | 68.38                      | 3924.51                   | 39.61                     | 3964.13                   | 999.43                    | 21.89    | 99.00    | 6.07                          |
| 2001 | 3623.75                    | 201.98                     | 133.05                     | 32.80                      | 45.38                      | 72.33                      | 3919.26                   | 45.38                     | 3964.64                   | 999.81                    | 26.07    | 98.86    | 6.64                          |
| 2002 | 3796.37                    | 198.45                     | 134.84                     | 31.50                      | 45.24                      | 78.13                      | 4083.02                   | 45.24                     | 4128.26                   | 1037.85                   | 29.68    | 98.90    | 7.06                          |
| 2003 | 4331.31                    | 197.99                     | 116.98                     | 31.10                      | 51.59                      | 83.69                      | 4593.70                   | 51.59                     | 4645.29                   | 1161.58                   | 19.31    | 98.89    | 6.99                          |
| 2004 | 4715.38                    | 194.60                     | 139.30                     | 25.20                      | 59.66                      | 94.06                      | 4980.42                   | 59.66                     | 5040.07                   | 1258.01                   | 24.26    | 98.82    | 7.26                          |
| 2005 | 5022.79                    | 196.50                     | 142.20                     | 27.50                      | 63.29                      | 94.55                      | 5294.45                   | 63.29                     | 5357.74                   | 1340.37                   | 19.23    | 98.82    | 7.73                          |
| 2006 | 4927.45                    | 206.80                     | 147.50                     | 30.30                      | 70.92                      | 107.28                     | 5204.77                   | 70.92                     | 5275.69                   | 1317.01                   | 31.24    | 98.66    | 8.89                          |
| 2007 | 5080.09                    | 208.70                     | 147.70                     | 30.90                      | 75.27                      | 103.25                     | 5364.14                   | 75.27                     | 5439.41                   | 1356.66                   | 24.68    | 98.62    | 9.80                          |
| 2008 | 5324.72                    | 208.00                     | 156.20                     | 29.90                      | 78.17                      | 100.39                     | 5618.43                   | 78.17                     | 5696.61                   | 1414.25                   | 25.02    | 98.63    | 10.41                         |
| 2009 | 5415.51                    | 204.10                     | 162.70                     | 29.60                      | 66.73                      | 73.51                      | 5738.40                   | 66.73                     | 5805.13                   | 1433.68                   | 24.73    | 98.85    | 11.36                         |
| 2010 | 5556.35                    | 212.00                     | 165.90                     | 30.40                      | 82.90                      | 87.53                      | 5877.12                   | 82.90                     | 5960.02                   | 1468.89                   | 22.91    | 98.61    | 12.44                         |
| 2011 | 5700.12                    | 222.70                     | 174.10                     | 36.20                      | 90.44                      | 97.59                      | 6035.53                   | 90.44                     | 6125.97                   | 1506.48                   | 24.81    | 98.52    | 13.58                         |
| 2012 | 5889.54                    | 212.60                     | 161.60                     | 36.20                      | 86.79                      | 102.71                     | 6197.23                   | 86.79                     | 6284.02                   | 1539.48                   | 22.59    | 98.62    | 14.63                         |
| 2013 | 5989.60                    | 213.00                     | 159.10                     | 33.40                      | 87.28                      | 102.49                     | 6292.62                   | 87.28                     | 6379.89                   | 1557.63                   | 23.68    | 98.63    | 15.78                         |
| 2014 | 6118.92                    | 187.50                     | 161.50                     | 31.70                      | 80.86                      | 105.68                     | 6393.93                   | 80.86                     | 6474.79                   | 1574.26                   | 24.32    | 98.75    | 16.85                         |
| 2015 | 6260.19                    | 194.70                     | 168.60                     | 32.90                      | 66.54                      | 98.05                      | 6558.33                   | 66.54                     | 6624.87                   | 1601.95                   | 28.47    | 99.00    | 17.73                         |
| 2016 | 6372.21                    | 190.95                     | 171.91                     | 40.72                      | 70.02                      | 90.61                      | 6685.18                   | 70.02                     | 6755.21                   | 1622.52                   | 27.69    | 98.96    | 18.68                         |
| 2017 | 6250.51                    | 185.83                     | 179.16                     | 53.26                      | 81.22                      | 94.70                      | 6574.06                   | 81.22                     | 6655.28                   | 1590.69                   | 25.11    | 98.78    | 20.31                         |
| 2018 | 6294.01                    | 179.08                     | 186.63                     | 57.44                      | 86.36                      | 100.15                     | 6617.01                   | 86.36                     | 6703.37                   | 1594.64                   | 21.27    | 98.71    | 21.57                         |
| 2019 | 6325.23                    | 168.02                     | 189.45                     | 72.55                      | 91.74                      | 100.73                     | 6654.52                   | 91.74                     | 6746.25                   | 1599.40                   | 23.33    | 98.64    | 22.75                         |

从表 1 中 2000-2019 年黄河流域总体水足迹构成方面分析:(1)农业水足迹在总体水足迹中所占比重最大,历年均在 90% 以上,并且农业水足迹逐年增加,年均增长率为 2.30%。河南和山东两省作为农业主产区对水资源消耗有着重要影响。但是与工业和服务业相比,农业对经济发展的贡献相对较小,要想助力黄河流域早日实现经济社会健康可持续发展,还需要引进先进的节水技术与灌溉技术,适当调整种植结构,提高农业水资源的利用效率。(2)工业水足迹呈现先增大后减少的变化趋势,

2000-2011 年黄河流域的工业水足迹从  $196.51 \times 10^8 \text{ m}^3$  增加至  $222.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;随后又经历了波动减少阶段,2019 年的工业水足迹为  $168.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,表明近年来黄河流域工业发展方式由粗放型转换为高效集约型,用水效率有所提升。(3)由于人民生活条件日益改善,2000-2019 年的生活用水逐年增加。(4)生态环境水足迹在 2000-2015 年呈现小幅波动特征,2015 年以后用水量迅速增加,年均增长率为 4.18%,主要是由于黄河水利委员会在 2015 年积极实行了最严格的水资源管理制度,水资



源生态环境保护在流域各省(自治区)逐渐得以重视。(5)近20年来,进出口虚拟水量在总体水足迹中占比均不超过5%,这与黄河流域大部分省(自治区)处于内陆,对外开放程度不够有很大关系。

另外,黄河流域人均水足迹与总体水足迹相比,2000-2019年的增长趋势一致但增长速度相对缓慢,年均增长率为2.51%。年际间水资源匮乏度呈现明显的波动状态,其变化区间为[19.23%,31.24%],这与黄河流域不同年份的降水量密切相关,在降水量丰富的年份,水资源相对充足;在降水量较少的枯水年,水资源相对紧缺。值得注意的是,在黄河流域各省(自治区)中,宁夏回族自治区面临严重缺水,2000-2019年缺水率的变化区间为[500%,1000%];而青海和四川省河流众多,水资源储量丰富,能够满足本省的水资源使用。2000-2019年黄河流域水资源自用率一直维持在较高水平,连续20年保持在98.5%以上,变化范围不超过0.5%,不仅表明黄河流域各省(自治区)的水资源能够保证经济社会的发展,同时也体现了黄河流域水资源利用结构的不合理,生产、生活用水更依赖于本地水资源,而外部水资源使用较少。水资源经济效益由2000年的6.07元/m<sup>3</sup>大幅提升至2019年的22.75元/m<sup>3</sup>,表明黄河流域水资源利用带来的经济效益逐年增加。同时,各省(自治区)的水资源利用率也呈现逐年递增态势。其中,山西和陕西省利用水资源创造的经济效益相对较高,年均水资源经济效益分别为18.92和16.55元/m<sup>3</sup>;其次是山东、四川和青海省,而宁夏回族自治区的水资源经济效益最低,仅为8.51元/m<sup>3</sup>。

**3.1.2 水质足迹构成与评价** 2000-2019年黄河流域水质足迹结构与动态变化见图2。由图2可以看出,研究期间水质足迹总体呈波动减小趋势。2000年黄河流域总体水质足迹为 $1\ 665.79 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,随后波动增大至2005年的 $1\ 719.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;自2005年后黄河流域水质足迹逐年稳步减小,随着2015年实施《水污染防治行动计划》,黄河流域水环境与水生态有了较大改善,水质足迹减小趋势更为明显,2019年总体水质足迹最小,为 $1\ 149.31 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。表明随着人们环保意识的增强以及污染处理技术的进步等,黄河流域水环境污染程度有所减轻。另外,2000-2019年黄河流域各省(自治区)年均水质足迹差异较为显著,主要体现出水质足迹较大的省份也是人口和农业大省的特征。上、中、下游地区的年均水质足迹分别为131.14、168.25、284.87 ×

$10^8 \text{ m}^3$ ,排名从大到小依次为下游、中游、上游。

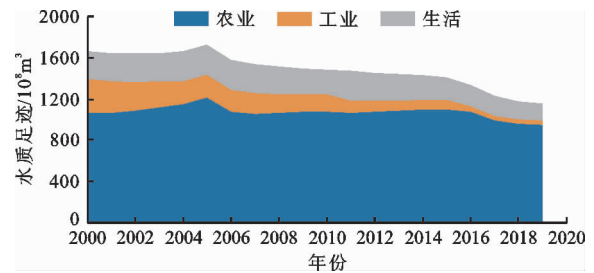


图2 2000-2019年黄河流域水质足迹结构与动态变化

从图2所示的2000-2019年黄河流域水质足迹总体构成方面分析:(1)农业水质足迹20年来在总体水质足迹中所占比重最大,且呈现逐年增加趋势。数据显示,农业水质足迹所占比重从2000年的63.92%增大至2019年的82.59%。(2)工业水质足迹相对较小,且呈现逐年减小态势,水质足迹所占比重从2000年的19.69%减小至2019年的3.73%,表明黄河流域的环保政策在近些年取得了显著成效,政府制定的废水排放标准政策得到有效落实,工业入河污水排放量得到有效控制,工业生产逐步实现绿色发展方式。(3)生活水质足迹呈现波动减小态势,但从2003年起生活水质足迹大于工业水质足迹。(4)农业、工业和生活水质足迹均表现为:以山东省为代表的黄河流域下游地区最大;以河南省为代表的中游地区次之;以甘肃省为代表的上游地区最小。总体而言,我国工业部门、生活部门的废水排放已得到有效控制,废水处理能力提升,但农业部门水质足迹仍呈现增加趋势。

### 3.2 黄河流域水资源利用与经济发展脱钩分析

近40年来黄河流域经济社会发展取得了显著成就,与之相伴的则是水资源消耗量不断增加、生产生活污水大量排放。本文首先利用Tapio脱钩指数模型得到黄河流域2001-2019年水量足迹变化率、水质足迹变化率、GDP变化率,在此基础上测算水资源利用与经济发展的脱钩指数( $D_{WC}$ )和水环境污染与经济发展的脱钩指数( $D_{CC}$ )。

#### 3.2.1 水资源利用与经济发展脱钩分析

(1)整体脱钩演变分析。明晰黄河流域水量足迹与经济发展的脱钩情况有助于从整体上了解水资源利用与经济社会的协调发展关系,为实现黄河流域水资源保护和高质量发展提供思路。2001-2019年黄河流域水量足迹与经济发展脱钩分析结果见表2。

由表2可以看出,2001-2019年黄河流域经济增长速度呈现先增大后波动减小的变化态势,其中,2001-2007年GDP增长率逐步提高,在2007年达

到最大值,为 13.659%。近年来我国经济转向高质量发展,黄河流域 GDP 增长率保持在 7% 左右。总体而言,黄河流域经济社会发展较快,GDP 年均增长率达到 10.24%;而水量足迹波动变化较大,其变化率在 [-1.53%,12.53%] 区间波动,但除 2006 年和 2017 年以外水量足迹均呈现增长趋势,且增长速度低于经济增长速度。表明黄河流域在经济增长

的同时,水资源利用量的增长速度相对较低,两者之间的关系符合水资源利用与经济发展脱钩规律。由于黄河流域水资源利用结构以农业用水为主,历年其所占比例均在 90% 以上,水量足迹变化以农业用水量的变化为主,因而调整水资源利用结构,可在一定程度上减少水资源的消耗总量,进而促进水量足迹与经济发展脱钩。

表 2 2001 - 2019 年黄河流域水量足迹与经济发展脱钩分析结果

| 年份   | 水量足迹变化率/% | GDP 变化率/% | 脱钩指数   | 脱钩程度 | 年份   | 水量足迹变化率/% | GDP 变化率/% | 脱钩指数   | 脱钩程度 |
|------|-----------|-----------|--------|------|------|-----------|-----------|--------|------|
| 2001 | 0.013     | 9.406     | 0.001  | RD   | 2011 | 2.784     | 12.248    | 0.227  | RD   |
| 2002 | 4.128     | 10.773    | 0.383  | RD   | 2012 | 2.580     | 10.502    | 0.246  | RD   |
| 2003 | 12.525    | 11.413    | 1.097  | EC   | 2013 | 1.526     | 9.518     | 0.160  | RD   |
| 2004 | 8.499     | 12.657    | 0.672  | RD   | 2014 | 1.487     | 8.398     | 0.177  | RD   |
| 2005 | 6.303     | 13.179    | 0.478  | RD   | 2015 | 2.318     | 7.648     | 0.303  | RD   |
| 2006 | -1.531    | 13.174    | -0.116 | WD   | 2016 | 1.967     | 7.426     | 0.265  | RD   |
| 2007 | 3.103     | 13.659    | 0.227  | RD   | 2017 | -1.479    | 7.101     | -0.208 | WD   |
| 2008 | 4.728     | 11.291    | 0.419  | RD   | 2018 | 0.723     | 6.962     | 0.104  | RD   |
| 2009 | 1.905     | 11.250    | 0.169  | RD   | 2019 | 0.640     | 6.161     | 0.104  | RD   |
| 2010 | 2.668     | 12.346    | 0.216  | RD   |      |           |           |        |      |

从表 2 中水资源利用与经济发展的协调关系来看,2001 - 2019 年黄河流域的水量足迹与经济发展绝大多数时期处于相对脱钩 (RD) 状态,两者在 2003 年处于增长性连接 (EC) 状态;2006 和 2017 年处于弱脱钩 (WD) 状态。脱钩指数整体呈减小趋势,脱钩效果逐渐变好,但是研究期内均没有实现强脱钩,即在水资源减少的情况下实现经济增长。可见水资源利用与经济发展的脱钩程度还有进一步提升的空间,黄河流域应在保持经济持续发展的同时,提高水资源利用效率,优化产业结构,使水量足迹与经济发展处于强脱钩状态。

(2) 区域脱钩特征分析。考虑到黄河流域各省 (自治区) 经济发展速度不同,水资源分布不均,本文计算了黄河流域 9 省 (自治区) 2001 - 2019 年的水量足迹与经济发展脱钩指数。同时,为了更具体地解释各省 (自治区) 的脱钩效应,本文将相对脱钩、弱脱钩和强脱钩定义为良好脱钩状态。图 3 显示了 2001 - 2019 年各省 (自治区) 处于良好脱钩状态的年份个数,并划分了上游、中游和下游进行比较。

由图 3 可见,2001 - 2019 年每个省 (自治区) 处于良好脱钩状态的年数均超过了 15 a,表明黄河流域近些年来总体上实现了水资源利用与经济协调发展脱钩

状态。从不同省 (自治区) 的比较来看,四川和青海省的水量足迹与经济发展的脱钩状态最好,主要是由于四川省政府根据本省实际情况开展水利工程建设,实施相关节水措施,依法实行了最严格水资源管理制度;青海省也陆续制定了《青海省水利工程管理保护条例》《青海省节约用水管理办法》等政策,均有效促进了水资源利用与经济发展的脱钩。

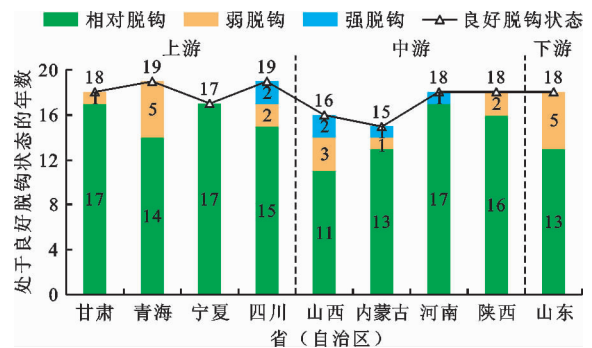


图 3 2001 - 2019 年各省 (自治区) 水量足迹与经济发展处于良好脱钩状态的年数

甘肃、河南、陕西、山东等省份基本实现脱钩,宁夏回族自治区仅为相对脱钩状态,而山西省和内蒙古自治区达到良好脱钩状态的年份相对较少。可见宁夏、山西、内蒙古等省 (自治区) 在经济社会发展

过程中未完全与水资源消耗量脱离,有必要进一步实施节水措施,提高水资源利用效率。从黄河流域上、中、下游的比较来看,上游和下游地区的脱钩状况好于中游地区,但在研究期间中游地区的脱钩水平也在逐渐提高,流域整体向好发展,若要达到水量足迹与经济协调的优质协调状态,脱钩效果仍需不断加强。

### 3.2.2 水环境污染与经济发展脱钩分析

(1)整体脱钩演变分析。2001-2019年黄河流域水质足迹与经济发展脱钩分析结果见表3。由表3可以看出,黄河流域水质足迹总体呈现先小幅波动增大,再逐渐减小的变化趋势,水质足迹增长率体

现“先正后负”的特征。而在研究期内黄河流域经济始终保持增长态势,这直接决定了水质足迹与经济协调的脱钩情况。根据水质足迹变化率的变动情况,将水质足迹与经济协调的脱钩分析分为3个阶段:第1阶段为2001-2002年,水质足迹减少,水生态环境状况有所改善;第2阶段为2003-2005年,随着经济的发展,水质足迹增多,且在2005年达到了研究期最大值,表明该阶段经济发展加剧了水环境污染;第3阶段为2006-2019年,我国制定了一系列环境保护战略,出台了相关文件,促使建设资源节约型和环境友好型社会,使得黄河流域水质显著改善,水质足迹减少。

表3 2001-2019年黄河流域水质足迹与经济发展脱钩分析结果

| 年份   | 水质足迹<br>变化率/% | GDP变化<br>率/% | 脱钩<br>指数 | 脱钩<br>程度 | 年份   | 水质足迹<br>变化率/% | GDP变化<br>率/% | 脱钩<br>指数 | 脱钩<br>程度 |
|------|---------------|--------------|----------|----------|------|---------------|--------------|----------|----------|
| 2001 | -1.387        | 9.406        | -0.148   | WD       | 2011 | -0.609        | 12.248       | -0.049   | WD       |
| 2002 | -0.274        | 10.773       | -0.025   | WD       | 2012 | -1.290        | 10.502       | -0.123   | WD       |
| 2003 | 0.163         | 11.413       | 0.014    | RD       | 2013 | -0.967        | 9.518        | -0.102   | WD       |
| 2004 | 1.285         | 12.657       | 0.102    | RD       | 2014 | -0.512        | 8.398        | -0.061   | WD       |
| 2005 | 3.492         | 13.179       | 0.265    | RD       | 2015 | -1.270        | 7.648        | -0.166   | WD       |
| 2006 | -8.124        | 13.174       | -0.617   | SD       | 2016 | -5.599        | 7.426        | -0.754   | SD       |
| 2007 | -3.182        | 13.659       | -0.233   | WD       | 2017 | -8.084        | 7.101        | -1.139   | SD       |
| 2008 | -1.428        | 11.291       | -0.127   | WD       | 2018 | -3.899        | 6.962        | -0.560   | SD       |
| 2009 | -0.883        | 11.250       | -0.079   | WD       | 2019 | -2.388        | 6.161        | -0.388   | WD       |
| 2010 | -1.018        | 12.346       | -0.083   | WD       |      |               |              |          |          |

从表3中水资源环境与经济发展的协调关系来看,2001-2019年黄河流域的水质足迹与经济发展多处于相对脱钩(RD)或弱脱钩(WD)状态,但2006、2016-2018年处于强脱钩状态(SD),水质足迹与经济协调的脱钩指数逐渐降低,脱钩状态整体向好,表明随着节水技术的持续进步以及公共环保意识的不断增强,水质足迹与经济发展处于较好的脱钩状态,但尚未达到最佳脱钩状态。

(2)区域脱钩特征分析。2001-2019年黄河流域各省(自治区)水质足迹与经济发展有扩展性负脱钩(END)、增长性连接(EC)、相对脱钩(RD)、弱脱钩(WD)和强脱钩(SD)等多种状态,并且地区之间脱钩状态差异显著。图4显示了2001-2019年各省(自治区)处于良好脱钩状态的年份个数,也划分了上游、中游和下游来进行比较。

由图4可以看出,山东、河南、山西、四川等省份在经济结构优化调整 and 环境污染治理上力度较大,弱脱钩和强脱钩年数大多超过了相对脱钩年份,即

水质足迹与经济发展呈现出较高的协调度。甘肃省和宁夏回族自治区的脱钩状态相对较差,其中甘肃省在2002和2011年处于增长性连接(EC)状态,表明经济发展过程中伴随着大量的废水排放;宁夏回族自治区在2005年处于扩展性负脱钩(END)状态。由于60%以上的废水来源于农业,影响水质足迹增长率的主要因素是农业生产废水排放,因此甘肃等地区需尽快发展清洁技术,加强农业废水污染处理。值得注意的是,青海省在所有省(自治区)中水量足迹与经济协调的脱钩状态仅次于四川省,但是水质足迹与经济协调的脱钩状态不太理想,研究期内相对脱钩和弱脱钩状态交替出现,且仅在2019年出现强脱钩状态。比较上、中、下游水质足迹与经济协调的脱钩状态发现,以山东省为代表的下游地区水质足迹与经济协调的脱钩状态最好;中游地区次之;上游地区较弱,因此需要重点关注并解决上游地区在经济发展过程中引起的水环境污染与水生态恶化等问题。



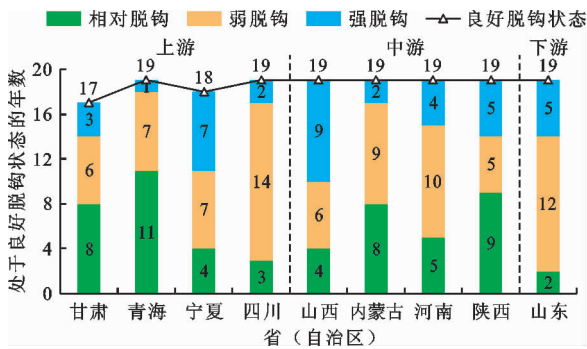


图4 2001-2019年各省(自治区)水质足迹与经济发展处于良好脱钩状态的年数

## 4 讨论

(1)研究表明,2001-2019年黄河流域水量足迹呈现波动增大趋势,其中农业用水比例过大,历年均占90%以上,且表现出逐年增加态势,与高明国等<sup>[32]</sup>的研究结果基本一致。主要是因为黄河流域近年来的城镇化规模不断扩大以及工业化进程加快导致了巨大的用水需求,同时山东、河南等省份作为粮食大省,在农作物产品生产过程中消耗了大量的水资源。因此,解决水资源短缺问题的关键是严格控制农业用水总量,提高水资源利用效率,进一步加强农业节水力度。

(2)研究期内黄河流域灰水足迹由2000年的 $1\ 665.79 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增大至2005年的 $1\ 719.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;自2005年后逐年稳步减少,孙才志等<sup>[33]</sup>也得到了类似的研究结果。本文在此基础上还测算了灰水足迹与经济发展的脱钩情况,发现水环境污染与经济发展脱钩状态逐渐向好。由此可见,黄河流域各省(自治区)在发展经济的同时逐渐重视水污染防治,减少了农业、工业和居民生活的废污水排放。

(3)无论是水量足迹、水质足迹或是两者与经济发展的脱钩状态,黄河流域上、中、下游地区均具有显著的差异性。主要是各地区地理位置、经济发展、资源禀赋等的差别,导致其产业结构特点、经济发展水平与水环境污染治理程度等的不同。因此,黄河流域各省(自治区)应依据以水而定、量水而行、因地制宜、分类施策的战略方针,探索制定适宜的节水策略、治污模式及经济高质量发展方式。

## 5 结论

本文依据水足迹理论与方法测算了2000-2019年黄河流域水资源利用和水环境污染状况,并运用Tapio脱钩指数模型分别考察了水量足迹、水

质足迹与经济发展的脱钩状态,具体结论如下:

(1)研究期内黄河流域水量足迹整体呈增大趋势,表现为先小幅波动后稳步上升,其中农业生产用水占比最高,水资源需求量最大,工业生产用水和生活用水相对较少。随着水资源生态系统重要性的日益体现,生态环境用水量增长加快。近年来黄河流域水环境污染得到系统治理,水质逐渐改善,使得水质足迹总体呈波动减少趋势。

(2)黄河流域水量足迹与经济发展绝大多数时期处于相对脱钩状态(RD);水质足迹与经济发展多处于相对脱钩(RD)和弱脱钩(WD)两种状态;虽然水质脱钩状况优于水量脱钩,但两者均未达到最佳脱钩状态,即水资源利用、水环境污染与经济协调发展还有较大的提升空间。

(3)从水量足迹、水质足迹以及两者与经济发展的脱钩状态来看,黄河流域上、中、下游地区均存在明显差异。其中,水量足迹和水质足迹大小排序依次为下游、中游、上游;水量足迹与经济发展的脱钩状态表现为上游和下游地区优于中游地区;水质足迹与经济发展之间的脱钩状态表现为下游地区脱钩状态最好,中游次之,上游较差。

水资源与经济发展脱钩程度会受经济发展、产业结构、水资源禀赋、人口规模等诸多复杂因素的影响,而本文仅分析了两者之间的脱钩程度,并未在此基础上进一步考察影响脱钩程度的其他关键因素。在今后的研究中可以增加脱钩影响因素分析,使研究结果更加完整,为黄河流域实现水资源强脱钩提供具体路径。

## 参考文献:

- [1] United Nations. Integrated environmental and economic accounting for water resources[M]. New York: United Nations Publication, 2012.
- [2] ZHANG Yao, LIU Wenxin, ZHAO Minjuan. The drag effect of water resources on China's regional economic growth: Analysis based on the temporal and spatial dimensions[J]. Water, 2020, 12(1): 266.
- [3] 李宁,张建清,王磊.基于水足迹法的长江中游城市群水资源利用与经济协调发展脱钩分析[J].中国人口·资源与环境,2017,27(11):202-208.
- [4] Organization for Economic Co-operation and Development. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth[R]. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 2002.
- [5] 钟太洋,黄贤金,韩立,等.资源环境领域脱钩分析研究

- 进展[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1400-1412.
- [6] WANG Qiang, JIANG Rui, LI Rongrong. Decoupling analysis of economic growth from water use in city: A case study of Beijing, Shanghai, and Guangzhou of China[J]. Sustainable Cities & Society, 2018, 41(5): 86-94.
- [7] SHI Changfeng, YUAN Hang, PANG Qinghua, et al. Research on the decoupling of water resources utilization and agricultural economic development in Gansu Province from the perspective of water footprint[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(16): 5758.
- [8] 汪奎, 邵东国, 顾文权, 等. 中国用水量与经济增长的脱钩分析[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 34-38.
- [9] 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+26+77.
- [10] 吴丹. 中国经济发展与水资源利用脱钩态势评价与展望[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 46-54.
- [11] 樊慧丽, 付文阁. 水足迹视角下我国农业水土资源匹配及农业经济增长——以长江经济带为例[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(10): 193-203.
- [12] 潘忠文, 徐承红. 我国水资源利用与经济增长脱钩分析[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2019, 18(2): 97-108.
- [13] 蒋惠凤. 江苏省废污水排放驱动因素及脱钩效应——基于STIRPAT模型和OECD脱钩指数的研究[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(12): 43-49+77.
- [14] 王雅晴, 冼超凡, 欧阳志云. 基于灰水足迹的中国城市水资源可持续利用综合评价[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 2983-2995.
- [15] 杨胜苏, 张利国, 喻玲, 等. 湖南省社会经济与水资源利用协调发展演化[J]. 经济地理, 2020, 40(11): 86-94.
- [16] 吴丹, 李昂, 张陈俊. 双控行动下京津冀经济发展与水资源利用脱钩评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(3): 150-160.
- [17] 潘安娥, 陈丽. 湖北省水资源利用与经济协调发展脱钩分析——基于水足迹视角[J]. 资源科学, 2014, 36(2): 328-333.
- [18] 侯林秀, 温璐, 赵吉, 等. 基于水足迹法的阿拉善地区水资源利用评价与分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 35-41.
- [19] 焦士兴, 张馨歆, 王安周, 等. 水足迹视角下安阳市水资源利用与经济增长关系研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(12): 10-15.
- [20] 章恒全, 陈卓然, 张陈俊. 长江经济带工业水环境压力与经济增长脱钩努力研究[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(2): 13-18+30.
- [21] ZHANG Yuying, SUN Meiyang, YANG Rongjin, et al. Decoupling water environment pressures from economic growth in the Yangtze River Economic Belt, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 122: 107314.
- [22] 于法稳, 方兰. 黄河流域生态保护和高质量发展的若干问题[J]. 中国软科学, 2020(6): 85-95.
- [23] 贡力, 马梦含, 靳春玲, 等. 基于和谐理论的黄河兰州段水生态可持续发展分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 9-16.
- [24] 贾绍凤, 梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 29-36.
- [25] 刘柏君, 彭少明, 崔长勇. 新战略与规划工程下的黄河流域未来水资源配置格局研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(2): 1-7.
- [26] 邢霞, 修长百, 刘玉春. 黄河流域水资源利用效率与经济发展的耦合协调关系研究[J]. 软科学, 2020, 34(8): 44-50.
- [27] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 污水综合排放标准: GB 8978—1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [28] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade (No. 12) [C]// IHE Delft, Netherlands, 2003.
- [29] 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.
- [30] WU Ya, TAM V W Y, SHUAI Chenyang, et al. Decoupling China's economic growth from carbon emissions: Empirical studies from 30 Chinese provinces (2001-2015) [J]. Science of the Total Environment, 2019, 656: 576-588.
- [31] ZHANG Lina, CHEN Donghui, PENG Sha, et al. Carbon emissions in the transportation sector of Yangtze River Economic Belt: Decoupling drivers and inequality [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(17): 21098-21108.
- [32] 高明国, 陆秋雨. 黄河流域水资源利用与经济发展脱钩关系研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(8): 198-206.
- [33] 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.