

# 中国耗水结构综合分析及其驱动力研究

刘 静<sup>1,2,3</sup>, 宣柯炆<sup>1,2</sup>, 余钟波<sup>1,2</sup>, 王卫光<sup>1,2,3</sup>

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**基于水足迹方法,量化了 2010 年和 2019 年中国除港澳台外 31 个省(自治区、直辖市)农业、工业、生活和生态部门的耗水量,以基尼系数、不平衡指数和水资源承载力为主要指标,评价了各省份耗水结构的空间均匀性、局部适配性和水资源脆弱性,并采用灰色关联法对各部门耗水特征进行了驱动力分析。结果表明:各部门耗水空间分布的均匀性差异显著,农业部门最优,2019 年较 2010 年有所下降;生活和工业部门的水资源适配度最佳,2019 年较 2010 年变化不大;北方地区较南方地区的水资源承载力更为脆弱,超载地区主要集中在黄淮海等地区,2019 年较 2010 年更为严峻;作物播种面积、工业营业收入、城镇生活污水排放量和城镇环境基础设施建设投资分别是农业、工业、生活和生态部门耗水结构的最主要驱动因素。

**关键词:**耗水结构;水足迹;基尼系数;不平衡指数;水资源承载力;中国

**中图分类号:**TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)06-0127-12

**Comprehensive analysis of water consumption structure in China and study on its driving forces//LIU Jing<sup>1,2,3</sup>, XUAN Keyang<sup>1,2</sup>, YU Zhongbo<sup>1,2</sup>, WANG Weiguang<sup>1,2,3</sup> (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China)**

**Abstract:** Based on the water footprint method, the water consumption of agriculture, industry, domestic, and ecology sectors in 31 provinces (autonomous regions, municipalities directly under the central government) in China, excluding Hong Kong, Macao, and Taiwan, in 2010 and 2019 was quantified. The Gini coefficient, inequality index, and water resources carrying capacity were used as the main indicators to evaluate the spatial uniformity, local adaptability, and water resources vulnerability of the water consumption structure in each province. The grey correlation method was used to analyze the driving forces of water consumption characteristics in each department. The results show that there is a significant difference in the uniformity of water consumption spatial distribution among various departments, with the agricultural department being the best, with a slight decrease in 2019 compared to 2010. The water resource adaptability of the domestic and industrial sectors is the best, with little change in 2019 compared to 2010. The water resources carrying capacity in northern regions is more fragile than in southern regions, and overloaded areas are mainly concentrated in areas such as the Huang-Huai-Hai region. The situation in 2019 was more severe than in 2010. The planting area of crops, industrial revenue, urban domestic sewage discharge, and investment in urban environmental infrastructure are the main driving factors for the water consumption structure of agriculture, industry, domestic, and ecology sectors, respectively.

**Key words:** water consumption structure; water footprint; Gini coefficient; inequality index; water resources carrying capacity; China

水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源,是生态环境的控制性要素和历史文化的重要载体,兼具自然、经济、生态和文化价值<sup>[1]</sup>。实现水资源与人口、经济和生态环境的空间均衡不仅是实现国家用水总量和强度双控的关键举措,也是保障国家高质量发展的重要前提<sup>[2]</sup>。我国的用水部门主

要包括农业、工业、生活和生态 4 个部门,其结构特征和演变趋势与社会经济的发展程度及资源环境的可持续性息息相关,具有重要的研究意义。

在区域水资源利用环节,取用水量的一部分通常会以某种形式重新回到该区域中被再次利用,而另一部分则通过蒸腾蒸发、土壤吸收、产品吸附、居

民和牲畜饮用等多种途径被消耗掉,不能回归到地表水体和地下含水层,这部分水量称之为耗水量<sup>[3]</sup>。因此,相较于用水量,耗水量能更真实地反映区域水资源使用情况,进而为水资源管理与调控提供更为精准的决策支持<sup>[4-5]</sup>。我国的耗水量约占用水总量的50%<sup>[3]</sup>,目前的耗水研究主要考虑农田与生态系统,涉及耗水量化评估、时空演变特征分析及驱动力探究,利用不同下垫面耗水量值的对比反映区域耗水结构<sup>[6-9]</sup>。为准确衡量水资源消耗量和类型,Hoekstra等<sup>[4]</sup>提出了水足迹概念,指特定的人口、地区或者国家在一段时间内消费的所有产品和服务所需要全部的水资源量(包含蓝水、绿水和灰水)。众多学者以水足迹理论为基础,针对特定区域耗水开展了量化与可持续评价研究,以不同类型产品和服务对应的耗水量比较来揭示区域耗水结构特征<sup>[10-13]</sup>。

目前的耗水结构研究主要集中于不同耗水对象耗水量的对比分析,针对大尺度全局视角的耗水空间结构特征及驱动力研究相对较少。中国现有耗水结构在空间分布上是否相对均匀、各地区耗水量与水资源禀赋在空间上是否适配以及相对可持续,这些问题都有待进一步探究。因此,本文以中国除港澳台外的31个省(自治区、直辖市)(以下简称省份)为研究区,基于水足迹理论量化区域耗水,采用基尼系数、不平衡指数与水资源承载力等评价指标,对中国各地区不同部门水资源消耗的空间均匀性、局部适配性和水资源脆弱性进行综合分析,以期从全局视角为区域耗水结构优化与可持续发展战略实施提供理论依据和决策支持。

## 1 研究方法 with 数据来源

基于水足迹理论,结合气象、农业生产及其他行业用、耗水数据,量化各部门耗水量,在此基础上,以基尼系数、不平衡指数和水质资源承载力为主要指标,解析区域水资源耗水结构特征,包括空间均匀性、局部适配性和水质资源脆弱性,并采用灰色关联法对部门耗水特征的驱动力进行分析。主要流程如图1所示。

### 1.1 耗水量计算

根据 Hoekstra 等<sup>[4,14-15]</sup>建立的水足迹理论框架计算各部门耗水量,计算公式为

$$\begin{cases} W_{CA} = \sum_{k=1}^r (F_k O_k) \\ W_{CI} = \delta_I W_{WI} \\ W_{CD} = \delta_D W_{WD} \\ W_{CE} = \delta_E W_{WE} \end{cases} \quad (1)$$

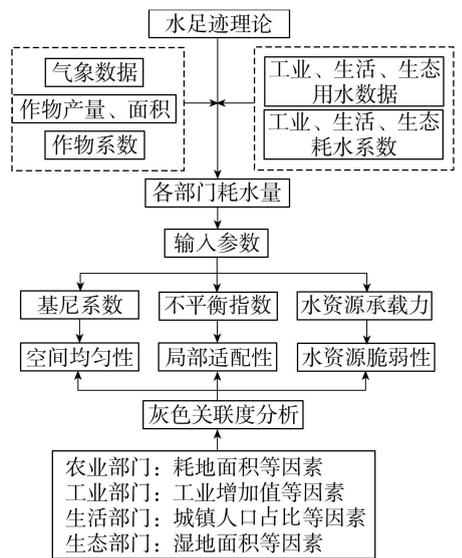


图1 耗水结构分析流程

Fig. 1 Analysis process of water consumption structure

式中: $W_{CA}$ 、 $W_{CI}$ 、 $W_{CD}$ 、 $W_{CE}$ 分别为农业、工业、生活和生态部门的耗水量; $W_{WI}$ 、 $W_{WD}$ 、 $W_{WE}$ 分别为工业、生活和生态部门的用水量; $\delta_I$ 、 $\delta_D$ 、 $\delta_E$ 分别为工业、生活和生态部门的耗水系数,2010年 $\delta_I$ 、 $\delta_D$ 、 $\delta_E$ 分别为24.7%、51.6%和74.0%,2019年分别为23.4%、40.1%和71.5%; $F_k$ 为作物 $k$ 的生产水足迹,包括绿水足迹和蓝水足迹两部分; $Q_k$ 为作物 $k$ 的产量; $r$ 为作物种类数,本文选取了5种粮食作物(小麦、玉米、稻谷、大豆和马铃薯)和5种经济作物(花生、棉花、甘蔗、蔬菜和柑橘)。作物生产水足迹的计算方法<sup>[16]</sup>为

$$F = F_G + F_B = \alpha \min(ET_c, P_e) / Y + \alpha \max(0, ET_c - P_e) / Y \quad (2)$$

式中: $F$ 为作物生产水足迹; $F_G$ 为作物生产绿水足迹; $F_B$ 为作物生产蓝水足迹; $\alpha$ 为单位转化系数,将单位由水深转化为单位面积水量,本文 $\alpha$ 取10; $Y$ 为作物单位面积产量; $ET_c$ 为作物蒸发蒸腾量; $P_e$ 为作物生育期有效降水量,可根据美国农业部土壤保持局提出的方法<sup>[17]</sup>计算。

### 1.2 洛伦兹曲线与基尼系数

经济学上,洛伦兹曲线用于描述社会收入分配不均的程度<sup>[18]</sup>,基尼系数用于定量测定收入分配的差异程度<sup>[19]</sup>。随着学科间的交叉融合,洛伦兹曲线与基尼系数逐渐被用于水资源管理领域,客观地刻画和解释用水结构的均匀性特征<sup>[20-22]</sup>。图2为洛伦兹曲线与基尼系数示意图。洛伦兹曲线函数与基尼系数的计算公式<sup>[23]</sup>为

$$G = S_1 / (S_1 + S_2) = 1 - 2 \int_0^1 f(x) dx \quad (3)$$

$$\int_0^1 f(x) dx = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (P_{i+1} - P_i)(Q_{i+1} + Q_i) \quad (4)$$

式中:  $G$  为基尼系数;  $f(x)$  为洛伦兹曲线函数;  $P_i$  为省份  $i$  的总耗水累积百分比;  $Q_i$  为省份  $i$  各部门耗水累积百分比;  $n$  为省份数量。本文根据基尼系数划分各部门耗水结构的均匀程度等级:  $0 < G < 0.2$  表示非常均匀,  $0.2 \leq G < 0.3$  表示比较均匀,  $0.3 \leq G < 0.4$  表示相对均匀,  $0.4 \leq G < 0.5$  表示比较不均匀,  $0.5 \leq G < 1$  表示非常不均匀。

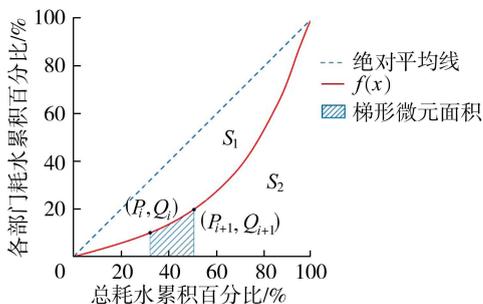


图2 洛伦兹曲线与基尼系数示意图

Fig. 2 Diagram of Lorenz curve and Gini coefficient

### 1.3 不平衡指数

不平衡指数可反映部门耗水与地区水资源禀赋的适配与错配关系,进而揭示中国耗水的局部空间适配特征<sup>[24-25]</sup>。根据地区某部门耗水量占全国该部门总耗水量的比例和地区水资源量占全国水资源量的比例计算不平衡指数<sup>[24]</sup>,计算公式为

$$U_{ij} = (W_i / \sum_{i=1}^n W_i - W_{Cij} / \sum_{i=1}^n W_{Cij}) / \sqrt{2} \quad (5)$$

式中:  $U_{ij}$  为省份  $i$  部门  $j$  的耗水不平衡指数;  $W_i$  为省份  $i$  水资源总量;  $W_{Cij}$  为省份  $i$  部门  $j$  的耗水量。根据地区不平衡指数  $U$  划分该地区耗水量与水资源量的适配等级<sup>[25]</sup>:  $-0.02 \leq U \leq 0.02$  表示耗水量与水资源量适配;  $U > 0.02$  表示水资源量相对于耗水量有所富余,定义为耗水量与水资源量 I 型错配,其中  $0.02 < U \leq 0.04$  为轻-I 型错配,  $0.04 < U \leq 0.06$  为中-I 型错配,  $U > 0.06$  为重-I 型错配;  $U < -0.02$  表示水资源量相对于耗水量有所短缺,定义为耗水量与水资源量 II 型错配,其中  $-0.04 \leq U < -0.02$  为轻-II 型错配,  $-0.06 \leq U < -0.04$  为中-II 型错配,  $U < -0.06$  为重-II 型错配。

### 1.4 水资源承载力

水资源承载力是衡量区域或流域水资源能否维持人类活动、社会经济可持续发展的重要指标,可揭示区域水资源耗用的超载情况,表征区域水资源脆弱性<sup>[26-28]</sup>。本文水资源承载力的计算方法参考 Song 等<sup>[29]</sup>的研究,计算公式为

$$R_j = R_{Aj} / R_{Mj} \quad (6)$$

其中

$$R_{Mj} = W_j / W_{Cj}$$

式中:  $R_j$  为部门  $j$  的水资源承载力;  $R_{Aj}$  为部门  $j$  评价指标的实际水资源承载力;  $R_{Mj}$  为部门  $j$  评价指标的最大水资源承载力;  $W_j$  为部门  $j$  的可利用水量;  $W_{Cj}$  为部门  $j$  的耗水量。农业部门选取耕地灌溉面积作为评价指标,工业部门选取工业增加值作为评价指标,生活部门选取人口规模作为评价指标,生态部门选取绿地园林面积作为评价指标。根据地区水资源承载力  $R$  值划分水资源承载力等级<sup>[29]</sup>, I~VII 级分别表示高度过剩、中度过剩、轻度过剩、临界、轻度超载、中度超载和严重超载,其  $R$  值范围分别为  $R < 0.50$ 、 $0.50 \leq R < 0.67$ 、 $0.67 \leq R < 1.00$ 、 $R = 1.00$ 、 $1.00 < R \leq 1.50$ 、 $1.50 < R \leq 2.00$  和  $R > 2.00$ 。

### 1.5 灰色关联分析

灰色关联分析是一种多因素统计分析的方法,能够表征目标项目的影响因素中,各影响因素对目标项目的影响程度。参考高煜昕等<sup>[30-33]</sup>的研究,选取各部门耗水结构的局部适配性和水资源脆弱性的可能影响因素进行灰色关联分析<sup>[34]</sup>。其中,农业部门的影响因素选取耕地面积、农田灌溉水有效利用系数、耕地灌溉面积、农用化肥施用量、作物播种面积和人均粮食产量;工业部门的影响因素选取工业增加值、工业产值占比、万元工业增加值用水量、工业生产水足迹和工业营业收入;生活部门的影响因素选取城镇生活污水排放量、城市用水普及率、人均生活用水量、人口密度、城镇人口占比和人口自然增长率;生态部门的影响因素选取湿地面积、城市污水日处理能力、城市绿地园林面积、人均公园绿地面积、城镇环境基础建设投资。

### 1.6 数据来源

本文研究时间为 2010 年和 2019 年。水资源数据包括农业、工业、生活和生态部门的用水量、耗水系数、农田灌溉水有效利用系数、万元工业增加值用水量等,来源于《中国水资源公报》;气象数据包括中国除港澳台外的 31 个省份的最高气温、最低气温、风速、日照时数和相对湿度等,来源于中国气象科学数据共享服务网 (<https://data.cma.cn/>);农业生产数据包括作物产量、播种面积、耕地面积、耕地灌溉面积、农用化肥施用量、作物播种面积等,来源于《中国统计年鉴》和《中国农业年鉴》;社会经济数据包括工业增加值、工业营业收入、人口密度、人口自然增长率、城市污水日处理能力、城市绿地园林面积、城镇环境基础建设投资、城市用水普及率、绿地园林面积等,来源于《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国环境统计年鉴》。

## 2 结果与分析

### 2.1 空间均匀性分析

图3为2010年和2019年农业、工业、生活和生态部门耗水的洛伦兹曲线,表1为2010年和2019年各部门耗水的基尼系数和评价结果。由图3和表1可见,农业部门总体上空间均匀性最好,其次为生活、工业和生态部门,且农业部门与其他3个部门存在显著差异。时间演变上,2019年研究区耗水结构的空間均匀性较2010年有所下降。

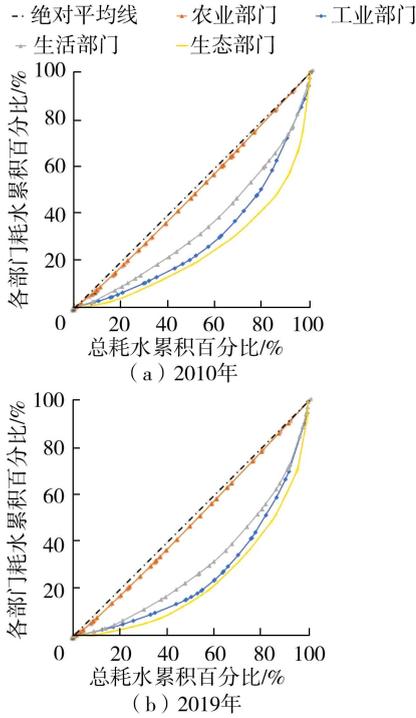


图3 2010年和2019年各部门耗水的洛伦兹曲线

Fig. 3 Lorenz curves of water consumption by various departments in 2010 and 2019

表1 2010年和2019年各部门耗水的基尼系数及其评价结果

Table 1 Gini coefficient and evaluation results of water consumption in various departments in 2010 and 2019

| 耗水部门 | 2010年 |       | 2019年 |       |
|------|-------|-------|-------|-------|
|      | 基尼系数  | 评价结果  | 基尼系数  | 评价结果  |
| 农业   | 0.04  | 非常均匀  | 0.04  | 非常均匀  |
| 工业   | 0.41  | 比较不均匀 | 0.48  | 比较不均匀 |
| 生活   | 0.32  | 相对均匀  | 0.39  | 相对均匀  |
| 生态   | 0.52  | 非常不均匀 | 0.54  | 非常不均匀 |

农业部门的洛伦兹曲线贴近绝对平均线,说明各地区的农业发展与其水资源禀赋的平衡度高,水资源利用做到了因地制宜。2010年和2019年的农业耗水基尼系数均为0.04,评价结果属于非常均匀,说明农业部门在水资源利用上相对高效。这主要得益于节水灌溉技术的改进、农业用水需求相对

保持稳定以及有效的水资源管理和分配政策,确保了农业用水的高效率和高公平性。

工业耗水的洛伦兹曲线距离绝对平均线相对较远,意味着工业部门耗水分配存在不均衡的情况,主要与不同地区的工业结构、经济发展水平、技术水平和产业特点有关。2010年和2019年工业耗水的基尼系数分别为0.41和0.48,已超过警戒线0.4,说明不同地区工业部门存在着较大的耗水量差异,并且这种差异呈现上升趋势,这可能会引发资源浪费、环境压力增加以及其他行业供水短缺等问题。工业部门耗水结构空间均匀性较差的地区有必要采用高效节水设备、改进工业生产工艺并优化工业用水流程,确保水资源的有效利用和公平分配<sup>[35]</sup>。

生活部门的洛伦兹曲线与绝对平均线的距离适中,说明各地区居民生活用水获得的供应相对平等,没出现不平衡现象。2010年生活耗水的基尼系数为0.32,2019年上升为0.39,接近警戒线0.4,说明研究时段内生活部门的水资源分配差距有所增大,尽管耗水分配相对均匀,但仍有不小的改进空间。各地区需要进一步改进生活供水基础设施,提高供水服务的可靠性和质量,并持续关注水资源的可持续利用,推动水循环经济,加强对居民生活耗水的分析和管理工作,以促进更加均匀的生活耗水分配。

生态部门的洛伦兹曲线相对于其他3个部门距离绝对平均线最远,其基尼系数由2010年的0.52上升至2019年的0.54,说明生态耗水空间分布的差异性最显著,不同地区的生态耗水分配极不均衡。这种不均匀的耗水分配可能会影响一些地区的自然环境,对可持续发展和生态平衡造成威胁,此类地区应在做好生态系统保护及修复工作的同时重视和优化环境用水管理。

### 2.2 局部适配性分析

表2和表3为2010年和2019年31个省份农业、工业、生活和生态部门耗水与水资源禀赋的适配情况。由表2和表3可见,2010年和2019年4个部门的不平衡指数和适配水平变化不大,其中生态部门的适配程度最低,生活部门的适配程度最好。

各省份农业耗水的适配程度在研究时段内表现出下降趋势,适配省份的数量由2010年的22个下降至2019年的18个。评价结果显示,I型错配主要分布于农业不发达的富水地区,II型错配主要集中于农业发达的缺水地区。其中,西藏拥有独特的自然条件、气候因素和地形地貌,水资源条件相对充裕,农业耕作方式传统,农业生产水平较低,水资源总量相对农业耗水量高度富余,在31省份的不平衡

表 2 2010 年各省份不同部门耗水与水资源禀赋的适配情况

Table 2 Adaptation of water consumption and water resource endowment in different departments of various provinces and regions in 2010

| 省份  | 农业部门    |         | 工业部门    |         | 生活部门    |         | 生态部门    |         |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|     | 不平衡指数   | 适配水平    | 不平衡指数   | 适配水平    | 不平衡指数   | 适配水平    | 不平衡指数   | 适配水平    |
| 北京  | -0.0010 | 适配      | -0.0020 | 适配      | -0.0136 | 适配      | -0.0231 | 轻-II型错配 |
| 天津  | -0.0024 | 适配      | -0.0021 | 适配      | -0.0049 | 适配      | -0.0069 | 适配      |
| 河北  | -0.0326 | 轻-II型错配 | -0.0081 | 适配      | -0.0190 | 适配      | -0.0140 | 适配      |
| 山西  | -0.0139 | 适配      | -0.0041 | 适配      | -0.0077 | 适配      | -0.0132 | 适配      |
| 内蒙古 | -0.0142 | 适配      | -0.0021 | 适配      | -0.0050 | 适配      | -0.0490 | 中-II型错配 |
| 辽宁  | -0.0043 | 适配      | 0.0017  | 适配      | -0.0097 | 适配      | -0.0063 | 适配      |
| 吉林  | -0.0072 | 适配      | 0.0030  | 适配      | 0.0006  | 适配      | -0.0062 | 适配      |
| 黑龙江 | -0.0388 | 轻-II型错配 | -0.0078 | 适配      | 0.0033  | 适配      | 0.0089  | 适配      |
| 上海  | -0.0008 | 适配      | -0.0406 | 中-II型错配 | -0.0209 | 轻-II型错配 | -0.0063 | 适配      |
| 江苏  | -0.0306 | 轻-II型错配 | -0.0850 | 重-II型错配 | -0.0401 | 中-II型错配 | -0.0102 | 适配      |
| 浙江  | 0.0213  | 轻-I型错配  | 0.0028  | 适配      | -0.0044 | 适配      | -0.0230 | 轻-II型错配 |
| 安徽  | -0.0176 | 适配      | -0.0248 | 轻-II型错配 | -0.0068 | 适配      | 0.0081  | 适配      |
| 福建  | 0.0265  | 轻-I型错配  | -0.0019 | 适配      | 0.0169  | 适配      | 0.0301  | 轻-I型错配  |
| 江西  | 0.0177  | 适配      | 0.0240  | 轻-I型错配  | 0.0267  | 轻-I型错配  | 0.0290  | 轻-I型错配  |
| 山东  | -0.0482 | 中-II型错配 | -0.0060 | 适配      | -0.0263 | 轻-II型错配 | -0.0201 | 轻-II型错配 |
| 河南  | -0.0551 | 中-II型错配 | -0.0149 | 适配      | -0.0211 | 轻-II型错配 | -0.0309 | 轻-II型错配 |
| 湖北  | -0.0028 | 适配      | -0.0282 | 轻-II型错配 | -0.0009 | 适配      | 0.0278  | 轻-I型错配  |
| 湖南  | 0.0022  | 适配      | -0.0002 | 适配      | 0.0008  | 适配      | 0.0247  | 轻-I型错配  |
| 广东  | 0.0200  | 适配      | -0.0221 | 轻-II型错配 | -0.0412 | 中-II型错配 | -0.0051 | 适配      |
| 广西  | 0.0045  | 适配      | 0.0148  | 适配      | -0.0012 | 适配      | 0.0104  | 适配      |
| 海南  | 0.0057  | 适配      | 0.0091  | 适配      | 0.0050  | 适配      | 0.0104  | 适配      |
| 重庆  | 0.0012  | 适配      | -0.0125 | 适配      | -0.0066 | 适配      | 0.0077  | 适配      |
| 四川  | 0.0340  | 轻-I型错配  | 0.0282  | 轻-I型错配  | 0.0238  | 轻-I型错配  | 0.0465  | 中-I型错配  |
| 贵州  | 0.0099  | 适配      | 0.0051  | 适配      | 0.0067  | 适配      | 0.0184  | 适配      |
| 云南  | 0.0198  | 适配      | 0.0320  | 轻-I型错配  | 0.0234  | 轻-I型错配  | 0.0213  | 轻-I型错配  |
| 西藏  | 0.1046  | 重-I型错配  | 0.1044  | 重-I型错配  | 0.1032  | 重-I型错配  | 0.1051  | 重-I型错配  |
| 陕西  | -0.0008 | 适配      | 0.0057  | 适配      | -0.0021 | 适配      | 0.0057  | 适配      |
| 甘肃  | -0.0133 | 适配      | -0.0018 | 适配      | -0.0050 | 适配      | -0.0128 | 适配      |
| 青海  | 0.0158  | 适配      | 0.0153  | 适配      | 0.0137  | 适配      | 0.0122  | 适配      |
| 宁夏  | -0.0042 | 适配      | -0.0018 | 适配      | -0.0015 | 适配      | -0.0081 | 适配      |
| 新疆  | 0.0045  | 适配      | 0.0200  | 适配      | 0.0137  | 适配      | -0.1312 | 重-II型错配 |

指数评价中居于首位。河南作为农业大省,2019 年农业耗水量占全国农业耗水的 9.44%,但其水资源总量仅占全国的 0.58%<sup>[36]</sup>,不平衡指数为 -0.0627,评价结果为重-II型错配,说明其水资源量相对农业耗水量高度紧缺。农业耗水局部适配性较差的省份应改进和提高农业灌溉技术水平,优化农作物的种植结构,并通过生态补偿等机制鼓励农民发展绿色农业、生态农业和可持续农业。

各省份工业耗水的适配程度虽然也表现出下降趋势,但全国有超过 50%的省份不平衡指数处于适配状态,说明我国大部分地区的工业耗水情况与当地水资源禀赋的匹配程度良好。I型错配主要分布在西南地区,西藏的不平衡指数最大,2010 年和 2019 年分别为 0.1044 和 0.1087,属重-I型错配;II型错配主要分布在东南沿海地区,其中江苏的不平衡指数最小,由 2010 年的 -0.085 下降至 2019 年的 -0.1385,属于重-II型错配。南方地区降水充

沛,水资源禀赋相对优异,因此造成这种差异性局面的原因主要来自产业本身。东南沿海地区的经济发展程度相对较高,工业规模大,工业结构更偏重于高耗水行业,而西南地区的工业发展程度相对较低,产业结构更侧重低耗水行业<sup>[37]</sup>。因此,可以根据不同省份的实际工业用水需求,对工业结构进行绿色改造,推进工业节水并限制高耗水工业发展,实现清洁生产和循环利用。

各省份生活耗水的适配程度相较其他部门更高,共有 22 个省份的不平衡指数评价为适配,高不平衡指数省份仅有西藏(重-I型错配)。人口压力较小、降水量相对充沛的江西、黑龙江和四川等省份属于轻-I型错配;经济发展程度较高的江苏、广东、上海和人口规模较大的河南、湖北、山东等省份属于II型错配;22 个适配省份主要分布在中部地区和西部地区,这些地区的人口压力相对较小,水资源量相对富裕<sup>[38-39]</sup>。不同省份应根据实际的人口情况,

表3 2019年各省份不同部门耗水与水资源禀赋的适配情况

Table 3 Adaptation of water consumption and water resource endowment in different departments of various provinces and regions in 2019

| 省份  | 农业部门    |         | 工业部门    |         | 生活部门    |         | 生态部门    |         |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|     | 不平衡指数   | 适配水平    | 不平衡指数   | 适配水平    | 不平衡指数   | 适配水平    | 不平衡指数   | 适配水平    |
| 北京  | 0.0002  | 适配      | -0.0013 | 适配      | -0.0146 | 适配      | -0.0447 | 中-II型错配 |
| 天津  | -0.0025 | 适配      | -0.0030 | 适配      | -0.0059 | 适配      | -0.0173 | 适配      |
| 河北  | -0.0297 | 轻-II型错配 | -0.0082 | 适配      | -0.0191 | 适配      | -0.0598 | 中-II型错配 |
| 山西  | -0.0123 | 适配      | -0.0055 | 适配      | -0.0088 | 适配      | -0.0115 | 适配      |
| 内蒙古 | -0.0231 | 轻-II型错配 | 0.0024  | 适配      | 0.0014  | 适配      | -0.0598 | 中-II型错配 |
| 辽宁  | -0.0130 | 适配      | -0.0044 | 适配      | -0.0143 | 适配      | -0.0107 | 适配      |
| 吉林  | -0.0182 | 适配      | 0.0041  | 适配      | 0.0015  | 适配      | -0.0061 | 适配      |
| 黑龙江 | -0.0282 | 轻-II型错配 | 0.0255  | 轻-I型错配  | 0.0242  | 轻-I型错配  | 0.0334  | 轻-I型错配  |
| 上海  | 0.0002  | 适配      | -0.0330 | 轻-II型错配 | -0.0184 | 适配      | -0.0014 | 适配      |
| 江苏  | -0.0379 | 轻-II型错配 | -0.1385 | 重-II型错配 | -0.0463 | 中-II型错配 | -0.0048 | 适配      |
| 浙江  | 0.0244  | 轻-I型错配  | 0.0085  | 适配      | -0.0061 | 适配      | 0.0169  | 适配      |
| 安徽  | -0.0269 | 轻-II型错配 | -0.0363 | 轻-II型错配 | -0.0150 | 适配      | -0.0087 | 适配      |
| 福建  | 0.0262  | 轻-I型错配  | 0.0007  | 适配      | 0.0055  | 适配      | 0.0231  | 轻-I型错配  |
| 江西  | 0.0187  | 适配      | 0.0155  | 适配      | 0.0264  | 轻-I型错配  | 0.0432  | 中-I型错配  |
| 山东  | -0.0505 | 中-II型错配 | -0.0140 | 适配      | -0.0258 | 轻-II型错配 | -0.0461 | 中-II型错配 |
| 河南  | -0.0627 | 重-II型错配 | -0.0221 | 轻-II型错配 | -0.0296 | 轻-II型错配 | -0.0785 | 重-II型错配 |
| 湖北  | -0.0163 | 适配      | -0.0381 | 轻-II型错配 | -0.0293 | 轻-II型错配 | 0.0101  | 适配      |
| 湖南  | 0.0198  | 适配      | -0.0016 | 适配      | 0.0132  | 适配      | 0.0403  | 中-I型错配  |
| 广东  | 0.0264  | 轻-I型错配  | -0.0046 | 适配      | -0.0337 | 轻-II型错配 | 0.0342  | 轻-I型错配  |
| 广西  | 0.0147  | 适配      | 0.0228  | 轻-I型错配  | 0.0179  | 适配      | 0.0419  | 中-I型错配  |
| 海南  | 0.0028  | 适配      | 0.0045  | 适配      | -0.0008 | 适配      | 0.0036  | 适配      |
| 重庆  | 0.0021  | 适配      | -0.0042 | 适配      | -0.0056 | 适配      | 0.0085  | 适配      |
| 四川  | 0.0443  | 中-I型错配  | 0.0449  | 中-I型错配  | 0.0231  | 轻-I型错配  | 0.0503  | 中-I型错配  |
| 贵州  | 0.0139  | 适配      | 0.0125  | 适配      | 0.0110  | 适配      | 0.0244  | 轻-I型错配  |
| 云南  | 0.0088  | 适配      | 0.0253  | 轻-I型错配  | 0.0185  | 适配      | 0.0249  | 轻-I型错配  |
| 西藏  | 0.1091  | 重-I型错配  | 0.1087  | 重-I型错配  | 0.1071  | 重-I型错配  | 0.1087  | 重-I型错配  |
| 陕西  | 0.0007  | 适配      | 0.0035  | 适配      | -0.0026 | 适配      | -0.0007 | 适配      |
| 甘肃  | -0.0059 | 适配      | 0.0029  | 适配      | 0.0002  | 适配      | -0.0068 | 适配      |
| 青海  | 0.0212  | 轻-I型错配  | 0.0208  | 轻-I型错配  | 0.0198  | 适配      | 0.0184  | 适配      |
| 宁夏  | -0.0030 | 适配      | -0.0022 | 适配      | -0.0021 | 适配      | -0.0076 | 适配      |
| 新疆  | -0.0033 | 适配      | 0.0145  | 适配      | 0.0084  | 适配      | -0.1175 | 重-II型错配 |

结合城市发展需求来规划水资源分配,加强和推广居民的节水意识,鼓励企业实施高效节水措施。

各省份生态耗水的适配程度相较于其他部门最低,并在研究时段呈现下降趋势,此外,不平衡指数表现出由北方地区向南方地区递增的趋势。II型错配主要集中在北方缺水地区,I型错配主要集中在南方富水地区,大部分中部地区和南方沿海地区生态耗水与水资源禀赋属于适配状态。西藏的水资源丰富程度最高,2010年和2019年不平衡指数分别为0.1051和0.1087,这主要与我国降水分布差异、植被覆盖差异、气候条件和人类活动等影响因素有关。新疆的不平衡指数在2010年和2019年分别为-0.1312和-0.1175,均属重-II型错配。生态耗水适配性较差的省份需要充分考虑当地产业对生态环境建设的影响,强调产业布局和水资源开发利用应符合区域生态环境保护要求,并探索生态治理保护与和谐发展的科学路径。

### 2.3 水资源脆弱性分析

表4和表5为2010年和2019年31个省份各部门的水资源承载力及评价结果。由表4和表5可见,研究时段31个省份各部门的水资源承载力状况均呈现下降趋势,尤其是工业部门和生态部门。空间分布上北方地区的水资源承载力较南方地区更为脆弱,西南地区的水资源承载状况相对较优,超载地区则集中在黄淮海等地区。各部门的水资源承载力由于区域行业结构、发展重心以及资源禀赋不同呈现出一定差异性,生态部门的水资源承载力较其他部门相对脆弱。

大部分北方省份的农业部门水资源承载力状况表现不佳,而南方省份的情况相对较好。低承载力地区多集中于黄淮海地区,这主要由人类活动频繁和水资源过度利用导致。根据水资源承载力等级划分,2010年有5个省份属于超载,其中宁夏、上海和天津属于严重超载;2019年超载省份增加至8个,严重超载的省份转变为宁夏、天津和江苏。西

表 4 2010 年各省份不同部门水资源承载力状况

Table 4 Status of water resources carrying capacity in different departments of various provinces in 2010

| 省份  | 农业部门   |       | 工业部门   |       | 生活部门    |       | 生态部门    |       |
|-----|--------|-------|--------|-------|---------|-------|---------|-------|
|     | 水资源承载力 | 承载力等级 | 水资源承载力 | 承载力等级 | 水资源承载力  | 承载力等级 | 水资源承载力  | 承载力等级 |
| 北京  | 0.5324 | II    | 0.5532 | II    | 1.4935  | V     | 2.5736  | VII   |
| 天津  | 2.6432 | VII   | 1.5468 | VI    | 2.7703  | VII   | 3.8762  | VII   |
| 河北  | 1.0392 | V     | 0.7107 | III   | 1.8364  | VI    | 3.2096  | VII   |
| 山西  | 0.5997 | II    | 0.5014 | II    | 0.9860  | III   | 0.8214  | III   |
| 内蒙古 | 0.4047 | I     | 0.1364 | I     | 0.3729  | I     | 0.1548  | I     |
| 辽宁  | 0.2439 | I     | 0.1286 | I     | 0.2418  | I     | 0.4279  | I     |
| 吉林  | 0.2122 | I     | 0.0387 | I     | 0.1610  | I     | 0.1198  | I     |
| 黑龙江 | 0.3645 | I     | 0.1560 | I     | 0.3850  | I     | 0.9920  | III   |
| 上海  | 3.0119 | VII   | 1.6862 | VI    | 3.1956  | VII   | 12.2065 | VII   |
| 江苏  | 1.1472 | V     | 0.9133 | III   | 1.6167  | VI    | 7.0619  | VII   |
| 浙江  | 0.1099 | I     | 0.0478 | I     | 0.1488  | I     | 0.0424  | I     |
| 安徽  | 0.2374 | I     | 0.1152 | I     | 0.3618  | I     | 0.7090  | III   |
| 福建  | 0.1165 | I     | 0.0257 | I     | 0.1588  | I     | 0.1422  | I     |
| 江西  | 0.1160 | I     | 0.0447 | I     | 0.1095  | I     | 0.0371  | I     |
| 山东  | 0.5528 | II    | 0.5724 | II    | 0.7074  | III   | 1.6784  | VI    |
| 河南  | 0.4179 | I     | 0.1599 | I     | 0.4787  | I     | 0.2643  | I     |
| 湖北  | 0.1781 | I     | 0.0713 | I     | 0.3470  | I     | 2.2737  | VII   |
| 湖南  | 0.1825 | I     | 0.0527 | I     | 0.1621  | I     | 0.0835  | I     |
| 广东  | 0.2115 | I     | 0.0749 | I     | 0.2248  | I     | 0.4000  | I     |
| 广西  | 0.1483 | I     | 0.0573 | I     | 0.1166  | I     | 0.0658  | I     |
| 海南  | 0.0746 | I     | 0.0242 | I     | 0.0984  | I     | 1.6495  | VI    |
| 重庆  | 0.3078 | I     | 0.0283 | I     | 0.2027  | I     | 0.4403  | I     |
| 四川  | 0.0966 | I     | 0.0175 | I     | 0.1218  | I     | 0.1039  | I     |
| 贵州  | 0.1105 | I     | 0.0186 | I     | 0.1052  | I     | 0.1791  | I     |
| 云南  | 0.0709 | I     | 0.0241 | I     | 0.0821  | I     | 0.0318  | I     |
| 西藏  | 0.0045 | I     | 0.0017 | I     | 0.0106  | I     |         |       |
| 陕西  | 0.1484 | I     | 0.0714 | I     | 0.1989  | I     | 0.2810  | I     |
| 甘肃  | 0.4891 | I     | 0.1820 | I     | 0.4980  | I     | 0.3037  | I     |
| 青海  | 0.0299 | I     | 0.0128 | I     | 0.0345  | I     | 0.0125  | I     |
| 宁夏  | 5.3595 | VII   | 3.7066 | VII   | 14.1799 | VII   | 8.8320  | VII   |
| 新疆  | 0.3029 | I     | 0.2742 | I     | 0.5607  | II    | 0.0722  | I     |

注:2010年西藏绿地园林面积数据缺失,故无生态部门水资源承载力及承载等级数据。

藏、青海和四川等地由于水资源丰富、作物需水量少和节水灌溉技术提高等原因,表现出最佳的承载力状况,属于高度过剩。

工业部门的水资源承载力呈现了由北向南递增的趋势。工业部门超载省份由2010年的3个增加至2019年的8个,主要分布于京津冀地区和黄淮海地区,其中2019年有5个严重超载省份(宁夏、天津、江苏、北京和上海)。2019年宁夏的工业可利用水资源总量仅为0.79亿 $m^3$ ,其工业发展耗水相对水资源禀赋严重短缺,水资源压力较大;江苏的可利用水资源总量为92.93亿 $m^3$ ,但万元工业增加值用水量高达65.60 $m^3$ ,高耗水工业发展对当地水资源承载力产生了严重的负面影响。青海和西藏的工业发展水平较低,但水资源较为丰富<sup>[40]</sup>,在承载力评价中表现良好。因此,工业水资源承载力较为脆弱的地区需要优化和调整工业结构,推进工业节水减排,积极探索新型节水型社会的建设。

生活部门的水资源承载力状况在研究时段内表

现出下降趋势。超载等级较高的省份主要集中在人口密度高的发达地区,南方省份表现出更为明显的可持续趋势。宁夏在2010年和2019年均是最脆弱的省份,其水资源禀赋相对短缺,这导致了生活方面的水资源供需矛盾不断加剧。天津、江苏、上海等地因人口密集程度不断上升,社会经济发展对水资源的依赖程度不断增加,造成了生活水资源承载力紧张严峻的形势。尽管不少南方经济发达地区的人口压力较大,但这些地区的水资源承载力状况表现良好,主要是由于水资源管理政策的实施以及居民节水意识的提高。

生态部门的水资源承载力状况呈现出自东北逐渐向西南逐渐好转的分布特征。生态部门的水资源承载力较其他部门更为脆弱,在研究时段内呈现出明显的下降趋势。2010年共有9个超载省份,其中7个省份严重超载,上海的承载力表现最差,宁夏次之;2019年超载省份的数量上升至14个,其中12个省份严重超载,江苏超过上海成为超载程度最

表5 2019年各省份不同部门水资源承载力状况

Table 5 Status of water resources carrying capacity in different departments of various provinces in 2019

| 省份  | 农业部门   |       | 工业部门   |       | 生活部门   |       | 生态部门    |       |
|-----|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|
|     | 水资源承载力 | 承载力等级 | 水资源承载力 | 承载力等级 | 水资源承载力 | 承载力等级 | 水资源承载力  | 承载力等级 |
| 北京  | 1.2307 | II    | 2.2898 | VII   | 1.6570 | VI    | 0.6985  | III   |
| 天津  | 3.5197 | VII   | 3.9597 | VII   | 3.5179 | VII   | 2.2594  | VII   |
| 河北  | 1.6061 | VI    | 1.8935 | VI    | 2.0123 | VII   | 2.6608  | VII   |
| 山西  | 0.7681 | III   | 0.8840 | III   | 0.7882 | III   | 2.0534  | VII   |
| 内蒙古 | 0.3970 | I     | 0.5255 | II    | 0.4249 | I     | 4.8428  | VII   |
| 辽宁  | 0.5348 | II    | 0.5938 | II    | 0.5089 | II    | 2.2759  | VII   |
| 吉林  | 0.2757 | I     | 0.2808 | I     | 0.2275 | I     | 0.2299  | I     |
| 黑龙江 | 0.2790 | I     | 0.2254 | I     | 0.2052 | I     | 0.8578  | III   |
| 上海  | 1.7300 | VI    | 2.2246 | VII   | 2.0900 | VII   | 13.3595 | VII   |
| 江苏  | 2.6414 | VII   | 3.1252 | VII   | 2.6798 | VII   | 37.2964 | VII   |
| 浙江  | 0.1187 | I     | 0.1462 | I     | 0.1274 | I     | 0.1450  | I     |
| 安徽  | 0.5883 | II    | 0.6880 | II    | 0.5179 | II    | 2.4178  | VII   |
| 福建  | 0.1389 | I     | 0.1655 | I     | 0.1308 | I     | 0.0974  | I     |
| 江西  | 0.1392 | I     | 0.1505 | I     | 0.1244 | I     | 0.1349  | I     |
| 山东  | 1.1763 | V     | 1.5007 | VI    | 1.2207 | V     | 2.6587  | VII   |
| 河南  | 1.4532 | V     | 1.8047 | VI    | 1.4238 | V     | 1.6395  | VI    |
| 湖北  | 0.4850 | I     | 0.5860 | II    | 0.4961 | I     | 1.0265  | V     |
| 湖南  | 0.1972 | I     | 0.2040 | I     | 0.1598 | I     | 0.1131  | I     |
| 广东  | 0.1887 | I     | 0.2202 | I     | 0.2016 | I     | 0.6348  | II    |
| 广西  | 0.1434 | I     | 0.1806 | I     | 0.1356 | I     | 0.1077  | I     |
| 海南  | 0.2126 | I     | 0.3443 | I     | 0.1861 | I     | 0.1315  | I     |
| 重庆  | 0.2073 | I     | 0.2196 | I     | 0.1548 | I     | 0.2916  | I     |
| 四川  | 0.0961 | I     | 0.1195 | I     | 0.0924 | I     | 0.0705  | I     |
| 贵州  | 0.1048 | I     | 0.1288 | I     | 0.0977 | I     | 0.1920  | I     |
| 云南  | 0.1046 | I     | 0.1515 | I     | 0.1018 | I     | 0.7904  | III   |
| 西藏  | 0.0059 | I     | 0.0343 | I     | 0.0073 | I     | 6.5093  | VII   |
| 陕西  | 0.1877 | I     | 0.2331 | I     | 0.1885 | I     | 0.1797  | I     |
| 甘肃  | 0.3469 | I     | 0.4164 | I     | 0.3391 | I     | 3.8205  | VII   |
| 青海  | 0.0231 | I     | 0.0398 | I     | 0.0283 | I     | 0.7879  | III   |
| 宁夏  | 5.3062 | VII   | 6.9732 | VII   | 5.6752 | VII   | 6.4785  | VII   |
| 新疆  | 0.5434 | II    | 0.8422 | III   | 0.6822 | III   | 0.1158  | I     |

高的省份。南方降水较为丰富,城市化程度较低的省份,如广西、福建、云南等,其承载力状况较为乐观。快速的城市化发展和工业化扩张对水资源有着高度依赖,使得这些省份的生态部门在水资源分配中受到了较大的限制,生态水资源承载力脆弱。此外,工业废水和城市污水的排放也会对生态系统造成严重的损害,2019年江苏的工业废水排放量和生活污水排放量分别为13.75亿t和46.03亿t,远高于全国平均水平<sup>[41]</sup>。为进一步促进水资源与生态文明可持续发展,生态耗水较为脆弱的地区应加强水源涵养与保护,保障生态环境用耗水需求,提升生态廊道功能,并推动工业和城市污废水处理设施的建设 and 升级,提升城市绿化植被覆盖率,加强生态系统的韧性和抵抗力。

## 2.4 驱动力分析

利用灰色关联分析法,对2019年中国农业、工业、生活和生态部门耗水状况的空间均匀性、局部适配性和水资源脆弱性进行驱动力分析,结果如表6

所示。参考高煜昕<sup>[30]</sup>的研究,将0.8作为灰色关联主要因素和次要因素的关联度界定值。

由表6可见,在农业部门的影响因素中,作物播种面积的差异性空间均匀性最主要的驱动力,其关联度为0.9447,而农田灌溉水有效利用系数则是唯一的次要因素;局部适配性无明显主要驱动因素;水资源脆弱性方面,农田灌溉水有效利用系数是最有力因素,而作物播种面积与脆弱性的关联度较低。在工业部门的影响因素中,生产水足迹是空间均匀性的主要驱动力,关联度为0.8742,万元工业增加值用水量是另一个主要影响因素;工业营业收入则是该部门耗水局部适配性和脆弱性评价中的最主要影响因素,其关联度分别达到了0.8228和0.9677;地区工业产值占比和工业增加值对水资源脆弱性的影响很大,其关联度分别为0.8193和0.9489。在生活部门的影响因素中,5个影响因素与空间均匀性的关联度不强,均为次要因素,其中人均日生活用水量关联度最高,为0.7937;城镇生活污水排放量

表 6 2019 年不同部门耗水状况关联度

Table 6 Correlation degree of water consumption of different departments in 2019

| 耗水部门 | 影响因素         | 空间均匀性  | 局部适配性  | 水资源脆弱性 |
|------|--------------|--------|--------|--------|
| 农业   | 作物播种面积       | 0.9447 | 0.7385 | 0.7977 |
|      | 人均粮食产量       | 0.8562 | 0.7316 | 0.8649 |
|      | 化肥施用量        | 0.8328 | 0.7355 | 0.8733 |
|      | 耕地灌溉面积       | 0.8241 | 0.7493 | 0.9180 |
|      | 农田灌溉水有效利用系数  | 0.7687 | 0.7616 | 0.9970 |
| 工业   | 工业生产水足迹      | 0.8742 | 0.8146 | 0.8044 |
|      | 万元工业增加值用水量   | 0.8084 | 0.8008 | 0.8878 |
|      | 工业产值占比       | 0.7900 | 0.8193 | 0.9489 |
|      | 工业增加值        | 0.7897 | 0.8210 | 0.9468 |
|      | 工业营业收入       | 0.7687 | 0.8228 | 0.9677 |
| 生活   | 人均日生活用水量     | 0.7937 | 0.8196 | 0.7555 |
|      | 城市用水普及率      | 0.7764 | 0.8202 | 0.7620 |
|      | 城镇人口占比       | 0.7655 | 0.8348 | 0.8205 |
|      | 城镇生活污水排放量    | 0.7249 | 0.8578 | 0.8632 |
|      | 人口自然增长率      | 0.7108 | 0.7748 | 0.6503 |
| 生态   | 城镇环境基础设施建设投资 | 0.9996 | 0.9991 | 0.9951 |
|      | 人均公园绿地面积     | 0.9993 | 0.9987 | 0.9953 |
|      | 城市绿地园林面积     | 0.9989 | 0.9984 | 0.9952 |
|      | 城市污水日处理能力    | 0.9969 | 0.9964 | 0.9947 |
|      | 湿地面积         | 0.8550 | 0.8546 | 0.8584 |

是该部门适配性和脆弱性关联度最高的因素,并且城镇人口占比在这两种特性分析中也起到了重要作用。在生态部门的影响因素中,城镇环境基础设施建设投资、城镇环境基础设施建设投资和人均公园绿地面积分别是空间均匀性、局部适配性和水资源脆弱性的最主要驱动力。

### 3 讨论

根据洛伦兹曲线和基尼系数的计算结果,中国水资源在空间均匀性上表现为:农业部门耗水的空间分布差异性最小,属非常均匀状态;其次是生活部门,属相对均匀状态;工业部门的基尼系数已超过警戒线,属比较不均匀状态;生态部门的洛伦兹曲线与绝对平均线的距离最远,生态耗水的空间分布差异性最显著,属非常不均匀状态。这与陈晓清等<sup>[42]</sup>对中国用水结构的评价结果相近,其指出农业用水在各地分布均匀,其次是工业用水和生活用水,生态用水大部分地区基尼系数已超过警戒线。随着区域资源禀赋差异和人类活动的影响不断加大<sup>[43]</sup>,各地区应重视水资源浪费和用水效率低等问题,并提高污水处理能力,缓解和减少水资源的空间失衡。

李雨岑等<sup>[25]</sup>分析了 2000—2019 年中国水-能-粮资源空间适配格局的演变过程,发现粮食、能源与水资源错配区域呈现北方地区水资源相对资源配置短缺,南方地区水资源相对资源配置富余。这与本文对各省份不同部门耗水量与水资源禀赋间的平衡

性分析结果相近,即西南欠发达的富水地区为 I 型错配,北方资源不发达的缺水地区为 II 型错配。对此,不同地区应根据实际的用水情况,优化产业结构和布局,结合不同部门的发展需求来规划分配水资源。

本文利用水资源承载力表征水资源的脆弱性,与 2010 年相比,2019 年我国各部门的水资源承载力均有所下降,北方地区的承载力较南方地区更为脆弱,超载地区主要集中于黄淮海等地区。刘雁慧等<sup>[44]</sup>对 2000—2015 中国水资源承载力的时空演变情况进行了研究,发现东北及西南大部分地区呈不断恶化的趋势,而东南大部分地区呈不断改善的趋势,并预测全国大部分地区将呈现持续恶化的趋势,与本文的评价结果相吻合。因此,各地区应重视水资源禀赋的本底功能,协调和发挥好社会经济发展水平与生态环境保护的驱动力功能,提升区域水资源系统的承载力和韧性。

农业、工业、生活和生态部门耗水在空间分布均匀性上呈现明显差异,与各类型水资源需求背后的社会经济驱动要素和政策影响密不可分。区域发展对水资源消耗结构有着较大的影响,经济发展水平较高、速度较快的地区往往面临着更为严峻的水资源分配不均问题,尤其是在工业和生态用水领域。与 2010 年相比,2019 年生态部门的水资源消耗结构指标均有待改善。随着社会发展和人类活动的影响,生态系统将面临更大的水资源需求,因此亟须合

## 4 结 论

a. 中国各部门耗水结构的空间均匀性表现为农业部门最优,生活和工业部门次之,生态部门最差;时间演变上,2019年耗水结构的空间均匀性较2010年有所下降,工业和生态部门高耗水地区建议积极采取节水措施,改善用水管理。

b. 中国各部门耗水结构的不平衡系数由大到小为:生活、工业、农业、生态;2019年耗水结构的局部适配程度较2010年变化不大,农业耗水局部适配性较差的地区可采用节水灌溉技术,生态耗水适配性较差的地区则应倡导生态可持续发展。

c. 中国各部门耗水结构的水资源脆弱性差异较大。空间分布上,北方地区的水资源承载状况较南方地区更为紧张,超载省份主要分布在黄淮海等地区;时间演变上,2019年水资源承载力较2010年更为脆弱,各区域应根据实际情况,优化产业结构,推进节水减排,保障生态需求。

d. 农业耗水空间均匀性和水资源脆弱性最主要的影响因素分别为作物播种面积和农田灌溉水有效利用系数;工业耗水空间均匀性的关键影响因素是工业生产水足迹和万元工业增加值用水量,影响局部适配性和脆弱性的最主要因素则是工业营业收入;城镇生活污水排放量是生活部门局部适配性和脆弱性的最主要影响因素;生态耗水特征影响因素相对较多,除湿地面积外,各因素关联度数值均超过0.99。

### 参考文献:

[ 1 ] 王浩,张建云,王亦楠,等. 水,如何平衡发展之重[J]. 中国水利,2020(21):11-19. (WANG Hao, ZHANG Jianyun, WANG Yinan, et al. How does water play an enabling role in balancing development[J]. China Water Resources,2020(21):11-19. (in Chinese))

[ 2 ] 王浩,刘家宏. 国家水资源与经济社会系统协同配置探讨[J]. 中国水利,2016(17):7-9. (WANG Hao, LIU Jiahong. Collaboration of national water resources with eco-social system in China[J]. China Water Resources,2016(17):7-9. (in Chinese))

[ 3 ] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报2018[M]. 北京:中国水利水电出版社,2019.

[ 4 ] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M, CHAPAGAIN A K, et al. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability[J]. PLoS One,2012,7(2): e32688.

[ 5 ] ALDAYA M M, CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y, et

al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [ M ]. Washington, D. C. : World Bank Group,2011.

[ 6 ] 李梦怡,邓铭江,凌红波,等. 新疆绿洲格局变化与生态耗水结构分析[J]. 水科学进展,2023,34(5):719-730. (LI Mengyi, DENG Mingjiang, LING Hongbo, et al. Analysis on the change of oasis pattern and ecological water consumption structure in Xinjiang[J]. Advances in Water Science,2023,34(5):719-730. (in Chinese))

[ 7 ] 王青松,冯浩,董勤各,等. 地膜覆盖对河套灌区春玉米耗水结构及水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报,2021,40(8):10-18. (WANG Qingsong, FENG Hao, DONG Qin'ge, et al. The effectiveness of mulching in improving water use efficiency of spring maize in Hetao irrigation district varied with types of plastic films[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(8):10-18. (in Chinese))

[ 8 ] 彭正凯,李玲玲,谢军红,等. 不同耕作措施对旱地作物生育期农田耗水结构和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(5):214-221. (PENG Zhengkai, LI Lingling, XIE Junhong, et al. Effects of different tillage practices on water consumption structure and water use efficiency during crop growth period in arid farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(5):214-221. (in Chinese))

[ 9 ] 桂云鹏. 区域耗水核算方法与演变驱动研究:以京津冀地区为例[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2018.

[ 10 ] 王保乾,严蕾. 长江经济带水足迹与经济高质量发展的脱钩效应[J]. 水利经济,2022,40(1):6-12. (WANG Baoqian, YAN Lei. Decoupling effects of water footprint and high-quality economic development in Yangtze River Economic Belt [ J ]. Journal of Economics of Water Resources,2022,40(1):6-12. (in Chinese))

[ 11 ] 马海良,鄯浩楠,李一凡. 基于水足迹理论的山西省水资源与经济增长脱钩分析[J]. 水利经济,2022,40(5):23-28. (MA Hailiang, YUN Haonan, LI Yifan. Decoupling analysis of water resources and economic growth in Shanxi Province from the perspective of water footprint[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022,40(5):23-28. (in Chinese))

[ 12 ] LIU Licheng, HU Xintao, ZHAN Yijuan, et al. China's dietary changes would increase agricultural blue and green water footprint [ J ]. Science of the Total Environment, 2023,903:165763.

[ 13 ] AKGÜN M, KATANALP B, CAN A V, et al. Adapting the activity-based costing method for water footprint accounting[J]. Journal of Cleaner Production,2023,400:136691.

[ 14 ] LIU Jing, XUAN Keyang, XIE Nimin, et al. Effects of urbanisation on regional water consumption in China[J]. Journal of Hydrology,2022,609:127721.

- [15] LIU Jing, WANG Yubao, YU Zhongbo, et al. A comprehensive analysis of blue water scarcity from the production, consumption, and water transfer perspectives [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 870-880.
- [16] SUN Shikun, WU Pute, WANG Yubao, et al. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 444: 498-507.
- [17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [M]. Rome: FAO, 1998.
- [18] LORENZ M O. Methods of measuring the concentration of wealth [J]. *Publications of the American Statistical Association*, 1905, 9(70): 209-219.
- [19] CERIANI L, VERME P. The origins of the Gini index; extracts from *Variabilità e Mutabilità* (1912) by Corrado Gini [J]. *The Journal of Economic Inequality*, 2012, 10(3): 421-443.
- [20] 洪思扬, 宋志松, 程涛, 等. 基于基尼系数的南水北调受水区水资源空间匹配分析 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(2): 175-179. (HONG Siyang, SONG Zhisong, CHENG Tao, et al. Spatial matching analysis of water resources in the intake area of South-North Water Transfer Project based on Gini coefficient [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2017, 53(2): 175-179. (in Chinese))
- [21] 武萍, 张慧, 邢衍. 青海省水资源利用的匹配性研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(7): 46-53. (WU Ping, ZHANG Hui, XING Yan. Study on the matching of water resources utilization in Qinghai Province [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(7): 46-53. (in Chinese))
- [22] 王建华, 何国华, 何凡, 等. 中国水土资源开发利用特征及匹配性分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 1-8. (WANG Jianhua, HE Guohua, HE Fan, et al. Utilization and matching patterns of water and land resources in China [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(4): 1-8. (in Chinese))
- [23] 齐泓玮, 尚松浩, 李江. 中国水资源空间不均匀性定量评价 [J]. *水力发电学报*, 2020, 39(6): 28-38. (QI Hongwei, SHANG Songhao, LI Jiang. Quantitative evaluation on spatial heterogeneity of water resources in China [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(6): 28-38. (in Chinese))
- [24] 王亚迪. 区域水资源与经济社会均衡发展及市场机制研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [25] 李雨琴, 张鹏鹏, 张小力, 等. 中国水-能-粮资源适配格局动态演化及其驱动因素 [J]. *生态学报*, 2023, 43(21): 8985-8997. (LI Yuqin, ZHANG Pengpeng, ZHANG Lixiao, et al. Regional inequality of water-energy-food resources in China: evolution trend and driving forces [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(21): 8985-8997. (in Chinese))
- [26] CHEN Si, ZHU Xuexing, ZHOU Yunchen, et al. Measurement of water resources carrying capacity in Gugang Town of Central China based on human-water-agriculture framework [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 881: 163459.
- [27] 左其亭. 水资源承载力研究方法总结与再思考 [J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(3): 1-6. (ZUO Qiting. Review of research methods of water resources carrying capacity [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(3): 1-6. (in Chinese))
- [28] 安莉娜, 范国福, 吴迪, 等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(2): 35-41. (AN Lina, FAN Guofu, WU Di, et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2): 35-41. (in Chinese))
- [29] SONG Xiaomeng, KONG Fanzhe, ZHAN Chesheng. Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin City of China [J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(3): 857-873.
- [30] 高煜昕. 安徽省用水结构变化及预测分析 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- [31] LIAO Xia, REN Yitian, SHEN Liyin, et al. A “carrier-load” perspective method for investigating regional water resource carrying capacity [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 269: 122043.
- [32] SUN Boyang, YANG Xiaohua. Simulation of water resources carrying capacity in Xiong'an new area based on system dynamics model [J]. *Water*, 2019, 11(5): 1085.
- [33] 曲绅豪, 姚怀柱, 王彦东, 等. 江苏典型灌区农业水土资源匹配现状及其承载力特征 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 452-457. (QU Shenhao, YAO Huaizhu, WANG Yandong, et al. Matching status and bearing capacity characteristics of agricultural water and land resources in typical irrigation districts of Jiangsu Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6): 452-457. (in Chinese))
- [34] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰. 灰色系统理论及其应用 [M]. 7版. 北京: 科学出版社, 2014.
- [35] 朱文祥, 谷桂华. 高原湖区水资源压力和用水结构演变研究 [J]. *人民黄河*, 2022, 44(增刊2): 63-65. (ZHU Wenxiang, GU Guihua. Study on water resources pressure and evolution of water use structure in highland lake basin

- [J]. Yellow River, 2022, 44 ( Sup2 ): 63-65. ( in Chinese))
- [36] 徐蕴韵,吴昊,李永泰,等.南水北调东线江苏段用水结构及其时空演变[J].水资源保护,2022,38(2):97-102. (XU Yunyun, WU Hao, LI Yongtai, et al. Water consumption structure and its temporal and spatial evolution in Jiangsu section of east route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection, 2022,38(2):97-102. (in Chinese))
- [37] 焦士兴,李青云,王安周,等.基于生态位的安阳市用水结构与产业结构动态演化分析[J].水资源保护,2021,37(1):79-85. (JIAO Shixing, LI Qingyun, WANG Anzhou, et al. Dynamic evolution analysis of water consumption structure and industrial structure based on niche in Anyang City[J]. Water Resources Protection, 2021,37(1):79-85. (in Chinese))
- [38] 徐方圆,石家豪,韩宇平,等.河南省黄河流域用水结构演变与空间均衡状态评价[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(1):41-48. (XU Fangyuan, SHI Jiahao, HAN Yuping, et al. Evolution of water use structure and evaluation of spatial equilibrium in the Yellow River Basin of Henan Province [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44 ( 1 ): 41-48. (in Chinese))
- [39] 张洪波,兰甜,王斌.基于洛伦茨曲线和基尼系数的榆林市用水结构时空演化及其驱动力分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(1):15-24. (ZHANG Hongbo, LAN Tian, WANG Bing, et al. Analysis of temporal and spatial evolution and driving forces of water consumption structure in Yulin City based on Lorenz curve and Gini coefficients [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39 ( 1 ): 15-24. (in Chinese))
- [40] 刘欢,宋孝玉,李磊,等.中国31省(市、自治区)水资源承载力评价及预测研究[J].干旱地区农业研究,2023,41(4):226-237. (LIU Huan, SONG Xiaoyu, LI Lei, et al. Evaluation and prediction of water resources carrying capacity in 31 provinces, municipalities and autonomous regions of China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41 ( 4 ): 226-237. (in Chinese))
- [41] 贾玉博,杨宏伟,粟晓玲,等.基于水循环和水代谢理论的石羊河流域水资源承载力评价[J].水资源保护,2024,40(5):86-94. (JIA Yubo, YANG Hongyu, SU Xiaoling, et al. Water resources carrying capacity evaluation in the Shiyang River Basin based on theories of water metabolism and water cycle [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 ( 5 ): 86-94. (in Chinese))
- [42] 陈晓清,侯保灯,周毓彦,等.中国地理分区用水结构时空演变对比分析[J].中国农村水利水电,2021(6):78-85. (CHEN Xiaqing, HOU Baodeng, ZHOU Yuyan, et al. A comparative analysis of the spatial and temporal evolution of water use structure in geographical regions of China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021 ( 6 ): 78-85. (in Chinese))
- [43] 夏帆,陈莹,窦明,等.水资源空间均衡系数计算方法及其应用[J].水资源保护,2020,36(1):52-57. (XIA Fan, CHEN Ying, DOU Ming, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 ( 1 ): 52-57. (in Chinese))
- [44] 刘雁慧,李阳兵,梁鑫源,等.中国水资源承载力评价及变化研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(5):1080-1091. (LIU Yanhui, LI Yangbing, LIANG Xinyuan, et al. Study on water resource carrying capacity evaluation and change in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28 ( 5 ): 1080-1091. (in Chinese))

(收稿日期:2024-02-11 编辑:王芳)

(上接第126页)

- [19] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134. (WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 ( 1 ): 116-134. (in Chinese))
- [20] 王海云,匡耀求,郑少兰,等.粤港澳大湾区2010—2020年湿地时空变化及驱动因素分析[J].水资源保护,2023,39(4):126-134. (WANG Haiyun, KUANG Yaoqiu, ZHENG Shaolan, et al. Spatial-temporal changes of wetlands and its driving factors in Guangdong Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 2010 to 2020 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 ( 4 ): 126-134. (in Chinese))
- [21] 孙豪,桂河清,杨冬.中国省域经济高质量发展的测度与评价[J].浙江社会科学,2020(8):4-14. (SUN Hao, GUI Heqing, YANG Dong. Measurement and evaluation of the high-quality of China's provincial economic development [J]. Zhejiang Social Science, 2020 ( 8 ): 4-14. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-22 编辑:胡新宇)