

# 流域主体功能优化与黄河水资源再分配

马涛<sup>1,2</sup>, 王昊<sup>2</sup>, 谭乃榕<sup>2</sup>, 朱江<sup>3</sup>, 张凡凡<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源和水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学经济与管理学院, 哈尔滨 150006; 3. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广州 510000)

**摘要:** 立足流域主体功能优化概念内涵, 系统性解析流域各类主体功能目标, 基于流域主体功能评价指标体系建立以主体功能优化为目标导向的流域主体功能水资源分配机制, 通过遗传算法求解多目标优化模型得到2017年黄河流域9省、自治区的四类水资源分配方案。研究结果表明: (1) 流域主体功能实现水资源分配机制, 使黄河流域最大可能节水23.01亿 $\text{m}^3$ 。(2) 流域主体功能水资源分配机制给黄河流域主体功能实现分别带来4344.48亿元的生产功能增量、991.35亿元的生态功能价值增量, 可多承载8194.84万人口。(3) 减少宁夏和山东的农业用水及内蒙古工业用水分配对黄河流域水资源优化分配至关重要。

**关键词:** 流域主体功能优化; 黄河流域; 水资源分配; 多目标优化模型

流域是一种典型的空間, 也是边界明确却又开放的自然地形空間系统, 与其他类型尺度的国土空間迥然相异<sup>[1]</sup>。水资源是流域内最关键的基础性资源要素, 在流域内地区间的分配是优化流域经济社会发展和生态保护目标功能的重要可控要素<sup>[2]</sup>。作为我国国土空間治理的基础性和长期性制度安排, 主体功能区规划是由国土空間自然属性而确定的资源开发及利用方式<sup>[3]</sup>。流域主体功能区规划给定了水资源开发利用的目标, 为流域水资源合理分配提供政策指引<sup>[4]</sup>。在流域国土空間的资源开发与利用中, 尤其是水资源的开发利用, 影响到流域内水生态和水环境关系, 最终影响流域整体的经济—人口—生态复合系统。对流域生产—生活—生态等主体功能进行定量刻画, 进而在流域国土空間中分解落实。既可以廓清水资源利用关系对流域不同空間尺度、不同功能类型的的影响关系, 探索流域水资源再分配实现流域国土空間主体功能优化的内在机制<sup>[5]</sup>。另一方面也可以为流域主体功能管理与优化提供科学依据, 形成并优化流域水资源等资源高效利用的政策设计。

黄河流域水资源的合理分配是流域高质量发展的重要前提<sup>[6]</sup>。长期以来, 我国“母亲河”黄河的上中下游、流域两岸开发过度, 水资源总量不足, 也深刻反映出水资源在流域内省区间分配与流域主体功能总体优化的治理问题<sup>[7]</sup>。黄河流域作为我国第二大流域, 是典型的资源型缺水流域, 其水资源总量占全国总量的2.6%、人均水资源量为全国平均水平的1/5。水资源分配问题进一步加重了流域内地区之间用水结构的供需矛盾, 一定程度上对流域生态环境造成不可逆影响<sup>[8]</sup>。黄河流域水资源分配机制源自“八七”分水方案, 该分水方案综合考虑了沿岸省份用水需求及生态保护要求, 尤其是断流问题及水沙

收稿日期: 2019-12-11; 修订日期: 2020-05-22

基金项目: 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学)自主课题(2019DX14); 国家自然科学基金项目(71950001, 71974046); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HIT.HSS.201839)

作者简介: 马涛(1979-), 男, 山东东营人, 博士, 教授, 主要从事中国经济与区域经济、资源环境可持续发展与政策研究。E-mail: matao@hit.edu.cn

平衡性,具有一定的科学性和可操作性<sup>[9]</sup>。但随着黄河流域沿岸地区经济社会的发展,早前“八七”分水方案指标时效性不足、黄河向流域外的河北和天津输送水资源、在枯水时期等比例削减流域内外省份配水量<sup>[10]</sup>等问题,进一步加剧了黄河自身水资源供给不足。此外,流域生态环境用水长期被经济建设用水挤占<sup>[11]</sup>,导致流域水环境进一步恶化。

目前国内外流域的各类水资源分配方法还不能完全解决黄河水资源短缺和生态保护不足的现实问题。从流域主体功能优化角度对流域水资源再分配进行分析对实现流域空间生态保护与可持续发展是一种新探索。目前对黄河流域水资源分配合理性及科学性的研究,主要集中在现阶段水权分配模式研究上,依据人口、面积、产值、混合、现状和市场等指标确定分配依据,或依据流域不同地区、不同企业及不同社会主体的偏好进行分配。国际上较典型的流域水资源分配机制更加复杂,依据流域内国家数量、国家流域面积、各国人口、国家贡献率等指标确定分配模式<sup>[12]</sup>。但单一水资源分配方式不具有全面性,适应性的水资源分配是解决水资源利用的关键<sup>[13]</sup>。从主体功能视角看,黄河流域现行水资源分配机制在流域主体功能上存在较大的优化空间,但需要对黄河各类水资源利用结构与异质性主体功能的关系进行科学分析。

基于此,本文尝试科学界定流域空间的主体功能属性,建立流域主体功能与流域水资源利用方式与跨行政区主体功能实现的理论描述,推进流域国土空间的主体功能定量计算与优化,应用到流域人口、生态资源环境与可持续发展的分析中,实现流域跨行政区统筹、异质性主体功能协调的初步核算与转译,探索对黄河流域水资源再分配政策设计的新思路。

## 1 流域主体功能与水资源分配

### 1.1 流域国土空间特性与流域主体功能的基本界定

生态环境保护基础性、战略性和长期性举措在“十一五”时期首次被纳入我国国土空间治理体系,也出台了对接主体功能分类指导的环境分类管理方式<sup>[14]</sup>。现行国土空间类型主要包括自然空间、行政空间、经济空间等,流域是一类兼具多重属性的特殊国土空间类型。

流域生态系统是地球上最复杂的生态系统之一<sup>[15]</sup>,包含水资源、水环境、水生态、陆域生态和水陆交错带等各地类要素,具有多样性、整体性和不可分割性。水资源是流域生态系统有机整体中最主要的组成,与土地、大气、生物等相互作用。不仅为生物群落提供生存环境,还为人类社会经济发展提供水生态与水环境等必要条件,是与人类关系非常密切、深受人类社会经济活动干扰系统之一。所提供的生态服务是流域空间存在与发展的重要物质基础,包括水源供给、气候调节、净化、美学以及生物多样性和生存栖息地等<sup>[16]</sup>。流域上中下游间的高度关联性和动态性是流域空间的突出特点,流域水资源和森林、草地等其他生态系统之间具有相互依赖和相互制约的关系。流域生态保护和提升生态系统功能稳定性的国土空间开发目标对整个流域的发展具有基础性作用。

流域主体功能的基本界定。基于流域国土空间连续性、整体性、多样性等生态与地理特性,从可持续发展角度,给出流域主体功能界定:在流域国土空间中,一定时期内或某动态时点上,在自然资源与非自然资源要素投入下,实现了流域经济—人口—生态系统功能,用功能实现的产品和服务总和表示<sup>[17]</sup>。流域国土空间能够提供多种功能,至少有一种作为主体功能。流域的生态系统和经济社会系统皆因“水”而发生某种程度的联系,并形成生态—经济—社会复合系统,可通过流域主体功能评价指标体系对复合功

能系统进行刻画。

流域水资源利用是流域国土空间开发的主体内容之一,是流域主体功能实现及优化的关键因素,其他资源的开发利用往往以水资源为前提。水资源是流域地区国民经济和社会发 展组织与管理的重要单元,而流域经济社会发展水平具有空间异质性,相关利益主体之间关系复杂,加剧了对流域上下游地区间的水资源统筹开发利用的难度。

## 1.2 流域水资源利用与流域主体功能的定量评价

流域国土空间资源开发利用需统筹兼顾以水资源为核心的生态环境系统与经济社会系统。需要制定流域复合功能系统的分阶段分区域目标,实现流域空间结构优化调整、资源高效利用、生态保护修复、灾害污染治理等目标,提升流域国土空间可持续发展能力的综合治理活动。

根据《全国主体功能区规划》,流域主体功能涉及经济、人口及生态多功能系统。厘清水资源对各主体功能实现的支撑作用,是流域主体功能进行定量评价并优化的前提。流域各地区所分配得到的各类水资源,对地区人类生产、生活、社会发展及主体功能实现起到重要支撑作用。水资源支撑主体功能实现过程是多层次系统的,生产—生活—生态复合层次功能相互联系,功能实现过程中存在许多耦合与反馈<sup>[18]</sup>。基于水资源对主体功能实现的支撑关系,可分别衡量不同功能系统发展状态选取指标作为参量对流域主体功能进行定量刻画。流域主体功能评价指标体系包括生产功能、生活功能和生态功能三方面。生态功能子系统是流域主体功能最重要的系统,通过对水资源总量和水质的实物量描述,刻画水资源对流域水生态、水环境的生态系统服务功能价值实现的支撑作用,包括水源涵养、水文调节、水土保持、环境净化和生物多样性<sup>[19]</sup>等生态功能。流域地区污染物排放是阻碍生态系统服务发挥作用的根本制约因素,因此减少污染源是对流域生态功能进行优化的方法之一。水资源同时支撑流域生产、生活功能的实现。生产功能子系统用于描述流域沿岸省份社会经济发展不断发展的过程,以及流域水资源为流域经济发展带来的支撑。生活功能子系统用于描述流域某一时期内,水资源支撑流域沿岸省份居民生活需求的实现,保障流域地区人均水量获得是水资源支撑生活功能实现的重要宗旨。流域水资源分配属于国土空间开发中的资源利用内容,水资源分配量既支撑又约束了流域主体功能实现。针对生产—生活—生态功能三个子系统提出流域主体功能评价指标见表1。

据此,可从水资源要素投入视角建立流域主体功能评价指标体系。流域主体功能( $Y$ )主要由生产功能( $Y_P$ )、生活功能( $Y_L$ )、生态功能( $Y_E$ )及其他功能( $Y_{else}$ )四部分组成,四种部门以功能量为虚拟量纲,既可以实物量表示也可以价值量表示<sup>[21]</sup>。

$$Y = Y_P + Y_L + Y_E + Y_{else} \quad (1)$$

流域主体功能作为复合功能系统,将系统序参量定义为流域主体功能实现 $Y$ ,将影响流域主体功能实现的可度量主要因素定义为 $X$ 主要因子,将剩余影响因子归并为 $W$ 其他因子,进而构建流域主体功能实现的运行状态模型,即:

$$\begin{aligned} Y &= F(Y_P, Y_L, Y_E, Y_{else}) = F(X, W) \\ Y_P &= F(X_1, W) \\ Y_L &= F(X_2, W) \\ Y_E &= F(X_3, W) \\ X &= \{X_1, X_2, X_3\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $Y$ 为流域主体功能实现状态; $F$ 为表征影响因子与主体功能实现状态关系方程; $X$ 为流域主体功能实现的主要因子,包括生产功能因子 $X_1$ 、生活功能因子 $X_2$ 和生态功能因子 $X_3$ 。



表 1 流域主体功能评价指标体系<sup>[20]</sup>

Table 1 Evaluation index system of main function of the river basin

主体功能	指标	含义	指标性质
生产功能	国内生产总值 GDP/万元	反映水资源利用结构对流域经济发展支撑能力	正向
	万元 GDP 用水量/(m <sup>3</sup> /万元)	反映流域水资源的经济效益	正向
生活功能	人口总量/万人	反映流域水资源承载人口能力	正向
	人均生活用水量/(L/人)	反映流域水资源实现居民生活功能的能力	正向
生态功能	流域水量	水资源总量/亿 m <sup>3</sup>	正向
		全年总供水量/亿 m <sup>3</sup>	正向
	流域水质	水质达标率/%	正向
	水环境	BOD、COD 排放浓度/(mg/L)	负向
	水生态	生态系统服务价值/万元	正向

1.3 流域主体功能优化与水资源再分配机制

1.3.1 流域主体功能优化的水资源再分配原则

水资源合理分配是实现流域水资源合理开发和高效利用的重要过程，其核心是水资源供需平衡协调分析。流域主体功能优化的水资源分配机制旨在以一种相对公平的方式，使沿岸地区经济和社会福祉的综合功能实现成果最大化，并且能维系流域重要生态系统的可持续性。内容上是对流域各地区的水量与水质的统一调配，以及优化间接调整影响水量与水质的各项生产—生活活动，涉及并促进以水资源为中心的多地区、多功能的协调开发和管理。黄河流域用水紧张，主体功能优化的水资源分配思路包括增加供水和抑制需求。黄河流域作为典型资源型缺水流域，有必要探索建立以主体功能优化为目标的水资源再分配机制。

1.3.2 黄河流域主体功能优化的水资源分配机制

流域主体功能优化的水资源分配，是基于主体功能优化视角的流域水资源分配新思路，是对各类流域水资源分配思路进行取舍后的综合（图 1）。根据 2019 年提出的黄河流域生态保护和高质量发展战略，确定水资源分配原则如表 2 所示。需要根据黄河流域上、中、下游城市各自情况，应用不同的水资源分配模式。黄河上游多适用于流域面积分配模式，中游多适用于人口分配模式，下游适用于产值分配模式。

黄河流域的水资源再分配首先要满足流域生态用水需求，保障流域内的天然河流、湖泊、沼泽以及河口三角洲生态系统用水<sup>[23]</sup>。其余水量通过统筹协调分配各地区各类水资源以优化流域整体生产—生活—生态复合功能效益，保障流域水资源的持续开发利用。黄河流域主体功能优化的水资源分配机制的层级结构是从黄河流域、省市级、省市内部的生产、生活、生态用水部门的自上而下结构。第一层是全流域生态环境用水和社会经济用水之间的优化分配，第二层是流域内各省市的水资源分配，第三层是流域各省市行政区内部多用水部门之间的水资源分配。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究区概况

黄河流域发源于青海省巴颜喀拉山脉，横跨我国北方东、中、西三大区域，流经 9 个省（自治区）的 43 个城市。黄河流域以全国 2.6% 的水资源总量承载了全国 12% 的人

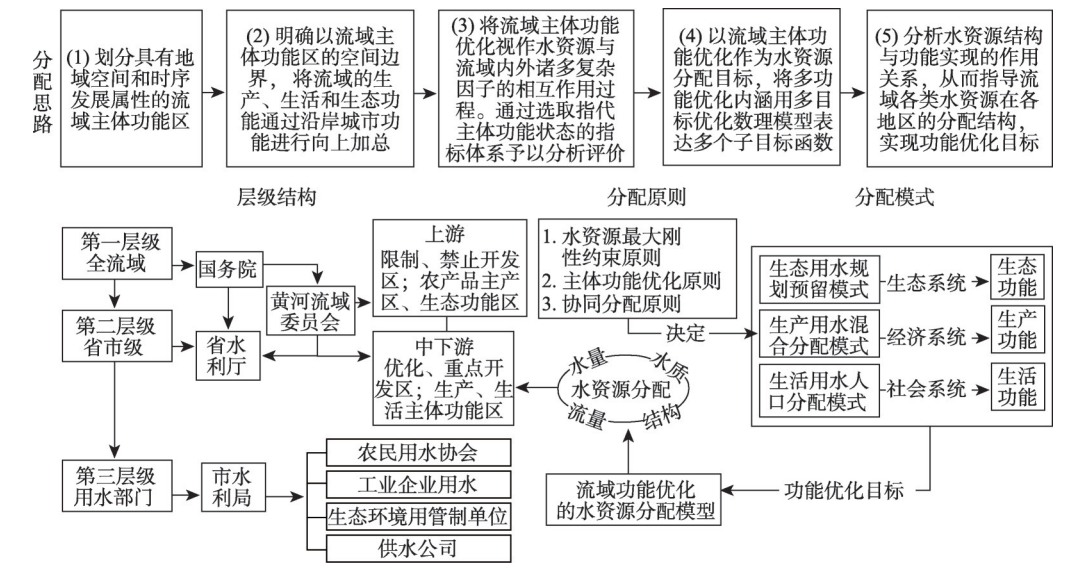


图1 流域主体功能优化的水资源分配机制

Fig. 1 Water resources allocation mechanism for optimization of main functions of the river basin

表2 黄河流域水资源分配原则

Table 2 Principles of water resources distribution in the Yellow River Basin

总原则	以供定需
原则1：水资源作为最大刚性约束原则	将国家规定的省域“三条红线”控制指标向下分解至市县行政单元主体功能区的年度水量分配方案中，对黄河水资源总量实行严格控制，作为多目标优化模型的主要约束条件，得到黄河流域内省市的各类用水量；坚持“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”原则 <sup>[21]</sup>
原则2：主体功能优化原则	在流域水资源总量约束前提下，通过对农业用水、工业用水、生活用水及生态用水在流域上中下游各地区之间的合理分配，达到流域总体主体功能实现优化和可持续发展的目的
原则3：协同分配原则	在流域水资源总量约束和整体主体功能实现优化前提下，根据主体功能区规划中对流域国土空间保护、开发、利用与修复的相关规定，量化不同主体功能区的功能实现优先次序，以实现流域内省与省之间、主体功能区之间的生产、生活和生态功能实现的协同

口和5.3%的工业总产值，流域粮食总产量占全国的13.4%，是我国重要的农业灌溉区、工业带和国家重要生态屏障的密集区，在我国经济发展和生态保护中承担全局性、战略性作用，是全国主体功能优化的重要组成部分<sup>[24]</sup>。

2.1.1 黄河流域水资源分配

1983年初黄河水利委员会通过了黄河流域年可供水量374亿m<sup>3</sup>的提议，并于1984年依据“保障基本用水”“以供定需”原则制定了《黄河可供水量分配方案》<sup>[25]</sup>，即“八七”分水方案。1987年国务院批准该方案，要求此后根据“八七”分水方案调整流域当年水资源分配量。黄河流域八七分水方案确定了沿黄各省（自治区）的耗水量，为流域的有序用水发挥了重要作用（表3）。

黄河“八七”分水方案主要依据1980年各省（市、自治区）的用水量。当时上中游地区社会经济发展水平普遍低于下游地区，因此客观上水量分配偏好下游地区。随着黄河流域上游地区经济社会发展水平与下游差距的明显缩小，目前来看上游省份得到的流域水量额分配比例明显偏少。此外，随着中国耕地的重心向西北方向迁移，有必要考虑对位于黄河流域上游的西北地区增加水资源分配量。黄河“八七”分水方案中明确指

表3 黄河流域水资源分配方案

Table 3 Water resources allocation plan of Yellow River Basin (亿m³)

省（市、自治区）	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东	河北、天津	合计
1987年各省提出的需求水量	36	0	74	61	149	115	61	112	84	6	696
“八七”分水方案	14.10	0.40	30.40	40.00	62	43	52	58	75	0	374
1987年耗水量	14.1	0.4	30.4	40.0	58.6	38.0	43.1	55.4	70.0	20.0	370.0
2014年南水北调东中线工程生效	13.16	0.37	28.37	37.32	54.68	35.46	40.22	51.69	65.32	6.20	332.79
2017年耗水量	9.31	0.20	30.32	37.15	54.37	31.38	28.93	49.72	85.18	2.30	328.86

注：数据来源于《黄河“八七”分水方案》<sup>[9]</sup>、《黄河流域综合规划》<sup>[26]</sup>、《黄河水资源公报》<sup>[27]</sup>。

出，此方案仅在南水北调工程生效前适用。截至2014年，南水北调东中线工程一期已建成运行。该工程改善了黄河流域内河南省及以下地区的水资源条件。因此适当减少了对陕西、山西和河南的水资源分配量，增加了对上游地区的分配水量。

2.1.2 黄河流域主体功能区划

选取2017年黄河流域9个省、自治区43个地级市的统计数据作为模型样本。数据资源来源《黄河水资源公报2017》<sup>[27]</sup>、《中国城市统计年鉴》<sup>[28]</sup>及各省份、地级市的《水资源公报》。根据《全国主体功能区划》以及各省主体功能区规划中对各地区主体功能的定位以及主体功能区的划分，整理得到黄河流域流经的43个地级市的主体功能区（表4、图2、图3）。

表4 黄河流域主体功能区

Table 4 Main functional areas of the Yellow River Basin

开发方式	开发内容	主要省、自治区（市、自治州）
优化开发区	城市化地区	山东（滨州、东营）
重点开发区	16个	青海（海南藏族自治州）、甘肃（兰州、白银）、宁夏（银川、石嘴山）、内蒙古（呼和浩特、乌海、鄂尔多斯）、山西（吕梁、忻州）、河南（三门峡、郑州、开封）、山东（济宁）
限制开发区	农产品主产区	甘肃（临夏回族自治州）、宁夏（中卫）、陕西（渭南）、山西（临汾、运城）、山东（菏泽、聊城、德州）
	生态功能区	青海（玉树藏族自治州、果洛藏族自治州、黄南藏族自治州、海东）、甘肃（甘南藏族自治州）、宁夏（吴中）、内蒙古（阿拉善盟、包头、巴彦淖尔）、陕西（榆林、延安）、河南（焦作、洛阳、新乡、濮阳）、四川（阿坝藏族羌族自治州）、山东（济南、淄博、泰安）
禁止开发区	禁止开发区	点状分布

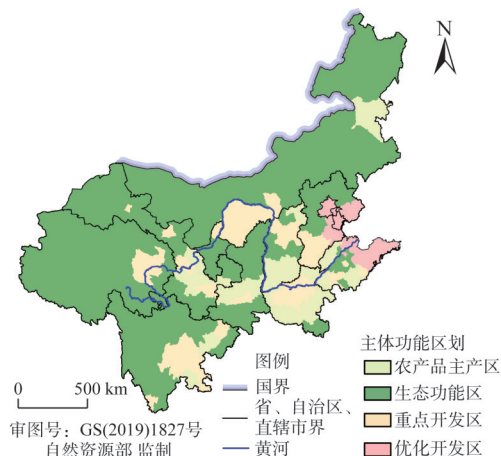
注：划分依据《全国主体功能区规划》、9个省、自治区的主体功能区规划。

2.2 流域主体功能多目标优化的水资源再分配模型构建

明确黄河流域各主体功能区的水资源分配功能实现目标。通过流域主体功能评价指标体系得到相关变量数值，建立以流域主体功能优化为目标导向的水资源再分配模型。流域主体功能多目标优化的水资源再分配模型的一般表达式如下：

$$\begin{cases} Z=\max[F(X)]=f_1(x), \cdots, f_m(x) \\ G(X)\leqslant 0 \\ X\geqslant 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中： $X$ 为决策变量； $F(X)$ 为总目标函数，表示流域整体主体功能实现； $G(X)$ 为约束条件集。



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图2 沿黄省份主体功能区划

Fig. 2 Main functional divisions in provincial-level regions along the Yellow River

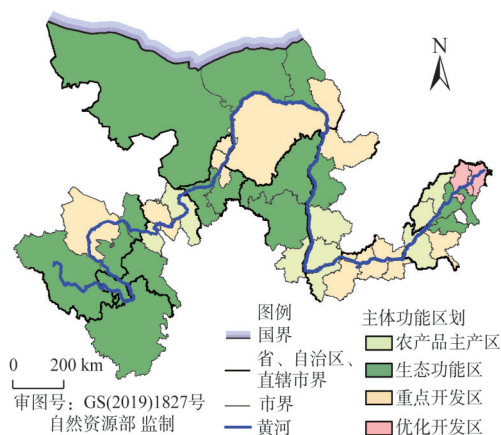


图3 沿黄地级市、区(县)主体功能区划

Fig. 3 The main functional divisions in the prefecture-level cities and districts (counties) along the Yellow River

数, 根据  $k$  功能区在流域内生产功能实现占比表示其优先次序大小;  $\omega_k$  表示  $k$  主体功能区的权重系数, 用  $k$  子区承担流域整体的功能比值表示。

黄河流域生活功能实现子目标。生活功能实现用流域承载人口量表示, 通过减少流域配水地区的缺水量, 以提高地区可承载人口量:

$$\max f_2(x) = -\min \left[ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} (S_j^k - \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k \beta_i^k) \right] \quad (5)$$

式中:  $S_j^k$  表示  $k$  子区  $j$  功能需水量 (亿  $\text{m}^3$ );  $\beta_i^k$  表示  $k$  功能区的生活用水次序, 用  $k$  功能区在流域内承担的生活功能实现占比大小表示。

黄河流域生态功能实现子目标。用流域水资源受污染物排放量最小间接表示流域生

(1) 子区划分、水资源总量及配置单元。根据流域各区域的自然地理条件、主体功能区划、行政区划以及水资源利用状况, 将黄河流域按地级市行政单元进行划分后, 以省级单元进行加总, 并依次对上游至下游的9个省、自治区进行编号。本文限定于对黄河流域公共水源进行分配, 地区内部的本地独立水源作为优化分配模型中的约束条件, 不参与流域水资源的再分配过程。决策变量为  $x_{ij}^k$ , 表示黄河流域  $i$  类水资源向  $k$  子区  $j$  功能的供水量,  $i$  取4, 分别为农业用水、工业用水、居民用水和生态用水;  $j$  取3, 分别为生产、生活和生态功能, 共计36个决策变量。

(2) 确定目标函数。根据黄河流域水资源分配原则2“主体功能优化原则”, 目标函数包含三个子目标, 分别为生产功能子目标、生活功能子目标和生态功能子目标。

黄河流域生产功能实现子目标。生产功能实现最大化目标用流域区域分配水量的直接经济效益最大表示:

$$\max f_1(x) = \max \left[ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \sum_{i=1}^{I(k)} (\gamma_{ij}^p - c_{ij}^k) x_{ij}^k \alpha_i^k \omega_k \right] \quad (4)$$

式中:  $\gamma_{ij}^p$  表示  $k$  子区  $j$  功能产出系数, 包括农业、工业用水的功能产出系数, 根据水与功能关系式计算得到;  $c_{ij}^k$  表示黄河流域  $i$  类水资源向  $k$  子区  $j$  功能供水的费用系数;  $\alpha_i^k$  表示  $k$  功能区的生产用水次序系数;  $\omega_k$  表示  $k$  主体功能区的权重系数, 用  $k$  子区承担流域整体的功能比值表示。



态功能最大化目标：

$$\max f_3(x) = -\min \left[ \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} 0.01 a_j^k b_j^k \sum_{l=1}^{I(k)} x_{ij}^k \right] \quad (6)$$

式中： $a_j^k$ 表示 $k$ 子区 $j$ 功能的单位污水排放量中的污染物浓度（mg/L），用生化需氧量（BOD）和化学需氧量（COD）的浓度表示； $b_j^k$ 表示 $k$ 区 $j$ 功能的污水排放系数，将农业和生态污水排放系数设为0。

（3）约束条件与模型系数。根据黄河流域水资源分配原则1“水资源作为最大刚性约束原则”，约束条件①为黄河流域可供水量约束：

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} x_{ij}^k \leq T_i^k \quad (7)$$

式中： $T_i^k$ 表示 $k$ 子区内 $i$ 类水资源的可供水总量（亿 $m^3$ ）。

约束条件②为用户需求量约束：

$$S_{j\min}^k \leq \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k \leq S_{j\max}^k \quad (8)$$

式中： $S_{j\max}^k$ 、 $S_{j\min}^k$ 分别是 $k$ 子区 $j$ 功能需水量的上限、下限（亿 $m^3$ ）。 $S_{j\max}^k$ 取值参考沿黄省份引黄水消耗量数据（亿 $m^3$ ）， $S_{j\min}^k$ 为非负数。

约束条件③为流域水系统的水质约束，包括水资源达标排放约束和总量控制约束：

$$r_{id}^k \leq r_d \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} 0.01 a_j^k b_j^k x_j^k \leq T_0 \quad (10)$$

式中： $r_{id}^k$ 表示 $k$ 子区 $i$ 类水资源排放污染物 $d$ 的浓度（mg/L）； $r_d$ 表示污染物 $d$ 达标排放规定的浓度（mg/L）； $T_0$ 表示流域允许的污染物排放总量（万t）。

约束条件④为非负约束：

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad (11)$$

约束条件⑤，根据黄河流域水资源分配原则3“协同分配原则”，流域不同主体功能区的生产、生活和生态功能实现目标存在优先次序，用功能实现优先序权重系数 $\rho_j^k$ 表示不同功能实现权重大小，计算方法参考流域用水公平系数的表示方法<sup>[29]</sup>：

$$\rho_j^k = \frac{1 + n_{\max}^k - n_i^k}{\sum_{j=1}^{J(k)} [1 + n_{\max}^k - n_i^k]} \quad (12)$$

式中： $n_i^k$ 表示 $k$ 子区 $j$ 功能实现的次序序号； $n_{\max}^k$ 表示 $k$ 子区功能实现次序序号的最大值。根据上式计算得到不同主体功能区的农业用水、工业用水、生活用水和生态用水分别赋予0.4、0.3、0.2和0.1表示其重要程度依次递减，将农业用水和工业用水权重系数之和表示生产用水权重，如表5所示。

综上建立得到黄河流域主体功能优化的水资源再分配模型，并运用带精英策略的快速非支配排序遗传算法NSGA-II（Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II）对该模型求解，利用MATLAB代码进行编程实现遗传算法优化过程（图4）。



表5 不同主体功能区的功能用水目标优先序与权重系数

Table 5 Priority and weight coefficient of water resources utilization in different main functional areas

根据开发方式划分	主体功能区	第一序位功能用水	第二序位功能用水	第三序位功能用水
优化/重点开发区	城市化地区	生产用水 (0.5)	生活用水 (0.3)	生态用水 (0.2)
限制开发区	农产品主产区	生产用水 (0.5)	生活用水 (0.3)	生态用水 (0.2)
	生态功能区	生态用水 (0.4)	生活用水 (0.3)	生产用水 (0.3)
禁止开发区	禁止开发区	生态用水 (0.7)	生活用水 (0.3)	生产用水 (0)

### 3 结果分析

#### 3.1 黄河流域主体功能的空间分布特征

黄河流域9个省、自治区的水资源禀赋、人口、产业结构等因素差异较大。在对黄河流域主体功能实现进行定量刻画时,选择流域流经的43个地级市的主体功能实现值,来指代沿黄9省、自治区的功能实现情况,便于更合理地对省份自身面积较大但流域流经面积较少地区进行刻画(图5)。

(1) 黄河流域生产、生活功能空间差异显著,下游城市经济发展显著优于中上游城市。黄河流域沿岸城市地区生产总值与人均生产总值自上游至下游依次递增,位于流域末端的东营市的人均GDP是位于流域源头玉树藏族自治州人均GDP的10倍。位于上游的甘肃、陕西、青海流经黄河流域的城市多是重点生态功能区,生产、生活功能实现弱,一些重点开发区因传统产业内生动力不足导致高质量转型滞后。流域生活功能空间分布与生产功能正相关,流域人口承载区主要位于下游,河南和山东两省共计承担了流域总人口的60.5%(图6)。

(2) 黄河流域承担了全国26.79%的生态功能,流域内生态功能与生产、生活功能呈空间负相关。黄河流域是国家生态功能实现的重要组成部分,包含多个国家级生态功能区。根据当量法<sup>[30]</sup>计算的2017年黄河流域沿岸省份生态功能价值之和为35732.16亿元。青海和内蒙古是黄河流域生态功能实现的主要组成部分,两地的生态功能量分别占流域生态功能总量的19.67%和38.37%。

(3) 黄河流域对上游省份的主体功能支撑作用高于下游省份。用省份中流域流经城市与全省的经济、人口比例,反映黄河流域对某一省份的功能实现支撑重要性。就生产功能来看,流域对甘肃和宁夏的生产功能支撑分别占全省、自治区的75%和58%。就生活功能来看,流域对宁夏和青海的生活功能支撑分别占全省、自治区的82%和52%(图6)。

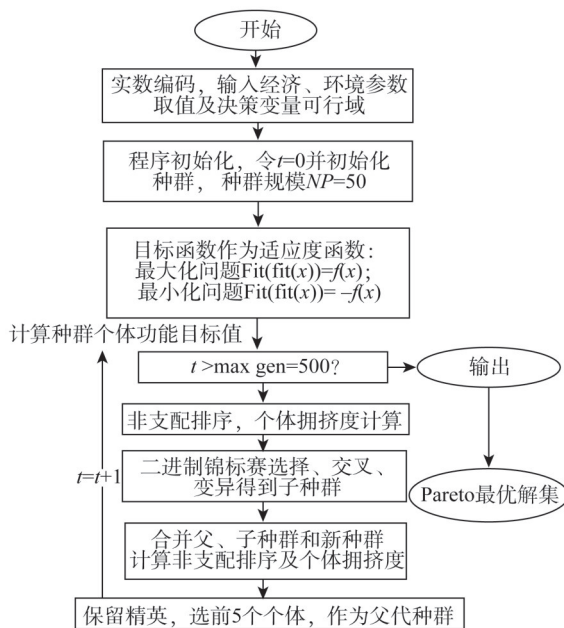


图4 遗传算法求解程序

Fig. 4 Genetic algorithm solver

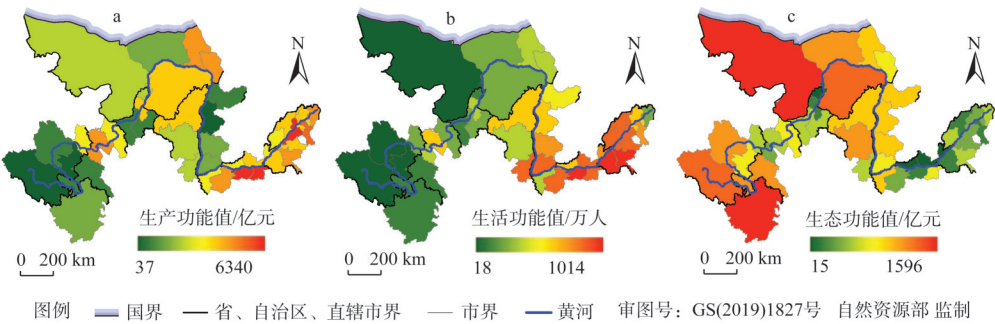


图5 沿黄城市主体功能实现值

Fig. 5 Realization value of main functions of cities along the Yellow River

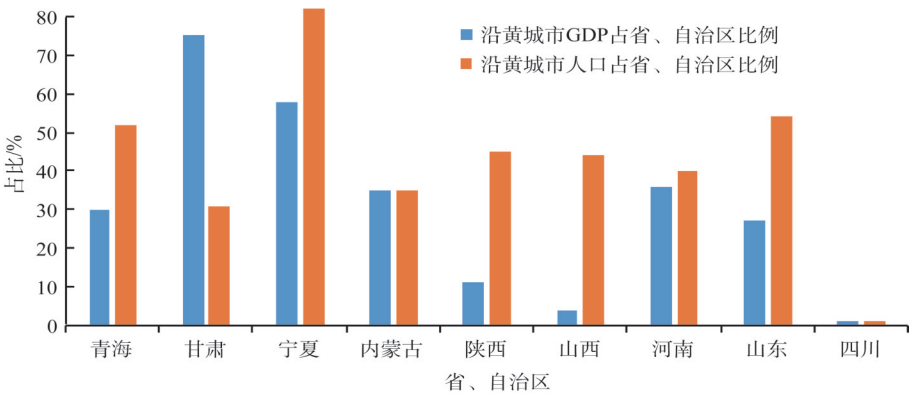


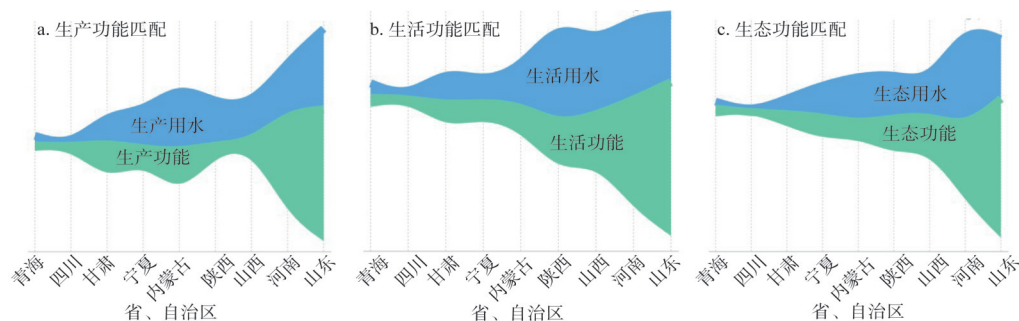
图6 沿黄城市GDP和人口占省、自治区比例

Fig. 6 The GDP and population proportions of cities along the Yellow River to their provincial-level regions

3.2 黄河流域水资源分配与功能实现匹配分析

将黄河流域9个省、自治区的主体功能实现量与各类用水量进行对比分析，分别用黄河流域流经某一省份的地级市的产业产值、承载人口和生态系统服务价值，表示这一省份沿黄地区的主体功能实现量。将某一地区生产功能、生活功能和生态功能实现量占黄河流域总的生产功能、生活功能和生态功能实现量比例，与此地区的生产、生活和生态用水量占黄河流域总生产、生活和生态水量的比例进行比较，由此分析流域各类水资源分配结构与功能实现是否匹配。

黄河流域整体水资源分配量与主体功能实现不匹配。生产、生活功能实现量与生产、生活水量分配脱钩，自上游至下游呈生产、生活功能逐渐增大而人均水资源量减少的趋势。位于流域上游的宁夏和陕西生产用水占比较大，但其生产功能实现占比小，生产用水的生产功能实现效率低，河南和山东较高；就生活功能匹配来说，陕西和山西生活用水的生活功能实现效率低，河南和山东较高；就生态功能匹配来说，内蒙古和河南生态用水的生态功能实现效率低，山东最高。此外，将地区取水量与耗水量做差，得到地区引黄的未用水量（表示省份引黄用水量最终回归到黄河干、支流的水量），宁夏、内蒙古和陕西的引黄未利用水量分别为29.46亿m<sup>3</sup>、21.13亿m<sup>3</sup>和16.07亿m<sup>3</sup>。因此，现存黄河流域水资源分配方案存在进一步的优化空间（图7）。



注：数据来源于《黄河水资源公报》<sup>[27]</sup>。

图7 黄河生产、生活、生态的耗水量与功能实现匹配图

Fig. 7 Matching diagram of water consumption and function realization of production, life and ecology in the Yellow River

### 3.3 黄河流域主体功能优化的水资源分配结果

用MATLAB编程NSGA-II程序，并输入计算所得相关系数参数，得到黄河流域9省、自治区四类用水的水资源分配Pareto最优解集。两两子目标函数的Pareto前沿图说明了流域生产、生活和生态三类主体功能之间的相关关系（图8）。生产—生活功能实现及生活—生态功能实现关系呈似倾斜双曲线状，分别表明居民生活用水量会先随着粗放式工业用水的增大而减少，随着经济的逐渐发展及水资源利用效率的提高，居民用水量会逐渐提高。在流域支撑居民生活功能能力逐渐降低时，流域水污染情况也会随之降低。生产—生态功能的实现关系呈正相关，表明黄河流域水资源利用处于随着水资源经济效益的提高水污染不断加大的情况。

求解黄河流域主体功能优化的水资源分配模型得到多个Pareto最优解集。为使模型求解结果在现实中更具有可操作性，选择配水方案中水资源总量最接近2017年实际耗水量的三个优化方案（表6）。方案一的配水总量为252.21亿 $\text{m}^3$ ，其中农业用水、工业用水、生活用水和生态用水的分配量分别为148.10亿 $\text{m}^3$ ，47.12亿 $\text{m}^3$ ，42.75亿 $\text{m}^3$ 和14.27亿 $\text{m}^3$ 。方案二的配水总量为305.85亿 $\text{m}^3$ ，其中农业用水、工业用水、生活用水和生态用水分别为177.05亿 $\text{m}^3$ ，68.03亿 $\text{m}^3$ ，50.03亿 $\text{m}^3$ 和10.74亿 $\text{m}^3$ 。方案三的配水总量为305.91亿 $\text{m}^3$ ，其中农业用水、工业用水、生活用水和生态用水分别为156.58亿 $\text{m}^3$ ，85.48亿 $\text{m}^3$ ，50.45亿 $\text{m}^3$ 和13.40亿 $\text{m}^3$ 。

通过模型求解得到的各地区生态用水分配量都显著高于现实情况，以及各地区的各类用水结构存在一定问题。需要结合前文流域水资源分配规律以及上下游不同地区的经济社会发展、人口承载实际情况，对Pareto最优解集的三个优化方案结果结合实际情况进行调整与选择。考虑到生态用水多是各地区的额定用水，方案二较其他方案而言更好地满足了地区生态用水需求，同时保障了内蒙古和山东的农业用水、陕西和河南的工业用水以及陕西和山西的居民用水需求。因此选择方案二作为最终配水方案，实现黄河流域节水23.01亿 $\text{m}^3$ 。

### 3.4 黄河流域水资源分配的主体功能优化量

以2017年为基准年，计算配水方案二的主体功能实现量，将结果与实际功能实现量进行对比分析。式（13）为各类用水与功能实现关系式，将2017年流域各地区主体功能量和农业用水  $water_{Agriculture}$ 、工业用水  $water_{Industry}$ 、生活用水  $water_{Life}$ 、生态用水

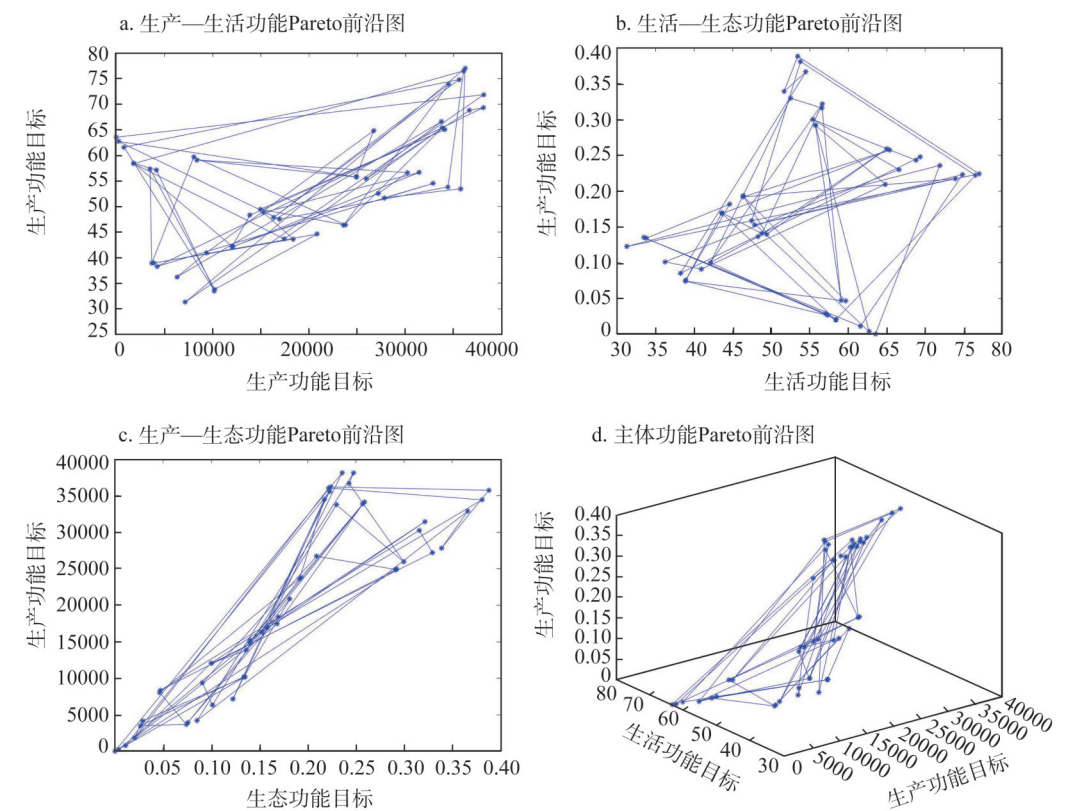


图8 遗传算法求解结果Pareto 前沿图

Fig. 8 Pareto frontier graph of genetic algorithm solution

表6 黄河流域水资源优化配置结果

Table 6 Results of optimal allocation of water resources in the Yellow River Basin (亿m³)												
省 (自 治区)	方案一				方案二				方案三			
	农业 用水	工业 用水	生活 用水	生态 用水	农业 用水	工业 用水	生活 用水	生态 用水	农业 用水	工业 用水	生活 用水	生态 用水
青海	13.419	5.839	6.751	1.584	16.112	7.814	10.433	0.974	7.6485	3.35	3.9995	1.3555
四川	13.409	3.043	2.033	0.183	5.313	2.600	2.819	0.048	0.65	0.122	0.2045	0.427
甘肃	14.41	6.745	7.554	0.154	13.517	7.130	4.983	0.686	14.333	8.6925	5.699	1.746
宁夏	9.867	6.925	6.262	0.315	20.847	7.124	2.778	0.522	21.7165	9.027	6.1975	1.3455
内蒙古	9.711	3.494	4.856	2.152	62.529	7.380	3.275	0.219	32.3065	7.5965	6.1665	2.0255
陕西	21.445	4.251	3.013	0.463	12.032	12.914	2.943	0.789	15.5315	18.38	6.729	1.8085
山西	19.836	6.253	5.874	2.521	14.424	6.273	10.028	0.264	17.0965	13.533	9.688	0.122
河南	6.008	6.459	2.682	4.213	18.800	8.021	6.822	1.467	24.4055	14.8605	5.168	0.4235
山东	39.989	4.091	3.721	2.682	13.479	8.774	5.952	5.775	22.898	9.921	6.598	4.142

数据代入此式，可求解得到各地区水资源的生产功能实现系数 $\gamma^P$ 、生活功能实现系数 $\gamma^L$ 和生态功能实现系数 $\gamma^E$ ，并与方案二中的配水量相乘，得到方案二的主体功能实现量（表7）。由此得到主体功能优化下的黄河流域水资源与功能实现关系图（图9）。与2017年基年配水方案相比，主体功能优化的配水方案使生产功能增加了



4344.48 亿元、生活功能增加了 8194.84 万人、生态功能增加 991.35 亿元。

$$Y_{water}=Y_P+Y_L+Y_E=\gamma^P(water_A+water_I)+\gamma^L\times water_L+\gamma^E\times water_E$$

(13)

4 结论与讨论

4.1 结论

本文围绕流域主体功能优化目标，探索建立水资源分配机制。通过构建流域主体功能评价指标体系，详细刻画了黄河流域 9 个省、自治区的四类用水对三类功能优化的关系，建立黄河流域主体功能优化的水资源分配模型。通过遗传算法求解得到黄河流域主体功能优化的水资源分配方案，尝试将主体功能战略在流域水资源分配问题中得到实践应用。

(1) 构建并验证了以主体功能优化为目标导向的流域水资源再分配机制，从流域国土空间类型进一步完善了主体功能理论。长江流域是典型的水质型缺水流域，依托于充沛的流域水资源而发展起来的航运体系，所带来的交通运输功能为流域经济发展起到重要作用，水资源的再分配并非是优化这类流域主体功能的最佳手段。相较于长江流域，黄河流域水资源短缺是制约其高质量发展及主体功能实现的瓶颈要素。因此水资源的合理再分配对这类资源型缺水流域的经济发展、人民生活保障以及生态环境保护意义重大。

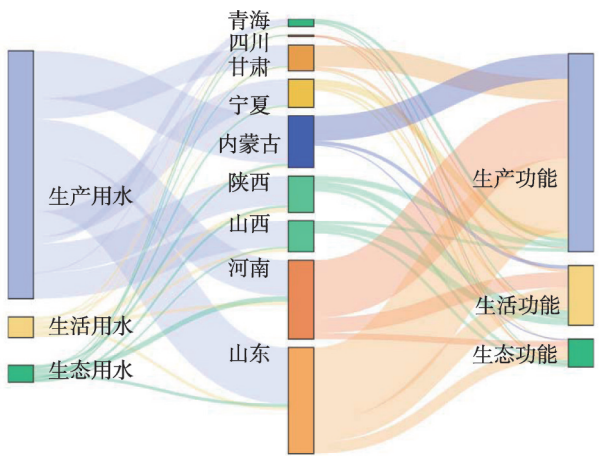
(2) 流域主体功能优化的水资源再分配机制较现行水资源分配方案使黄河流域实现最大可能节水 23.01 亿 m<sup>3</sup>。主体功能实现的流域水资源再分配机制明确了预留生态用水量及流域各功能区、各类用水的优先次序，作为对各地区水资源的合理再分配的科学依据。首先，黄河流域存在如宁夏自治区这类引黄供水量大于实际耗水量地区。其次，流域内水资源分配与功能实现不匹配。流域自上游至下游的生产、生活功能实现效率呈上升趋势，各类水资源分配量呈下降趋势，使得现行配水方案不能更好地满足流域各地用水需求。

(3) 流域主体功能优化的水资源再分配机制能优化提升黄河流域环境保护、经济发展以及提高人口承载力的多重功能效益。带来 4344.48 亿元的生产功能增量、991.35 亿元的生态功能价值增量，可多承载 8194.84 万人口。从黄河流域内部省份来看，上、中、下游地区水资源的主体功能实现规模总量与效率之间存在显著差异，自上游至下游生产—生活功能效率呈升高趋势，生态功能效率呈下降趋，通过对流域水资源的合理再分配优化了流域各类主体功能实现。

表 7 水资源分配的主体功能优化量

Table 7 Optimization of main functions of water resources allocation

	生产功能/亿元	生活功能/万人	生态功能/亿元
基年方案	50110.53	15140.86	7058.83
优化方案	54455.01	23335.7	8050.18



注：数据来源于《黄河水资源公报》<sup>[27]</sup>及作者计算。

图 9 引黄水资源量支撑地区主体功能实现桑基图

Fig. 9 Diversion of water from the Yellow River to support the main functions to realize the Sankey diagram

## 4.2 讨论

如何透视黄河流域水资源分配对流域生产—生活—生态功能优化作用的复杂机理,能为新时代主体功能战略指导流域国土空间可持续发展提供借鉴思路,也是当前学术研究及实践需求面临的宏大命题,需要多学科和多部门协同深入探讨。今后需要开展的重点研究内容包括:

(1) 黄河流域水资源分配方案的完善与多资源开发利用的流域主体功能优化理论精准构建。目前国务院分配的黄河分水指标已经由省级单元向下分解细化至地级市单元,亟需推进落实跨省市的流域支流水量分配工作,以及制定流域季节性断流时的应急配水方案。在已有概念模型基础上,构建囊括更多自然资源支撑流域主体功能实现的作用机理模型,促进以水资源为核心的流域多资源的协调开发、高效利用及复合功能优化。开展包括政府、企业、居民全视角、跨行政区域的流域治理主体利益分配、现实条件、发展前景的系统探讨,为实现跨行政区的流域多规划和多部门相协调而建立统一的流域治理主体部门的政策制定提供支持。

(2) 水资源作为流域资源管理的重要自然资源,可进一步探究功能优化的配水机制在生态补偿方面的应用。建立以流域总体主体功能优化为基准、两岸及各功能空间为年核算单元的流域生态补偿机制。以流域主体功能优化模型作为量化依据,不同于以往单纯货币化转移支付手段。以水资源分配为主的调剂手段、货币化为辅的流域补偿方式,有助于实现对流域内重点生态功能区、农产品主产区等限制和禁止开发区域提供行之有效的生态补偿<sup>[31]</sup>。

## 参考文献(References):

- [1] KHAN A S, YI H, ZHANG L, et al. An integrated social-ecological assessment of ecosystem service benefits in the Kagera River Basin in Eastern Africa. *Regional Environmental Change*, 2019, 19(1): 1-15.
- [2] LI Y J, ZHANG Z Y, SHI M J. What should be the future industrial structure of the Beijing-Tianjin-Hebei city region under water resource constraint? An inter-city input-output analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239(12): 117-118.
- [3] WEI Y J, ZHEN L, DU B Z. Effects of grassland restoration approaches in different major function-oriented zones of the headwater region of the Yellow River in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2020, 11(2): 150-158.
- [4] 樊杰. 主体功能区战略与优化国土空间开发格局. *中国科学院院刊*, 2013, 28(2): 193-206. [FAN J. The strategy of major function oriented zoning and the optimization of territorial development patterns. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2013, 28(2): 193-206.]
- [5] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 325-337. [CHEN W X, LI J F, ZHU L J. Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the Middle Yangtze River Region. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2): 325-337.]
- [6] 胡德胜, 孙睿恒, 许胜晴. 国际水法对长江流域立法的启示和意义. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 425-437. [HU D S, SUN R H, XU S Q. Enlightenment from international water law and its values to the legislation on the Yangtze River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 425-437.]
- [7] 唐常春. 流域主体功能区划方法与指标体系构建: 以长江流域为例. *地理研究*, 2011, 30(12): 2173-2185. [TANG C C. Construction of method and index system of MFOZ in a river basin: A case study of Yangtze River Basin. *Geographical Research*, 2011, 30(12): 2173-2185.]
- [8] ZHANG L. Thoughts on ecological watershed planning under the territorial spatial planning. *Landscape Architecture Frontiers*, 2019, 7(4): 77-87.
- [9] 王煜, 彭少明, 武见, 等. 黄河“八七”分水方案实施30年回顾与展望. *人民黄河*, 2019, 41(9): 6-19. [WANG Y, PENG S M, WU J, et al. Review of the implementation of the Yellow River water allocation scheme for thirty years. *Yellow*

- River, 2019, 41(9): 6-19.]
- [10] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展. 地理学报, 2019, 74(12): 2431-2436. [LU D D, SUN D Q. Development and management tasks of the Yellow River Basin: A preliminary understanding and suggestion. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2431-2436.]
- [11] 许长新, 吴晓远. 水环境承载力约束下区域城镇化发展合理速度分析. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(3): 135-142. [XU C X, WU X Y. Analysis of reasonable speed of regional urbanization development under the constraint of water environmental carrying capacity. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(3): 135-142.]
- [12] WANG Z, ZHU J, ZHENG H. Improvement of duration-based water rights management with optimal water intake on/off events. *Water Resource Management*, 2015, 29(8): 2927-2945.
- [13] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead: Whither water management?. *Science*, 2008, 319(2): 1-7.
- [14] 王威, 胡业翠. 改革开放以来我国国土整治历程回顾与新构想. 自然资源学报, 2020, 35(1): 53-67. [WANG W, HU Y C. The new conception and review of territory consolidation based on the past years of reform and opening-up. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 53-67.]
- [15] COSTANZA R, GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26(5): 152-158.
- [16] 柳冬青, 曹二佳, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域水源涵养服务时空格局及其影响因素. 自然资源学报, 2020, 35(7): 1728-1743. [LIU D Q, CAO R J, ZHANG J Q, et al. Spatiotemporal pattern of water conservation and its influencing factors in Bailongjiang Watershed of Gansu. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(7): 1728-1743.]
- [17] 马涛, 谭乃榕. 区域主体功能实现与自然资源利用的定量关系研究. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(1): 30-40. [MA T, TAN N R. Study on the quantitative relationship between major functions and natural resources. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(1): 30-40.]
- [18] SCHULZE E D, WIRTH C, HEIMANN M. Climate chance: Managing forests After Kyoto. *Science*, 2000, 289(5487): 2058-2059.
- [19] TRISOS C H, MEROW C, PIGOT A L. The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature*, 2020, 580(7804): 1-6.
- [20] 王昊. 水资源约束下黄河流域主体功能实现的多目标优化研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020. [WANG H. Research on multi-objective optimization of main function realization of the Yellow River Basin under water resources constraint. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.]
- [21] HEIN L, BAGSTAD K J, OBST C, et al. Progress in natural capital accounting for ecosystems: Global statistical standards are being developed. *Science*, 2020, 367(6477): 514-515.
- [22] 徐勇, 王传胜. 黄河流域生态保护和高质量发展: 框架、路径与对策. 中国科学院院刊, 2020, 35(7): 857-883. [XU Y, WANG C S. Ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin: Framework, path, and countermeasure. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(7): 857-883]
- [23] 刘曙光, 许玉洁, 王嘉奕. 江河流域经济系统开放与可持续发展关系: 国际经典案例及对黄河流域高质量发展的启示. 资源科学, 2020, 42(3): 433-445. [LIU S G, XU Y J, WANG J Y. Relationship between river basin economic system opening-up and sustainable development: International experiences and implications for the Yellow River Basin high-quality development. *Resources Science*, 2020, 42(3): 433-445.]
- [24] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. 水利建设与管理, 2019, 39(11): 1-6. [XI J P. Speech at the symposium on ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. *Water Conservancy Construction and Management*, 2019, 39(11): 1-6.]
- [25] 王浩, 陈敏建, 何希吾, 等. 西北地区水资源合理配置与承载能力研究. 中国水利, 2004, (22): 43-45. [WANG H, CHEN M J, HE X W, et al. Reasonable allocation of water resources in Northwest China and carrying capacity research. *China Water Resources*, 2004, (22): 43-45.]
- [26] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划. <https://wenku.baidu.com/view/fe4ecbabf8b069dc5022aaca998fcc22bcd14320.html>, 2013. [Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Comprehensive Planning of the Yellow River Basin. <https://wenku.baidu.com/view/fe4ecbabf8b069dc5022aaca998fcc22bcd14320.html>, 2013]

- [27] 水利部黄河水利委员会. 黄河水资源公报. <http://www.yrcc.gov.cn/other/hhgb/2017szygb/index.html#p=1>, 2017. [Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Yellow River Water Resources Bulletin. <http://www.yrcc.gov.cn/other/hhgb/2017szygb/index.html#p=1>, 2017.]
- [28] 国家统计局. 中国城市统计年鉴. <https://data.cnki.net/yearbook/Single/N2019070173>, 2018. [National Bureau of Statistics. China City Statistical Yearbook. <https://data.cnki.net/yearbook/Single/N2019070173>, 2018.]
- [29] 王战平. 宁夏引黄灌区水资源优化配置研究. 银川: 宁夏大学, 2014. [WANG Z P. Study on optimal allocation of water resources in Ningxia Yellow River Irrigation Area. Yinchuan: Ningxia University, 2014.]
- [30] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [31] 郑云辰, 葛颜祥, 接玉梅, 等. 流域多元化生态补偿分析框架: 补偿主体视角. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(7): 131-139. [ZHENG Y C, GE Y X, JIE Y M, et al. Analysis framework of diversified watershed eco-compensation: A perspective of compensation subject. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(7): 131-139.]

## Optimization of main functions of river basin and redistribution of water resources in the Yellow River

MA Tao<sup>1,2</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>, TAN Nai-rong<sup>2</sup>, ZHU Jiang<sup>3</sup>, ZHANG Fan-fan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resources and Water Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. School of Economics and Management, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China; 3. Guangzhou Urban Planning Survey and Design Institute, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** Based on the concept and connotation of the main function optimization of the river basin, this paper systematically analyzes various main function goals of the basin, and establishes the main function water resource allocation mechanism based on the evaluation index system of the main function of the basin, which is solved by genetic algorithm. The multi-objective optimization model obtained 4 types of water resource allocation plans for 9 provincial-level regions in the Yellow River Basin in 2017. The research results show that: (1) The main functions of the river basin to realize the water resource allocation mechanism makes the Yellow River Basin the largest possible water saving of 2.301 billion m<sup>3</sup>. (2) The water resources allocation mechanism for the main functions of the basin has brought about 434.448 billion yuan in production function increments, and 99.135 billion yuan in ecological function value increments, which can feed 81.948 million more people. (3) Reducing agricultural water use in Ningxia and Shandong and industrial water distribution in Inner Mongolia is crucial to the optimal distribution of water resources in the study basin.

**Keywords:** optimization of main function of river basin; Yellow River Basin; water resources allocation; multi-objective optimization model