

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.005

# 黄河流域需水分层预测

武见,明广辉,周翔南,严登明,张永永,贾冬梅

(黄河勘测规划设计研究院有限公司,河南 郑州 450003)

**摘要:**为了提高需水预测精度,并为流域水资源分层配置提供基础,基于马斯洛需求层次理论提出了包括刚性、刚弹性和弹性需水的黄河流域需水分层预测方法。按照不同行业的用水特点进行层次划分,将农业需水按照口粮安全、消费需求进行划分,工业需水分为一般行业需水和高耗水行业需水,将流域外生态补水作为河道外生态刚弹性需水,河道内生态需水根据泥沙冲淤比划分。黄河流域需水分层预测结果表明,2030年黄河流域河道外需水量为534.62亿 $m^3$ ,其中刚性、刚弹性和弹性需水占比分别为59.81%、33.62%和6.57%,比2017年增加139.01亿 $m^3$ ,而人均用水量减少25 $m^3$ ,流域用水水平得到提高;农业节水量被用于工业等效益更高的行业,预测结果符合黄河流域1980—2017年用水规律和新时期“生态优先,水资源节约集约利用”的用水要求。

**关键词:**黄河流域;水资源配置;需水分层预测;需求层次理论

中图分类号:TV213.4;TV882.1 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)05-0031-07

**Forecasting of water demand hierachy in the Yellow River Basin**//WU Jian, MING Guanghui, ZHOU Xiangnan, YAN Dengming, ZHANG Yongyong, JIA Dongmei(*Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China*)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of water demand forecast and provide the foundation for water resource hierarchical allocation of river basins, a forecasting method of water demand hierachy for the Yellow River Basin, including rigidity, rigid and elastic water demand, was proposed based on the theory of Maslow's hierarchy of needs. Hierarchical partitions are conducted based on the water usage characteristics in different industries. The agricultural water demand is partitioned based on food safety and consumer demand. The industrial water demand is partitioned into regular industries water demand and high water consumption industries water demand. The ecological water supply outside the river basin is considered as the elastic water demand outside the river channels. The ecological water demand within the river channels is partitioned according to the proportion of sedimentation in the downstream. The forecasting results of water demand hierachy in the Yellow River Basin indicate that the total water demand outside the river channels in 2030 will be 53.462 billion  $m^3$ , where the proportion of rigidity, rigid and elastic water demand will be 59.81%, 33.62% and 6.57%, respectively. It will be 13.901 billion  $m^3$  more than that in the year of 2017, while the per capita water consumption is reduced by 25  $m^3$ , indicating the water saving level in the river basin is improved. Water saved in agriculture is used in industries, which can produce more value. The above results are consistent with the law of water usage in 1980—2017 in the Yellow River Basin and meet the requirement of “ecological priority, intensive use of water resources” in the new era.

**Key words:** Yellow River Basin; water resources allocation; forecasting of water demand hierarchy; hierarchy of needs theory

水资源需求预测是进行水资源规划、配置和管理的基础和核心内容之一<sup>[1-2]</sup>。未来用水量的变化趋势如何,既是制定正确的供需平衡对策的前提,也是国家宏观经济布局和重大水利工程决策的依据。对水资源需求规律认识的不足和需水管理认识的落后会导致对需水预测的失误<sup>[3-4]</sup>,如20世纪80年代

初,《中国水资源利用》<sup>[5]</sup>预测2000年全国总需水量约为7096亿 $m^3$ ,实际上2000年全国的用水量仅为5497.6亿 $m^3$ ;1982年黄河流域各省(区)编制了利用黄河水资源的规划,预测2000年黄河流域需水量高达696亿 $m^3$ ,超黄河天然径流量近120亿 $m^3$ ,而2000年实际用水量仅为480.68亿 $m^3$ <sup>[6]</sup>。

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2017YFC0404404);中国博士后科学基金(2020M672245)

作者简介:武见(1981—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: 65694750@qq.com

通信作者:明广辉,工程师。E-mail: minggh@yrec.cn

马斯洛<sup>[7]</sup>认为人类的需求是分层逐步实现的。经济社会中不同行业对水资源的需求也是分层次的,水资源的供给首先要满足各行的基本生存需水,然后才是更高层次的发展需水。Gleick<sup>[8]</sup>通过搜集各国的用水实例,较早地进行了维持人类生存的最小需水量研究。生态需水研究中最小和适宜生态流量概念就是根据生态系统服务的不同需水要求而提出的<sup>[9]</sup>。张雷等<sup>[10]</sup>根据马斯洛需求层次理论将水资源开发利用过程分为工程水利、资源水利、人水和谐水利 3 个阶段。侯保灯等<sup>[11]</sup>基于马斯洛需求层次理论,将水资源需求分为基本需求、发展需求、和谐需求 3 个层次,并应用于普洱市水资源需求预测中。田文凯等<sup>[12]</sup>基于生活用水需求的层次化分析,提出了居民生活需水精细化管理的必要性和对策建议。

水资源需求涉及经济社会、生态环境、科学技术、文化以及政治等多方面的因素,不同用水行业的用水过程十分复杂<sup>[13]</sup>。国内外从用水行业的用水过程角度考虑用水机制的研究越来越多,比如,作物需水从 SPAC(土壤-作物-大气连续系统)角度考虑了作物不断生长阶段的需水规律<sup>[14]</sup>,生态需水注重生态系统功能和水文过程的相互反馈作用<sup>[15]</sup>,居民生活需水考虑了水资源的不同用途<sup>[12]</sup>等。为了揭示不同行业需水机理,很多研究者<sup>[16-23]</sup>采用统计分析的方法分析了影响各行业需水的主要因素,并进行了模拟研究。

随着水资源供需矛盾的加剧,需水精细化管理成为社会发展的必然。本文基于马斯洛需求层次理论,提出了包括刚性、刚弹性和弹性需水的 3 层需水分层预测方法,并根据不同用水行业的用水特点进行层次划分,对黄河流域各行业需水进行了分层预测,并分析了预测成果的合理性。

## 1 研究区概况

黄河是我国西北、华北地区的重要水源,作为孕育了中华民族的母亲河,黄河以仅占全国 2% 的河川径流量承担着全国 15% 的耕地和 12% 人口的供

水任务,同时还承担着向流域外部分地区远距离调水的任务。黄河流域人均径流量 473 m<sup>3</sup>,不足全国平均水平的 1/4,是我国水资源极其短缺的地区之一。黄河流域是国家重要能源基地和粮食主产区,自 20 世纪 70 年代以来,用水刚性需求持续增长,加上气候变化的影响,径流量逐渐减少,水资源供需矛盾不断加剧,水资源开发利用从 20 世纪 50 年代初的 12% 提高到 2016 年的 84%<sup>[6,24-25]</sup>。

在水资源高度缺乏的黄河流域,不可能完全满足各行业所有用水需求,优先满足各行业的刚性需求,并对弹性需求根据一定的原则进行分配是一种重要水资源配置策略,而分层次的需水预测为水资源分层配置提供了基础。

## 2 预测方法

### 2.1 需水分层内涵

马斯洛将人的需求划分为 5 个层次,由低到高分别为生理需求、安全需求、社交需求、尊重需求和自我实现的需求。在经济社会中,首先要满足基本生存需水,然后才是更高层次的发展需水,与马斯洛的需求层次理论有相通之处。尤其是在缺水流域,不可能所有的需水要求都能得到满足,需要分类管控,进行分层配置。因此,根据马斯洛需求层次理论,并考虑到流域水资源特征,提出刚性、刚弹性和弹性的黄河流域需水分层预测方法,其内涵如图 1 所示。

a. 刚性需水。属于第一层次的需求,对应马斯洛需求层次理论中的生理和安全需求。是指满足人类生活、生物生存、企业开工生产、河湖基本健康所需要的基本水量,一旦缺失将会使得用水行业面临生存威胁。在不受资源和工程条件的制约下,此层次的需水量应全部满足,配置时主要考虑公平原则。

b. 刚弹性需水。属于第二层次的需求,对应马斯洛需求层次理论中的社交和尊重需求,即提高生活品质、满足粮食消费需求、发展工业和塑造适宜生态环境所需的水量,该层次水量可以促进生产效率

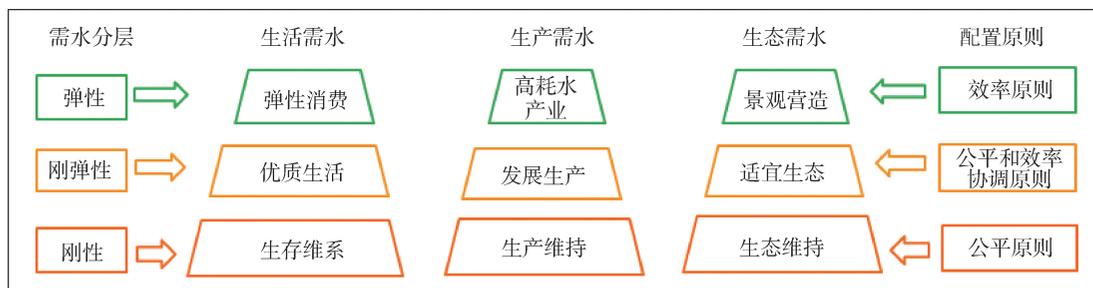


图 1 黄河流域需水分层内涵

Fig. 1 Implication of water demand hierarchy in the Yellow River Basin

和生活品质的提高。在水资源充足的条件下此层次需水应尽量满足,配置时需遵循公平和效率协调原则。

c. 弹性需水。属于第三层次的需求,对应马斯洛需求层次理论中的自我实现需求,即维持生活中的奢侈消费、高耗水产业和人工营造高耗水景观所需的水量。此层次需水是经济社会得到充分发展,人民生活水平得到极大提高时对水资源的更高需求,在水资源充裕的流域可以满足,并按照效率优先的原则配水。

## 2.2 需水分层计算方法

考虑到不同行业对水资源的需求过程和机理不同,因此针对不同行业的用水特点,制定了黄河流域不同行业的需水分层原则,如表 1 所示。

### 2.2.1 生活需水

按照基本生存、优质生活和奢侈需求 3 个层次将生活需水分为刚性、刚弹性和弹性需水。由于第三产业用水基本为生活用水,因此把生活用水和第三产业用水放在一起进行分析。生活需水量采用人均日用水量方法进行预测,计算公式为

$$W_n = RQ_d \frac{365 d}{1000} \quad (1)$$

式中:  $W_n$  为年生活需水量,  $m^3$ ;  $R$  为区域用水人口, 人;  $Q_d$  为生活用水定额,  $L/(人 \cdot d)$ 。

### 2.2.2 农业需水

农业需水包括农田灌溉需水和林牧渔畜需水。由于林牧渔畜需水量较少,按照农田灌溉需水分层的比例划分。农田灌溉层次划分按照居民口粮安全和消费需求来划分,刚性需求定义为满足基本口粮的需水量,刚弹性需求为满足消费自足的需水量,弹性需求为外销的粮食所对应的需水量。

利用人均粮食需求和最小保有灌溉面积推求农田灌溉需水<sup>[26]</sup>。对于一定区域,粮食需求总量取决于人口数量、人均粮食消费水平以及粮食自给程度,而粮食生产总量取决于耕地面积、灌溉面积、复种指数、粮经比、单位面积产量等因素。从粮食供需平衡角度出发,在确保一定的区域粮食生产总量前提下,根据区域灌溉面积及其单位面积产量,确定最小保有灌溉面积,再结合灌溉定额确定最小保有灌溉需水量。最小保有灌溉需水量基本分析思路见图 2。

表 1 基于行业用水特点的黄河流域需水分层原则

Table 1 Principles of water demand hierarchy of the yellow River Basin based on water usage characteristics in different lines

需水分层	生活需水	农业需水	工业需水	河道外生态需水	河道内生态需水
刚性	基本生存	口粮安全	一般工业及建筑业	绿化与环境卫生、湖泊湿地	生态功能不丧失的最小水量
刚弹性	优质生活	消费自足	高耗水工业	向流域外湖泊湿地生态环境补水	生态环境功能正常发挥
弹性	奢侈需求	粮食外销		人造奢侈景观等	冲淤平衡

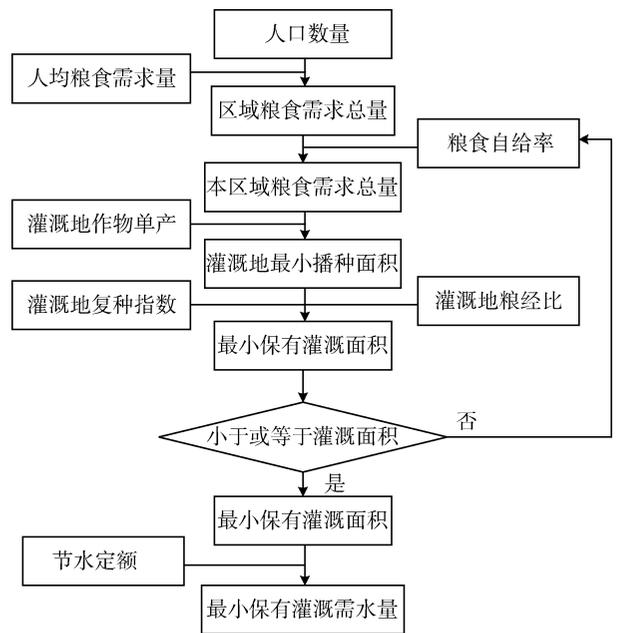


图 2 最小保有灌溉需水量分析思路

Fig. 2 Analysis train of minimum irrigation water demand

具体计算方法如下:

a. 区域粮食需求总量。按照人口数量、人均粮食需求量以及粮食自给率确定本区域粮食需求总量,即:

$$D = Rq\lambda \quad (2)$$

式中:  $D$  为区域粮食需求总量,  $kg$ ;  $q$  为人均粮食需求量,  $kg/人$ ;  $\lambda$  为区域粮食自给率。

b. 灌溉地最小播种面积。根据灌溉地单位面积粮食产量,结合本区域粮食需求总量,计算灌溉地最小播种面积,即

$$A_0 = D/C \quad (3)$$

式中:  $A_0$  为灌溉地最小播种面积,  $hm^2$ ;  $C$  为灌溉地单位面积粮食产量,  $kg/hm^2$ 。

c. 最小保有灌溉面积。结合区域粮经比、复种指数等指标求得最小保有灌溉面积,即:

$$A_m = A_0 / (\theta\varphi) \quad (4)$$

式中:  $A_m$  为区域最小保有灌溉面积,  $hm^2$ ;  $\theta$  为粮食作物种植比例;  $\varphi$  为灌溉地复种指数。最小保有灌溉面积不应大于区域有效灌溉面积,否则在给定粮食自给率条件下区域粮食安全难以保证。

d. 最小保有灌溉需水量。根据灌溉需水对干旱等级的响应关系,求得不同干旱条件下的灌溉毛

需水定额,进而可计算最小保有灌溉需水量,即:

$$W_{\min} = A_m Q_i \quad (5)$$

式中:  $W_{\min}$  为区域最小保有灌溉需水量,  $m^3$ ;  $Q_i$  为灌溉毛需水定额,  $m^3/hm^2$ 。

### 2.2.3 工业需水

将一般工业和建筑业用水需求定为刚性需求,高耗水工业用水需求定为刚弹性需求。采用趋势法预测,一般工业和建筑业需水计算公式为

$$Q_{t_2} = Q_{t_1} (1 - r_{t_2})^{t_2 - t_1} \quad (6)$$

式中:  $Q_{t_2}$ 、 $Q_{t_1}$  分别为第  $t_2$  和第  $t_1$  水平年的用水定额,  $m^3$ ;  $r_{t_2}$  为第  $t_1$  至  $t_2$  水平年取水定额年均递减率, %, 其值可根据变化趋势分析后拟定。

### 2.2.4 河道外生态需水

河道外生态刚性需水主要是指流域内城镇绿化、环境卫生、湖泊湿地生态环境补水量与生态防护林灌溉用水。除了维护缺水地区的生态环境健康,黄河还需为其他流域生态进行补水,因此将流域外生态补水定为刚弹性需求。

a. 城镇生态环境需水量。城镇生态环境需水量指为保持城镇良好的生态环境所需要的水量,主要包括城镇绿化需水量和城镇环境卫生需水量。采用定额法,即按下式计算:

$$W_g = A_g Q_g \quad (7)$$

式中:  $W_g$  为城镇生态环境需水量,  $m^3$ ;  $A_g$  为绿地面积,  $hm^2$ ;  $Q_g$  为绿地灌溉定额,  $m^3/hm^2$ 。

b. 湖泊湿地生态环境补水量。湖泊湿地生态环境补水量指为维持湖泊一定的水面面积需要人工补充的水量。湖泊湿地生态环境补水量可根据湖泊水面蒸发量、渗漏量、入湖径流量等按水量平衡法估算,计算公式如下:

$$W_1 = A(E - P)/10 + F - Q_1 \quad (8)$$

式中:  $W_1$  为湖泊湿地生态环境补水量,  $m^3$ ;  $A$  为需要保持的湖泊水面面积,  $hm^2$ ;  $E$  为水面蒸发量,  $mm$ ;  $P$  为降水量,  $mm$ ;  $F$  为渗漏量,  $m^3$ ;  $Q_1$  为入湖径流量,  $m^3$ 。

### 2.2.5 河道内生态需水

主要包括汛期输沙水量和非汛期生态环境需水量。汛期输沙水量的作用主要是输送泥沙和污染物。非汛期生态环境需水量作用是维持河道不断流、保持合理地下水位和维持河口三角洲湿地生态系统稳定。需水分层按照河道内泥沙淤积比进行划分。输沙需水量可用下式计算:

$$W_s = S_1/S_{cw} \quad (9)$$

式中:  $W_s$  为年输沙需水量,  $m^3$ ;  $S_1$  为多年平均输沙量,  $kg$ ;  $S_{cw}$  为多年平均汛期含沙量,  $kg/m^3$ 。

## 3 预测结果与分析

### 3.1 现状用水水平分析

黄河流域 1980—2017 年河道外各行业用水量情况如图 3 所示。黄河流域 1980—2017 年河道外各行业用水量按从大到小的顺序排列为农业、工业、生活和生态。其中,农业用水量占比最大,占到总用水量的 70% 以上,1980—2000 年逐渐升高,2000 年之后逐渐下降,农业用水占比从 1980 年的 87% 下降到 2017 年 70%;工业用水量 1980—2000 年增长较快,2012 年以后稳定在 60 亿  $m^3$  左右;生活用水量 1980—2017 年增长了 1.76 倍,生态需水量 2005—2017 年增长了 4.24 倍;总用水量 2000 年以来较为平稳,2017 年出现下降的趋势。参考发达国家水资源利用的经验,在黄河流域水资源短缺的刚性约束下,黄河流域用水量或已经达到河流可利用水资源量的极限<sup>[27-29]</sup>。

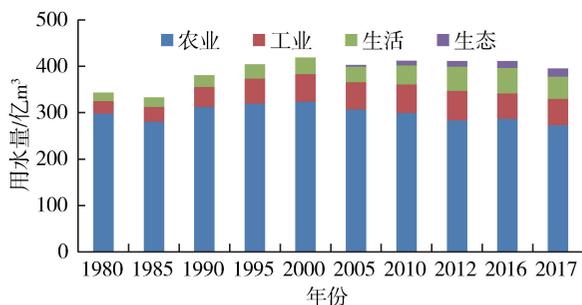


图 3 1980—2017 年黄河流域河道外各行业用水量变化  
Fig. 3 Changes of water usage in different lines of the Yellow River Basin from 1980 to 2017

1999—2017 年黄河流域水资源利用效率指标变化如图 4 所示。1999 年以来,随着社会经济的发展,人均 GDP 呈指数型增长,万元 GDP 用水量和万元工业增加值用水量均呈指数型减小。人均用水量和单位面积(指每公顷的 1/15)灌溉用水量均缓慢降低。2017 年人均用水量、万元 GDP 用水量、耕地实际单位面积灌溉用水量、万元工业增加值用水量

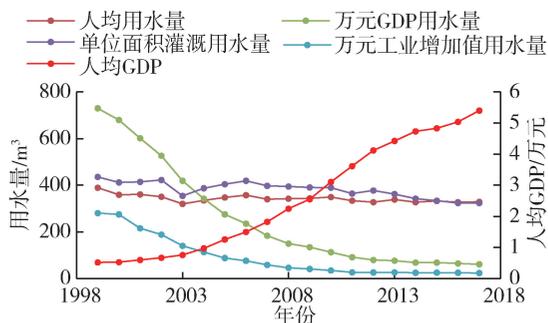


图 4 1999—2017 年黄河流域水资源利用效率变化  
Fig. 4 Changes of water use efficiency in the Yellow River Basin from 1999 to 2017

均低于全国平均水平。以上分析说明,黄河流域节水水平和水资源利用效率的提高,是农业用水量降低和工业用水保持平稳的推动因子。

### 3.2 2030年需水分层预测结果分析

2030年黄河流域各行业需水量以及河道外总需水量分层预测结果如表2所示。

a. 社会经济发展预测。社会经济发展预测是河道外需水预测的基础。依据黄河流域人口增加趋势和城镇化率,预测2030年黄河流域人口达到13093.85万人,其中城镇和农村人口分别达到7703.92万人和5389.93万人,比2016年11957万人增加了9.5%,其中城镇人口增加了20.0%,而农村人口减少了3.4%。

b. 生活需水。考虑到黄河流域经济社会发展相对滞后,特别是上中游地区和下游滩区,是我国贫困人口相对集中的区域。2017年黄河流域城镇和农村居民平均用水定额仅为103L/(人·d)和51L/(人·d),远小于我国发达地区和发达国家的用水水平。因此仅把黄河流域生活需水分为刚性和刚弹性需水两部分。规划2030年城镇居民需水净定额平均取110L/(人·d),考虑水利用系数0.89,毛定额取124L/(人·d)。规划2030年农村居民生活毛定额取72L/(人·d)。预测2030年生活需水量65.21亿m<sup>3</sup>,其中刚性48.60亿m<sup>3</sup>,刚弹性16.61亿m<sup>3</sup>。

c. 农业需水。黄河流域大部分处于干旱半干旱区,一半以上的耕地以及目前可供开发的大部分土地资源主要分布在必须灌溉的干旱半干旱地区。考虑到流域粮食消费水平,刚性需求定义为每人180kg口粮安全的最小保有灌溉需水量,刚弹性需求定义为每人消费粮食180~400kg对应的需水量,而超过400kg人均粮食需求的外销粮食所对应的需水量定义为弹性需求。2030年预测黄河流域农业需水量共334.28亿m<sup>3</sup>,其中刚性、刚弹

性和弹性需水量分别为161.82亿m<sup>3</sup>、137.36亿m<sup>3</sup>和35.10亿m<sup>3</sup>,分别占比48.41%、41.09%和10.50%。黄河流域弹性需水主要是内蒙古和河南的粮食外销。

d. 工业需水。2030年黄河流域工业需水量为110.41亿m<sup>3</sup>,比2017年56.82亿m<sup>3</sup>提高94.32%。郑州、西安、济南等中心城市和中原等城市群加快建设,全国重要的农牧业生产基地和能源基地的地位进一步巩固,新的经济增长点不断涌现,预计未来工业需水量仍会进一步增长。

e. 河道外生态需水。河道外生态需水量由2017年的17.30亿m<sup>3</sup>增加到2030年的24.72亿m<sup>3</sup>,全部为刚性需水。近年来随着生态用水得到重视,用于流域外的生态补水越来越多,例如为促进乌梁素海的生态改善,从2013年起黄河每年向乌梁素海生态补水2亿~3亿m<sup>3</sup>。据《黄河水资源公报》,2011—2017年向流域外生态补水4.80亿m<sup>3</sup>,包括引黄入淀(白洋淀)、引黄济乌(乌梁素海)等。

f. 河道外需水总量。综合以上分析,2030年河道外需水总量为534.62亿m<sup>3</sup>,其中刚性、刚弹性和弹性需水分别为319.77亿m<sup>3</sup>、179.75亿m<sup>3</sup>和35.10亿m<sup>3</sup>,占比分别为59.81%、33.62%和6.57%。

g. 河道内生态需水。中游来沙4亿t、5亿t、6亿t、7亿t和8亿t情景下,利津断面基本生态需水量分别为126.20亿m<sup>3</sup>、149.32亿m<sup>3</sup>、155.10亿m<sup>3</sup>、174.27亿m<sup>3</sup>和179.34亿m<sup>3</sup>,下游河道淤积比为0.0%、0.0%、10.0%、10.0%和16.1%;考虑南水北调西线工程调入水量80亿m<sup>3</sup>后,中游来沙6亿t和8亿t情景下,利津断面适宜生态需水量分别为193.00亿m<sup>3</sup>和210.93亿m<sup>3</sup>,下游河道淤积比为4.3%和15.0%。预测的基本生态需水量与石伟等<sup>[30]</sup>预测中游来沙7亿~10亿t条件下利津生态需水量130~180亿m<sup>3</sup>接近。

表2 2030年黄河流域各行业需水分层预测结果

省(区)	生活需水量		农业需水量			工业需水量		河道外生态需水量(刚性)	河道外需水总量			合计
	刚性	刚弹性	刚性	刚弹性	弹性	刚性	刚弹性		刚性	刚弹性	弹性	
青海	2.03	0.66	9.28	9.00	0	3.9	1.41	0.63	16.50	10.41	0	26.91
四川	0.03	0.01	0.26	0.20	0	0.01	0	0.00	0.31	0.20	0	0.50
甘肃	7.30	2.50	15.2	15.45	0	8.17	10.18	2.78	35.95	25.63	0	61.57
宁夏	2.78	0.71	37.17	35.74	0	4.47	4.35	2.74	47.87	40.09	0	87.96
内蒙古	3.86	1.68	28.94	18.69	31.02	7.62	7.17	6.25	48.35	25.86	31.02	105.23
陕西	13.02	4.76	29.11	20.44	0	16.63	7.30	5.57	69.09	27.74	0	96.82
山西	9.33	2.31	19.44	16.66	0	10.66	6.92	3.33	45.07	23.58	0	68.65
河南	6.85	2.78	15.53	15.57	4.08	11.85	2.76	2.48	39.49	18.33	4.08	61.91
山东	3.39	1.22	6.89	5.61	0	4.71	2.31	0.94	17.15	7.92	0	25.07
黄河流域	48.60	16.61	161.82	137.36	35.10	68.02	42.39	24.72	319.77	179.75	35.10	534.62

### 3.3 预测成果合理性分析

2030年需水量与2017年用水量对比如表3所示。本文预测的2030年河道外需水量比2017年增加了139.01亿 $m^3$ ,增加了35.14%,其中生活需水量增加了35.05%,农业需水量增加了22.35%,工业需水量增加了94.32%。各行业间对比,农业需水量的增长率最低,工业需水量增长率最高,说明随着农业节水水平提高,节约的水量被用于工业等效益更高的行业。河道外生态需水量增加了42.91%,南水北调西线工程通水后河道内生态需水量增加了28.64%,体现了生态文明建设和“幸福河”对生态保护的内在要求。2030年人均用水量411 $m^3$ ,小于2017年全国人均用水量436 $m^3$ ,说明流域整体的用水水平得到提高,符合黄河流域生态保护和高质量发展对水资源节约集约利用的要求。

表3 2030年预测需水量与2017年用水量对比

Table 3 Comparison of forecasting water demand in 2030 and the water consumption in 2017

用水行业	2017年 用水量/亿 $m^3$	2030年预测 需水量/亿 $m^3$	变化率/%
生活	48.29	65.21	35.05
农业	273.21	334.28	22.35
工业	56.82	110.41	94.32
河道外生态	17.30	24.72	42.91
河道外合计	395.61	534.62	35.14
河道内生态	157.50	210.97	33.95

注:2017年河道内生态用水量是2001—2016年的利津断面平均入海量,2030年河道外生态需水量预测为适宜水量。

从以上分析可知,2017—2030年需水量的变化与1980—2017年各行业用水量变化情况是一致的,说明本文的预测结果符合流域历史用水规律。随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家战略,未来流域用水仍将有一定的刚性增长,但考虑水资源最大刚性约束及节约集约利用,流域水资源需求上升速率会逐渐放缓,表明预测结果符合黄河流域新时期“生态优先,水资源节约集约利用”的用水要求。

## 4 结论

a. 为了更好地提高需水预测的精度,并为缺水流域水资源分层配置提供参考,引入马斯洛需求层次理论初步提出了包括刚性、刚弹性和弹性需水的黄河流域需水分层预测方法。

b. 考虑各行业需水过程的用水特点,制定了黄河流域各行业刚性、刚弹性和弹性需水分层的原则和计算方法。

c. 对黄河流域2030年需水分层进行了预测,预测结果符合黄河流域历史用水规律和新时期“生

态优先,水资源节约集约利用”的用水要求,表明预测方法和结果是合理的。

### 参考文献:

- [1] 许银山,吕孙云,梅亚东,等.等维新息径向神经网络模型在需水预测中的应用[J].水资源保护,2012,28(2):8-11. (XU Yinshan, LYU Sunyun, MEI Yadong. Application of equi-dimensional information renewal radial basis function neural network model to urban water demand forecast[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(2):8-11. (in Chinese))
- [2] 崔东文.加权平均集成神经网络模型在城市需水预测中的应用[J].水资源保护,2014,30(2):27-32. (CUI Dongwen. Application of weighted average integrated neural network model to urban water demand forecasting [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2):27-32. (in Chinese))
- [3] 钱正英,陈家琦,冯杰.从供水管理到需水管理[J].中国水利,2009(5):20-23. (QIAN Zhengying, CHEN Jiaqi, FENG Jie. From water supply management to water demand management [J]. China Water Resources, 2009(5):20-23. (in Chinese))
- [4] 王小军.需水管理理论与实践研究[D].南京:南京水利科学研究所,2011.
- [5] 水利电力部水电规划设计院.中国水资源利用[M].北京:水利电力出版社,1989.
- [6] 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[J].人民黄河,2019,41(9):6-13. (WANG Yu, PENG Shaoming, WU Jian, et al. Review of the implementation of the Yellow River water allocation scheme for thirty years[J]. Yellow River, 2019, 41(9):6-13. (in Chinese))
- [7] MASLOW A H. A theory of human motivation [J]. Psychological Review, 1943, 50(4):370-396.
- [8] GLEICK P H. Basic water requirements for human activities meeting basic needs [J]. Water International, 1996, 2(21):83-92.
- [9] FALKENMARK M, ROCKSTRÖM J. Balancing water for humans and natures[M]. London: Earthscan, 2004.
- [10] 张雷,邹进,胡吉敏,等.马斯洛需求层次理论在水资源开发利用进程中的应用[J].水电能源科学,2011,29(9):28-30. (ZHANG Lei, ZOU Jin, HU Jimin, et al. Application of Maslow's hierarchy of needs theory to utilization of water resources [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(9):28-30. (in Chinese))
- [11] 侯保灯,高而坤,吴永祥,等.水资源需求层次理论和初步实践[J].水科学进展,2014,25(6):897-906. (HOU Baodeng, GAO Erkun, WU Yongxiang, et al. Water resources demand hierarchy theory and preliminary practice [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6):

- 897-906. (in Chinese)
- [12] 田文凯,侯保灯,陈海涛,等. 居民生活需水精细化管理必要性分析与对策建议[J]. 水电能源科学,2018,36(10):49-52. (TIAN Wenkai, HOU Baodeng, CHEN Haitao, et al. Necessity analysis and countermeasures of refined management of residential living water demand [J]. Water Resources and Power,2018,36(10):49-52. (in Chinese))
- [13] RUSSELL S, FIELDING K. Water demand management research a psychological perspective[J]. Water Resources Research,2010,46(5):1-12.
- [14] 粟晓玲,康绍忠. 生态需水的概念及其计算方法[J]. 水科学进展,2003,14(6):740-744. (SU Xiaoling, KANG Shaozhong. Concept of ecological water requirement and its estimation method[J]. Advances in Water Science,2003,14(6):740-744. (in Chinese))
- [15] 于鲁冀,陈慧敏,王莉,等. 基于改进湿周法的贾鲁河河道内生态需水量计算[J]. 水利水电科技进展,2016,36(3):5-9. (YU Luji, CHEN Huimin, WANG Li, et al. Study of ecological instream flow requirement of Jialu River based on improved wetted perimeter method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016,36(3):5-9. (in Chinese))
- [16] 沈大军,王浩,杨小柳,等. 工业用水的数量经济分析[J]. 水利学报,2000,31(8):27-31. (SHEN Dajun, WANG Hao, YANG Xiaoliu, et al. The econometric analysis of industrial water use [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000,31(8):27-31. (in Chinese))
- [17] 沈大军,杨小柳,王浩,等. 我国城镇居民家庭生活需水函数的推求及分析[J]. 水利学报,1999,30(12):6-10. (SHEN Dajun, YANG Xiaoliu, WANG Hao, et al. Analysis of urban residential water demand functions in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999,30(12):6-10. (in Chinese))
- [18] 左其亭. 人均生活用水量预测的区间 S 型模型[J]. 水利学报,2008,39(3):351-354. (ZUO Qiting. Interval S-model for forecasting per capita domestic water consumption [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(3):351-354. (in Chinese))
- [19] 沈大军,陈雯,罗健萍. 城镇居民生活用水的计量经济学分析与应用实例[J]. 水利学报,2006,37(5):593-597. (SHEN Dajun, CHEN Wen, LUO Jianping. Econometric analysis and application on urban household water use [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(5):593-597. (in Chinese))
- [20] HUSSIEN W A, MEMON F A, SAVIC D A. An integrated model to evaluate water-energy-food nexus at a household scale [J]. Environmental Modelling & Software,2017,93:366-380.
- [21] HUSSIEN W A, MEMON F A, SAVIC D A. Assessing and modelling the influence of household characteristics on per capita water consumption [J]. Water Resources Management,2016,30(9):2931-2955.
- [22] 袁宝招,陆桂华,李原园,等. 水资源需求驱动因素分析[J]. 水科学进展,2007,18(3):404-409. (YUAN Baozhao, LU Guihua, LI Yuanyuan, et al. Analysis of driving factors for water demand [J]. Advances in Water Science,2007,18(3):404-409. (in Chinese))
- [23] 袁宝招. 水资源需求驱动因素及其调控研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [24] 王煜,彭少明,郑小康. 黄河流域水量分配方案优化及综合调度的关键科学问题[J]. 水科学进展,2018,29(5):614-624. (WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang. Key scientific issues of water allocation plan optimization and comprehensive operation for Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science,2018,29(5):614-624. (in Chinese))
- [25] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护,2020,36(2):1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River Basin based on combined weight [J]. Water Resources Protection,2020,36(2):1-7. (in Chinese))
- [26] 蔣桂芹,王煜,靖娟. 黄河流域最小保有灌溉需水量预测[J]. 人民黄河,2017,39(11):30-33. (JIANG Guiqin, WANG Yu, JING Juan. Mini-mum irrigation water requirement for food security in the Yellow River Basin [J]. Yellow River,2017,39(11):30-33. (in Chinese))
- [27] 刘昌明,何希吾. 中国 21 世纪水问题方略[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [28] 贾绍凤,张士锋. 中国的用水何时达到顶峰[J]. 水科学进展,2000,11(4):470-477. (JIA Shaofeng, ZHANG Shifeng. When will fresh water use in China reach the climax [J]. Advances in Water Science,2000,11(4):470-477. (in Chinese))
- [29] GLEICK P H, PALANIAPPAN M. Peak water limits to freshwater withdrawal and use [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2010,107(25):11155-11162.
- [30] 石伟,王光谦. 黄河下游生态需水量及其估算[J]. 地理学报,2002,57(5):595-602. (SHI Wei, WANG Guangqian. Estimation of ecological water requirement for the Lower Yellow River [J]. Acta Geographica Sinica,2002,57(5):595-602. (in Chinese))

(收稿日期:2019-12-23 编辑:熊水斌)