

DOI: 10.5846/stxb202004020783

庞爱萍, 易雨君, 李春晖. 基于生态需水保障的农业用水安全评价——以山东省引黄灌区为例. 生态学报, 2021, 41(5): 1907-1920.

Pang A P, Yi Y J, Li C H. Evaluation of agricultural water-use security with ecological water demand as a priority: A case study of the Yellow River estuary in Shandong Province. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1907-1920.

基于生态需水保障的农业用水安全评价 ——以山东省引黄灌区为例

庞爱萍^{1,2}, 易雨君¹, 李春晖^{1,*}

1 北京师范大学环境学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875

2 中共南京市委党校公共管理教研部, 南京 210046

摘要:保障农业用水安全和生态安全是流域水资源管理的重点, 针对黄河口和山东引黄灌区的用水矛盾, 采用阈值分析与地统计学方法, 考虑作物蒸散发和有效降雨计算山东省引黄灌区灌溉需水量, 在优先保障黄河口不同等级生态需水条件下分析灌区(划分为不同调控区)可用水量的响应特征, 以地理信息系统(GIS)为平台计算具有时空差异的山东省引黄灌区农业用水安全压力指数, 进而评价多时空尺度下的山东省引黄灌区农业用水安全。结果表明, 在平水年, 保障适宜等级的生态需水后大概有 33% 的年份农业用水安全存在压力, 保障最低等级的生态需水约有 27% 的农业用水面临短缺, 但是大部分情况下农业用水安全压力指数都在 30% 之下, 然而保障最高等级生态需水后, 有 50% 以上的年份存在农业用水安全压力, 这种压力无论是从出现频次还是在指数强度上都有明显增加。在空间尺度上, 以打渔张、刘春家、麻湾和簸箕李等灌区为代表的调控区 2、11、13、14 和 17 的农业用水压力显著, 代表年内保障最低等级的生态需水后调控区的农业用水安全压力指数超过了 20%, 保障适宜等级的生态需水后, 大部分调控区的农业用水安全压力指数超过了 20%, 调控区 2 和 13 的压力指数超过了 30%, 保障最高等级的生态需水后大部分调控区的农业用水安全压力指数超过了 60%。在引黄水量调配过程中, 应该按照水文年的不同保障合理的生态水量, 同时充分考虑水文气象因子的空间差异性, 在不同调控区细化分配方案, 平水年份保障适宜等级生态需水后农业用水短缺由 55.28 降低到 18.25 亿 m³。该评价方法反映了优先保障生态需水后灌区农业水资源保障情况, 并能有效降低农业和生态用水之间的矛盾, 为管理部门进行“精细配水”提供依据。

关键词:农业用水安全; 阈值分析; 地统计分析; 引黄灌区; 生态需水; 地理信息系统

Evaluation of agricultural water-use security with ecological water demand as a priority: A case study of the Yellow River estuary in Shandong Province

PANG Aiping^{1,2}, YI Yujun¹, LI Chunhui^{1,*}

1 Key Laboratory for Water and Sediment Science of the Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Department of Public Management, Nanjing Academy of Administration, Nanjing 210046, China

Abstract: To address the conflicts of agricultural and ecological water use between the Shandong irrigation district and the Yellow River estuary, a method to evaluate the agricultural water-use security with the priority to meet ecological water demand is developed. A threshold analysis that takes into consideration evapotranspiration and effective rainfall is used to calculate irrigation water requirement. Then, a geo-statistical method is introduced to calculate irrigation water use for different regulatory regions with the priority to maintain different levels of environmental flows. Finally, a water-use security pressure index is introduced based on the geographic information system (GIS) platform, which is used to evaluate the spatial and temporal variations of water-use safety in the Shandong irrigation area. The results show that the maintenance of

基金项目: 国家重大研发计划项目(2018YFC0407403); 国家社科基金项目(19BGL189)

收稿日期: 2020-04-02; 网络出版日期: 2021-01-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chunhui@bnu.edu.cn

average and low levels of environmental flows could pose a pressure on agricultural water-use security for 33% and 27% of the average hydrological years, respectively. The corresponding pressure index is below 30% in most of the cases. The maintenance of a high level of environmental flows could pose a pressure on agricultural water-use security for 50% of the average hydrological years, with increases in the frequency and intensity of the pressure. In terms of spatial variations, the regulatory regions 2, 11, 13, 14 and 17 (i. e. , Dayuzhang, Liuchunjia, Mawan and Bojili) are experiencing more stress than the other regulatory regions. When meeting the demand of low-level environmental flows, the pressure indexes are over 20% in these regulatory regions. With the average level of environmental flow demand, the pressure indexes are over 20% in most regulatory regions and over 30% in regulatory regions 2 and 13. When the environmental flow demand increases to the high level, the pressure indexes are over 60% in most regulatory regions. In water resources management and planning, the allocation target of environmental flows for the Yellow River estuary should be carefully adjusted according to the changing hydrological conditions and the spatially-varied meteorological factors. An improved distributed allocation plan could reduce the water shortage from 5.53 to 1.83 billion m³ while meeting the average demand of environmental flows in average hydrological years. The evaluation method developed in this study can reflect the spatial and temporal variations of agricultural water-use security when ecological water demand is satisfied in priority. It can effectively mitigate the conflicts between agricultural and ecological water demands and provide a decision-making basis for water resources management.

Key Words: water-use security for agriculture; threshold analysis; geo-statistical analysis; irrigation district of the Yellow River; ecological water demand; GIS

水资源是粮食生产的必备条件,水资源的稀缺性已经成为可持续农业生产的重要影响因素^[1]。一方面,随着人口的增长,人类将更加依赖于粮食生产和粮食安全,保障农业用水安全依然是流域水资源配置的重点^[2]。农业用水安全是一定经济技术条件下,由于水资源量与质供需矛盾产生对农业生产、农村生活乃至社会稳定的危害问题^[3]。农业用水安全作为水安全的重要组成部分,评价方法的一部分包含于水安全评价方法中,国外主要以水贫穷指数和水资源紧缺指数来进行评价^[4-5],近几年国内外学者采用多目标综合评价区域水资源供需平衡来评价水安全状况^[6-8]。在农业用水安全评价方面,已有研究在分析农业用水现状的基础上,预测农业用水供需态势,并给出粮食安全的农业用水红线^[9-10],或者预测气候变化对农业用水安全的影响^[11-12],还有相关研究从用水效率上侧面评价农业用水安全^[13-14]。对于农业用水安全评价方面的研究,根据不同区域、不同保障目标而采取不同的评价方法,建立不同的评价指标。评价水资源供需平衡带来的农业用水安全可以为水资源管理提供科学依据。

从另一方面来看,不合理的水资源利用对水生态系统健康造成的严重威胁逐步引起重视^[15],人类不能挤占过多的生态用水而使生态系统崩溃^[16]。灌区是保障社会安定和粮食安全的基石,在水资源紧缺的地区,灌区内农业用水和生态用水之间的矛盾似乎是不可调和的,Jägermeyr 等的研究表明,保障生态需水后全球将有 52% 灌区的农业生产面临 10% 以上的损失,考虑到灌溉用水总共可以支撑 15% 的粮食产量,保障生态需水造成的农业损失是十分惊人的^[17],给农业用水安全带来了一定的威胁。然而到目前为止,很少研究从保障生态需水的角度,在灌区尺度上对农业用水安全进行评价,使得灌区农业水资源合理配置缺乏更有力的科学依据。

2019 年 9 月,习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上指出“保护黄河是事关中华民族伟大复兴的千秋大计”。由于自然和人为诸多因素影响,黄河流量也在急骤减少,不仅危及到黄河流域的生态安全,还威胁到工农业生产和居民饮用。如何分配和利用有限的黄河水资源,已是矛盾重重,尤其是山东省引黄灌区同黄河口之间的用水矛盾,近几十年来有愈演愈烈的趋势。本研究在充分考虑山东省引黄灌区地理位置、水文气象条件以及行政归属的基础上,将山东省主要引黄灌区划分不同调控区。采用阈值分析法和 GIS 空间分析技术计算具有时空差异的山东省引黄灌区的灌溉需水量,在优先保障黄河口不同等级生态需水条件下分析灌区可用水量的响应特征,采用地统计学方法计算具有时空差异的山东省引黄灌区农业用水安全

压力指数,揭示灌区的供需水矛盾,客观反映“精细配水”情况下的农业系统的水资源保障状况。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概述

黄河是流经山东省主要灌区的最大河流和主要水源,自山东省的东明县入境,呈北偏东流向,经菏泽、济宁、泰安、聊城、德州、济南、淄博、滨州、东营 9 市的 25 个县(市、区),在垦利县注入渤海。黄河进入山东省的年均径流量为 347 亿 m³(1951—2018 年均值),80 年代以来受中上游引水及流域偏旱的影响,径流量呈逐年减少的趋势。山东省引黄灌区的年降雨量在 163—1766 mm 之间,年蒸发量在 439—1407 mm 之间,年际变化大。大部分引黄灌区位于黄河冲积平原,地势平坦,除泰安和菏泽境内的灌区海拔较高外(高于 800 m),其他大部分灌区的海拔多在 100 m 以下(图 1)。

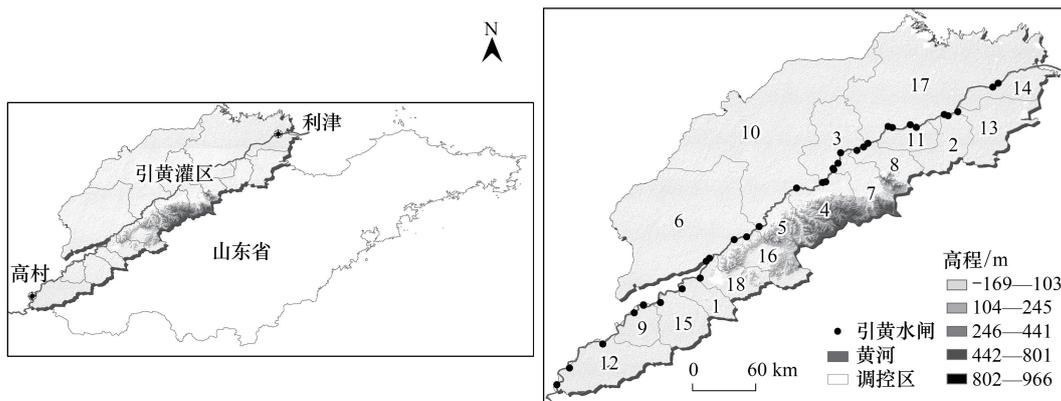


图 1 山东省引黄灌区地理位置及调控区分布(图内数字为调控区编号)

Fig. 1 The location of Shandong irrigated area for the Yellow River and the distribution of the regulatory regions (the figures represent the regulatory region numbers)

山东省引黄工程建设始于 1950s,50 年代末期引黄灌溉面积由开始的 3.5 万 hm² 迅速发展到了 60.8 万 hm²,到 2000 之后引黄灌溉面积稳定在 194.9 万 hm²(图 2)。

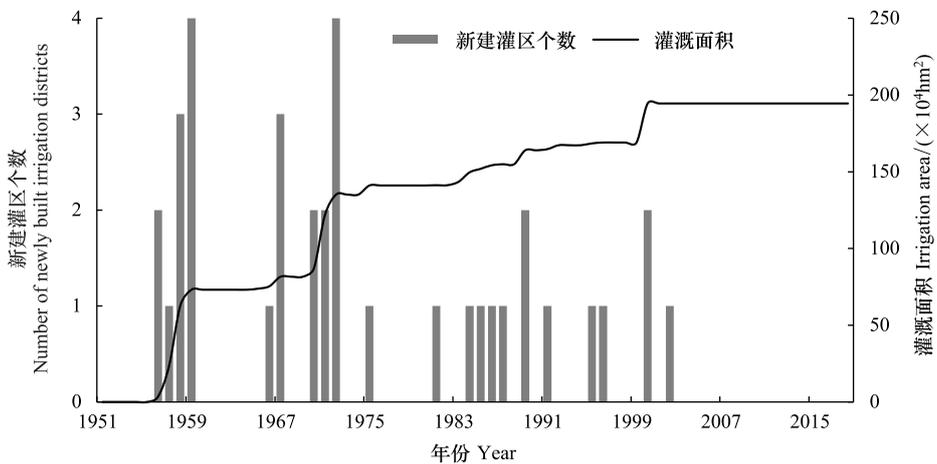


图 2 1951—2018 年间山东省新建引黄灌区数量及灌溉面积

Fig. 2 The number of newly built irrigation districts and the irrigation area of the Yellow River in Shandong province from 1951 to 2018

本研究选择了 36 个大型灌区,其面积占山东省总引黄灌溉面积的 97%。一个灌区往往位于几个行政区

内,而同一行政区也可能包含一个以上的灌区,但是引黄资源的调配离不开行政区管理者的统筹协调,因此本研究根据灌区所在的位置及行政区归属将其进一步合并为 18 个调控区(图 1 和表 1)。

表 1 引黄调控区主要信息

Table 1 Primary information for the Yellow River regulatory regions

调控区 Regulatory region	灌区 Irrigation district	行政区 District	灌溉面积 Irrigation area/10 ⁴ hm ²
1	陈垓/国那里	梁山县	5.01
2	打渔张	博兴县/桓台县	2.53
3	葛店/张辛/沟阳/邢家渡	济阳县/商河县	8.83
4	霍家溜/大王庙	济南市历城区和天桥区	3.73
5	东风	济南市长清区	0.17
6	郭口/位山/陶城铺/彭楼	高唐县/临清市/茌平县/聊城市/冠县/东阿县/ 莘县/阳谷县	69.38
7	胡家岸	章丘市	2.67
8	胡楼/张桥	邹平县	4.81
9	旧城/苏酒庄	鄄城县	9.74
10	李家岸/潘庄	庆云县/乐陵市/宁津县/陵县/德州市/临邑县/ 武城县/平原县/禹城市/夏津县/齐河县	35.53
11	刘春家/马扎子	高青县	18.66
12	刘庄/谢寨	菏泽市/东明县	6.85
13	麻湾	东营市东营区/广饶县	3.49
14	双河	垦利县	0.67
15	苏阁/杨集	鄄城县	4.03
16	田山	平阴县/肥城市	1.6
17	小开河/白龙湾/簸箕/韩墩/王庄	无棣县/东营市河口区/沾化县/利津县/阳信县/ 滨州市/惠民县	16.47
18	戴庙	东平县	0.7

1.2 研究方法

供需水是影响用水安全的主要因素,国内外的研究中多采用多目标综合分析法和供需平衡法等评估供需水参数对用水安全的影响^[6-8]。供需平衡的方法反映了地表水、地下水、工业、生活和生态用水等水资源因子对灌区用水安全的影响,本研究在供需平衡法的基础上^[9-10],加入了降雨、气温、风速等水文气象因子的时空差异对灌区用水安全的影响,提高了灌区农业水资源合理配置的科学性和精准性。在计算中,灌区的灌溉用水考虑用水因子的影响,灌溉需水考虑水文气象因子的时空差异的影响。如果灌区内灌溉可用水量大于等于灌溉需水量,那么灌区内的农业安全压力指数为 0,此时灌区内农业用水可以满足作物生长的需求;如果灌溉可用水量小于灌溉需水量,那么两者的差值除以灌溉需水量即为农业用水安全压力指数,该指数越大,表明灌溉可用水量越少,农业用水安全性越低,评价方法如下:

$$R = \begin{cases} 0 & W_{ir}^r \leq W_{ir}^u \\ \left(\frac{W_{ir}^r - W_{ir}^u}{W_{ir}^r} \right) \times 100\% & W_{ir}^r > W_{ir}^u \end{cases} \quad (1)$$

其中, R 为农业用水安全压力指数; W_{ir}^r 为灌溉需水量(m^3); W_{ir}^u 为灌区可用水量(m^3)。

(1) 灌区灌溉需水量 W_{ir}^r : 采用阈值分析法,通过灌区内种植作物实际需水与有效降雨来确定。

$$W_{ir}^r = W_a - P_e S_p / 1000 \quad (2)$$

其中, W_a 为作物需水量(m^3); P_e 为有效降雨(mm); S_p 为灌区灌溉面积(m^2)。其中作物需水量 W_a 可以通过作物不同发育期蒸散发(ET_m)和种植面积来确定^[18]:

$$W_a = ET_m S_c / 1000 \quad (3)$$

其中, ET_m 为不同发育期作物蒸散发(mm); S_c 为作物种植面积(m^2)。其中 ET_m 通过潜在蒸散发(ET_0)和作物系数(k_c)确定^[2]。

利用彭曼公式来计算潜在蒸散发^[19], 计算过程参考刘钰等人的研究^[20]。

$$ET_0 = \frac{\frac{p_0 \Delta}{p\gamma} + 0.26(E_s - E_a)(1 + cU_2)}{\frac{p_0 \Delta}{p\gamma} + 1} \quad (4)$$

其中, p_0 为海平面标准大气压(kPa); p 为测量地点的实际大气压(kPa); E_s 为饱和水汽压(kPa); E_a 为实际水汽压(kPa); c 为风速修正系数(无量纲); U_2 为 2 m 高处风速(m/s); Δ 为饱和水汽压—温度曲线上的斜率(kPa/°C); γ 为温度计常数(kPa/°C)。

有效降雨 P_e 为总降雨量中被作物直接或间接利用, 以及用作农田其他必须耗用的水量, 通过以下公式来确定^[21]:

$$P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.2P)/4.17 & P < 8.3 \\ 4.17 + 0.1P & P \geq 8.3 \end{cases} \quad (5)$$

其中, P 为总降雨(mm)。

(2) 灌区可用水量: 在引黄水量中农业灌溉用水占 80% 以上^[18]。随着生态环境的恶化, 生态建设上升为千年大计, 而改善河口生态环境需要控制人类对生态用水的占用, 本研究以生态用水、工业和生活用水优先的原则, 确定灌溉用水:

$$W_{ir}^u = \begin{cases} W_{in} + \alpha S_T P + W_u - W_d - W_i - W_e & W_{in} + \alpha S_T P + W_u - W_d - W_i - W_e < W_{ir}^r \\ W_{ir}^r & W_{in} + \alpha S_T P + W_u - W_d - W_i - W_e \geq W_{ir}^r \end{cases} \quad (6)$$

其中, W_{ir}^u 为灌溉可用水量(m^3); W_{in} 为上游来水(m^3); α 为产水系数(无量纲); S_T 为流域面积(m^2); W_u 为地下水开采量(m^3); W_d 为居民生活用水(m^3); W_i 为工业用水(m^3); W_e 为生态需水(m^3)。

本研究以保持河口径流自然状态为目标, 根据“加和性”和“最大值”的原则计算河口不同等级生态需水^[22]:

$$W_e = \sum_{i=1}^n W_i + \max(W_{j1}, W_{j2}, \dots, W_{jm}) \quad (7)$$

其中, $\max(a, b)$ 代表参数 a 和 b 之前的较大值; W_i 为消耗性需水量(m^3); W_j 为非消耗性需水量(m^3); n 和 m 分别代表消耗性和非消耗性需水目标。

一般认为生态需水可以分为最低、适宜和最高 3 个等级, 其中最小生态需水量是指为保证特定发展阶段的生态系统结构稳定, 保护生物多样性以及确保水资源功能正常发挥所必须的、一定质量的最小水量; 适宜生态需水量综合考虑目标物种生存繁衍对生态系统各方面特性的要求, 当流量持续小于这个数值时, 将导致生物繁殖条件的破坏, 减少生物量, 进而降低生态系统完整性; 最高生态需水维持生态系统整体动态平衡, 通过影响河流造床输沙、水文连通性、河流生境等多个方面, 影响河流生态系统的健康, 低于最低生态需水或者高于最高生态需水, 将导致生态系统的退化^[23]。

(3) GIS 的空间分配方案

以 ArcGIS10.2 为平台, 采用泰森多边形插值法以及地统计学分析方法, 将具有空间差异的灌溉需水量分配到相应的调控区, 具体分配方案如下:

$$(W_{ir}^u)_A = [(ET_m - P_e)_x R(S_p)_x + (ET_m - P_e)_y R(S_p)_y \dots + (ET_m - P_e)_n R(S_p)_n] (S_p)_A / 1000 \quad (8)$$

其中, $(W_{ir}^u)_A$ 为调控区 A 的灌溉需水量(m^3); $(ET_m - P_e)_n$ 为气象站点 n 的作物蒸散发和有效降雨的差值(mm); $R(S_p)_n$ 为气象站点 n 所生成的泰森多边形在调控区 A 中所占的比例; $(S_p)_A$ 为调控区 A 的灌溉面积

(m^2); $x, y \cdots n$ 为调控区 A 中所包含的气象站点。比如说调控区 10 的灌溉需水量是由德州、陵县、惠民县、济南和朝阳 5 个气象站点的数据计算而来, 首先计算这 5 个气象站点作物蒸散发和有效降雨的差值, 然后通过地统计分析计算这 5 个气象站所在泰森多边形在调控区 10 中所占的灌区面积, 差值和所占灌区面积相乘即为每个气象站所占比的那部分灌区需水量, 最后进行累加得到调控区 10 的总的灌溉需水量。该计算方法体现了气象数据的空间差异对灌区需水的影响。

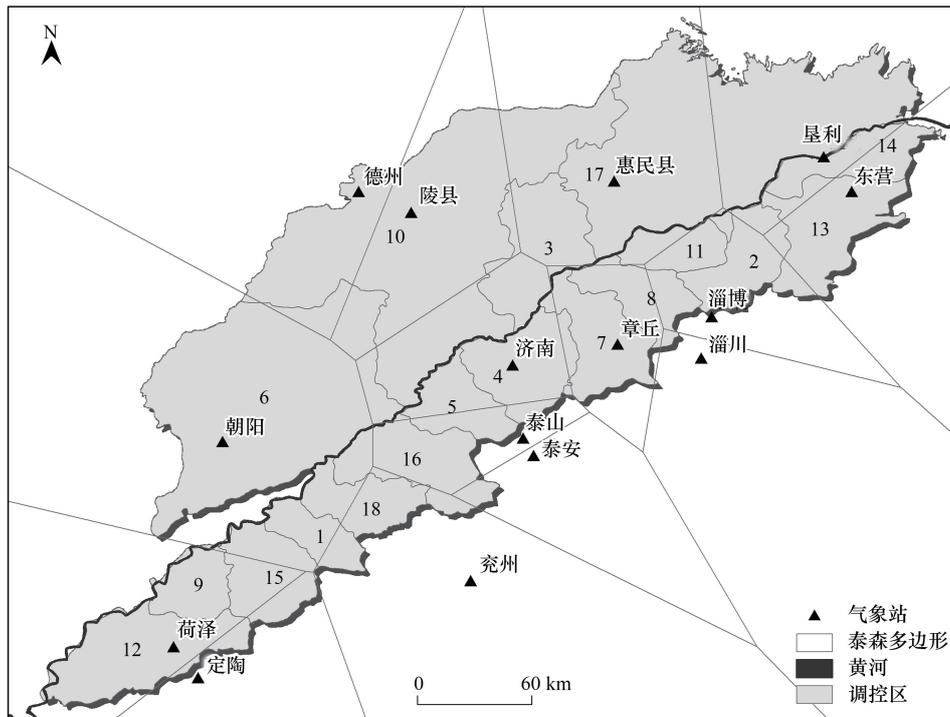


图 3 不同调控区灌溉需水的空间分配方案(图内数字为调控区编号)

Fig. 3 Space allocation scheme for irrigation water requirement in different regulatory regions (the figures represent the regulatory region numbers)

(4) 水文年的划分

农业用水安全压力指数体现了不同情境下灌区需水和用水的关系, 受来水过程和水文保证率等因素的影响。本研究在历史系列数据分析的基础上, 划分不同水文年, 进而评估不同水文保证率下的农业用水安全。在水文年划分中主要考虑降雨因素, 年降水量频率曲线上小于 25% 的年份设定为丰水年, 大于 75% 设定为枯水年, 50% 左右的设定为平水年。

1.3 数据来源与处理

引黄灌区的位置、建成时间、实际灌溉面积和所在行政区等相关信息主要来自《全国大型灌区一览表》^[24], 以及各灌区管理部门进行访谈和电话咨询, 通过查阅文献法对缺失数据进行补充和校核^[25-32]。山东省引黄灌区内主要作物为冬小麦和夏玉米, 采用轮作的方式, 占灌区面积的 92.3%^[23], 本研究中山东省引黄灌区内作物种植面积按照引黄灌区的灌溉面积进行计算(年序列数据见图 2)。

用来计算潜在蒸散发的山东省 15 个气象站(朝阳、德州、定陶、东营、菏泽、惠民县、济南、垦利、陵县、泰安、泰山、兖州、章丘、淄博和淄川)1951—2018 年的逐日气象资料(经纬度、海拔、气压、气温、湿度、降雨、风速和日照时数等)主要来自国家气象科学数据共享服务中心(<http://data.cma.cn>)。潜在蒸散发数据逐日进行计算, 然后累积到月尺度, 降雨数据由日尺度累积到年尺度。

表 2 水文年划分标准及代表年份

Table 2 Classification standard and the representative year for different hydrological years

水文年 Hydrological year	划分标准 Classification standard/P%	代表年份 Representative years
枯水年 Dry year	$P > 75\%$	1981、2002、1968、1989、1986、1999、1988、1992、2014、2006、1983、1997、1966、1952、1982、1969、1977、2000
平水年 Average year	$P \approx 50\%$	2015、2017、1965、1991、1955、2001、1979、1972、1958、1976、1967、1980、2012、1957、2016、1987、1954、1978、1951、1995、1996、2013、1984、2009、2010、1959、2008、1973、1994、2011、1960、1993、1975
丰水年 Wet year	$P < 25\%$	2004、2018、1953、1970、1998、1963、1956、1974、2005、1962、1961、1985、1971、2007、2003、1990、1964

山东省引黄灌区主要农作物信息及作物系数来自陈玉民等人的研究^[33],作物不同发育期蒸散发和作物需水量逐月进行计算,然后累积到年尺度。以 ArcGIS10.2 为平台,采用泰森多边形插值法以及地统计学分析方法,将具有空间差异的年度灌溉需水量分配到相应的调控区。

黄河高村站和利津站的实测年度径流数据主要来自庞爱萍等人的研究^[18]以及《黄河水资源公报》^[34]。根据济南市水资源初步评价,产水系数取 0.378^[35]。山东省引黄灌区多年平均地下可开采资源量约为 40 亿 m^3 ^[36-37],本研究将该值定为合理的地下水开采量,一方面维持地下水生态系统的健康,另一方面通过地表水和地下水联用,可以在黄河径流减少期间最大限度保障农业用水安全。

1998—2017 年的工业和生活用水的数据取自《黄河水资源公报》^[34],其中工业用水和生活用水总量在 1990s、2000s 和 2010s 分别占历年山东省引黄水量的 7.4%、14.3% 和 15.7%。1951—1997 和 2018 年工业用水和生活用水量分别通过高村和利津水文站实测径流年均差值乘以 7.4% 和 15.7% 来确定。

2 结果与分析

2.1 黄河口不同等级生态需水量

黄河河口湿地最低、适宜和最高等级生态需水年度总量分别为 134.2、162.7 和 274.9 $\times 10^8 \text{ m}^3$,最低等级生态需水主要满足河口蒸发消耗需水及盐度平衡需水的要求,最高等级生态需水中,泥沙输运需水比例相对最高,有利于整个生态系统的动态平衡^[22-23]。1951—2018 年间黄河河口来水量(利津站)的年际变化较大(图 4),整体呈现不断减少的趋势,尤其在 1997—2002 等年份内实际来水量已经不足以保障最低等级的生态需水量。

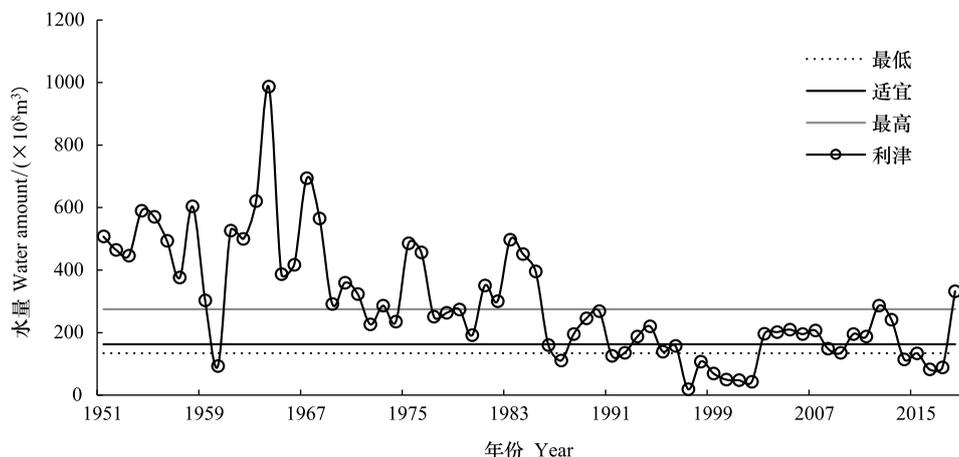


图 4 1951—2018 年黄河河口来水过程及不同等级的生态需水量

Fig. 4 The water runoff in the Yellow River Estuary and different level of environmental flows from 1951 to 2018

从年均来水过程来看,有 30 年的来水量可以满足最高等级生态需水要求,有 14 年的来水量尚不能满足最低等级生态保护目标的需求,其他年份的来水过程在最高和最低等级生态需水之间。

表 3 来水过程对应的生态需水等级

Table 3 Water runoff process and the corresponding level of environmental flows

来水量 Runoff W_{ij}	出现频率 Frequency of occurrence/%	平均来水量 Average runoff/ ($\times 10^8 \text{ m}^3$)	生态需水保障 Environmental flow security/($\times 10^8 \text{ m}^3$)
$W_{ij} \geq 274.9$	30	462.2	274.9
$162.73 \leq W_{ij} < 274.9$	19	220.5	162.7
$134.22 \leq W_{ij} < 162.7$	6	145.9	134.2
$W_{ij} < 134.2$	14	81.3	—

2.2 灌区需水量与实际引黄水量

根据历年山东省引黄灌区引水情况分析,20 世纪 80 年代引黄用水量达到了历史的最高水平,比 50 年代增加了近 5 倍,在此之前的代际年均需水量的走势和实际引水量相当。90 年代之后因黄河上游来水量偏少,引黄水量有明显的下降趋势,但是平均引黄水量仍然维持在 60 亿 m^3 以上,随着灌区面积扩大和气候偏枯等因素的影响,使得灌区需水量和可供水量的差距加大,尤其是 2000—2002、2016 和 2017 等年份,黄村站来水量均低于 200 亿 m^3 ,已不足历年年均来水量的 50%,2000—2018 年山东引黄灌区代际年均引黄水量仅占灌溉需水量的 70% 左右(图 5)。

灌区灌溉需水量受种植面积和气象条件的双重影响,总体趋势随灌溉面积的增加而上升,在气象条件的影响下呈现剧烈波动(图 6),比如 1990 年和 2003 年,山东引黄灌区年均降雨量均超过 900 mm,降雨已经基本能够满足大部分农业用水的需求,因此灌溉需水仅为 34.3 和 37.8 亿 m^3 ,与此相对比的 1981、1989、1999 和 2002 等年份,年均降雨量均低于 500 mm,因此该年份中灌溉需水量普遍高于 100 亿 m^3 。山东省引黄水量在水文条件差的年份是不能满足农业用水的需求,为了确保农业生产安全,灌区内还有一部分农户依赖开采地下水灌溉,目前山东省引黄灌区地下水可开采量约为 40 亿 m^3 ,在一定程度上缓解了引黄灌区内的农业用水短缺。

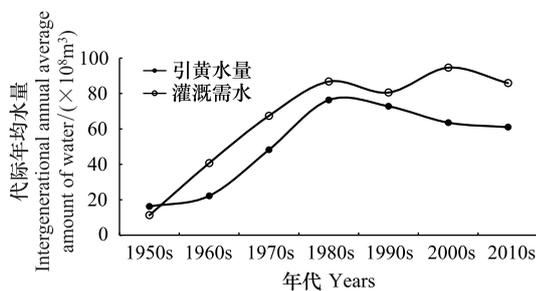


图 5 山东省引黄灌区代际灌溉需水量与实际引黄水量

Fig. 5 Intergenerational irrigation water requirement and actual irrigation water use by the Yellow River irrigation district in Shandong province

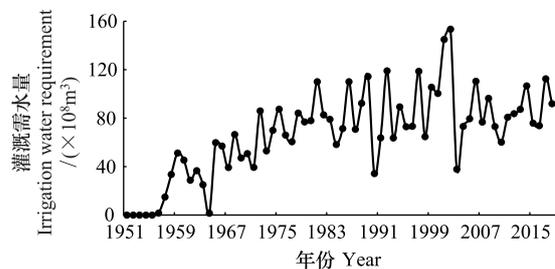


图 6 1951—2018 年山东省引黄灌区灌溉需水量

Fig. 6 Irrigation water requirement by the Yellow River irrigation district in Shandong province from 1951 to 2018

山东省引黄灌区区域跨度较大,不同调控区需水量的差异显著,这种差异不仅受灌区面积的影响,还受到气象条件的差异和降雨不平衡的影响。调控区 10 包含的陵县等地区在典型枯水年(2002)的年降雨量不足 300 mm,而调控区 2 和 11 所包含的淄博和淄川等地区同时间内的年降雨量达 550 mm。从图 7 来看,需水量在 10 亿 m^3 以上为调控区 6 和 10,集中在灌区面积大、降雨量较少的鲁西北地区。需水量低于 0.5 亿 m^3 的主

要为调控区 5、14、18 和 16,该调控区的特点是灌溉面积小,年降雨相对丰沛。调控区的面积对灌溉需水量的影响毋庸置疑,而水文气象的空间差异对其影响也不容忽视,比如在典型丰水年(2003),同样为 9 万 hm^2 左右灌溉面积的调控区 3 和 9,前者的灌溉需水量为 2.6 亿 m^3 ,而后者的需水量几乎为 0;还有灌溉面积较大的调控区 6 和 10,前者面积几乎为后者的两倍,然而两者的需水量却相当。在典型平水年(2016),面积相当的调控区 13 和 4,前者的灌溉需水量为后者的 3 倍。

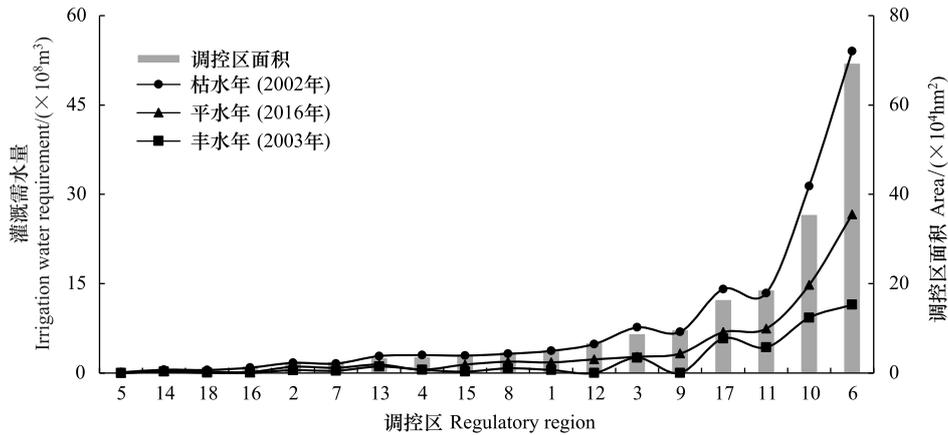


图 7 不同水文保障率下灌溉需水的空间差异

Fig. 7 The spatial disparity of irrigation water requirement under different hydrological years

2.3 基于生态需水保障的山东省灌区可用水量

1991 年之后,黄河流入山东的水量在大部分年份内已不足 300 亿 m^3 ,山东境内黄河流域的产水量在 23—40 亿 m^3 之间,山东省引黄灌区年均地下水可采量约为 40 亿 m^3 ,满足黄河口最高等级生态需水 274.9 亿 m^3 的需求对山东省引黄灌区的农业用水造成很大的影响。图 8 代表了保障不同等级生态需水的灌溉可用引黄水量,对比之前的灌区需水量,保障适宜等级的生态需水后,约有水文气象条件差的 31% 的年份无法满足灌溉用水的需求,保障最低等级的生态需水后,无法保障灌溉需水的年份降低到 26%。水文气象条件差的代表性的年份有 1997 及 1999—2002 年,尤其是 1997 年,山东省发生新中国成立以来罕见的夏旱,黄河断流累计长达 222 d,在这种状况下,生态用水和农业用水均得不到保障,1999—2002 年间,保障最低等级的生态需水后,山东灌区引黄水量不到灌溉需水的 40%,在同时限制开采地下水且无其他外来水源的情况下,

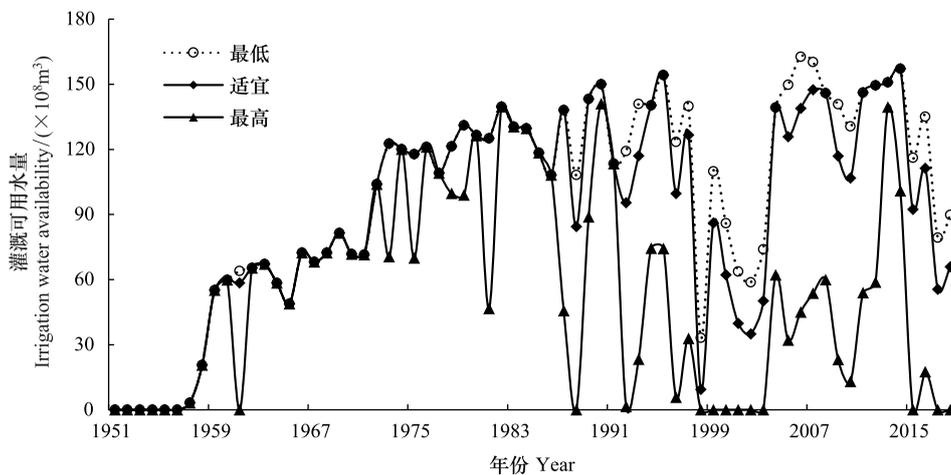


图 8 1951—2018 年保障不同等级生态需水的灌溉可用引黄水量

Fig. 8 The amount of irrigation water availability after securing different level of environmental flows from 1951 to 2018

山东引黄灌区的粮食生产将面临减产。

2.4 山东省引黄灌区农业用水安全评价

图9表明保障不同等级生态需水的山东省引黄灌区农业用水安全压力指数的差异,即使是在丰水年,黄河口生态需水的保障也有可能给灌区的农业生产带来一定的压力,但是保障适宜或者最低等级的生态需水后农业用水压力较小,保障适宜等级生态需水后,约有18%的年份存在35%以下的农业用水压力,保障最低等级的生态需水后,同样的是18%的年份存在压力,但是该压力指数都在15%以下,而保障最高等级生态需水后,约有35%的年份存在农业用水压力,并且压力指数都在40%以上,某些年份的压力指数甚至达到了100%。在平水年,保障最高等级的生态需水后有一半以上的年份存在用水安全压力,这种压力无论是从出现频次还是在指数强度上都有明显增加,保障适宜等级的生态需水后大概有33%的年份农业用水安全存在压力,保障最低等级的生态需水约有27%的农业用水面临短缺,但是大部分情况下农业用水安全压力指数都在

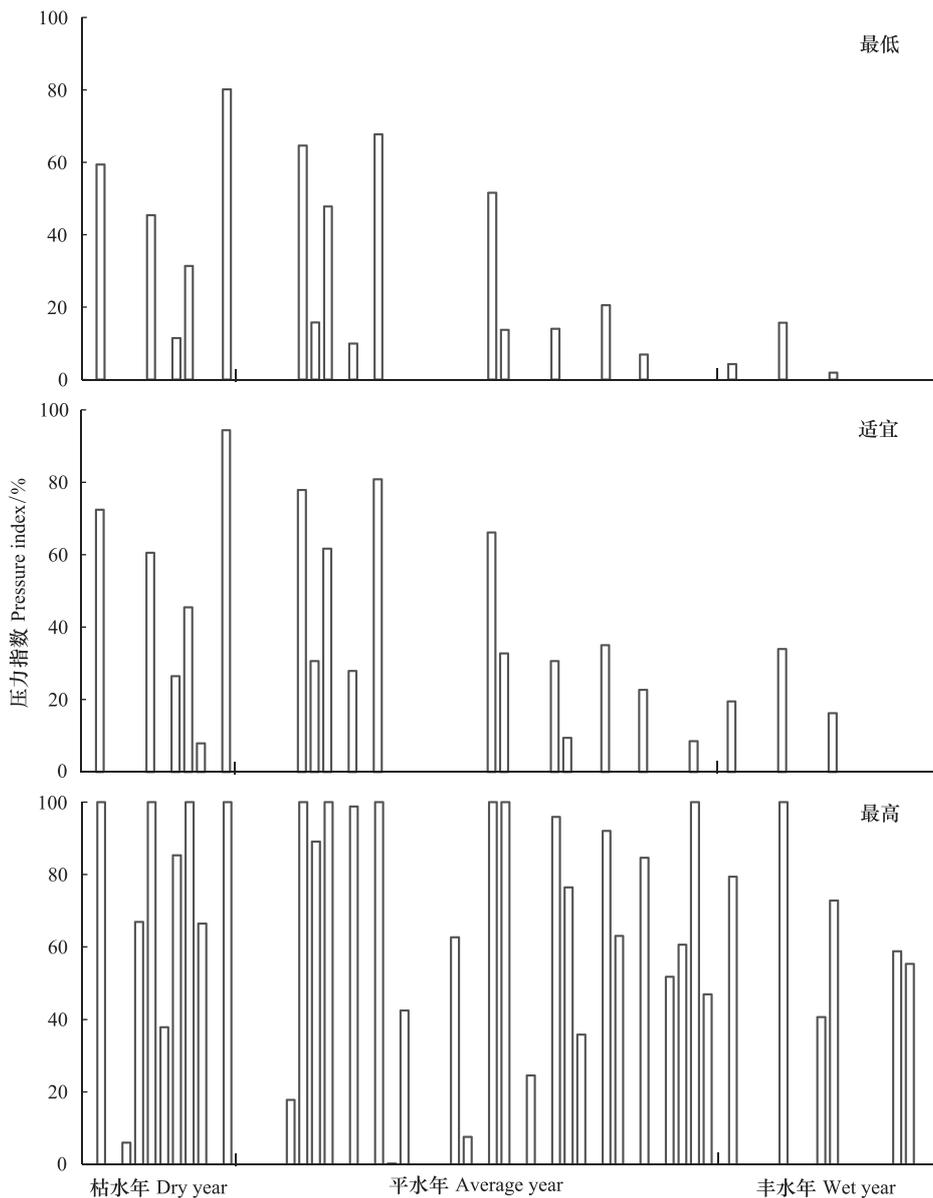


图9 保障不同等级生态需水的山东省引黄灌区农业用水安全压力指数

Fig.9 Agricultural water-use security pressure index for the Yellow River irrigation districts after securing different level of environmental flows

30% 之下。枯水年中,保障最低和适宜等级的生态需水后虽然农业用水得不到完全保障的年份都在 40% 以下,但是由于极端气象条件的存在,使得农业用水安全压力指数会有超过 80% 的情况出现。

图 10 表示在保障不同等级的生态需水后,山东省引黄灌区农业用水安全在空间的差异性。近年来山东省境内黄河来水量逐年减少,在没有超采地下水的情况下,即使保障最低等级生态需水,各大调控区的农业用水都不能得到全部的满足,平均农业用水安全压力指数在 15% 左右,由于气象条件的差异,各大调控区存在一些差异,以打渔张、刘春家、麻湾和簸箕李等灌区为代表的调控区 2、11、13、14 和 17 的农业用水压力指数超过了 20%。而在保障适宜等级的生态需水后,大部分调控区的农业用水安全压力指数也超过了 20%,比保障最低等级生态需水时增加了 8% 左右,压力较大的调控区依然是集中在以上调控区,而且调控区 2 和 13 的压力指数超过了 30%。保障最高等级的生态需水后,除调控区 7 外,其他调控区的压力指数都在 60%—70% 之间。2008—2018 年平均情况下,农业用水安全压力较大灌区主要分布在山东东部地区,包括东营市区以及下属的垦利和利津县、博兴县和无棣县等地区;农业用水安全压力较小的灌区主要分布在鲁中南地区,包括济南市长清区、平阴县、章丘和肥城等地区。2008—2018 年,山东东部地区的淄博、东营、垦利和惠民等地区的平均降雨量在 450—796 mm 之间,而鲁中南的济南、泰安和章丘等地区的平均降雨量在 654—1185 mm 之间,气象条件的差异是各大调控区农业用水差异的重要原因之一。

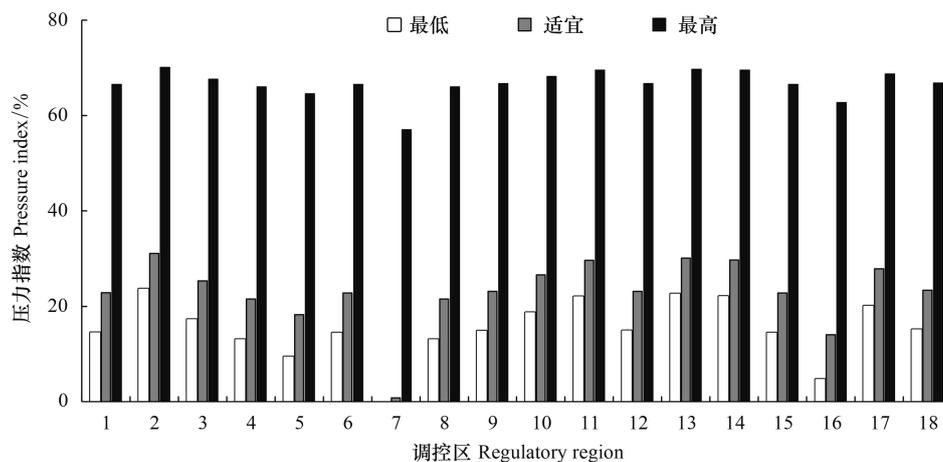


图 10 保障不同等级生态需水的农业用水安全压力指数的空间变化 (2008—2018 年均值)

Fig. 10 Spatial variations of agricultural water-use security pressure index after securing different levels of environmental flows (the annual mean value from 2008 to 2018)

2.5 山东省引黄灌区“精细配水”方案

山东省引黄灌区的农业用水和生态用水之间存在着不可调和的矛盾,保障生态需水后难免会造成灌溉农业用水短缺,使得引黄灌区存在不同程度的用水压力。利用不同灌区水文气象等条件的差异,计算出最佳的配水方案,可以缓解灌区的农业用水压力,表 4 通过和灌溉用水定额法相对比的方式给出了平水年保障不同等级生态需水后配水比例及灌溉用水短缺。

2010 年,山东省出台了《山东省地方标准—山东省主要农作物灌溉定额》^[38],规定平水年山东省引黄灌区主要作物平均灌溉定额为 $0.57\text{m}^3/\text{m}^2$,配水比例等同于不同调控区灌溉面积的比例。在合理利用地表及地下水资源,而又没有其他调水工程的前提下,保障最低、适宜和最高等级的生态需水的山东省引黄灌区农业用水短缺为 31.45、55.28 及 110.78 亿 m^3 。利用水文气象条件的空间尺度的差异,考虑调控区安全压力指数的不同,得出最佳的配水方案,在同样的条件下的农业用水短缺分别为 0、18.25 以及 73.76 亿 m^3 。

表 4 平水年保障不同等级生态需水配水比例及灌溉用水短缺

Table 4 Water allocation ratio and irrigation water shortage after securing environmental flows in average hydrological years

调控区 Regulatory region	定额法 Quota method				本研究方法 This study			
	配水比例 Allocation ratio/%	灌溉用水短缺 Irrigation water shortage /($\times 10^8 \text{ m}^3$)			配水比例 Allocation ratio/%	灌溉用水短缺 Irrigation water shortage /($\times 10^8 \text{ m}^3$)		
		最低 Low	适宜 Average	最高 High		最低 Low	适宜 Average	最高 High
1	2.57	0.81	1.42	2.85	2.43	0	0.44	1.79
2	1.30	0.41	0.72	1.44	1.44	0	0.26	1.06
3	4.53	1.43	2.50	5.02	3.70	0	0.67	2.73
4	1.91	0.60	1.06	2.12	0.78	0	0.14	0.57
5	0.09	0.03	0.05	0.10	0.02	0	0.00	0.01
6	35.60	11.20	19.68	39.44	36.10	0	6.59	26.63
7	1.37	0.43	0.76	1.52	1.19	0	0.22	0.88
8	2.47	0.78	1.36	2.73	2.59	0	0.47	1.91
9	5.00	1.57	2.76	5.54	4.43	0	0.81	3.27
10	18.23	5.73	10.08	20.20	20.05	0	3.66	14.79
11	9.58	3.01	5.29	10.61	10.10	0	1.84	7.45
12	3.52	1.11	1.94	3.89	3.11	0	0.57	2.29
13	1.79	0.56	0.99	1.98	1.92	0	0.35	1.42
14	0.34	0.11	0.19	0.38	0.39	0	0.07	0.29
15	2.07	0.65	1.14	2.29	1.92	0	0.35	1.42
16	0.82	0.26	0.45	0.91	0.22	0	0.04	0.16
17	8.45	2.66	4.67	9.36	9.30	0	1.70	6.86
18	0.36	0.11	0.20	0.40	0.32	0	0.06	0.24
总计 Sum	100	31.45	55.28	110.78	100	0	18.25	73.76

3 讨论

自 2000 年之后山东省引黄灌区的面积趋于平稳,但是气象水文条件越来越差,旱灾频繁发生,保障生态需水后的灌区可用水量也呈减少的态势,而最高等级的生态需水保障可能会造成很更大的农业用水压力,有近一半的平水年内农业安全压力指数都在 50% 以上。保证适宜或者最低等级的生态需水后,农业用水勉强可以得到满足,仅有少数的情况会出现农业用水短缺的情况,平水年内的农业安全指数一般不会超过 30%。目前山东引黄灌区还存在一定的节水潜力,通过节水等措施可以同时实现黄河口适宜等级生态需水的保障和山东省引黄灌区农业用水安全。适宜等级的生态需水可以保障黄河口生态系统结构的稳定,但是要达到生态系统的动态平衡还是有赖于最高等级生态需水的保障。

2008—2018 年,山东东部地区和鲁西北等地区的年平均降雨量不足 600 mm,而鲁中南地区的年均降雨量在 900 mm 左右,水文气象条件的差异使得山东省引黄灌区的农业用水安全具有明显的空间异质性。在保障适宜等级的生态需水后,各大调控区的农业用水安全压力指数的均值为 23%,以打渔张、刘春家、麻湾和簸箕李等灌区为代表的调控区 2、11、13、14 和 17 的农业用水压力较大,其中调控区 2 和 13 的压力指数超过了 30%,而以胡家岸、田山和东风等灌区为代表的调控区的农业安全指数普遍低于 20%。在山东省引黄灌区水资源管理过程中,应综合考虑农业节水措施的实施和水文气象条件差异的影响,在推行农业节水及调水工程的同时,考虑灌区农业安全压力进行“精细配水”,平水年份保障适宜等级生态需水后农业用水短缺由 55.28 降低到 18.25 亿 m^3 ,有效的降低了农业和生态用水之间的矛盾。

山东省引黄灌区内水资源短缺与浪费现象并存,一方面可用水量减少,另一方面普遍存在大水漫灌、用水效率不高的情况。引黄灌区的农业用水不仅来自降雨和引黄工程,还有一部分来自地下水,而这部分水资源

以井灌的形式被农民开采,不容易受到有关部门的统一监管和调控。在引黄水量不能满足农业用水需求的情况下,农户会通过开采地下水来保障农业用水安全,目前山东省引黄灌区年均地下水可采量约为 40 亿 m^3 ,随着降水系列的偏枯,地下水开采量呈增加趋势,已经造成了地面沉降、地下漏斗区和海水倒灌等生态问题。除了保障黄河口生态安全,提高农业灌溉效率,重视机井灌溉的管理,科学的进行引水补源,维护地下水生态环境健康也是未来努力的方向。

4 结论

为保证黄河口生态安全,国家做出重要决策,坚持生态优先的原则,在任何情况下都要保证一定的入海水量。保障不同等级的生态需水会对山东省农业用水安全造成一定的影响,但是由于水文气象的空间差异的影响,导致山东省引黄灌区的农业安全压力也存在空间异质性,因而管理部门可以根据水文气象条件,以及不同调控区的实际情况进行引黄水量的调控,争取在空间上细化黄河水资源分配方案,结合农业节水措施的实施,有望达到适宜等级生态需水保障的目标,维持黄河口生态系统结构的稳定。为了满足黄河口整体生态系统的动态平衡,保障最高等级生态需水,更加需要跨流域调水、农业节水和地表水地下水联动等多途径入手,最终实现山东引黄灌区和黄河口生态环境的协调发展。

参考文献 (References):

- [1] Lu S B, Bai X, Li W, Wang N. Impacts of climate change on water resources and grain production. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 143: 76-84.
- [2] Khan S, Ahmad A, Malano H M. Managing irrigation demand to improve seasonality of river flows. *Irrigation and Drainage*, 2009, 58(2): 157-170.
- [3] 刘强, 严登华, 何岩, 邓伟, 章光新. 东北地区农业用水安全预警研究. *水土保持通报*, 2003, 23(5): 53-57.
- [4] Sullivan C. Calculating a water poverty index. *World Development*, 2002, 30(7): 1195-1210.
- [5] Falkenmark M, Widstrand C. Population and water resources: a delicate balance. *Population Bulletin*, 1992, 47(3): 1-36.
- [6] Ali A M, Shafiee M E, Berglund E Z. Agent-based modeling to simulate the dynamics of urban water supply: climate, population growth, and water shortages. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 28: 420-434.
- [7] Garcia-Cuerva L, Berglund E Z, Binder A R. Public perceptions of water shortages, conservation behaviors, and support for water reuse in the U. S. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, 113: 106-115.
- [8] Ait-Aoudia M N, Berezowska-Azzag E. Water resources carrying capacity assessment: the case of Algeria's capital city. *Habitat International*, 2016, 58: 51-58.
- [9] 王西琴, 王佳敏, 张远. 基于粮食安全的河南省农业用水分析及其保障对策. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(3): 114-118.
- [10] Zhu W B, Jia S F, Devineni N, Lv A F, Lall U. Evaluating China's water security for food production: the role of rainfall and irrigation. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(20): 11155-11166.
- [11] 王鹤龄, 张强, 王润元, 吕晓东, 王力, 张镭, 齐月. 气候变化对甘肃省农业气候资源和主要作物栽培格局的影响. *生态学报*, 2017, 37(18): 6099-6110.
- [12] Hatfield J L, Dold C. Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 103.
- [13] 陈洪斌. 我国省际农业用水效率测评与空间溢出效应研究. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(2): 85-90.
- [14] Ezenne G I, Jupp L, Mantel S K, Tanner J L. Current and potential capabilities of UAS for crop water productivity in precision agriculture. *Agricultural Water Management*, 2019, 218: 158-164.
- [15] 鲍超, 邹建军. 基于人水关系的京津冀城市群水资源安全格局评价. *生态学报*, 2018, 38(12): 4180-4191.
- [16] 贾绍凤, 张军岩, 张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 538-545.
- [17] Jägermeyr J, Pastor A, Biemans H, Gerten D. Reconciling irrigated food production with environmental flows for sustainable development goals implementation. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 15900.
- [18] Pang A P, Sun T. Bayesian networks for environmental flow decision-making and an application in the Yellow River estuary, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(5): 1641-1651.
- [19] Monteith J L. Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1981, 107(451): 1-27.
- [20] 刘钰, Pereira L S, Teixeira J L, 蔡林根. 参照蒸发量的新定义及计算方法对比. *水利学报*, 1997, (6): 27-33.

- [21] Smith M. CROPWAT-A Computer Program for Irrigation Planning and Management. Rome: FAO, 1992.
- [22] Sun T, Yang Z F, Cui B S. Critical environmental flows to support integrated ecological objectives for the Yellow river estuary, China. *Water Resources Management*, 2008, 22(8): 973-989.
- [23] 庞爱萍, 孙涛. 基于生态需水保障的农业生态补偿标准. *生态学报*, 2012, 32(8): 2550-2560.
- [24] 《中国水利》编辑部. 全国大型灌区一览表. *中国水利*, 2005, (23): 96-100.
- [25] 王孝青. 田山灌区现状与发展对策. *山东水利*, 2001, (11): 15-15.
- [26] 李振贤. 东营市双河灌区节水灌溉发展方向. *山东水利*, 2001, (2): 24-24.
- [27] 韩瑞先, 蔡志强. 彭楼引黄灌区改革浅析. *山东水利*, 2008, (11): 50-51.
- [28] 崔璇. 簸箕李灌区建设节水型灌区措施初探. *山东水利*, 2006, (12): 34-34, 36-36.
- [29] 肖峰. 参与式管理在韩墩引黄灌区的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [30] 白子韶. 谢寨引黄灌区节水灌溉的发展措施. *山东水利*, 2003, (5/6): 50-50.
- [31] 王卫红. 鄄城县旧城引黄灌区防渗工程施工. *山东水利*, 2014, (7): 59-60.
- [32] 王建设. 苏泗庄引黄灌区水量供需平衡分析. *山东水利*, 2012, (5/6): 80-81.
- [33] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 康绍忠, 罗怀彬, 张大中. 中国主要作物需水量与灌溉. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [34] 水利部黄河水利委员会. 黄河水资源公报. 郑州: 黄河水利出版社, 1998-2018.
- [35] 赵延铸, 王传江. 济南市水资源初步评价 // 山东水利学会暨水利建设战略问题学术讨论会论文集. 济南: 山东水利学会, 1988: 90-99.
- [36] 商广宇, 赵士贤, 孔宪芳. 山东省引黄灌区地下水赋存条件与开发潜力分析. *地下水*, 1998, 20(2): 80-81, 66-66.
- [37] 徐征和, 负汝安, 王继光, 郭印坦. 山东省引黄灌区节水技术应用研究. *山东水利*, 2002, (2): 26-27.
- [38] 山东省质量技术监督局. DB37/T 1640—2010 山东省地方标准—山东省农业灌溉用水定额. 北京: 中国标准出版社, 2010.