

泾惠渠灌区渠首地表水资源可利用量 长期变化及其潜力研究

刘招^{1,2}, 李强², 李璐路², 毛全年³, 贾志峰^{1,2}

(1.长安大学水与发展研究院, 陕西西安 710054; 2.长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西西安 710054;
3.泾惠渠灌区管理局, 陕西三原 713800)

摘要:以泾惠渠灌区渠首——泾河张家山站长系列水文数据为研究对象,利用滑动平均、Tenant、回归分析及概率统计等方法分析了泾河来水形势、河道内生态环境需水量以及汛期不可利用水量,深入研究了泾惠渠灌区渠首水资源可利用量、灌区可引水量及引水潜力等问题。研究结果表明:泾河流域张家山站实测年径流量呈现出明显递减趋势,多年平均实测径流量从20世纪60年代的17.15亿m³下降到近十年来的9.95亿m³,实测径流距平最小达到-29.6%;河道内全年水资源可利用率基本维持在50%~60%左右;随着河道水资源利用的沙限的提高,灌区渠首可引水量及可引水量潜力均相应有所增加。按照目前泾河来水水源形势,灌区仍有1.66~2.10亿m³左右引水潜力可以挖掘。

关键词:地表水资源;年径流量;水资源可利用率;生态流量;引水潜力;泾惠渠灌区

中图分类号:S273 **文献标志码:**A

Study of long-term variation and potential of available surface water resources of Jinghui Canal Head

LIU Zhao^{1,2}, LI Qiang², LI Lu-lu², MAO Quan-nian³, JIA Zhi-feng^{1,2}

(1. Institute of Water and Development, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3. The Administration Bureau of Jinghui Canal Irrigation Area, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: Based on long series of hydrological data of Jinghui Canal head on Jinghe River, the runoff, the water demand in dry season, and the unusable runoff in flood season were analyzed using moving average, regression, statistic and Tenant methods. The average annual usable runoffs and potentially usable runoffs of the Jinghe River were further discussed. The results showed that the annual runoff of Jinghe River decreased apparently from 1.72 billion m³ in the 60's of last century to less than 1.00 billion m³ now and the observed minimum runoff departure was almost -29.6%. The average annual usable runoff was about 50% to 60% of the total runoff. Both of the average annual usable runoff and the potential usable runoff were increased with the improvement of sediment limitation for the irrigation and its canal system. According to the runoff situation and its trend of the Jinghe River, there are still 166 to 210 million m³ of runoff, which are potential available for the Jinghui Canal Irrigation Area.

Keywords: surface water resources; annual runoffs; available water resources; ecological flow; usable runoffs potential; Jinghui Canal Irrigation District

大中型灌区历来是农业生产的主力军,对于保持国民经济发展和社会稳定都具有十分重要的作

用^[1]。但受全球气候变化和人类活动的影响,降水在时空分布上变的更加不均匀,导致洪涝及干旱等

极端灾害频发,使得原本水文生态就脆弱的干旱半干旱地区的水资源问题更加突出,并引发了灌区一系列农业生产及发展的新问题。泾惠渠史称郑国渠,作为我国历史上四大水利工程之一,是关中乃至全国知名的大型现代化灌区^[3],辖西安、咸阳、渭南三市的泾阳、三原、高陵、临潼、阎良、富平六个县(区)的 48 个乡镇,计 597 个行政村,总人口 118 万人。目前,灌区拥有灌溉面积约 9.7 万 hm^2 ,其中自流灌溉面积 7.4 万 hm^2 ,抽水灌溉面积 2.3 万 hm^2 ,是陕西省重要的农产品生产区之一。

1 泾惠渠灌区及灌溉水源困境

泾惠渠灌区实行引蓄提相结合、地表水与地下水综合利用的灌溉制度。灌区工程设施主要有渠首枢纽工程、西郊水库、渠道工程三大部分,其中渠首设在泾河干流张家山断面。泾河作为灌区主要地表水资源,发源于宁夏回族自治区泾源县六盘山东麓,流经宁夏、甘肃、陕西三省(区),流域面积 45 421 km^2 ,多年平均径流量 14.5 亿 m^3 ,其中,汛期三个月径流占总径流的 63%。由于泾河流域位于黄土高原中部,区内地形破碎,沟壑纵横,水土流失严重,汛期来水含沙量大。据张家山站测定,泾河平均含沙量约 141 $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$,每年有 3.1 亿 t 泥沙输入黄河,是黄河上输沙量最大的二级支流^[4]。

20 世纪 60 年代初,因灌溉面积扩大,且受水均衡和供水不及时等因素影响,在群众自发和地方政府的引导下有计划的发展井灌,到 20 世纪 80 年代,机井已发展较多,渠井双灌的结合,有效地发挥了引、蓄、提的调节作用。然而,随着灌区社会经济发展对水资源需求的不断增加,近年来水资源的不合理利用使水量短缺日益加剧,主要表现在两个方面:一方面,作为灌溉水源的泾河来水量呈递减趋势,多年平均径流量从 20 世纪 60 年代的 17.97 亿

m^3 下降到目前的 10~12 亿 m^3 ;另一方面,地下水采补失调,过度开采问题突出,灌区平均地下水埋深由 1982 年的 4.74 m 下降为目前的 20 m 以下,局部降至 50 m 以下,并由此引发了地沉、地陷和地裂缝等一系列的生态环境问题^[5]。地下水采补失调等严重影响到灌区水资源的高效和安全利用,为了提高灌区水资源利用效率,维护灌区可持续发展,地方政府及灌区管理部门加大引导和管理力度,制定了优先使用地表水等一系列水资源管理制度,同时强调对灌区主要水源——泾河渠首来水的规律、水资源可利用量及用水潜力做深入研究^[3]。

通过对不同年代泾河张家山站径流量和降水量分析(见表 1),从 20 世纪 70 年代以来,泾河张家山来水呈减小趋势,实测径流距平最小达到 -29.6%,趋势检验结果也表明其递减趋势通过了 99% 的置信度检验,由还原计算得到的天然径流量在规律上与实测值基本一致;降水虽呈现出一定的减小趋势,但近 30 年基本保持稳定。为了更清晰展示泾河径流系列,采用河川径流五级丰枯划分标准,分别以 $\mu+1.17\sigma$, $\mu+0.33\sigma$, $\mu-0.33\sigma$, $\mu-1.17\sigma$ 作为阈值(μ 为系列均值, σ 为系列标准差),将泾河径流丰枯划分为丰水、偏丰、平水、偏枯和枯水五级^[6-7]。绘制泾河张家山站 83 年(1932 年至 2014 年)实测长系列径流系列丰枯变化图(图 1)。由图 1 可见,多年平均径流量为 14.52 亿 m^3 ,近 20 年来绝大多数点距落在偏枯区间,径流量趋势线呈较明显下降趋势;对泾河张家山站近 20 年(1995 年至 2014 年)实测径流系列丰枯变化作同样分析,如图 2 所示,近 20 年多年平均径流量为 10.79 亿 m^3 ,径流量趋势线亦呈略微下降趋势。

作为泾惠渠灌区的主要水源,泾河来水量的锐减给农业生产带来了潜在的风险,渠首可利用水量备受关注。径流还原计算和分析结果(表 1)表明,

表 1 泾河张家山站不同时期降水量、实测及天然径流对比

Table 1 The comparison of average precipitation and runoff at Zhangjiashan of Jinghe River basin in different periods

年代 Period	实测径流 Observed runoff		天然径流 Natural runoff		天然-实测/ 10^8m^3 The differences	同期降水 Precipitation	
	平均值/ 10^8m^3 Mean value	距平/% Departure	平均值/ 10^8m^3 Mean value	距平/% Departure		平均值/mm Mean value	距平/% Departure
1932-1939	16.43	16.65	19.27	1.43	2.84	-	-
1940-1949	17.84	26.66	20.02	5.37	2.18	-	-
1950-1959	13.1	-6.99	19.72	3.8	6.62	-	-
1960-1969	17.97	27.59	23.09	21.53	5.12	534.6	13.91
1970-1979	13.04	-7.42	18.7	-1.57	5.66	490.2	4.45
1980-1989	13.29	-5.64	19.1	0.53	5.81	495.4	5.56
1990-1999	13.23	-6.07	18.5	-2.63	5.27	438.2	-6.63
2000-2009	9.91	-29.64	15.56	-18.1	5.65	427.04	-9.01
2010-2014	11.95	-15.15	17.03	-10.36	5.08	430.43	-8.28

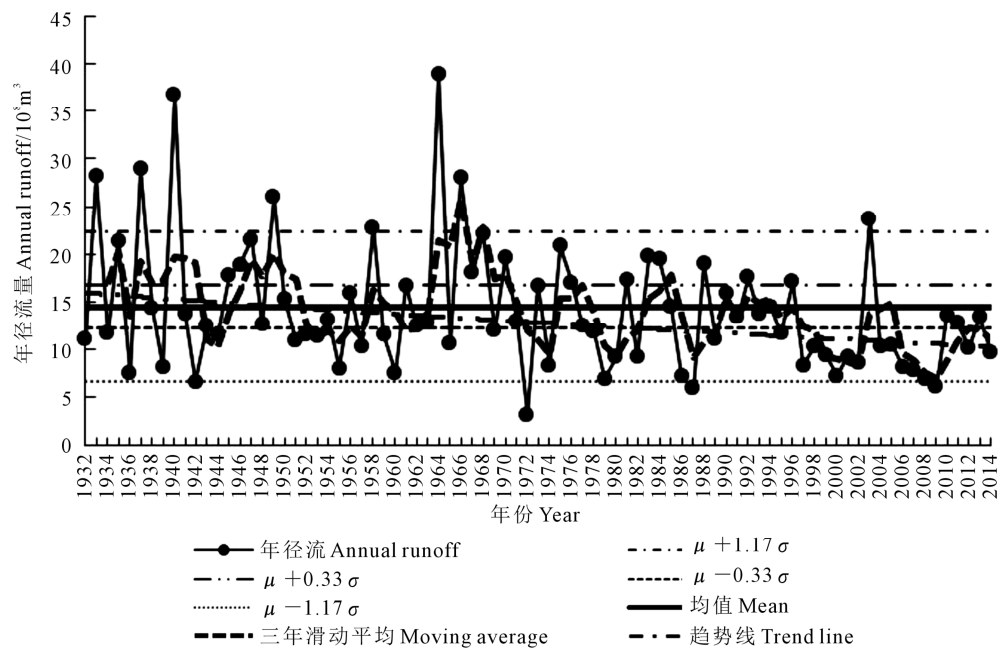


图 1 泾河张家山站实测径流系列丰枯变化及趋势(1932–2014)

Fig.1 The observed runoff and its trend at Zhangjiashan of Jinghe River from 1932 to 2014

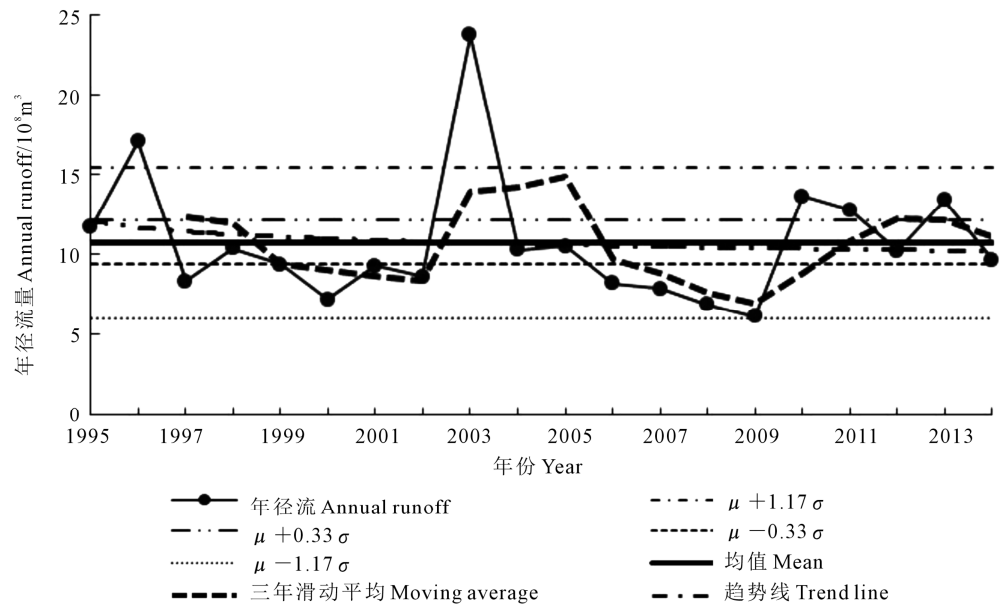


图 2 泾河张家山实测径流系列丰枯变化及趋势(1995–2014)

Fig.2 The observed runoff and its trend at Zhangjiashan of Jinghe River from 1995 to 2014

自 20 世纪 70 年代以来,泾河中上游河道水资源补排基本稳定,天然径流与实测径流量之差基本稳定。在此情况下,本文分析计算均依据河道实测径流量进行。

2 渠首地表水资源可利用量

在汛期,根据调水调沙要求,泾河往往需要宣泄洪水以及不可利用的高泥沙水流;此外,泾河流经地多为干旱半干旱地区,水资源紧缺。在非汛期需要优先保证河道内生态用水量的要求,故可用下式来估算渠首处的河道水资源可利用量^[8]。

$$W_k = W_t - W_e - k \cdot W_f \tag{1}$$

式中, W_k 为河道水资源可利用量; W_t 为河道实测径

流量; W_e 为非汛期河道最小生态需水量; k 为汛期径流不可利用系数; W_f 为汛期实测径流量。汛期径流不可利用系数与汛期实测径流量的乘积即为汛期不可利用水量,主要包括不可利用洪水及高泥沙含量水流。当非汛期河道最小生态需水量和汛期弃水量确定后即可算出河道水资源可利用量。下面对各类水量分别加以计算:

(1)非汛期河道生态流量。生态流量狭义上讲是维持河流生态与环境需要的最小流量,而广义生态流量除了满足自然生态系统基本需要的流量外,还包括下游取水、用水、航运、稀释废污水、景观与旅游等方面需求^[9-10]。确定非汛期河道最小生态需水量的方法较多,常用的基于水文学的方法有

Tenant 方法,最小月径流法,RVA 方法和 Texas 方法等^[11-12]。为了便于对比,本文选用前两种方法计算张家山渠首断面河道最小生态需水。对 Tenant 方法,在枯水季(10 月~翌年 5 月)最小生态流量可分别按多年平均流量的 10%和 15%两个标准计算;对最小月径流法,可分别采用长系列、短系列和典型年三种方案,计算结果如表 2 所示。由表 2 可见,不同方法的计算结果差别较大,最大者为 W_{e2} ,为 0.734 亿 m^3 ;最小者为 W_{e4} ,仅为 0.016 亿 m^3 。

(2)汛期不可利用水量。汛期不可利用水量主要包括不可利用洪水及高泥沙水流,单次洪水或高泥沙水流均可依据渠首张家山水库蓄泄资料计算得出。李勋贵等^[13]的研究表明,汛期来水不可利用系数与径流泥沙含量及泄洪水量有关,而泄洪量与泥沙含量呈一定的相关关系。事实上,高泥沙水流一般均是因上游暴雨洪水所致,因此该二因素可以合一考虑。

为了得到汛期来水不可利用系数,本文利用泾惠渠灌区渠首 1960 年至 2001 年入库水量及输沙率数据,以及 1995 年至 2014 年干渠引水输沙率等数据资料,经统计回归,得到汛期来水不可利用系数 y 和径流含沙量 $x(kg \cdot m^{-3})$ 近似符合式(2)的对数函

数关系($R^2=0.6012$)。

$$y = 0.0751 + 0.2206\ln x \tag{2}$$

依据上式,可由不同泥沙含量推求汛期来水不可利用系数,再将其与对应时段内的径流量相乘即可求得该时段的不可利用水量。时段划分一般可按 5 日、一句或一月,时段尺度越小则误差就相对越低,但计算量就会增大。本文以月为单位,把当年汛期各月的不可利用水量相加,即得当年汛期弃水量。

考虑到灌溉及渠道冲淤等限制,泾惠渠灌区实际灌溉引水控制含沙量不超 7%,在干旱等特殊情况下可按 10%的含沙量进行引水灌溉。依据长系列引水数据计算所得,当河道水资源利用沙限为 10%时,泾河多年平均汛期不可利用水量占径流量的 35.55%,折合水量约 3.84 亿 m^3 ;当沙限为 7%时,河道汛期不可利用水量占径流量的 41%,折合水量约 4.43 亿 m^3 。

(3)地表水资源可利用量。当多年平均非汛期最小生态需水量和多年平均汛期弃水量确定后,由式(1)可计算得出泾河多年平均河道水资源可利用量。表 3 和表 4 为沙限分别取 10%和 7%时的泾河多年平均(1995-2014 年)河道水资源可利用量。

表 2 泾河张家山站多年平均非汛期河道最小生态需水量计算结果

Table 2 The minimum ecological water demand of dry season at Zhangjiashan of Jinghe River

计算方法 Method	选用标准 Criteria *	表示符号 Symbol	非汛期河道最小生态需水量/ $10^8 m^3$ The minimum ecological water demand in dry season
Tenant	10%	W_{e1}	0.489
	15%	W_{e2}	0.734
最小月径流法 * The minimum monthly runoff	长系列 Long series	W_{e3}	0.062
	短系列 Short series	W_{e4}	0.016
	典型年 Typical year	W_{e5}	0.089

* 注:每种方法具体计算时可选择不同的标准,采用 Tenant 方法,枯水季最小生态流量可分别按多年平均流量的 10%和 15%两个标准计算;采用最小月径流法,可分别用长系列、短系列和典型年三个标准。

Note:The different criteria was adopted here for comparison in terms of each method, for example, the minimum ecological flow can be calculated with 10% and 15% of the runoff in dry season. The minimum monthly runoff can be used in three standard: Long series, short series and typical year.

表 3 沙限为 10%时泾河多年平均地表水资源可利用量计算结果

Table 3 The average annualusable surface water when the sand content is limited to 10%

径流量/ $10^8 m^3$ Total runoff	汛期不可用水量/ $10^8 m^3$ Unusable runoff	非汛期最小生态需水量/ $10^8 m^3$ The minimum ecological water demand in dry season		河道水资源可利用量/ $10^8 m^3$ Usable runoff		河道水资源利用率/% Usage ratio
10.79	3.84	W_{e1}	0.489	W_{k1}	6.461	59.88
		W_{e2}	0.734	W_{k2}	6.216	57.61
		W_{e3}	0.062	W_{k3}	6.888	63.84
		W_{e4}	0.016	W_{k4}	6.934	64.26
		W_{e5}	0.089	W_{k5}	6.861	63.59

由表 3 可见,河道水资源可利用量的多年平均值最大为 6.938 亿 m³,最小为 6.216 亿 m³,对应的河道水资源可利用率分别为 64.26%和 57.61%。由于非汛期最小生态需水量的计算方法之间的差别,计算出来的河道水资源可利用量差异较大。当河道水资源利用沙限为 7%时,据表 4 计算结果,河道水资源可利用量的多年平均值最大为 6.344 亿 m³,最小为 5.626 亿 m³,对应的河道水资源可利用率分别为 58.80%和 52.14%。由于非汛期河道内最小生态需水量的计算方法不同,河道水资源可利用量计算结果有一定差异。鉴于近些年来泾河张家山站下游枯水期基流不足,参照《全国水资源综合规划》对我国北方河流河道内生态环境蓄水量占其地表径流量的比例建议^[14],认为用多年平均非汛期径流量百分数法计算的成果 W_{e2} 较为合理,则与其对应的河道水资源可利用量为 W_{k2} 。

3 灌区可引水量及引水量潜力

灌区渠首的地表水资源可利用量与灌区工程可引水量是两个不同的概念。由于水利工程都有一定的设计标准,尤其在变化条件下,依据原始水文系列设计的工程也相应受其影响,实际引水能力发生变化,当水量超出渠道设计标准则无法被工程加以利用。

3.1 灌区可引水量

泾惠渠灌区渠首的设计引水能力为 50 m³ · s⁻¹^[3],所以并不是所有的河道水资源可利用量都可引用,只有小于引水能力的河道水量才是渠首工程

的可引水量。因此,从河道水资源可利用量中扣除超出渠首引水能力的那部分水量即为灌区的工程可引水量。可引水量与可利用来水量的时间分布密切相关,年内分布差异可能引起可引水量的较大差异,故本文依据长系列历史数据进行统计求得。可引水量计算宜采取日数据,计算时先求得日河道水资源可利用量,当可利用量大于渠首的引水能力 50 m³ · s⁻¹时,以 50 m³ · s⁻¹作为渠首日可引水量,小于时则全部作为渠首工程可引水量。具体计算方法如下:

$$W_a = \sum_{i=1}^{365} w_{ai}$$

其中
$$w_{ai} = \begin{cases} w_i & w_i < 50 \\ 520 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} & w_i \geq 50 \end{cases} \quad (3)$$

式中, W_a 为年可引水量; w_{ai} 为日可引水量; w_i 为逐日可利用水量,可参照(1) 式进行计算。经计算,当沙限为 10% 时,渠首工程可引水量的多年平均值为 5.64 亿 m³;沙限为 7% 时,渠首工程可引水量的多年平均值为 5.12 亿 m³。

3.2 引水量潜力

从 20 世纪 50 年代起,泾惠渠灌区总引水量持续升高,在 70 年代初达较高水平,后略有下降并趋于稳定,目前,泾惠渠灌区多年平均渠首总引水量值为 3.64 亿 m³。从上述可引水量的计算可知,灌区引水系统仍有一定潜力,引水潜力即为可引水量与目前总引水量之差。泾惠渠渠首工程多年平均实际引水量、可引水量、可引水量潜力、可利用量、天然来水之间的关系如表 5 所示。

表 4 沙限为 7%时泾河多年平均地表水资源可利用量计算结果

Table 4 The average annualusable surface water when the sand content is limited to 7%

径流量/10 ⁸ m ³ Total runoff	汛期不可用水量/10 ⁸ m ³ Unusable runoff	非汛期最小生态需水量/10 ⁸ m ³ The minimum ecological water demand in dry season		河道水资源可利用量/10 ⁸ m ³ Usable runoff		河道水资源可利用率/% Usage ratio
10.79	4.43	W_{e1}	0.489	W_{k1}	5.871	54.41
		W_{e2}	0.734	W_{k2}	5.626	52.14
		W_{e3}	0.062	W_{k3}	6.298	58.37
		W_{e4}	0.016	W_{k4}	6.344	58.80
		W_{e5}	0.089	W_{k5}	6.271	58.12

表 5 渠首多年平均可利用水量、工程可引水量、可引水量潜力计算结果

Table 5 The average annualusable runoff, the engineering usable runoff, and its potential

沙限 Sand limit	实际来水/10 ⁸ m ³ Total runoff	可利用量/10 ⁸ m ³ Usable	工程可引水量/10 ⁸ m ³ Engineering usable	实际引水量/10 ⁸ m ³ Actual use	可引水量潜力/10 ⁸ m ³ Potential
7%	10.79	5.63	5.12	3.46	1.66
10%	10.79	6.21	5.64	3.46	2.18

由表 5 中计算成果可见,泾河天然来水量的多年平均(1995–2014 年)为 10.79 亿 m^3 ,当沙限按 10%取时,河道多年平均水资源可利用量为 6.21 亿 m^3 (沙限取 7%时,5.63 亿 m^3);渠首工程多年平均可引水量为 5.64 亿 m^3 (沙限取 7%时,5.12 亿 m^3);渠首工程实际引水量的多年平均值为 3.46 亿 m^3 ,渠首工程可引水量潜力的多年平均值为 2.18 亿 m^3 (沙限取 7%时,1.66 亿 m^3)。沙限为 7%时,渠首工程可引水量占实际来水量的 52.18%;可引水量潜力占可利用量的 29.5%,占渠首工程可引水量的 32.4%。沙限为 10%时,渠首工程可引水量占实际来水量的 57.55%;可引水量潜力占可利用量的 35.1%,占渠首工程可引水量的 38.65%。较高的可引水量与可利用量之比表明工程引水能力较高,在径流变化条件下,灌区渠首实际引水量已经占到可引水量的 60%以上,表明工程引水能力也已得到了较大限度的发挥,但仍有 30%左右的潜力可挖。

4 结 论

在分析泾河流域水文气象基本条件的基础上,依据长系列水文数据,研究了泾惠渠灌区渠首泾河张家山站来水形势、水资源可利用量、工程可引水量及引水潜力等问题,为泾河流域及泾惠渠灌区水资源合理开发利用及优化配置等提供参考。研究表明:

(1)泾河流域张家山站实测年径流量呈现出较明显的递减趋势,多年平均实测径流量从 20 世纪 60 年代的 17.15 亿 m^3 下降到 70、80 年代的 13 亿 m^3 左右,再由上世纪末的 12.77 亿 m^3 下降到近十年来的 9.95 亿 m^3 ;

(2)理论上,灌区渠首的河道内水资源可利用率约为 50%~60%,受工程规模限制,其中约 90%可引并用于灌溉,较高的工程可引水量与可利用量比值表明渠首工程引水能力较高,而多年实际引水量常常仅占可引水量的 60%左右;

(3)随着河道水资源利用沙限的提高,灌区渠首可引水量及可引水量潜力均相应有所增加,按照目前泾河来水水源形势,灌区仍有 1.66 到 2.10 亿 m^3 左右引水潜力可以挖掘。

生态需水量及汛期不可用水量都是决定水资源可利用量的重要因素,但对生态需水内涵和范围的界定较为复杂,汛期不可用水量计算也尚未有成熟方法。本文通过对生态需水采用多种方法对比选择确定,汛期不可用水量采用回归统计方法确定,这些尚有讨论余地,相关研究也有待进一步加强。

参 考 文 献:

- [1] 于长生,薛小杰,黄强,等.关中地区面临的水资源问题与对策研究[J].西安交通大学学报,2000,21(5):725-731.
- [2] 李峰平,章光新,董李勤.气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J].地理科学,2013,33(4):457-461. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2013.04.012.
- [3] 陕西省泾惠渠灌区管理局[EB/OL]:泾惠局概况[EB/OL], (2018-1-1)[2018-1-1].http://www.sxjhj.cn/1/1/list.aspx.
- [4] 冉大川,刘斌,罗全华,等.泾河流域水土保持措施减水减沙作用分析[J].人民黄河,2001,23(2):6-8.
- [5] 刘燕,泾惠渠灌区地下水位动态变化特征及成因分析[J],人民长江,2010,41(8):100-103.
- [6] 王文胜.河川径流水文干旱分析[J].甘肃农业大学学报,1999,34(2):184-187.
- [7] 张翔,夏军,贾绍凤.干旱期水安全及其风险评价研究[J].水利学报,2005,36(9):1138-1142.
- [8] 李勋贵.水资源系统耦合理论及其在泾河水文水资源研究中的应用[D].西安:长安大学,2008:95-100.
- [9] 陈进,黄薇.长江的生态流量问题[J].长江科学院院报,2007 24(6):1-5.
- [10] 王义民,孙佳宁,畅建霞,等.考虑“三条红线”的渭河流域(陕西段)水量水质联合调控研究[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(5):861-865.
- [11] Karim K, Gubbels M E, Goulter I C. Review of determination of instream flow requirements with special application to Australia. Journal of the American Water Resources Association, 1995, 31: 1063 - 1077.
- [12] Palau A, Alcazar J. The basic flow: an alternative approach to calculate minimum environmental instream flows. Proceedings of the 2nd International Symposium on Habitat Hydraulics, Leclerc M, Capra H, Valentin S, Boudreault A (eds), 1996: 547-558. Quebec, Canada.
- [13] 李勋贵,王乃昂,魏霞.高含沙河流汛期弃水量确定的分级最大值法[J].资源科学,2010,32(6):1213-1219.
- [14] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.全国水资源综合规划(2010-2030 年)[EB/OL].(2018-1-1)[2018-1-1],http://www.ldbdoc.cn/p-2066729.html.