

宝鸡峡引水对渭河水文规律及生态系统的影响

张洪波¹, 辛 琛², 王义民³, 黄 强³

(1 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2 陕西秦安河流研究所, 陕西 西安 710016;

3 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048)

[摘 要] **【目的】**研究水文变化与河流生态系统的响应关系,通过对生态系统进行诊断,为河流生态系统的研究提供新途径。**【方法】**对渭河 44 年(1960—2005 年)的水文资料和宝鸡峡灌区 32 年(1972—2005 年)的引水资料进行统计与分析,探讨引水对渭河水文规律的影响,并采用变化范围法(RVA)对 32 个水文改变指标(IHA)进行统计,研究引水对渭河水文情势及生态系统的影响。**【结果】**引水导致渭河年平均流量较天然径流明显减少,且枯水年份尤为突出,32 年中有 8 年年平均流量低于生态基流量;输沙量较引水前减少了 80%强;且对河流的枯季月流量、年最小流量平均值、年最小 1 日流量发生时间、年低流量发生次数及平均延时、流量平均增加率等影响较大。**【结论】**宝鸡峡灌区引水对渭河的水文规律及生态系统的影响较大,尤其是低流量出现的频率和时间过多,严重影响河流的功能实现,迫切需要开展维持渭河河流健康生命的相关研究,在保证河流生态系统安全的同时,支持和改善灌区建设,以确保粮食稳定和区域社会的安全发展。

[关键词] 宝鸡峡引水;渭河;水文规律;水文情势;生态系统

[中图分类号] P333.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)04-0226-09

Influence of drawing water to Baojixia irrigation area on hydrologic regularity and ecosystem of Weihe River

ZHANG Hong-bo¹, XIN Chen², WANG Yi-min³, HUANG Qiang³

(1 College of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2 Shaanxi Qin'an River Institute, Xi'an, Shaanxi 710016, China; 3 Key Lab of Northwest Water Resources and

Environment Ecology of MOE at XAUT, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: **【Objective】** A new approach appeared to settle the above problem, that to diagnose the river ecosystem by analyzing the response relationship between hydrological change and river ecosystem. **【Method】** Using 44 years' (1960—2005) historical hydrological data and 32 years' (1972—2005) drawing water data for Baojixia irrigation area, the influence of water diversion on hydrologic regularity of Weihe River was studied. Then with RVA method adopted for statistical analysis of 32 IHA indexes, the influence of water diversion on flow regime and ecosystem of Weihe River was also analyzed in this paper. **【Result】** Drawing water from Weihe River led to the decrease of its annual discharge and more strongly in dry years, causing the average discharge lower than the basic flow of Weihe River in 8 years time of the past 32 years. In addition it impacted the sediment discharge, cutting 80 percent. And an obvious change occurred on monthly water condition in the dry season, annual minimal mean runoff, julian date of each 1-day annual, number of low pulses and its median duration and rise rate after drawing water. **【Conclusion】** The results indicated that water diversion to Baojixia irrigation area has a great effect on hydrologic regularity and ecosystem safety of Weihe River, especially on functions related to low flow. And related research on keeping

* [收稿日期] 2009-09-26

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50709027);水利部公益性行业专项(2007SHZ1-19)

[作者简介] 张洪波(1979—),男,辽宁沈阳人,讲师,博士后,主要从事河流健康与生态调度研究。E-mail:hbzhang@chd.edu.cn

river healthy is urgently needed to assist supporting and improving irrigation district construction to ensure river ecosystem, to guard the stable development of grain production and safety of regional development.

Key words: Drawing water to Baojixia area; Weihe River; hydrologic regularity; flow regime; ecosystem

水是人类与自然生态系统联系的纽带,良好的生态水文关系是维持流域或区域水循环过程的健全性与天然水资源更新再生的关键,对促进社会经济可持续发展,实现人水和谐相处具有重要的意义。然而,随着经济社会发展对水资源需求的日益增加,人类对河流进行了过度攫取,导致河流生态水文系统的健康状况不断恶化^[1]。有关人类活动与径流响应关系的研究已取得很多成果,分别从气候变化、水循环过程、社会系统损耗、下垫面变化等多个因素对河流径流的影响方面进行了有益的探索,旨在识别和考量人类活动对河流系统的影响^[2]。但限于目前的科学技术和生态检测手段,人们尚无法直接大规模观测河流生态系统的变化与演变过程,因此对于人类活动与河流生态系统变化间响应关系的研究,进展一直比较缓慢。

渭河流域水资源开发利用历史悠久,对关中地区的经济发展和社会进步起到了重要作用。近年来,由于受降水减少、水土保持工程建设以及工农业用水增加等方面的影响,渭河出现了河道萎缩、河槽淤积、水污染加剧、水资源供需矛盾突出等问题,致使渭河健康状况严重恶化,并已成为地区经济社会可持续发展的主要制约因素。宝鸡峡引渭灌区位于陕西省关中平原西部且与甘肃毗邻,既是渭河流域五大灌区之一,也是陕西省最大的国有灌区和主要的粮食生产基地。灌区按自然地形分塬上、塬下两大供水系统。塬下渭惠渠 1959 年建成,塬上宝鸡峡 1971 年通水。由于共引渭河水源,1975 年宝鸡峡与

渭惠渠合并,形成了现在的引水结构。该工程自建成以来,对解决渭北高原严重的干旱问题,保障和改善灌区人民生活发挥了巨大作用。然而,宝鸡峡灌区在解决自身用水需求的同时,也对渭河的河流健康状况产生了深刻影响,尤其是在枯水期,河流系统遭到严重破坏^[3]。本研究以渭河为研究对象,从水文规律、水文情势以及生态系统响应 3 个方面,研究了宝鸡峡灌区引水对渭河的影响,探讨渭河水文变化与河流生态系统间的响应关系,并对人类活动引发的生态系统变化状态进行诊断,试图从水文学的角度,突破生态监测数据获取上的瓶颈,为人类活动与河流生态系统变化间的响应关系研究提供一条新途径。

1 研究对象

宝鸡峡灌区的供给水源由降雨、渭河引水和提取地下水 3 部分组成。灌区平均年降水量为 537~651 mm,渭河来水年径流量为 24 亿 m³,灌溉引水 4~7 亿 m³;灌区年可提取地下水 1.5 亿 m³ 以上,累计年可供水量为 8.11 亿 m³。宝鸡峡引渭灌区自 1972 年开始从渭河引水,渠首位于渭河中游林家村附近、渭河峡谷出口处以上^[1],设计引水流量为 95 m³/s。

对宝鸡峡灌区 1972—2005 年 32 年(缺 2001、2002 年)的引水资料进行统计分析发现,宝鸡峡灌区多年平均引水 5.8 亿 m³,相应的平均引水流量为 18.35 m³/s,各月引水数值不稳定,且无明显规律性(图 1)。

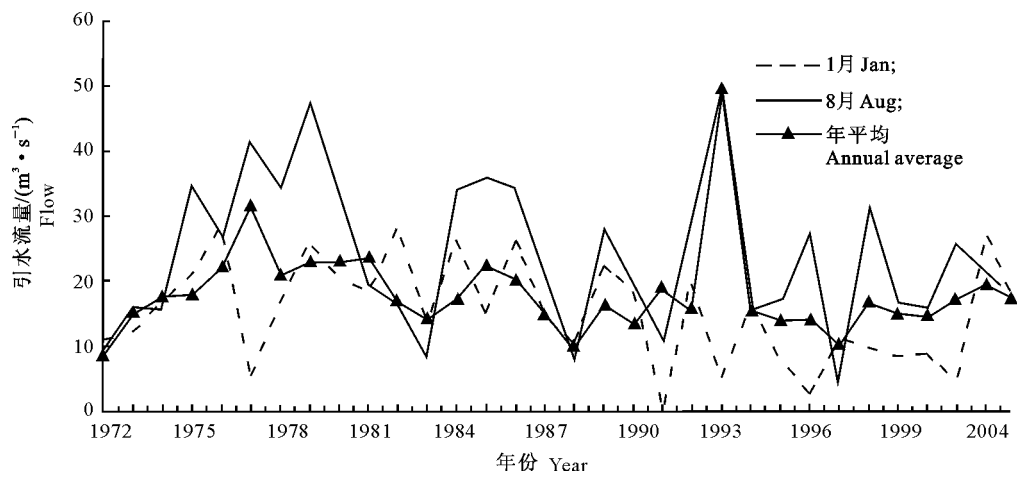


图 1 1972—2005 年宝鸡峡灌区 1 月、8 月和年均引水流量的变化

Fig. 1 Variety of average drawing water in Jan, Aug and annual during 1972—2005

灌区引水灌溉工程主要是利用渠首加闸加坝水库、小水河水库、王家崖水库、信义沟水库、大北沟水库和泔河水库,共 6 座渠库结合水利工程引蓄非灌溉季节的渭河河水。在灌溉时期水源不足时,抽库水入渠以缓解旱情。因此,灌溉引水在年内时间的分布上并未留有明显的灌溉制度痕迹,大体趋势为年内分布比较均匀,汛期略有增加。年际变化相对趋于平稳,引渭起始阶段水量逐年递增,1975 年以后趋于平稳,其中 1993 年引水较多,但主要集中在汛期。

由于渭河径流呈明显的年内丰枯变化,因此相

近的引水条件对渭河水文系统的影响也存在明显差异。经统计分析,由表 1 可见,宝鸡峡灌区引水主要影响渭河的枯水季节,即 12 月到次年 4 月,其引水量占天然径流量的 60% 以上,其中 12、1 和 2 月均达到约 80%,造成下游几近断流。而相对于汛期,引水量占天然径流量的比例基本保持在 50% 以下,加之退水总体表现为汛期引水对渭河水文系统影响不大。由图 2 可见超过 90% 引水比例的极端事件在年内各月的分布情况,该结果与引水的总体趋势基本相当。

表 1 引渭水量占渭河多年平均年径流量的比例及其在年内的分布情况

Table 1 Distribution of average annual drawing water percentile of Weihe River flow

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
引水量占天然径流量的比例/% Drawing water/ Natural water	82.36	79.63	73.86	61.06	47.02	47.03	36.22	36.30	30.47	33.26	46.63	82.23

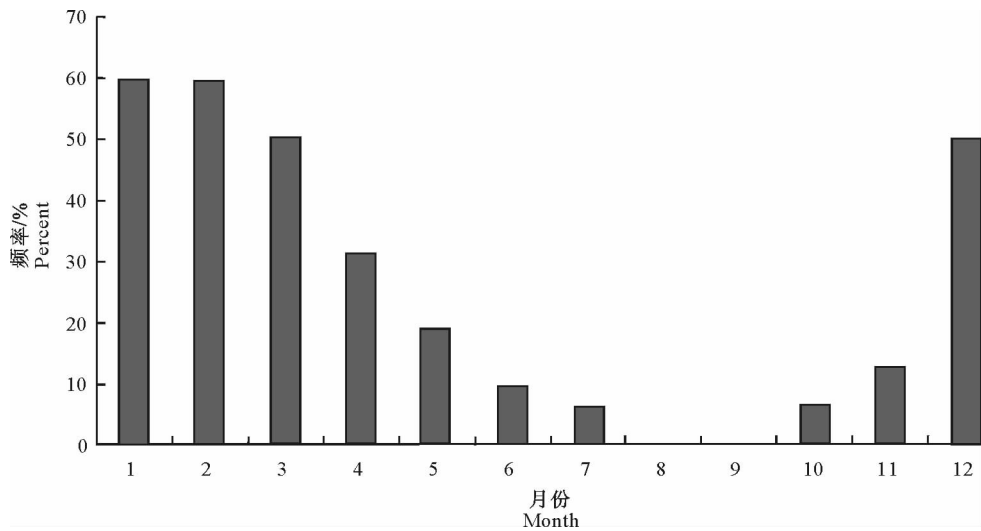


图 2 1960—2005 年引水比例超过 90% 极端事件的发生频率及其在年内的分布

Fig. 2 Frequency distribution of the drawing water exceeding 90 percent of river flow during 1960–2005

2 研究方法

20 世纪 90 年代,南非和澳大利亚科学家对维持河流生态水流问题的研究跳出了最小河流流量的思路,认为天然水流在河流生态系统中起着至关重要的作用,提出应将天然水流流态作为行动指南^[4]。1997 年,一些学者提出了河流水文情势的概念,并以与生态相关的流量特征统计分析为基础,从用量、时间、频率、延时和变化率 5 个方面的水文改变指标(Indicators of Hydrologic Alteration,简称 IHA)来描述河流水文情势^[5](表 2),并采用变化范围法^[6](Range of Variability Approach,简称 RVA)对不同时间的河流水文情势进行对比,分析河流流量受水

利工程建设及运行(如引水工程)的影响程度。RVA 评价方法以各指标的平均值加减标准偏差或以各指标发生机率的 75% 及 25% 的值作为各个指标的上下限,称为 RVA 阈值^[7-8]。如果水利工程建设后,受影响流量纪录的 IHA 落在 RVA 阈值内的比率,与水利工程建设前的比率相同,则表示水利设施建设与运行对河流影响轻微,仍然保持有自然的流量变化范围;但若受影响的流量纪录落在 RVA 阈值内的比率远大于或远小于水利工程建设前的比率,则表示水利设施已经改变了原有河流的流量变化特性,此改变将进一步对河流水域生态系统产生严重的负面影响^[9-11]。

表 2 水文改变指标及参数特征
Table 2 Indexes of IHA and its parameter characters

组别 Group	内容 Context	特性 Character	指标序号 Index	IHA
1	各月流量 Magnitude of monthly water conditions	量、延时 Magnitude, duration	1~12	各月流量平均值 Mean or median value for each calendar month
			13	年最小 1 日流量平均值 Annual minima,1-day means
			14	年最大 1 日流量平均值 Annual maxima,1-day means
			15	年最小 3 日流量平均值 Annual minima,3-day means
2	年极端流量、延时 Magnitude and duration of annual extreme water condition	频率、延时 Frequency, duration	16	年最大 3 日流量平均值 Annual maxima,3-day means
			17	年最小 7 日流量平均值 Annual minima,7-day means
			18	年最大 7 日流量平均值 Annual maxima,7-day means
			19	年最小 30 日流量平均值 Annual minima,30-day means
			20	年最大 30 日流量平均值 Annual maxima,30-day means
			21	年最小 90 日流量平均值 Annual minima,90-day means
			22	年最大 90 日流量平均值 Annual maxima,90-day means
			23	年最小 7 日流量平均值/年平均流量 7-day minimum flow/mean flow for year
			24	年最小 1 日流量发生时间 Julian date of each annual 1-day minimum
			25	年最大 1 日流量发生时间 Julian date of each annual 1-day maximum
4	高、低流量出现的频率及延时 Frequency and duration of high and low pulse	频率、延时 Frequency, duration	26	每年发生低流量的次数 Number of low pulses within each water year
			27	每年发生高流量的次数 Number of high pulses within each water year
			28	低流量平均延时 Mean or median duration of low pulses
			29	高流量平均延时 Mean or median duration of high pulses
5	流量变化改变率及频率 Rate and frequency of water condition changes	频率、变化率 Frequency, rate	30	流量平均减少率 Fall rates
			31	流量平均增加率 Rise rates
			32	每年流量逆转次数 Number of hydrologic reversals

3 结果与分析

3.1 宝鸡峡灌区引水对渭河径流规律的影响

根据渭河林家村站 1960—2005 年 44 年(缺 2001,2002 年)的实测径流资料,应用 Mann-Kendall

趋势检验法^[12]对渭河上游径流规律进行分析,图 3 结果显示,Mann-Kendall 法统计检验值为-3.727,通过可信度为 99%的显著性检验,表明在近 50 年以来,渭河上游的年径流量呈现出明显的减少趋势。

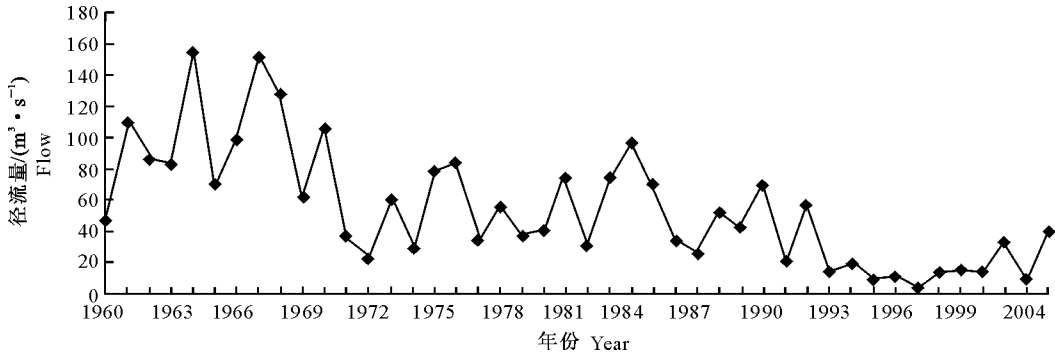


图 3 1960—2005 年渭河林家村站年径流的演变过程

Fig. 3 Annual flow changes at Linjiacun station in the Weihe River during 1960—2005

近年来,许多学者对导致渭河径流锐减趋势的自然因素与人为因素进行了研究,结果表明,从 20 世纪 70 年代开始,非降水因素的贡献率逐渐增强,成为影响渭河上游天然径流量减少的主要因素^[2]。由此可见,宝鸡峡灌区引渭工程对渭河径流有明显的影响。为了验证这种影响的客观存在,本研究应用时间序列累计值相关曲线法^[13],对渭河林家村站

的实测径流序列进行分析,所得结果见图 4。由图 4 可见,渭河林家村站的径流序列中出现 2 个突变点,将曲线分成 3 段。第 1 个突变点发生在 1971—1972 年,正值宝鸡峡灌区开始引渭的时期;第 2 个突变点发生在 1991—1992 年,可能是由于上游大面积的梯田和水保工程建设引起径流减少所致。

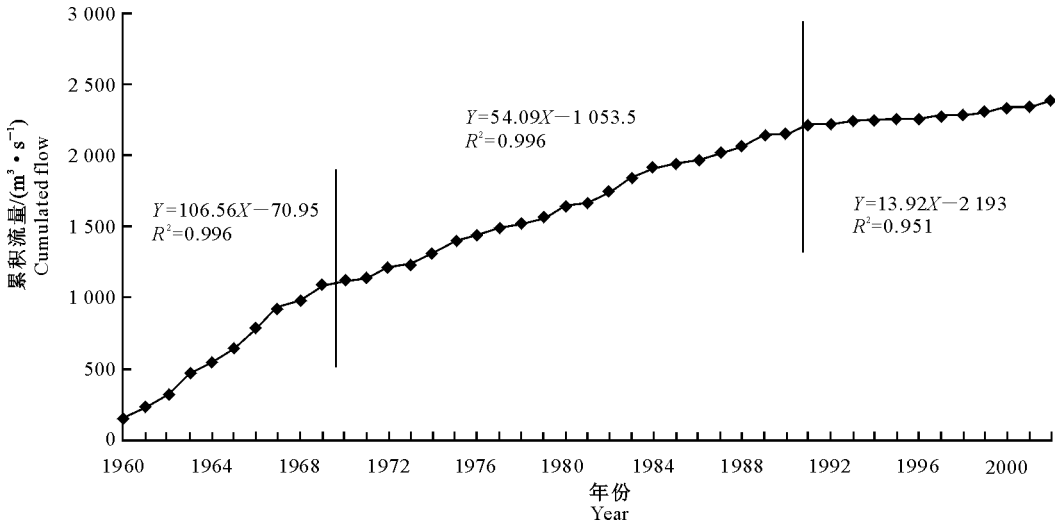


图 4 1960—2005 年渭河林家村站径流突变点分析

Fig. 4 Analysis of flow catastrophe point at Linjiacun station in the Weihe River during 1960–2005

随着渭河径流演变趋势的变化,人类需求与河流自身生命之间的水冲突日益突出。引渭后,20 世纪 90 年代,渭河林家村站的平均实测年径流量仅为 $10.72 \times 10^8 \text{ m}^3$,相当于引渭前 20 世纪 60 年代年平均径流量的 60%,特别是 1995—2000 年,连续 5 年

均不足 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$,严重影响了渭河自身的生命安全和流域社会经济发展的稳定。图 5 显示了 1972—2005 年渭河林家村站引水与不引水情况下年平均流量的对比情况。

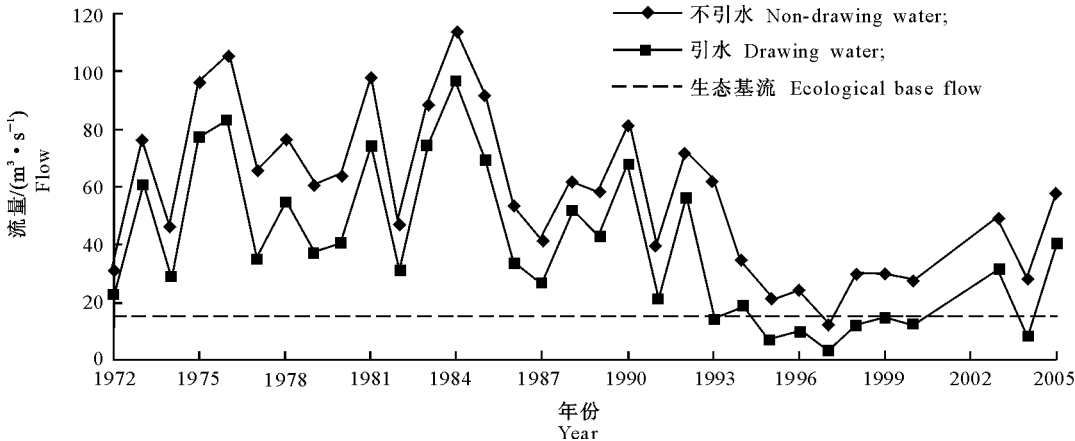


图 5 引水后渭河林家村站实测年平均流量与天然径流量的比较

Fig. 5 Measured annual runoff and natural runoff after drawing water at Linjiacun station

由图 5 可见,开始引水后,渭河林家村断面的年平均流量较天然径流明显减少,且枯水年份表现得尤为明显。将年平均流量与通过 Tennant 方法获得

的生态基流量(30%)进行对比后发现,引水后林家村断面的年平均流量中有 8 年处于生态基流量以下,且均集中在最近 15 年内,严重威胁着渭河河流

的生态安全和沿河经济带的健康、稳定发展^[3]。

渭河是一条多沙河流,多年平均输沙量为 1.47 亿 t,实测年最大输沙量为 3.99 亿 t(1973 年),输沙量年内分配极不平衡,汛期(6—8 月)沙量较大,占年沙量的 76.3%^[12],且沙量以上游来沙为主。沉积在河道的泥沙,一般都是借助水流动力输沙入黄河,其中输沙水量、流速等非常关键。然而由于灌区引水,渭河林家村站断面的实测径流量明显减少,流速

降低,河流挟沙能力下降。通过对 1960—2005 年林家村断面年输沙量资料的统计与分析,由图 6 可见,1972 年(宝鸡峡灌区引水)以后,渭河林家村站断面的输沙量明显减少,特别是在 1993 年以后,径流的减少引发了更严重的输沙问题,年平均输沙量仅为 0.31 亿 t,较引水前的平均输沙量(1.925 亿 t)减少了 80%强。

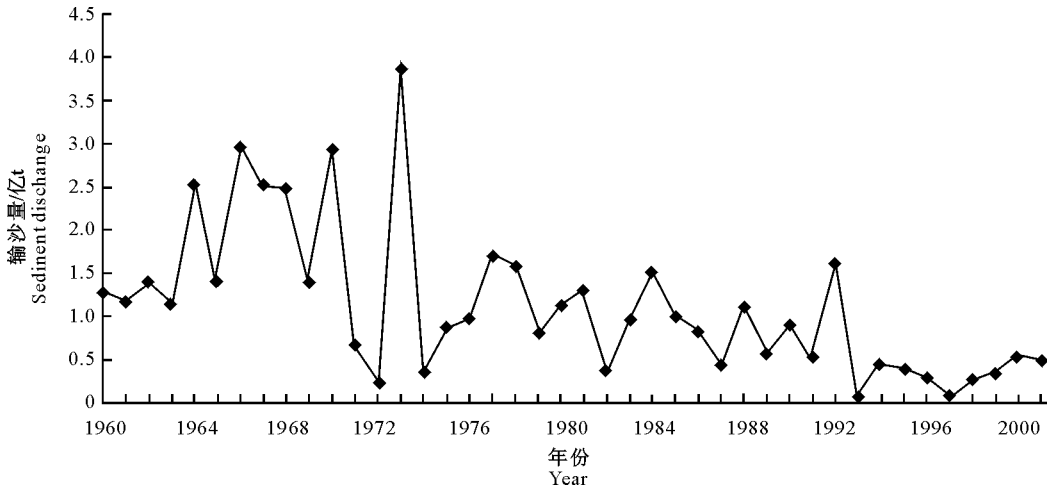


图 6 1960—2005 年渭河林家村站输沙量的年际分布

Fig. 6 Distribution of sediment discharge at Linjiacun station during 1960—2005

3.2 宝鸡峡灌区引水对渭河水文情势的影响

选取渭河林家村水文站 1960—2005 年共 44 年的实测径流资料,采用 RVA 法评价宝鸡峡灌区引渭与否 2 种情形下特征值的变化情况,进而分析宝鸡峡灌区引水对渭河水文情势的影响^[9-10]。

3.2.1 月流量变化 由于宝鸡峡灌区采用的是蓄引相结合的方式,因此引渭水量在年内的分布比较平均,基本保持在 15~25 m³/s。通过 RVA 计算,

以渭河天然径流条件为基准,对引渭后的实测径流进行评估,结果发现,宝鸡峡灌区引渭后,11,12,2 和 3 月的月平均流量较天然径流产生了较大改变,而汛期 5—10 月的月平均流量变化较小,这主要是由于引渭时在相当引水流量下,其对枯水期的影响相对更大一些,特别是在枯水或特枯年份。图 7 显示了渭河林家村站具有代表性的 2 和 7 月月平均流量的 RVA 评估结果。

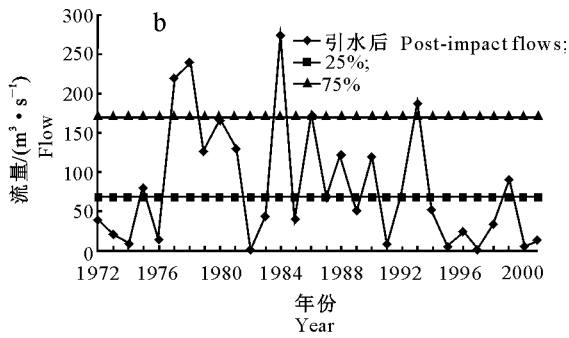
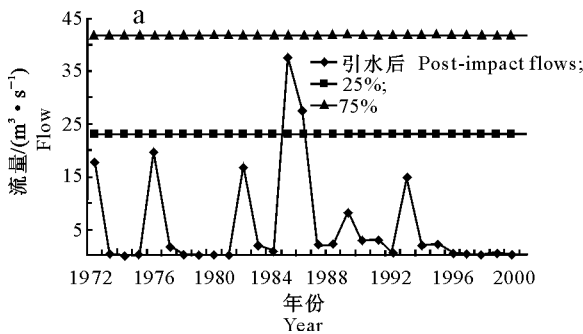


图 7 引渭后渭河林家村站 2 月(a)、7 月(b) 月平均流量的年际变化

Fig. 7 Variety of average month flow in Feb (a) and Jul (b) in different years before and after drawing water at Linjiacun station

3.2.2 年极端流量变化 从年极端流量的统计结果可以发现,11 个年极端流量改变指标中,涉及年

最小流量的指标均产生了高度改变,而年最大流量相关指标的改变则基本在中度以下,可见宝鸡峡灌

区引渭工程明显改变了河流原有的极值变化过程，特别是枯水流量进一步减小，甚至接近断流，而对于年最大流量的影响则相对较小。宝鸡峡灌区引渭工程实施后，年最小流量明显变小，且短历时最小流量指标较长历时最小流量指标的变化更为显著，其中以最小 1 日流量减少最为明显，除了 1987 年以外，其他年份最小 1 日流量均小于 $1\text{ m}^3/\text{s}$ (图 8-a)，河道几乎干涸，生态系统受损严重；而年最大流量也有明

显减少，且以长历时最大流量的变化更为显著，其中年最大 90 日流量的变化最大(图 8-b)，但仍较最小流量指标的变化程度小。可见，宝鸡峡灌区通过蓄灌结合的方式，冬灌、春灌及灌前蓄水基本使枯水季节的来水大部分被拦蓄或引走。然而由于渭河干流尚无年调节水库，不能有效实现渭河流域水资源的年内调节，因此引渭造成的影响在短期内还难以有较大缓解。

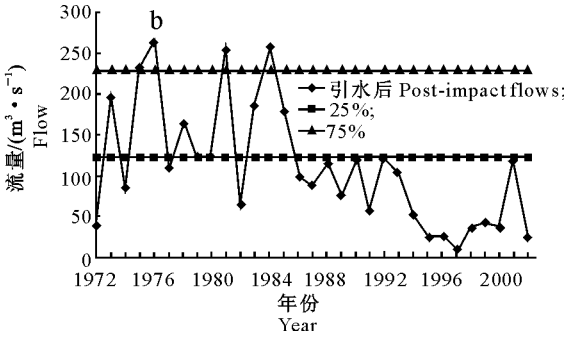
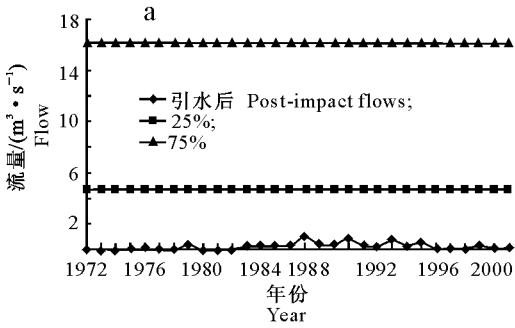


图 8 引渭后渭河林家村站年最小 1 日(a)和年最大 90 日(b)平均流量的变化
Fig. 8 Variety of average minimum one day flow (a) and maximum 90 days (b) in different years before and after drawing water at Linjiacun station

3.2.3 年极端流量发生时间 引渭后，年最大 1 日流量的发生时间变化不大，大部分仍集中在汛期的 7—9 月，但期内分布不均，跳跃较为明显；年最小 1 日流量出现时间与引渭前差异较大，波动范围较广，落点在枯水期呈现不规则状态，1990 年以前多发生在 1—4 月，而在 1990 年以后于汛末出现的几率明显增加，这可能与灌区或水库汛末蓄水有关。

知，引渭后，每年发生低流量的次数显著增加，而其平均延时有所减少；每年发生高流量的次数稍有降低，但其平均延时变化不大。由于宝鸡峡灌区引水灌溉，原来河道中的最小下泄流量必定减少，但由于引水操作受人为干预较大，引水一旦减少或停止，延时统计就会终止，从而限制了长时间低流量情况的发生。

3.2.4 高、低流量出现的频率及延时 由图 9 可

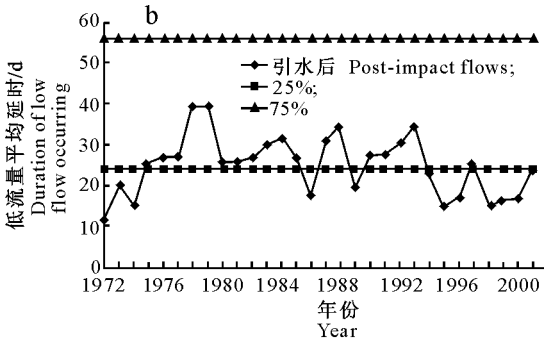
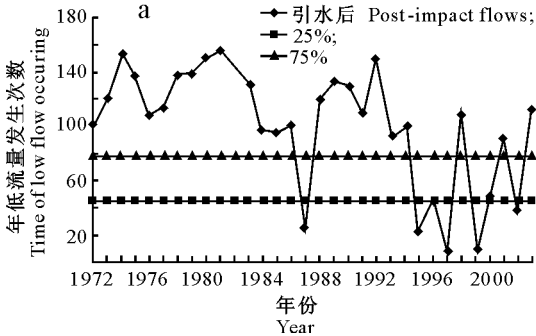


图 9 引渭后渭河林家村站每年发生低流量的次数(a)及低流量平均延时(b)的变化

Fig. 9 Variety of annual low flow appeared times (a) and duration (b) before and after drawing water at Linjiacun station

3.2.5 流量变化改变率及频率 对流量变化改变率及频率的统计分析发现，引渭后流量平均减少率变化较小，但频率稍有增大；流量平均增加率呈显著上升趋势；每年流量逆转次数有所增加，且均高于引渭前水平，这主要是由于灌区频繁引水所致。

度^[9]的综合计算可知，宝鸡峡灌区引水后，渭河的水文情势发生了高度改变。

3.3 宝鸡峡灌区引水对渭河生态系统的影响

从 3.2 节对 IHA 指标的评价分析中发现，宝鸡峡灌区引渭工程对渭河水文系统的枯季月流量、年最小流量平均值、年最小 1 日流量发生时间、年低流

依据 32 个指标的评价结果，通过整体水文改变

量发生次数及平均延时、流量平均增加率等均产生了深刻的影响。根据这些指标所反映的生态系统的响应机理^[12-14],可以分析得出宝鸡峡灌区引渭工程对渭河生态系统的影响表现在以下几个方面:(1)由于引水后不同月份的丰枯特征发生较大改变,这将对下游河道生物的栖息环境及迁徙、洄游等产生显著影响。(2)由于引渭后流量极值波动较大,且年际波动显著,河流生态系统稳定性变差,对河道地貌及自然栖息地的构建影响较大。另由于最大极值(洪峰)变小,河道和滞洪区之间的养分输运不畅,将严重影响滞洪区内水生生物与周边植被的生长。(3)极端流量的发生一般都伴随着生物特别是鱼类的洄游产卵和繁殖等行为,极值发生时间的不稳定,会严重影响生物繁殖期内的行为及其栖息环境。(4)高、低流量是构造河流生境不可或缺的因素,低流量频繁增加,可能会导致河流构造河道功能的丧失,河岸植被覆盖减少,对滞洪区水生生物的支持、泥沙运输、渠道结构、底层扰动等功能的满足程度下降等。(5)流量的逆转次数与河流生态环境的变化周期有紧密的联系,频繁流量逆转可能会对一些植物和有机物的生长产生较大的影响。

由于渭河径流较少,河流环境容量紧缩,工业污染和生活污染源不断侵蚀渭河。自上世纪 70 年代起,渭河道内生物量锐减;到上世纪 90 年代,渭河内鱼虾等水生动物几乎绝迹,生态系统诊断的微观对象严重缺乏,而国内关于渭河流域生态系统方面的研究几乎还是空白。文献[15]对渭河咸阳段冬迁野鸭数量的分析结果表明,上世纪 70 年代初,由于人类活动的影响,鱼、虾、蟹、河蚌等水生动物数量迅速减少,野鸭等候鸟赖以生存的生态环境受到严重破坏,短短几年间野鸭等候鸟就从渭河流域消失了。究其原因主要是因为野鸭等候鸟的食源不足和栖息地消失所致,这与本研究结论类似。

4 结论与展望

综合以上分析,可得出以下结论:(1)宝鸡峡灌区引水对渭河水文系统变化规律和水文情势的影响是客观存在的,其是导致渭河下游径流减少的关键因素之一。(2)引水后,渭河年径流量较天然径流明显减少,且枯水年份尤为明显,32 年中有 8 年的年平均流量低于生态基流量。(3)由于灌区引水,渭河林家村站断面的实测径流量明显减少,流速降低,河流挟沙能力下降,输沙量较引水前减少了 80% 强。(4)引水对渭河水文系统的枯季月流量、年最小流量

平均值、年最小 1 日流量发生时间、年低流量发生次数及平均延时、流量平均增加率等产生了深刻影响。(5)引水会对渭河河道地貌及自然栖息地的构建、养分输运、生物繁殖期内的行为过程等生态产生影响。

本研究初步探讨了宝鸡峡灌区引水对渭河(林家村站断面)水文规律和生态系统的影响,但研究中由于生态系统监测资料的缺乏,在水文情势变化对河流生态系统影响的实证基础方面略有不足。下一步的研究工作将会落实到野外生态监测与资料收集方面,通过水文指标与生态状态的响应关系分析,探讨生态水文响应机制的更深层次的机理基础。此外,可以依据本研究的结果,积极改善灌溉制度,缓解农业用水与河流健康维护间的矛盾关系,并适时在渭河流域开展面向生态的水资源调控工作,通过调节水文过程,削弱宝鸡峡引水对下游生态环境的影响,改善渭河生态环境现状,实现人水和谐的良好局面。

[参考文献]

- [1] 马 斌. 基于信息技术的渭河流域水资源管理研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
Ma B. The study on water resources management of Weihe river basin based on information techniques [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [2] 王西琴, 张 远, 张艳会. 渭河上游天然径流变化及其自然与人为因素影响贡献量 [J]. 自然资源学报, 2006, 21(6): 981-990.
Wang X Q, Zhang Y, Zhang Y H. Change of natural runoff and contribution of the natural and artificial factors to the upper reaches of Weihe River [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(6): 981-990. (in Chinese)
- [3] 王雁林, 王文科, 杨泽元. 陕西省渭河流域生态环境需水量探讨 [J]. 自然资源学报, 2004, 19(1): 70-78.
Wang Y L, Wang W K, Yang Z Y. Discussion on eco-environmental water demand in Weihe River basin of Shaanxi province [J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(1): 70-78. (in Chinese)
- [4] Pistel S, Richter B D. 河流生命: 为人类和自然管理水 [M]. 武会先, 王万战, 宋学东, 译. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
Pistel S, Richter B D. Rivers for life: managing water for people and nature [M]. Wu H X, Wang W Z, Song X D, Translated. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Publishing House, 2005. (in Chinese)
- [5] Mathews R, Richter B D. Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting [J]. Journal of American Water Resources Association, 2007, 43(6): 1400-1413.
- [6] Poff N L, Allan J D, Bain M B, et al. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration [J]. Bioscience, 1997, 47(11): 22-29.

[7] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. Regulated River: Research and Management, 1998, 14(4): 329-340.

[8] Rosenberg D M, McCully P, Pringle C M. Global-scale environmental effects of hydrological alterations: Introduction [J]. Bio-science, 2000, 50(9): 746-751.

[9] Shiau J T, Wu F C. Feasible diversion and stream flow release using range of variability approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130(5): 395-404.

[10] Shiau J T, Wu F C. Compromise programming methodology for determining stream flow under multi-objective water allocation criteria [J]. Journal of American Water Resources Association, 2006, 42(5): 1179-1191.

[11] 张洪波, 王义民, 黄 强. 基于 RVA 的水库工程对河流水文情势的影响评价 [J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(3): 262-267.

Zhang H B, Wang Y M, Huang Q. Effects of reservoir engineering based on RVA upon river flow regime [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 24(3): 262-267. (in Chinese)

[12] 张洪波. 黄河干流生态水文效应与水库生态调度研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2009.

Zhang H B. Study on eco-hydrological effect and reservoir ecological regulation on the main Yellow River [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. (in Chinese)

[13] 钮本良. 黄河流域 1919—1997 年天然径流量系列特性分析 [J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2002, 14(1): 9-12.

Niu B L. Natural runoff characteristic analysis in the Yellow River Basin during 1919—1997 [J]. Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute, 2002, 14(1): 9-12. (in Chinese)

[14] 李 翀, 廖文根, 彭 静. 宜昌站 1900—2004 年生态水文特征变化 [J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 76-81.

Li C, Liao W G, Peng J. Assessment of eco-hydrological alteration (1900—2004) in Yichang Gauge of the Yangtze river [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(1): 76-81. (in Chinese)

[15] 严少普. 渭河流域生态环境对野鸭数量分布的影响 [J]. 安全与环境学报, 2003, 3(4): 53-54.

Yan S P. Influence of eco-environment change in Weihe river valley on distribution of wild duck [J]. Journal of Safety and Environment, 2003, 3(4): 53-54. (in Chinese)

(上接第 225 页)

[8] 李久生, 张建君, 饶敏杰, 等. 滴灌施肥灌溉的水氮运移数学模拟及试验验证 [J]. 水利学报, 2005, 36(8): 932-938.

Li J S, Zhang J J, Rao M J, et al. Model verification of water and nitrate transport from a surface point source [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(8): 932-938. (in Chinese)

[9] Skaggs T H, Trout T J, Simunek J, et al. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2004, 8(7): 304-310.

[10] 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚, 等. 滴灌入渗土壤水分分布的数值研究 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 91-94.

Zhang Z H, Cai H J, Yang R Y, et al. The water content distribution of trickle source infiltration [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(3): 91-94. (in Chinese)

[11] Šimunek, M van Genuchten, M Sejna. The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: Technical manual version 1. 0 [M]. Calif: PC -Progress, Prague; Czech Republic, 2006.

[12] Šimunek, M Sejna. The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: User manual version 1. 0 [M]. Calif: PC-Progress, Prague; Czech Republic, 2007.

[13] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.

Huang C Y. Soil science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. (in Chinese)