

黄河下游水资源转化结构及其变化规律*

倪晋仁 王裕东 钱征寒 李天宏

(北京大学环境工程系水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

赵业安

(黄河水利委员会水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要 在黄河下游河流生态环境需水量和河流系统功能研究的基础上, 结合研究区域的实际情况, 针对水资源在河流系统中的不同服务目标, 将通过黄河下游各主要水文断面的水资源划分为生态环境水、资源水和灾害水 3 个组成部分(简称“三水”), 并分别对“三水”的概念及其在实践中的意义进行了阐述. 通过对 1950~2001 年逐日水文数据的整理分析, 计算了每年的“三水”数量, 探讨了 50 多年来“三水”的相互转化情况及其变化规律. 结果表明, 自 20 世纪 50 年代以来, 尽管水资源优先用于满足河流系统功能最基本的需要, 但可用生态环境水在比例增加的同时水量却不断减少, 与黄河下游河道最小生态环境需水量的差值不断增大; 而潜在可利用的资源水无论是数量还是比例均呈明显减少趋势. 20 世纪 90 年代以来, 沿岸实际需水量已经超过潜在可利用的资源水量而需动用早已不足的生态环境水, 使河流系统正常功能进一步受损、河道日益萎缩, 进而导致灾害水在总水量大幅减少的情况下其比例及潜在危害仍无明显减小.

关键词 黄河下游 水资源转化结构 生态环境水 资源水 灾害水

自 1986 年以来, 黄河下游出现连续的枯水时期, 而水利设施的调节能力还不足以使水资源在全流域得到统一调度和控制利用, 这导致下游河道在枯水期经常发生断流, 水资源供需矛盾日益突出, 从而给下游地区的工农业生产、居民生活以及河流生态环境功能的维护带来严重影响. 此外, 尽管上游来水偏少, 但泥沙在下游河槽严重淤积, 致使河道排洪能力下降, 漫滩几率增大, 水患威胁反而加重.

2004-01-15 收稿, 2004-04-27 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043603)资助

水资源可以按照量算要求、形成条件、存在形式以及利用方式等进行分类^[1], 在一定分类原则下各种水量的组合形成一定的结构. 由于供需矛盾日益突出, 在水资源匮乏地区许多研究都集中在不同用户间的水量分配, 如Tumbare^[2]研究了水资源在非洲赞比西河流域内各个国家间的公平分配, 张士锋等人^[3]对黄河流域上中下游地区及不同行业间的用水结构进行了分析. 但这些研究都是将河流作为水资源提供者, 而很少考虑维持河流系统正常功能的需水要求. 事实上, 河道水流既要满足河流最基本的生态环境需求, 也要为沿岸居民提供生产生活用水, 在大流量下还可能形成洪水灾害, 这些对应于不同服务对象或功能的组分在水资源总量中分别占据一定的数量和比例, 形成一定的水资源结构; 另一方面, 由于各组分可能在一定条件下相互转化, 并带来河流系统功能健康状况的改变, 因而可以把处于变化和转化过程中的水资源结构叫做“水资源转化结构”, 以此来反映河流系统功能的动态变化.

近几十年来, 黄河上游来水及河道冲淤状况变化剧烈, 致使下游水资源转化结构发生相应改变, 因此有必要对水资源转化结构及其变化规律进行深入的探讨与分析. 要实现水资源的可持续利用, 必须首先满足河流自身最基本生态环境需求, 在此基础上才能考虑河流能够为沿岸社会经济发展提供的潜在可利用水量, 并尽量避免在汛期时产生可能造成洪水的灾害水量. 因此, 在生态环境需水量和河流系统功能研究的基础上^[4,5], 可以将河流中的水资源划分为生态环境水、资源水和灾害水(以下简称“三水”), 并以年为主要尺度研究“三水”随时间的变化规律.

为协调河流系统的各项功能、实现水资源的可持续利用, 河道在特定的时间和空间内必须保持某特定水平的水量, 生态环境水就是指当年可用于满足河流系统功能最低临界流量要求的水资源. 当流量小于最低临界流量时, 维持河流系统正常功能所需的临界水量得不到完全满足, 河流系统诸项(或单项)功能受损甚至暂时或永久地丧失^[4], 为尽量保护河流生态环境, 应将河流当时的全部过水量都看作生态环境水量. 生态环境水量的多少反映了河流维持最基本生态环境功能所需水量得到满足的程度.

河流是沿岸工农业生产和居民生活用水的主要来源, 而资源水是指当年在尽量不损害河流系统功能且不会导致洪水灾害的流量情况下, 河流潜在的可供沿岸社会经济发展利用的水资源. 因此, 资源水量是以优先满足河流系统功能基本需水为前提的. 当流量低于最低临界流量时, 河流当时的全部过水量都应看作生态环境水, 此时资源水量应该为零, 任何引水都会损害河流系统基本功能. 此外, 资源水量的多少也受河道过流能力的限制, 超过河道过流能力的大流量水流并不能成为可受控利用的资源水量, 反而可能引发洪水灾害. 资源水量是河流在尽量保持健康功能的基础上在理论上潜在可为人类社会利用的水量, 但下

游沿岸的实际取水可能超过资源水量, 也可能没有对理论上存在的资源水量进行完全利用。

河流水量在年内分布是不均匀的, 汛期的大水量在超过河道过流能力时可能导致洪水灾害。所谓灾害水是指当年超过最高临界流量而可能造成洪水灾害流量下的水量。灾害水量不仅不能为生产生活所利用, 反而可能对两岸居民的生命财产造成威胁, 但水利设施的修建可能通过一些控制措施减少灾害水量, 并将灾害水转化为可受控利用的资源水。

根据以上定义可知, 本文是以流量为基础对通过该水文断面的水资源转化结构进行研究的。当流量小于或等于维持河流系统正常功能所需的最低临界流量时, 该流量下的所有水量都应算作生态环境水量; 当流量大于最低临界流量而小于或等于可能引发洪水灾害的最高临界流量时, 最低临界流量下的水量为生态环境水量, 而扣除生态环境水量后的剩余水量都可算作资源水量; 当流量大于可能引发洪水灾害的最高临界流量时, 生态环境水量仍为最低临界流量下的水量, 最高临界流量以上的水量则应算作灾害水量, 而介于两者之间的水量为资源水量。

1 研究区域概况

黄河下游通常是指自桃花峪以下的黄河干流, 因为三门峡水利枢纽对下游水资源具有重要调控作用, 所以具体分析时将三门峡以下干流作为研究河段。

由于黄河下游河道特性变化复杂, 而河道比降、断面形态和河型不同使得河流系统基本功能维持所要求的最低临界流量也不尽相同, 河道排洪能力也会有较大差别, 因此需要分河段对黄河下游水资源转化结构进行研究。根据河道特性的不同, 黄河下游干流大致可以分为 4 个河段, 即决定下游来水来沙情况的三门峡-花园口段、属于游荡型河流的花园口-高村段、属于过渡型河流的高村-艾山河段以及属于弯曲型河流的艾山-河口段。考虑到在水文站获得的有效流量和水量数据有利于保证数据系列的完整性且在不同河段间有可比性, 分析时主要采用花园口、高村、艾山和利津站从 1950~2001 年的径流量和逐日流量数据代表下游不同河段的水文水资源状况。黄河下游各个河段和主要水文站的具体位置如图 1 所示。

2 水资源转化结构中“三水”的界限

2.1 生态环境水与资源水的界限

河流系统具有输水、输沙、泄洪、自净、航运等功能, 此外还可以作为观赏和娱乐景观, 并为生物体提供栖居环境, 河流最小生态环境需水量是在特定时间和空间为满足特定的河流系统功能所需的最小临界水量的总称^[5]。河流水量不能

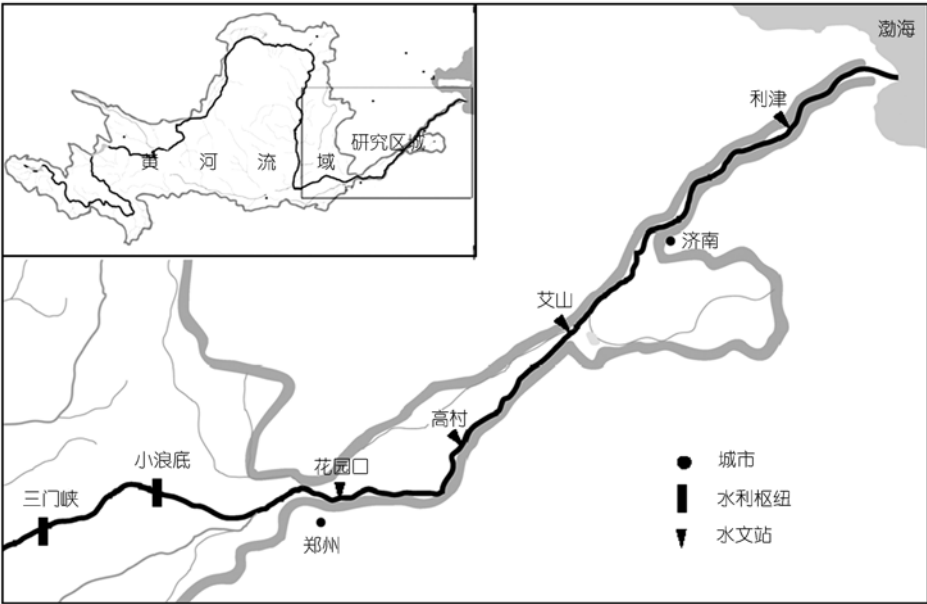


图 1 黄河下游各河段及水文站的位置分布

小于最小生态环境需水量，否则河流系统功能将可能受损，河流不能以健康状态为沿岸生产生活提供用水。要实现水资源的可持续利用，河道水量只有在大于最小生态环境需水量时才能为流域提供资源用水，因此可以将最小生态环境需水量作为水资源转化结构中生态环境水与资源水之间的界限。

针对黄河下游河流系统的主要功能目标，以往的相关工作确定了黄河下游各河段在不同时段的综合最小生态环境需水量^[5]，如表 1 所示。

表 1 黄河下游各河段综合最小生态环境需水量^[5]

站 名	对应河段	汛期最小流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	非汛期最小流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	年总径流量/ $\text{m}^3 (\times 10^8)$
花园口	三门峡-花园口	1972.3~2042.1	231.5	252.5~259.7
高 村	花园口-高 村	2321.9~2684.4	234.3	289.3~326.9
艾 山	高 村-艾 山	2190.5~2639.5	158.0	259.9~306.4
利 津	艾 山-利 津	2140.2~2520.1	155.6	254.2~293.5

此外，黄河水利委员会在 2000 年“黄河的重大问题及其对策”的研究报告中也分析了维持黄河下游河流系统综合功能所需的最低临界水量，提出黄河河口全年总共应保证 $210 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的生态环境用水。根据该方案，近似认为利津站所需生态环境水量与河口地区相同，可以计算黄河下游各河段的最小生态环境需水量(表 2)。

表 2 根据黄委会报告确定的黄河下游各河段综合最小生态环境需水量

站 名	对应河段	汛期最小流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	非汛期最小流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	年总径流量/ $\text{m}^3(\times 10^8)$
花园口	三门峡-花园口	1781.5	373.6	267.4
高 村	花园口-高 村	1517.4	336.5	231.6
艾 山	高 村-艾 山	1530.5	315.5	228.6
利 津	艾 山-利 津	1443.2	270.8	210.0

由于计算方法不同, 不同研究确定的黄河下游各河段综合最小生态环境需水量有一定差异. 为全面分析黄河下游水资源转化结构, 并对比不同界限的影响, 研究中除采用以往相关工作所确定的综合最小生态环境需水量作为生态环境水与资源水间的界限外(以下简称方案 1), 还将使用根据黄委会报告确定的界限(以下简称方案 2)进行分析.

2.2 资源水与灾害水的界限

建国以来, 黄河下游初步形成了“上拦下排、两岸分滞”的防洪工程体系, 50 多年来下游堤防一直安全无恙. 小浪底水库建成并投入使用后, 河防工程抵御大洪水的能力得到进一步增强. 尽管如此, 洪水灾害仍然威胁着黄河下游沿岸居民的生命财产安全, 尤其是自 1986 年以来下游出现连续的枯水时期, 非汛期零流量情况频繁出现, 泥沙在主河槽大量淤积, 河道萎缩, 河道排洪能力下降, 防洪难度反而加大.

随着河防工程的进一步完善, 黄河下游堤防将得到更好的控制与保护, 堤防溃决可能性将进一步降低, 但当前黄河下游滩区约有 179 万人居住并从事各种生产活动, 洪水只要漫滩便可使滩区遭受重大损失, 而且滩区居民在短期内无法全部迁出. 随着沿岸社会经济的发展, 洪水上滩造成的损失将会越来越严重, 如 1996 年 8 月发生的中常洪水(“96·8”洪水)就导致河南、山东两省共有 40 个县、173 个乡镇、1345 个村庄、107 万人受灾, 淹没了约 $23 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 的耕地^[6]. 因此, 基于黄河下游滩区的实际情况, 可以将平滩流量视为可能导致灾害的临界流量, 即水资源转化结构中资源水与灾害水之间的界限.

平滩流量是指河道水位达到河漫滩(或边滩的滩边)高度时相应的流量^[7], 河流水沙条件是平滩流量的主要影响因素: 大流量下槽冲滩淤, 滩槽高差增加, 平滩流量增大; 而小水大沙可导致主槽淤积, 平滩流量减小. 受降雨、上游来水以及三门峡水库改建及运行方式更替等因素的影响, 20 世纪 50 年代以来黄河下游河道的水沙条件变化剧烈, 不仅逐年的平滩流量不同, 而且即使在同一年份, 汛期前后的平滩流量也可能有很大差别, 因此可以说黄河下游可能造成洪水灾害的临界流量是时刻变化的. 但根据对相关文献资料的整理^[7~12], 可以计算出 20 世纪 50 年代以来黄河下游每十年的大致平滩流量, 如表 3 所示.

表 3 黄河下游各河段在不同年代的平滩流量(单位: $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

站名	对应河段	1950s	1960s	1970s	1980s	1990s
花园口	三门峡-花园口	7140	8500	4560	6440	3820
高 村	花园口-高 村	8700	10500	4150	5480	3510
艾 山	高 村-艾 山	7730	8000	4300	5280	3690
利 津	艾 山-利 津	7790	7650	4170	4920	3500

3 黄河下游水资源转化结构

利用黄河下游 4 个主要水文站从 1950~2001 年的径流量及逐日流量数据,并根据前面关于生态环境水、资源水和灾害水“三水”之间的界限分析,可以计算 1950~2001 年黄河下游各水文站或其对应河段逐年的“三水”数量. “三水”之间界限的不同会导致“三水”的具体数量不尽相同,然而无论采用哪一种界限,水资源转化结构在时间和空间上都呈现相似的变化趋势. 不失一般性,本节将先采用方案 1 作为生态环境水与资源水的界限对黄河下游的水资源转化结构进行讨论,然后再分析不同界限对水资源转化结构的影响.

3.1 “三水”在时间和空间上的变化

图 2 为 1950~2001 年黄河下游的生态环境水、资源水和灾害水量的变化情况. 由图 2 可知,自 1950 年以来黄河下游各水文站的生态环境水量总体上呈明显的递减趋势,在 20 世纪 80~90 年代间尤为明显: 80 年代中期之前,各站每年的生态环境水量在 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右波动,而 80 年代中期以后,各站的生态环境水量开始在波动中递减,利津站在最低时(1997 年)仅有 $13.04 \times 10^8 \text{ m}^3$. 此外从空间上看,20 世纪 80 年代中期之前的河道流量基本上能够满足河流生态环境的基本需求,各站可用的生态环境水量主要取决于对应河段实际的生态环境需水量. 由于花园口-高村河段为游荡性河段,冲淤变化剧烈,河流系统功能所需最低临界水量要高于其他河段,因此在 20 世纪 80 年代中期以前高村站的生态环境水量在各河段中是最高的;但随着上游来水量的减少,此后各站的生态环境水量更多地取决于实际通过的水量,由于黄河下游水量基本上是沿程递减的,因此 80 年代中期以后上游站的生态环境水量一般要高于下游站. 由此可见,从 1986 年起的枯水系列对于黄河下游的生态环境水量变化来说起着分界线的作用.

由于上游来水量减少,河道中大多数水量被用于满足河流系统的基本生态环境需求,因此资源水量随时间在总体上也出现明显的递减趋势. 但与生态环境水相比,资源水随时间的波动程度要剧烈得多. 50 多年来资源水量的减少主要有两次突变: 一次是 20 世纪 60 年代三门峡水库的修建,它不仅导致资源水量在 60 年代大起大落,而且致使各站资源水量从 60 年代到 70 年代骤减了 100 多亿立方左右;另一次突变与生态环境水量类似,是由 1986 年起的枯水时期引起的,20 世

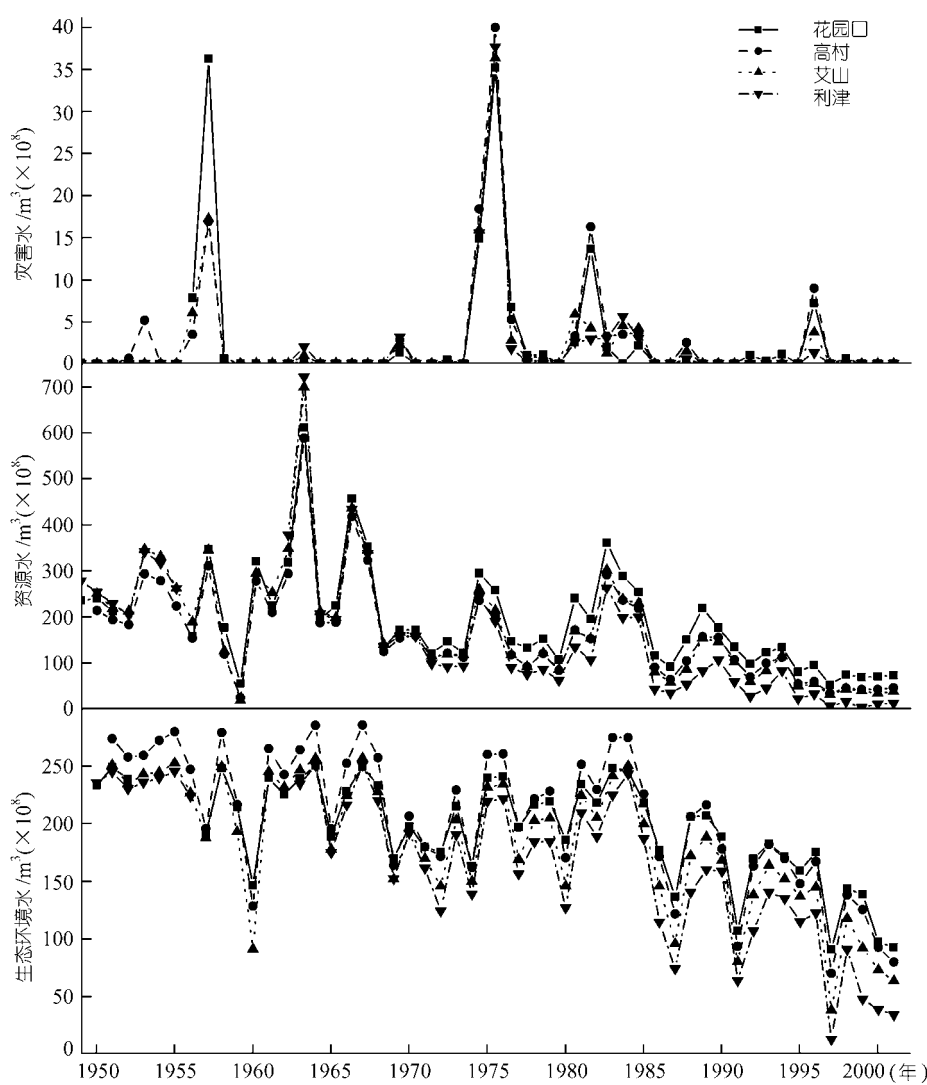


图2 黄河下游各水文站的“三水”数量在不同年份的变化

纪 90 年代以后下游各站资源水量一般不超过 $100\times10^8\text{ m}^3$ 。

此外，从空间上看，上游站的资源水量一般要高于下游站，但在 20 世纪 70 年代之前这种差别并不明显，而随着时间的推移，上下游站的资源水量的差别越来越大。进入 21 世纪后，花园口每年的资源水量仍超过 $90\times10^8\text{ m}^3$ ，而利津已经不足 $40\times10^8\text{ m}^3$ ，这说明沿程引水量的逐年增加造成上下游可用资源水量的差别越来越大。

尽管生态环境水和资源水均呈减少趋势，但并不意味着灾害水的消失。与前

两者相比, 灾害水量要小得多, 且其变化并无明显的规律性, 多集中在几个发生洪水灾害的时期, 如 1958, 1976, 1982 和 1996 年等. 值得注意的是, 自 20 世纪 80 年代中期后黄河下游很少出现高流量情况, 但各站的灾害水量并无明显减少, 90 年代的平均灾害水量甚至比 60 年代的灾害水量还要高. 在当前河槽淤积导致河道排洪能力下降, 而滩区居民越来越多的情况下, 极容易出现小水大灾的情况, 如自 1986 年枯水系列以来仍然在 1996 年出现灾害水量偏高的情况, 对该年灾害水量起主要贡献作用的“96·8”洪水给沿岸居民造成了巨大损失. 因此, 黄河下游的灾害水量并没有随着径流量的减少而出现与生态环境水或资源水量相似的递减趋势, 洪患灾害仍然时刻威胁着黄河下游沿岸居民的生命财产安全.

3.2 “三水”在不同状态下的比例

根据以上计算结果, 可以进一步确定各站自 20 世纪 50 年代以来平均每十年的生态环境水、资源水和灾害水的比例变化, 如图 3 所示.

黄河下游的自然水文循环过程在 20 世纪 50 年代受人类活动的干扰强度相对较小, 水沙条件属于“自然状态”. 此时各站用于维持河流系统基本功能的生态环境水量和潜在可用资源水量差别不大, 占总水量的比例均在 45%以上; 受游荡性河段生态环境需水较高的影响, 高村站生态环境水比例稍高, 而高村以下河段的资源水比例稍高.

1960 年三门峡水库开始蓄水运用, 受泥沙淤积影响, 其运行方式多次变更, 并经过数次改建. 三门峡水库的修建与改建导致 20 世纪 60 年代黄河下游水沙状态在年际和年内变化异常, 河流生态环境需水在水库蓄水期间常得不到满足. 但三门峡水库的运行也使黄河下游河道在 20 世纪 60 年代初普遍经历大规模冲刷, 平滩流量增加, 而且 60 年代水量较丰, 年均径流量要高于 50 年代, 因此各站潜在可利用的资源水量也有所增加, 占总水量的比例上升到 50%以上, 而生态环境水比例下降到 40%左右. 与自然状态相比, 20 世纪 60 年代是在总水量有所增加的基础上, 生态环境水和灾害水向资源水转化的时期.

三门峡水库在 1973 年底完成第 2 次改建后, 开始按照“蓄清排浑”方式运行, 黄河下游水沙条件处于“受控状态”, 此时三门峡水库的入库水量及运行方式决定了下游河道的水资源状况. 由于三门峡水库在非汛期主要是蓄水排沙, 进入下游的水量较少, 在 5 和 6 月份, 甚至在汛期前期, 水库下泄水量即使大部分都用于满足河流生态环境需求仍难达到要求. 生态环境水量与 20 世纪 50 年代或 60 年代相比有所减少, 但 20 世纪 70 年代黄河下游处于平水期, 年径流量普遍较低, 从而生态环境水量比例反而上升到 55%左右. 此外, 由于黄河下游河道在 20 世纪 70 年代普遍淤积, 各河段的平滩流量大大降低, 大流量下可能引发洪水的灾害水量明显增加, 所以受控状态下的灾害水量在各个时期中是最高的, 在各站的

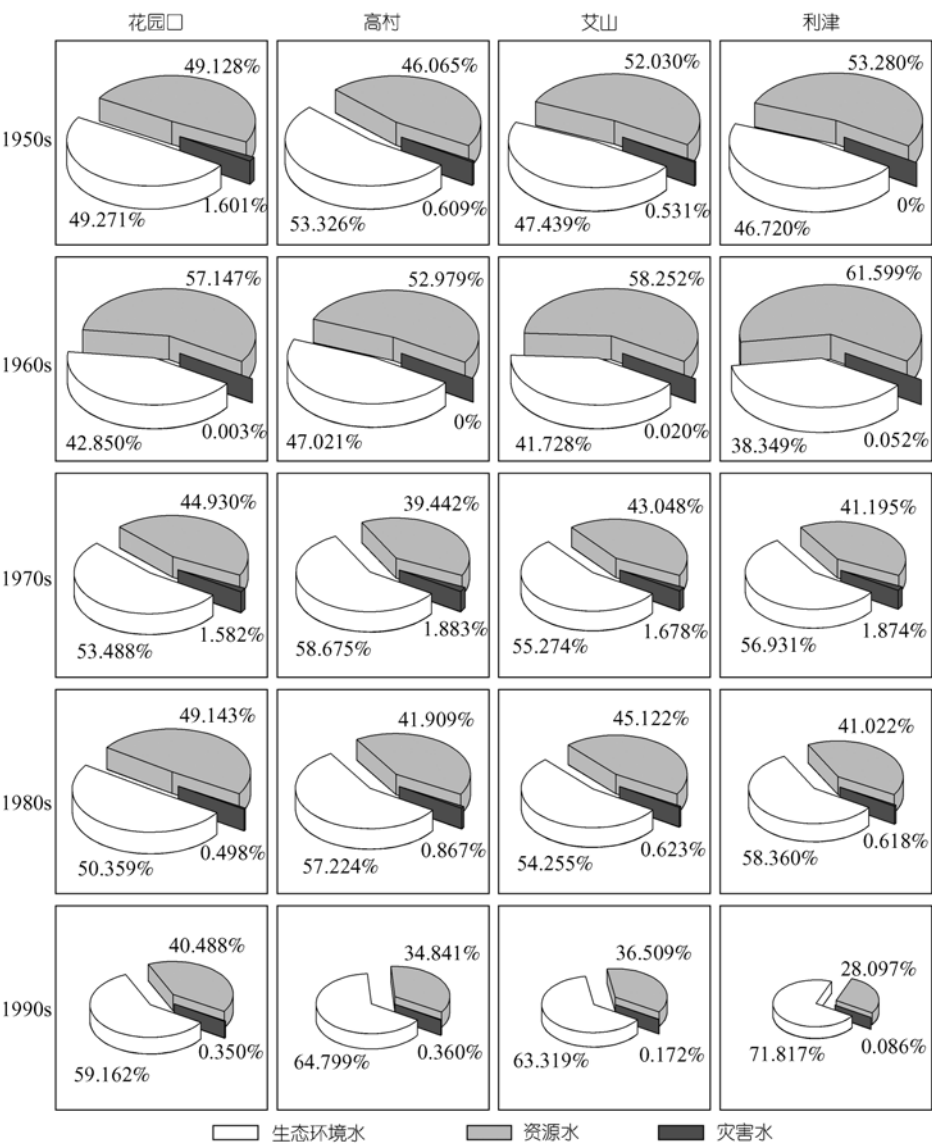


图3 黄河下游各主要水文站每十年的“三水”比例变化

比例也都超过了 1%。由于总水量减少而生态环境水和灾害水比例均上升, 因此潜在可利用的资源水量显著减少, 占总水量的比例下降到 40%左右。综上所述, 20 世纪 70 年代是在总水量减少的情况下, 资源水向生态环境水和灾害水转化的时期。

20 世纪 80 年代的黄河下游水沙条件处于“复杂状态”。在 20 世纪 80 年代前期, 黄河下游水量偏丰, 但从 1986 年 10 月起, 上游龙羊峡水库开始蓄水使用, 上

游沿程引水量也开始增加,再加上降雨及人为因素的影响,黄河下游径流进入枯水时期.前期丰水与后期枯水相互作用的结果使黄河下游在 20 世纪 80 年代的年均径流量与 70 年代相近,多数水文站的生态环境水比例仍在 55%左右,但此时沿黄引水影响开始明显,利津站的生态环境水比例已经超过原来生态环境需水最多的高村站.此外,由于 20 世纪 80 年代前期黄河下游水量偏丰,河道处于冲刷状态,平滩流量有所增加,因此大流量下可能引发洪水的灾害水量减少,比例下降.与受控状态相比,除少量灾害水转化为资源水外,该时期的水资源转化结构从总体看比较平稳.

始于 20 世纪 80 年代中期的枯水系列在进入 90 年代以后依然持续,且沿岸社会经济的发展导致沿黄引水量迅速增加,水资源供需矛盾日益突出,河道断流现象频繁发生,黄河下游水沙条件处于“异常状态”.水资源总量锐减导致三类水量均显著减少.为尽量维持河流系统的正常功能,河道中大部分水量都必须用于满足河流基本生态环境需求,生态环境用水比例通常超过 60%,在利津站甚至高达 71.82%.虽然总水量显著减少,但长期枯水作用致使河道淤积严重,平滩流量大大降低,因此在 20 世纪 90 年代流量明显偏低的情况下,灾害水量仍具有一定比例.生态环境用水比例大幅度上升而灾害水量无明显减少导致潜在可利用资源水量显著减少,比例也明显下降,花园口、高村、艾山和利津的资源水比例分别降低到 40.49%, 34.84%, 36.51%和 28.10%.在水沙状态异常情况下,该时期最明显的特点就是生态环境水显著占据总水量中原属于资源水的部分.

3.3 不同界限下的水资源转化结构

生态环境水、资源水和灾害水之间不存在绝对的界限,针对水资源界限的不确定性,为避免出现片面结果,在此采用了不同界限进行计算,以分析不同界限对黄河下游水资源转化结构的影响.由于生态环境水和资源水是水资源的主要组成部分,因此生态环境水和资源水之间的界限对水资源转化结构起着主要的影响作用.

如前所述,黄河下游生态环境水与资源水间界限的确定存在两个方案,根据方案 1 和方案 2 计算的 1950~2001 年各站的生态环境水量如图 4 所示.除花园口外,根据方案 2 计算的各站生态环境水量在 20 世纪 80 年代中期之前一般要低于根据方案 1 得到的计算值,但 80 年代中期以后的情况却刚好相反.究其原因,20 世纪 80 年代以前黄河下游水量相对较丰沛,维持河流系统功能所需水量基本上能得到满足,因此计算出来的生态环境水量与河道最小生态环境需水量比较接近,而方案 2 与方案 1 相比,汛期和全年的临界需水量相对偏小,因此计算出来的生态环境水量也相对偏小.1986 年以后黄河下游出现连续的枯水时期,汛期来水急剧减少,各河段所需生态环境水量很难得到满足,而在非汛期,由于河道输

沙用水较少,并在上游水库的调节下,下游各河段在非汛期所需的生态环境用水可以得到较好的满足.由于方案 2 中的非汛期生态环境水界限相对于方案 1 来说要高,因此计算出来的生态环境水量也相对较高.

尽管不同方案计算的生态环境水量存在一定差异,从图 4 可知两者在不同年份的变化趋势是完全一致的,而且每一年份的差值相对于当年的实际生态环境水量来说是极其微小的.因此,只要以合理的河流最小生态环境需水量作为生态环境水与资源水的界限,黄河下游各河段的水资源转化结构在时间和空间上的变化规律不会发生根本的改变.

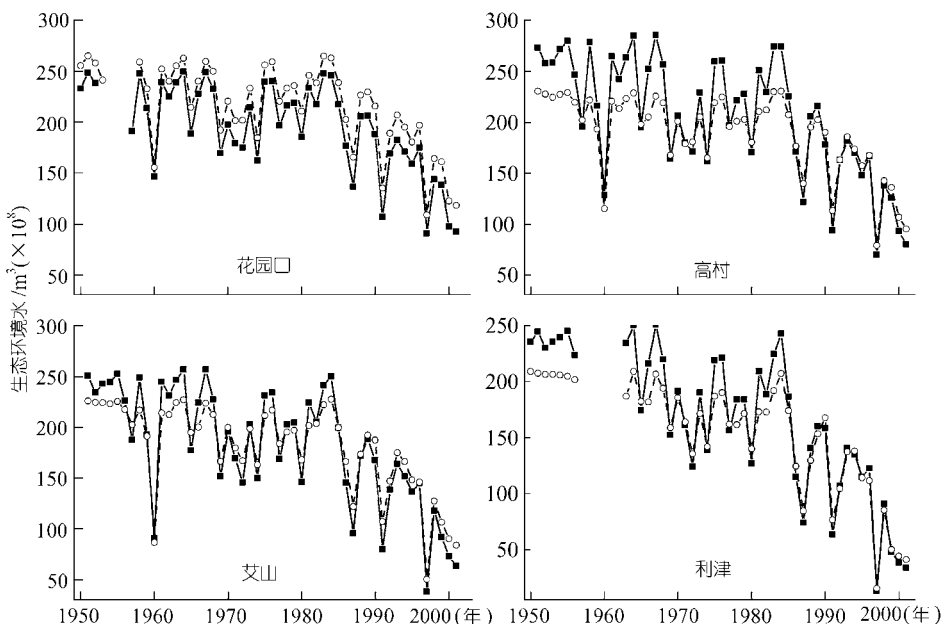


图 4 根据两种方案计算的各站生态环境水量

4 讨论

自 1950 年以来,黄河下游水沙条件发生了剧烈的变化,经历了不同的状态,河流中的生态环境水、资源水和灾害水量及其比例也随着水沙状态的改变而变化,形成不同的水资源转化结构.综合以上分析,以柱状图高表示不同年代的年均径流量,并区分每一年代下的三类水量,可以得到如图 5 所示的黄河下游各水文站从 20 世纪 50 年代起的水资源转化结构.

要实现黄河下游水资源的可持续利用,河流系统功能的基本用水需求必须首先得到满足,但由于上游来水量的减少,黄河下游各河段可用的生态环境水量不断减少,而在总水量中所占的比例却不断增大,这在图 5 中有明显的反映.在河流受人为干扰较轻的 20 世纪 50 年代,花园口、高村、艾山和利津站的年均径

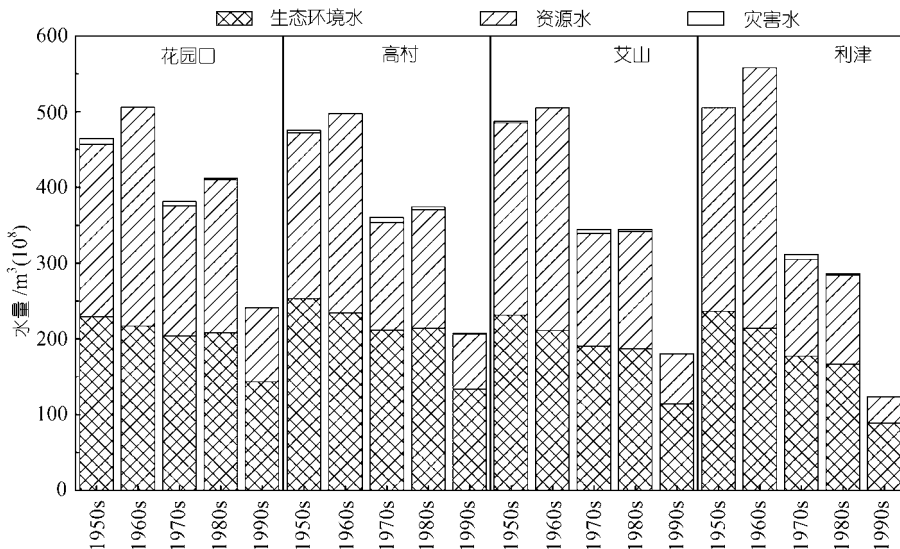


图 5 黄河下游各水文站 50 年代以来的水资源转化结构

流量为 464.43 , 474.87 , 487.16 和 $505.58 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中可用生态环境水量分别为 228.83 , 253.23 , 231.10 和 $236.21 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总水量的比例为 49.27% , 53.33% , 47.44% 和 46.72% ; 而到了河流系统处于异常状态的 90 年代, 花园口、高村、艾山和利津站的年均径流量只有 241.66 , 206.63 , 180.15 和 $123.81 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中可用生态环境水量已经下降到 142.97 , 133.89 , 114.07 和 $88.92 \times 10^8 \text{ m}^3$, 但占总水量的比例反而上升到 59.16% , 64.80% , 63.32% 和 71.82% . 虽然上游来水量减少是 50 多年来黄河下游水资源转化结构发生剧烈变化的主要原因, 但下游沿黄引水量增加以及支流汇水减少甚至消失也是水资源转化结构变化的重要因素, 最下游的利津站潜在可用生态环境水量 20 世纪 90 年代与 50 年代相比减少了接近 $150 \times 10^8 \text{ m}^3$, 而其比例却上升了约 25% , 变化幅度要比上游其他河段剧烈得多。

虽然年总径流量的多少对水资源转化结构具有决定作用, 但径流量的年内分布对水资源转化结构也有一定的影响. 在年总来水量相若的情况下, 相对均匀的年径流分布有利于河流生态环境保护和人类对水资源的控制利用, 而来水的剧烈变化对当年乃至来年的水资源转化结构都将产生巨大影响. 其中典型的是图 5 中 20 世纪 50 年代和 60 年代的水资源转化结构对比: 尽管黄河下游各河段的年均径流量在 60 年代要高于 50 年代, 但三门峡水库的修建、改建及运行方式的更替导致 60 年代黄河下游流量波动剧烈, 小流量情况下河流系统所需生态环境用水常得不到满足, 但大流量情况下水流对河槽的剧烈冲刷使河道变宽变深, 可以容纳更多水量而不会引发洪水威胁. 因此, 尽管黄河下游 20 世纪 60 年代的年均径流量要高于 50 年代, 但河流系统可用的生态环境水量却低于 50 年代, 而

潜在可利用的资源水量却有大幅度增加, 可能引发洪水威胁的灾害水量在各个年代中也是最低的.

要使河流能够利用的生态环境水量能够维持健康的河流系统功能, 河道中水量至少需要达到最小生态环境需水量的水平, 因此在分析黄河下游水资源转化结构时优先考虑满足河流系统的生态环境需水, 这使得在总水量锐减的情况下生态环境水量超过总水量的 2/3. 尽管如此, 分析图 6 的黄河下游各水文站从 20 世纪 50 年代起每 10 年的年均生态环境水量及其与综合最小生态环境需水量的差值可知, 到 90 年代绝大多数河段的河道中能够实际用于满足河流生态环境需求的水量已经不足理论所需临界水量的一半, 而且河道中的总水量也已经小于最低临界水量, 此时即使沿岸无任何资源水量的消耗或者灾害水量的损失, 河流系统最基本的生态环境需水要求也已无法满足. 根据国务院 1987 年的黄河可供水量分配方案, 黄河下游总共需要向河南、山东、河北和天津四省市供水 $145.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 但自 1990 年以来, 在尽量不损害黄河下游河流系统功能的前提下, 通过花园口站的年均潜在可用资源水量已经只有 $97.8 \times 10^8 \text{ m}^3$. 考虑到黄河下游基本上无其他水源补给, 因此国务院配水方案若要得以实施, 只能占用河流最基本的生态环境用水, 而这必然进一步恶化河流生态环境. 从 20 世纪 80 年代末起黄河下游泥沙严重淤积, 河道萎缩, 同流量水位显著升高, 防洪能力下降, 因此在 90 年代的低流量情况下黄河下游的灾害水量并没有明显减少, 反而比 60 年代的高流量情况下还要多, 洪水灾害的潜在威胁反而加重.

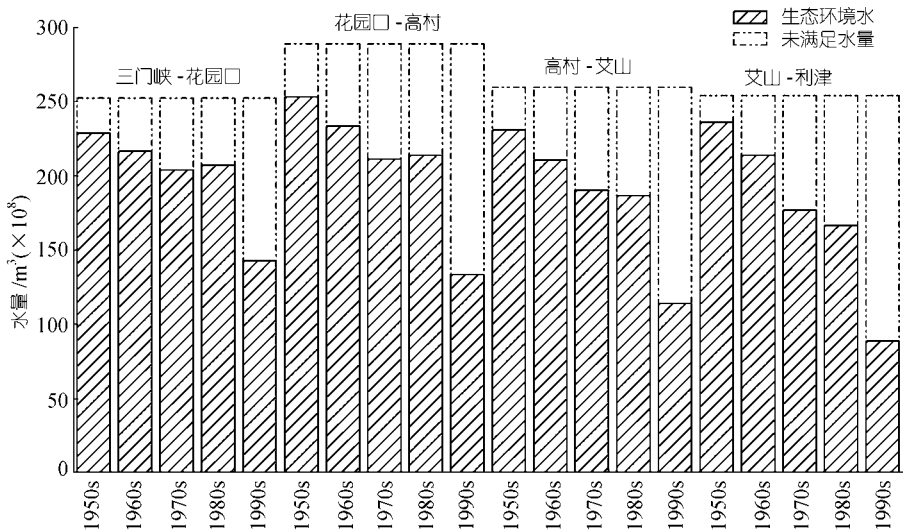


图 6 各水文站在不同年代的生态环境需水满足状况

5 结论

(i) 河流中的水资源可以划分为“三水”,即生态环境水、资源水和灾害水 3 个组成部分. 由于上游干支流来水量减少和下游沿岸取水量增加,在优先满足河流系统功能维护的基本用水需求条件下,近 50 年来黄河下游水资源转化结构呈现资源水向生态环境水转化的趋势,各河段的生态环境水比例明显增加,潜在可供利用的资源水所占比例显著减少,但可能造成洪水的灾害水比例总体来说变化不大,更多体现在个别年份为沿岸带来洪水灾害.

(ii) 水资源转化结构的变化导致了黄河下游用于维护河流系统功能的生态环境水量与最小临界水量间的差值逐渐增大,同时沿岸居民实际需水量也已超过河道中潜在可供利用的资源水量而不得不动用本已不足的生态环境水量,这使得河流系统正常功能进一步受到损害,加剧了“小水大灾”的可能性.

(iii) 水资源转化结构中“三水”的界限选取会导致三类水量相对大小发生变化,但总体来说差别不大,不会影响 50 多年来黄河下游水资源转化结构在时间和空间上的变化规律.

当前,黄河下游水资源供需矛盾突出,但不顾河流系统自身需求而盲目取水只能使水资源状况更加恶化. 在当前的水量和流量分布情况下,应该在保障河流最基本的生态环境用水需求的前提下,为沿岸生产生活提供尽可能多的资源水量,并尽可能控制洪水灾害,即寻求一个合理的最优水资源转化结构,以促进黄河下游水资源的可持续利用.

参 考 文 献

- 1 陈传友,王春元,高迎春. 论水资源学. 水利水电科技进展, 2002, 22(4): 1~6
- 2 Tumbare M J. Equitable sharing of the water resources of the Zambezi River Basin. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 1999, 24(6): 571~578
- 3 张士锋,贾绍凤. 黄河流域近期用水特点与趋势分析. 资源科学, 2002, 24(2): 1~5
- 4 倪晋仁,钱征寒. 论黄河功能性断流. 中国科学, E 辑, 2002, 32(4): 496~502 [[摘要](#)] [[PDF](#)]
- 5 倪晋仁,金玲,赵业安,等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究. 水利学报, 2002, (10): 1~7
- 6 卢杜田. 从“96·8”洪水看黄河下游防洪形势. 人民黄河, 1997, 19(5): 9~11
- 7 张红武,张清,江恩惠. 黄河下游河道造床流量的计算方法. 泥沙研究, 1994, (4): 50~55
- 8 洪尚池. 黄河河口治理及其对下游防洪的影响. 人民黄河, 1995, 17(11): 13~19
- 9 申冠卿,张晓华,李勇,等. 1986 年以来黄河下游水沙变化及河道演变分析. 人民黄河, 2000, 22(9): 10~11
- 10 牛占,田水利,王丙轩,等. 1977~1996 年黄河下游水文断面反映的河床演变. 泥沙研究, 2000, (3): 21~29
- 11 许炯心. 论黄河下游河道两次历史性大转折及其意义. 水利学报, 2001, (7): 1~7
- 12 Xu J X. River sedimentation and channel adjustment of the lower Yellow River as influenced by low discharges and seasonal channel dry-ups. *Geomorphology*, 2002, 43: 151~164 [[DOI](#)]