

论黄河功能性断流^{*}

倪晋仁 钱征寒

(北京大学环境科学中心水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要 基于黄河河道径流量与河流基本功能之间关系的认识, 提出了黄河功能性断流的概念. 探讨了能够反映黄河功能性断流严重状况的基本因子. 根据 1950~1999 年间的实测数据结合聚类分析, 得出了关于黄河功能性断流严重程度的分级参考标准. 分别按照作者和黄河水利委员会提出的最小生态需水量方案计算了黄河功能断流的级别, 并对预测结果进行了比较. 在此基础上, 揭示了黄河功能性断流与零流量断流之间的关系.

关键词 黄河 功能性断流 严重程度 分级

1 黄河功能性断流的概念

通常意义下的黄河断流特指黄河河道出现的“零流量”断流事件^[1, 2], 而黄河功能性断流则指河道径流量不能满足河流基本功能最小需水量要求的特定事件. 我们将前一种断流现象简称“黄河断流”, 而将后一种“断流”现象就叫做“黄河功能性断流”, 两者的发生都有一定时间和空间范围的限定.

黄河断流和黄河功能性断流有着本质的区别. 首先, 前者系指河道水量减至为零的特殊现象, 只要尚存少许径流就不被认为断流. 后者着眼河流功能受损衰竭的临界状态, 即使河水仍未干枯也会被看作“断流”. 其次, 前者属于一种自然表象上的“绝对断流”, 后者则类似一种内在功能性的“相对断流”. 在河道径流明显减少直至小于某临界值时, 尽管黄河并未断流, 但是黄河功能性断流可能早已发生而且或许开始导致河流系统诸项(或某项)功能受损甚至暂时或永久地丧失. 黄河功能性断流属于一种不利于维护河流系统功能的事件, 它对各项功能的影响大小与断流发生的时空范围、频度和功能的易损性有着密切关系. 黄河断流的影响不仅表现为河流功能受损的严重程度, 而且取决于受损河流功能的恢复能力. 黄河断流后需要恢复的是流量不为零的表象景观, 而黄河功能性断流后需要恢复的则是健康河流的实际功能, 应该从近期和远期综合考虑, 将现状与后效优化协调.

黄河断流的现象必然会引出黄河功能性断流的问题. 这是因为: (i) 黄河断流本身就是黄河河流系统功能状态不佳的征兆. (ii) 黄河断流引发的深刻影响可能因表象和语义含混被掩盖. (iii) 黄河在其水量极小且不能满足任何河流功能的同时却有可能被误认为断流问题已经解决. (iv) 黄河在断流现象出现的条件下一些河流行为的规律显著变化, 描述方法和原有研究结果失效. (v) 黄河断流为河流系统功能的维持、调控和恢复提出了新的挑战.

黄河功能性断流研究旨在明确黄河“零流量”断流与黄河功能性断流的根本区别,明确黄河表象不断流与功能性不断流的河流调控目标的本质不同,探索黄河水量减少与断流条件下各项功能需水的新方法,揭示河流功能性断流的特征与机理,提出缓减功能性断流的决策依据。为此,本文以黄河下游河段为研究区域,结合已有研究成果和实测资料,重点就黄河功能性断流的表征因子、临界水量、严重程度分级以及黄河功能性断流与黄河零流量断流的关系进行研究。

2 黄河功能性断流的临界水量

河流系统具有多种功能,包括输水、输沙、泄洪、自净、航运功能以及作为观赏和娱乐景观与作为生物栖居环境的其他功能¹⁾。为了维持河流系统功能的健康,在特定时间和空间必须保证能够在特定水平下满足河流系统诸项功能所需的水量。只有这样才能使河流系统各项功能得以协调,河流生态环境得以保护,河流水资源得以持续利用。

对于黄河下游功能性断流问题而言,其关注的主要功能包括为满足一定水质目标的环境功能、为满足一定生态标准的生态保护功能、为满足一定程度河道冲淤幅度的输沙功能以及综合的河口区生态环境功能。相应地,可以确定与各种功能用水对应的状态与临界水量。将黄河下游干流按照其河道特性的不同大致分为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-艾山河段和属于弯曲型河流的艾山-河口段。考虑到只有水文站才可能获得有效数据,因此分别用花园口、高村、艾山和利津4个下游主要水文站的资料确定与各种功能用水对应的临界水量。

2.1 河流水污染防治用水的临界水量

对于不考虑断流事件的河流,估算河流水污染防治最小用水量最为简单实用的方法有美国的90%保证率条件下最枯连续7d平均流量法和中国的10a最枯月平均流量法。河流水污染防治用水也可按照以水质目标为约束的方法估算。然而,对于像黄河这样存在断流现象的河流,以往的研究成果很难直接采用。例如,对于10年内连续断流超过一个月的河流,按照10年最枯月平均流量法将会得到断流后水污染防治最小用水量为零的错误结论。同样,以水质目标为约束的研究方法多数也因不能考虑河流中断流和泥沙对污染物行为的影响而不能用于研究黄河的问题。

当水质目标确定后,表征水质状况的各项水质指标都已经有的标准,所以从河流水污染防治的功能来看,只要自然条件没有发生变化而且污染物排放量保持不变,则各个河段在最不利来流条件下要求的最小水量不应因断流与否发生本质改变。考虑到沿黄河下游因其“悬河”地貌而不易大量排入污染物且排放量不易监控,采用以水质目标为约束的估算方法不会在计算精度上有多少提高。因此,在黄河发生断流现象以来,下游各河段的河流水污染防治最小用水量可以近似采用断流前的计算结果。如果不考虑黄河泥沙的影响,则根据每10年最枯月平均流量法计算知下游各河段的河流水污染防治临界水量分别为231.5, 234.3, 146.0和18.1 m³/s¹⁾。当河流水污染防治用水量小于临界水量时,河流就可能无法满足期望的水质目标。

2.2 河流生态用水的临界水量

河流生态用水涉及各类生物体及其生境用水的各个方面。河流最小生态用水流量的计算

1) 倪晋仁,金玲.黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究.水利学报(待发表)

方法包括湿周法、R2CROSS 法以及 20 世纪 80 年代初提出的河道内流量增加法等多种方法¹⁾。不过, 由于实测资料的短缺和应用上的困难, 较为生产单位乐用的还是超脱于特定用途的复合型计算方法, 如 Montana 法^[3]等。这类方法建议的河流生态用水量根据对生物物种和生境的有利程度确定, 在年内的不同阶段可以按照河流年平均流量或其他特征流量的百分比来表示。本文采用法国关于最小河流生态用水量不应小于多年平均流量的 1/10 之规定。根据计算知, 下游各河段的河流生态用水的最小临界水量分别为 157.2, 154.1, 158.0 和 155.6 m³/s¹⁾。当河流生态用水量小于临界水量时, 河流就可能无法满足预期的生态标准。

2.3 河流输沙用水的临界水量

河流输沙用水是黄河河流输沙功能的基本要求^[4, 5]。河流输沙用水随年来水来沙特点变化, 在不同时段(如洪水期、汛期和非汛期)各河段对应的输沙用水量不尽相同。非汛期单位重量泥沙的输沙用水较汛期的要多, 河流输沙效率相对较低。河流输沙用水一方面影响泥沙输移过程, 另一方面又影响河床变化和污染物迁移转化过程。根据资料统计, 黄河下游各河段在汛期的河流输沙用水临界水量分别为 1972.3 ~ 2042.1, 2321.9 ~ 2684.4, 2190.5 ~ 2639.5 和 2140.2 ~ 2520.1 m³/s。在非汛期的临界水量分别为 835.4, 831.5, 756.3 和 667.3 m³/s¹⁾。

2.4 河口区生态环境用水的临界水量

河口区生态环境需水量与径流和潮流双向作用的大小对比有关。黄河河口区是一个复杂的生态系统, 涉及湿地、鸟类、植物、三角洲海岸伸缩和海洋生物等多个方面, 为需水量的计算造成了不可克服的困难。国家水产总局在 20 世纪 80 年代中期提出的每年 4 ~ 6 月份下泄入海水量 60×10^8 m³、枯水年需要在 4 月份下泄 20×10^8 m³ 的结果虽然偏大, 但是可以作为确定黄河河口区生态环境需水量时的一个参考依据。按照这一估计, 4 月份利津站的平均流量至少应为 771.6 m³/s。另外, 从维持海岸线的进退幅度和沿海滩涂面积的角度来看, 河口区生态环境需水量还与输沙用水有着密切关系^[6]。研究表明, 当来水的水沙比小于 0.01 t/m³ 时, 沙咀延伸的长度可能停止^[7], 即利津的输沙用水量应不大于 100 m³/t。然而, 根据 1950 ~ 1997 年利津的输沙用水计算结果来看, 汛期均能满足这一条件, 而非汛期即便在不断流的 20 世纪 50 和 60 年代也有 56% 的年份输沙用水大于 100 m³/t。考虑到海岸线的变化通常是在较长时间内累积的结果, 而且至今黄河三角洲的淤进并未停止, 因此, 可以认为在满足黄河下游河流输沙功能的同时, 到达利津以下的沙量基本能够阻止海岸线蚀退。

2.5 下游河流系统综合功能临界需水量

一般来说, 河流输沙用水量的临界水量是满足其他功能临界水量的若干倍。一旦河流输沙功能得以满足, 其他功能往往会相应满足。在前面讨论的基础上, 考虑到汛期河流输沙功能的突出地位, 兼顾非汛期河流其他河流生态环境功能的要求, 可以根据相关水文站的统计结果, 给出各河段相应于功能性断流的最小临界水量, 综合结果如表 1。

与以上结果类似, 黄河水利委员会在 2000 年“黄河的重大问题及其对策”的研究报告中提出有关生态环境需水标准的方案: “河道内生态环境低限需水量: 一是汛期输沙水量, 多年平均需要 150×10^8 m³。二是非汛期生态基流, 总需水量 50×10^8 m³, 相当于非汛期平均入海流量 240 m³/s, 入海最小流量控制在 50 m³/s 以上。三是维持水体稀释自净能力需水, 根据黄河水资源短缺的实际情况, 汛期以输沙水量、非汛期以生态基流作为其需水……”。此外, 这个方案

1) 见 497 页脚注

还考虑了水土保持用水, 认为这部分用水可以与减少的输沙用水互相抵消. 另外, 尚须计入下游河道蒸发渗漏损失 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$, 总共应保证 $210 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的生态用水^[5]. 该方案结合了多年来的实测水文资料和小浪底等水利枢纽的运作方式, 综合性比较强, 但因计算方法的不同, 非汛期需水与这里采用的数值相近, 而汛期和全年临界需水则相对偏小.

表 1 综合功能的最小临界需水量

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 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	非汛期径流量 $\times 10^8/\text{m}^3$	年总径流量 $\times 10^8/\text{m}^3$
花园口	三门峡-花园口	1972.3~2042.1	231.5	48.0	252.5~259.7
高村	花园口-高村	2321.9~2684.4	234.3	48.6	289.3~326.9
艾山	高村-艾山	2190.5~2639.5	158.0	32.8	259.9~306.4
利津	艾山-利津	2140.2~2520.1	155.6	32.3	254.2~293.5

3 黄河功能性断流的严重程度分级

3.1 功能性断流天数的统计

由于各河段和各时段的功能性需水量有所不同, 因而功能性断流既无法像零流量断流那样通过表象断流河长来描述, 也无法简单地用利津站年断流天数来描述. 但是, 根据不同河段在汛期和非汛期的生态环境需水量以及 20 世纪 50 年代以来对应水文站的实测日流量资料, 可以获得各河段每年功能性断流的天数.

经统计, 黄河下游(含三门峡-花园口河段)各个河段 20 世纪 50 年代以来每 10 年年均(1950 年、1953~1963 年因数据不全或缺失未列入统计总数中, 下同)非汛期和汛期功能性断流天数变化如图 1 和 2.

3.2 表征因子的选择

根据前面统计得出的各河段功能性断流天数, 再与各河段自身的长度组合, 便可获得反映下游功能性断流持续时间和范围的综合性指标, 用以表征功能性断流的影响范围和严重程度, 这一综合性指标定义如下:

$$L_{\text{year}} = \sum_{i=1}^4 (D_i \times L_i),$$

(1)

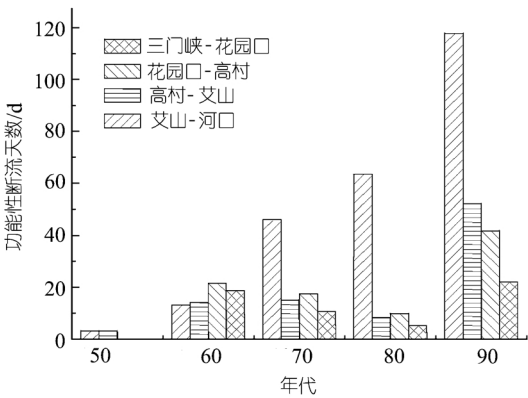


图 1 20 世纪 50 年代以来黄河下游 4 个河段非汛期功能性断流天数变化

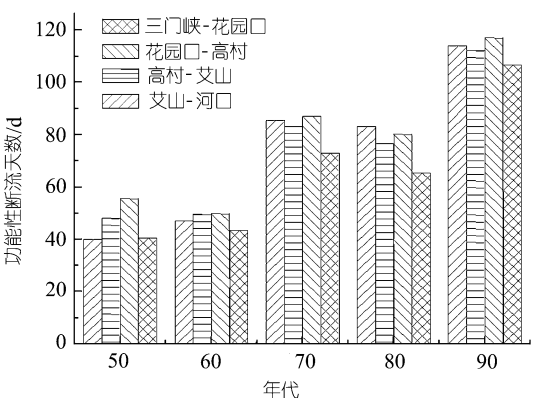


图 2 20 世纪 50 年代以来黄河下游 4 个河段汛期功能性断流天数变化

其中, L_{year} 代表年内功能性断流的总河长, 作为体现功能性断流严重程度的主要表征因子; D_i 为某河段发生功能性断流的天数; L_i 代表河段对应的河长; $i = 1 \sim 4$ 分别代表黄河下游不同的河段, 如表 2 所示.

表 2 黄河下游 4 个主要水文站及其对应河段长度

i	对应站点	对应河段	河段长度/ km
1	花园口	三门峡-花园口	257
2	高村	花园口-高村	189
3	艾山	高村-艾山	193
4	利津	艾山-利津	282

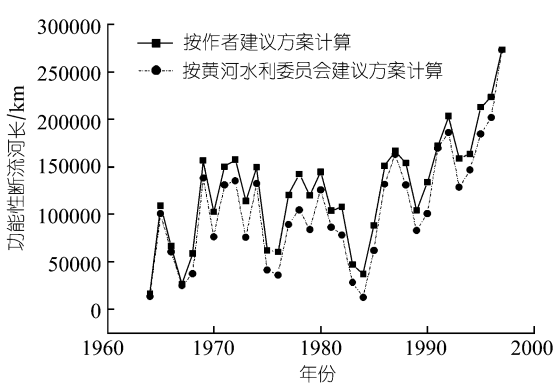


图 3 20 世纪 60 年代以来黄河下游 L_{year} 的变化

20 世纪 60 年代以来黄河下游功能性断流的严重程度有不断加剧的趋势. 结合图 1 和 2 分析, 功能性断流从 20 世纪 50 年代始就有发生, 只是当时不很严重, 后来才在自然和人为影响下变得严重起来. 比较说明, 基于作者建议和黄河水利委员会建议方案得到的结果反映了基本相似的变化趋势, 但是按照后者估算的结果偏于乐观.

3.3 功能性断流的分类与严重程度分级

与零流量断流的情况类似, 黄河下游功能性断流的严重程度因来水来沙条件不同而存在差异. 通过表征因子 L_{year} 描述功能性断流严重程度时, 首先需要利用分层聚类法(hierarchical cluster)优化分类, 然后再在此基础上分级, 相关统计结果见表 3.

表 3 黄河功能性断流严重程度的划分原则

级别	$L_{\text{year}} / \text{km}$	样本数	功能性断流严重程度	代表年份
0	<1000	0	无断流或极轻微断流	1952
1	1000~90000	11(18) ^{a)}	轻微断流	1976
2	90000~180000	21(14)	中等程度断流	1990
3	180000~240000	3(3)	严重断流	1995
4	>240000	1(1)	特别严重断流	1997

a) 括号内为按黄河水利委员会水量标准的结果

根据上述黄河功能性断流严重程度的划分原则, 可以进一步基于作者和黄河水利委员会建议的河流生态环境需水方案对功能性断流的严重程度分级. 图 4 基于不同河流生态环境需水方案对比了黄河功能性断流级别. 可以看出, 基于不同河流生态环境需水方案得到的黄河

按照(1)式, 可对 20 世纪 60 年代以来各个年份的 L_{year} 进行计算. 为比较起见, 分别以黄河水利委员会提出的河流生态环境需水量与本文采用的方案为基础进行了计算, L_{year} 在时间序列上的变化如图 3(数据缺失年份不计入内)所示.

指标 L_{year} 包含了各河段功能性断流时间和范围的信息, 具有较好的综合性和代表性, 可以作为对黄河下游功能性断流严重程度级别划分的主要依据. 由图 3 可见, 20 世

功能性断流级别既有总体上的一致性, 又有局部上的差异性. 在功能性断流级别大致处于轻微断流和中等断流之间时, 按照作者方案较按照黄河水利委员会方案得到的功能性断流级别偏高. 进入 20 世纪 90 年代后, 功能性断流的级别增高, 采用两个方案得到的功能性断流级别趋于一致.

一般情况下, 如果已知某一年份的功能性断流表征因子 L_{year} , 则可以近似地根据其各类中心的距离远近原则进行判断, 完成功能性断流的分级工作.

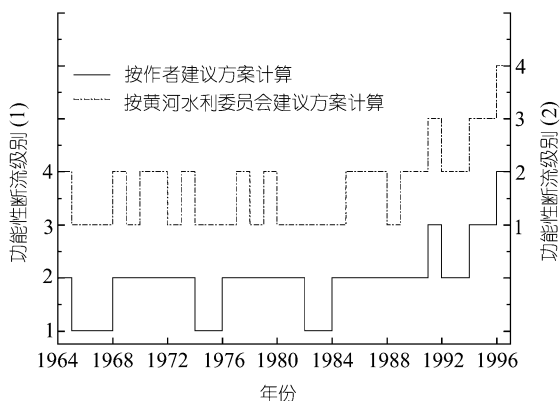


图4 不同方案下各年份黄河功能性断流级别

4 黄河零流量断流与功能性断流的关系

黄河零流量断流与功能性断流既有一致的方面, 又有本质的不同. 前者反映的是河道水量是否为零的现象, 可以通过零流量断流的长度表征; 后者反映的是河道水量小于河流功能需求的事件, 必须根据不同时空单元小于临界需水量的河段长度或历时表征. 由于黄河断流和黄河功能性断流级别划分的标准或原则不一致, 无法直接进行断流河长或断流严重程度级别的比较. 为了对两者的关系进行深入探讨, 可以定义一个“相对断流长度”. 其中, 功能性断流的相对长度定义为各年份小于某临界流量的总河长(L_{year} , 以下简记为 L)和各年中最大功能性断流总河长($(L_{\text{year}})_{\text{max}}$, 以下简记为 L_{max})的比值 L/L_{max} . 零流量断流的相对长度定义为各年份断流总河长(L'_{year} , 以下简记为 L')和各年中断流最大总河长($(L'_{\text{year}})_{\text{max}}$, 以下简记为 L'_{max})的比值 L'/L'_{max} . 这样, 黄河功能性断流和零流量断流严重程度的关系便可通过 L/L_{max} 和 L'/L'_{max} 的关系(见图 5)间接地得到反映.

由图 5 显示的结果, 黄河功能性断流和零流量断流的关系可以归纳如下: (i) 黄河功能性

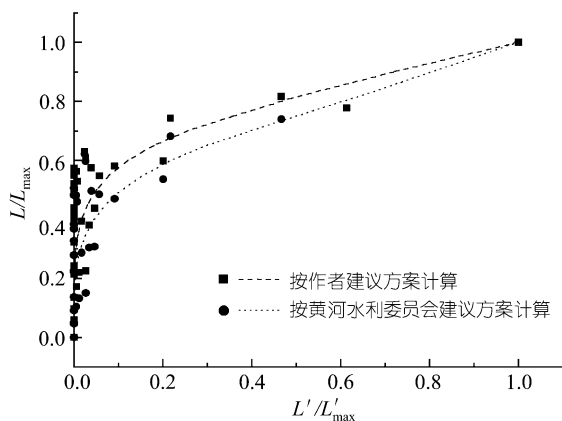


图5 黄河下游功能性断流与零流量断流相对长度的关系

断流在本质上不同于零流量断流, 在零流量断流长度未达到零时黄河功能性断流的严重性已经有各种程度不同的表现, 这说明离开黄河河流功能来探讨黄河断流问题没有多少意义. (ii) 黄河零流量断流在一定条件下是黄河功能性断流严重受损的征兆, 黄河功能性断流的严重程度随着零流量断流严重程度的增加而增加, 这说明黄河断流严重程度的增加可能对河流系统功能产生深刻的影响. (iii) 黄河功能性断流和零流量断流的关系受河流系统功能临界需水量的影响, 基于作者和黄河水利委员会方案得到的结果存在差异, 说明临界需水量是决定河流系统功能状态的关键因素.

5 结论

本文提出了黄河功能性断流的概念,给出了黄河下游功能性断流严重程度分级方法,分析了黄河河流系统功能及其所需临界水量,探讨了黄河功能性断流与零流量断流的关系.主要结论如下:

(i) 黄河断流和黄河功能性断流有着本质的区别.在河道径流明显减少直至小于某临界值时,尽管黄河并未断流,但是黄河功能性断流可能早已发生.具体表现在断流长度未达到零时,黄河功能性断流的严重性就可能已经有不同程度的表现了.

(ii) 黄河零流量断流在一定条件下是黄河功能性断流严重受损的征兆.黄河功能性断流的严重程度随着零流量断流严重程度的增加而增加,当黄河河流系统功能受损的严重程度达到某一级别时,会反过来大大加剧黄河断流的严重程度.

(iii) 黄河功能性断流或河流系统健康状况与河流功能需要的临界水量密切相关.基于作者和黄河水利委员会方案得到的结果说明,在相同的零流量断流严重程度条件下,河流功能的临界需水量越大,黄河功能性断流的严重程度级别越高.

黄河功能性断流概念的提出有助于透过表面现象去深入揭示河流系统功能变化的规律,从而为从根本上解决黄河断流问题奠定基础.

参 考 文 献

- 1 陈霁巍, 穆兴民. 黄河断流的态势、成因与科学对策. 自然资源学报, 2000, 15(1): 31~35
- 2 程进豪, 王维美, 王 华等. 黄河断流问题分析. 水利学报, 1998, (5): 75~79
- 3 Smakhtin V U. Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology, 2001, 240: 147~186
- 4 常炳炎, 薛松贵, 张会言, 等. 黄河流域水资源合理分配和优化调度. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. 132~152
- 5 朱晓原, 张学成. 黄河水资源变化研究. 郑州: 黄河水利出版社, 1999. 113 ~ 116
- 6 叶青超. 黄河断流对三角洲环境的恶性影响. 地理学报, 1998, 53(5): 385~391
- 7 何庆成. 黄河断流及其对河口区(黄河三角洲)地质环境的影响. 中国地质灾害及防治学报, 1998, (9): 392 ~ 398