

黄河水资源量可再生性问题及量化研究

夏 军^{1,2}, 王中根¹, 刘昌明¹

(1. 中科院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072)

摘要: 通过探讨黄河水资源量可再生性的量化问题, 对黄河断流的情况、危害和成因进行分析。由于水资源量可再生性问题的复杂性, 现行的方法一般都过于简单。目前迫切需要从水文循环更深层次上揭示水资源量可再生性。依据系统理论方法, 从河流水循环系统的稳定性和抗干扰能力出发, 提出度量和评价河流水体水资源量可再生性的指数。利用该指数, 对黄河干流上、中、下游河段不同年代的水资源量可再生能力进行了定量评价, 评价结果能够客观地反映实际情况。从维持水资源量可再生性的角度, 进行了黄河干流水资源量的调控分析。模拟结果表明, 20 世纪 90 年代严重的黄河断流问题主要受人为因素的影响。

关键词: 黄河; 可再生性; 水资源量; 变化环境

中图分类号: TV213.2

1 引言

水资源可再生性是指变化环境下水体通过水文循环 (包括自然和人工的循环), 能够不断得到恢复或更新的一种能力。如果细分水资源的可再生性, 它包括量与质两个方面。本文结合“黄河断流”问题, 重点探讨河流水体水资源量可再生性的量化方法。

黄河是西北和华北地区重要水源, 长期面临着水资源短缺、水灾害加剧、生态环境恶化三大问题。其中, 20 世纪 70 年代以来出现的黄河断流问题更是举世瞩目。研究黄河水资源演化规律及可再生性维持机理, 是实现黄河水资源可持续利用的基础条件。

目前, 国际上针对水资源演化已进行了大量的研究。如 UNESCO 的 IHP 计划、IGBP 的 BAHC 计划、WCRP 的 GEWEX 计划等等。这些大型的科学计划, 不仅为解决全球变化问题服务, 而且也水资源的合理利用提供科学依据。国际水文科学协会 (IAHS) 同国际气象和大气科学协会 (IAMAS), 也瞄准水资源演化的世界前沿课题研究, 在示踪、遥感、GIS 等新技术的应用、水文与大气模型的耦合和尺度转化、水文极值问题等方面, 取得了一些新的进展^[1-8]。但很少直接从水文循环深层次上探讨水资源可再生性问题。

在我国, 针对黄河问题已进行了多年的研究, 如“黄土高原综合考察与治理”、“黄河流域环境演变及水沙运行规律”; “黄河流域治理及水资源开发”; “黄河中下游水资源开发利用及河道减淤关键技术研究”和“江河泥沙灾害形成机理与防治措施研究”等^[9-12]。

但上述研究, 对黄河流域经济发展中出现的断流问题尚未顾及。黄河断流是黄河流域水资源短缺的极端表现, 虽然对此已开展了广泛的调查与讨论, 发表了不少文章^[13-21]。但是, 由于问题的复杂性, 这些研究对断流现象所包含的水资源演化和可再生性的理论问题还涉及不多。

收稿日期: 2002-12-10; 修订日期: 2003-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50239050); 国家重点基础研究发展规划项目 (G19990436-01/05); 中国科学院百人计划项目 [Foundation Item: National Natural Science Foundation of China, No.50239050; National Key Project for Basic Research, No.G19990436-01/05; One Hundred Talents Program of CAS]

作者简介: 夏军 (1954-), 男, 研究员, 博士生导师, 国家有突出贡献中青年专家, 国际水文科协 (IAHS) 水资源系统委员会副主席, 国际水资源协会 (IWRA) 常务理事, 2000 年入选中国科学院“百人计划”。

缓解黄河断流这一严重的水资源危机, 关键要从水文循环和人类活动影响的系统层面上, 阐明黄河水资源可再生的主要影响因素是什么? 如何影响? 这需要提出黄河水资源可再生性的量化指标, 探讨在自然变化和人类活动影响情况下的水资源可再生能力大小及变化规律。为认识黄河水资源可持续利用提供如何确定控制阈值的科学依据。

目前, 关于水资源量可再生性的度量, 有以下几种理解或做法。用传统意义上的水资源可更新量(即水资源量), 作为水资源量可再生性的表征值^[22]。以单位面积的水资源量作为水资源量的可再生能力^[23, 24], 也即水资源通量或径流深的概念。用水体的更新周期(或更新速率)来表述水资源量的可再生性^[25]。

以上三种做法虽然都从某一方面描述了水资源量可再生性, 具有一定的道理。但是, 在实际应用上都存在一些的局限性。目前迫切需要从水文循环更深层次上揭示水资源量的可再生性。本文从河流水循环过程及系统的稳定性入手, 探索量化黄河水资源量可再生性的指标, 并以此定量分析黄河水资源量可再生能力大小及变化规律, 从水循环可再生的角度来调控水资源量的开发强度, 维持水循环再生系统的完整性, 实现黄河水资源可持续管理与利用。

2 黄河水资源量可再生性的问题

断流是黄河面临的最严重的水资源量可再生性问题。自从 1972 年黄河首次出现断流以来, 在随后的 26 年中有 20 年出现断流。从黄河入海口利津站的断流天数统计结果(图 1), 进入 20 世纪 90 年代, 断流态势更为严峻, 不仅年年断流, 而且断流历时在延长; 断流河段也在不断向上游延展^[17]。这标志着黄河正在逐渐趋于变成季节性河流, 黄河水循环再生系统遭到了严重破坏。

黄河断流引起了一系列的社会、经济、生态、环境等问题, 严重障碍了区域可持续发展。据有关部门调查, 黄河下游 1972~1996 年因断流和供水不足造成工农业累计经济损失约 268 亿元^[13]。由于长时间的断流, 河床得不到冲刷, 汛期河槽过洪能力降低, 形成了“小洪峰, 高水位, 大漫滩, 大灾害”的不利局面^[14-20]。河道断流对环境生态的影响更是多方面、多层次, 而且具有潜在性、滞后性和不可逆转性。在黄河水量日趋减少甚至断流的情况下, 黄河本身的自净能力降低, 大量入黄废污水得不到净化, 水质环境恶化, 下游河道鱼类种群等生物资源数量急剧减少, 甚至到了濒临灭绝的边缘。因断流所引起的海水入侵, 土壤盐化、沙化等问题, 使黄河河口及三角洲的生态系统和生物多样性遭到了严重破坏。

造成黄河断流的原因来自自然和人为两个方面。20 世纪 90 年代以来, 受全球气候变化的影响, 黄河流域降雨偏少(表 1)。花园口以上 1990~1996 年全年平均降水比 1950~1989 年减小 11.5%, 汛期平均降水减少 15.4%, 非汛期平均降水减少 2.3%^[16]。受天气条件影响, 径流减少是必然的。在黄河断流的成因中, 人类活动高强度用水是主要因素。黄河流域是我国人均占有水量较低、水资源开发利用程度较高的地区之一。1997 年全流域水资源利用消耗率为 53.3%, 污染河长达 65.3%。20 世纪 80~90 年代黄河的年耗水量比 50~60 年代增加了近 100%。在降水减少的情况下, 黄河流域的

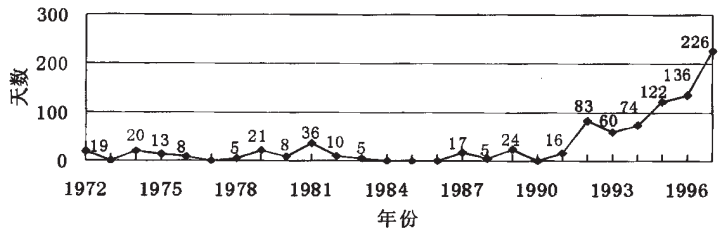


图 1 黄河利津站 1972~1997 年间断流天数统计

表 1 黄河流域 20 世纪不同年代降水情况统计 (mm)

分区	项目	50 年代	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代	多年平均
兰州以上	年	415.9	420.1	432.5	429.5	352.5	413.8
	汛期	308.4	295.9	317.7	309.8	258.6	300.6
	非汛期	107.5	124.3	114.9	119.8	93.9	113.2
兰州至河口镇	年	312.6	304.1	293.0	264.1	248.6	286.8
	汛期	233.6	215.7	220.0	190.8	191.2	211.5
	非汛期	79.0	88.4	73.0	73.3	57.5	75.3
河口镇至花园口	年	449.8	457.5	437.5	433.3	393.5	438.8
	汛期	315.2	311.7	312.8	306.4	263.6	306.2
	非汛期	134.5	145.8	124.7	126.8	129.9	132.6
花园口以下	年	684.3	695.8	658.4	564.8	635.1	648.0
	汛期	501.7	500.6	486.4	401.8	346.2	457.4
	非汛期	182.6	195.2	62.0	162.9	288.9	190.6

耗水量在逐步增加(表 2)。

3 黄河水资源量可再生性的度量

黄河断流是黄河水资源量不可再生的表现之一。水资源可再生性源于水文循环过程,并包含量与质两个方面的属性。其中,水资源量可再生性反映了水体在水量上损失后(如蒸发、流失或人类耗用等),通过大气降水和其它途径(如人工降雨或调水等)可以得到恢复即更新的一种能力。它与水体的蓄水特性、水循环过程的周期性、水体的补给以及更新速率有直接联系。维持水资源量可再生性是有条件的。由于一定时段内流域降水量和水体蓄水容量是有限的,水资源的可更新能力也是有限的。当水资源被超量开采,会影响水体水量的恢复能力;当超采状态持续下去,水循环的补给与输出平衡关系将遭到破坏。如果超过了水资源量可更新的最低限度,将导致水资源量的不可更新。对于河流水体而言,此时便会出现断流。

为了探讨黄河断流的本质,建立一维河流水文模型(图 2)。基于河流水循环系统及水量平衡关系,探索黄河水资源量可再生性的量化方法。

对于图 2 中的单元河段, V_{max} 为满岸时河段最大蓄水量, V_{min} 为维持河流生存(不断流)以及保证生态用水的河段最小蓄水量, V_n 为河流多年平均蓄水量。时段内河流水量平衡关系式如下。

$$\Delta V = (Q_I + Q_P) - (Q_D + Q_U + Q_F) \quad (1)$$

式中: ΔV 为河段蓄水量的变化量, Q_I 为上游河段的输入量, Q_P 为降水引起的河段区间输入量, Q_U 为河段内的人工用水量, Q_D 为河段向下游的输出量, Q_F 为河段下渗和蒸发等引起的输移损失量。

为了维持河流的生存,使河流水循环处于可再生的良性状态,最直观的条件是:

(1) 河段蓄水量 V 应保持一个理想的值,并介于 V_{min} 和 V_{max} 之间。如果 V 的取值小于 V_{min} , 此时即使有微小的流量,河流也处于生态断流状态;如果 V 的取值大于 V_{max} , 此时河流已处于洪水患难状态。一般情况下,希望 V 的取值等于河流多年平均蓄水量 V_n 。

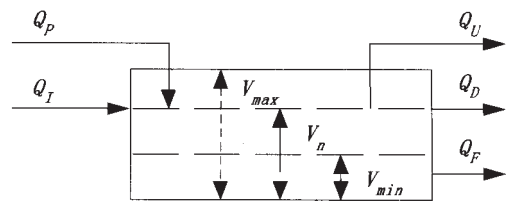


图 2 一维河流水文模型
Fig. 2 River hydrology model

(2) 在水循环的动态变化过程中, 为了维持水循环系统的稳定性, ΔV 的变幅越小越好。一般情况, $|\Delta V| = k \cdot (V_{\max} - V_{\min})$, 其中, k 为调控系数, $k \in (0, 1)$; k 越趋向 0, 河流发生断流或洪灾的风险就越小, 但从水资源开发利用的角度 k 的值不宜过小。

以上分析了维持河流可再生的条件, 下面探讨度量河流水资源量可再生性的方法。水资源量可再生性反映了水体在水量上损失后, 通过水循环可以得到恢复即更新的一种能力。换句话而言, 水资源量可再生性也是水循环系统抗干扰的一种可恢复能力。对于河流系统说, 当输入和输出发生变化时, 河流系统状态 V (即河流蓄水量) 便偏离平衡状态 (即河流多年平均蓄水量 V_n)。当向上偏离超过 V_{\max} 时, 便发生洪灾; 当向下偏离超过 V_{\min} 时, 便出现断流。以上两种情况, 都会使水循环系统遭到破坏。如果系统的偏离, 能够通过水循环过程得以恢复, 那么这种恢复能力便是河流水资源量可再生能力的一种体现。显然, 系统偏离平衡状态越大, 系统的可恢复能力就越弱。另外, 系统的可偏离空间 ($V_{\max} - V_{\min}$) 越大, 系统的可恢复性越强。

通过上述分析, 我们提出了衡量河流水资源量可再生能力的指数 α , 称其为河流水资源量可再生性指数。

$$\alpha = 1 - \frac{|V - V_n|}{V_{\max} - V_{\min}} \quad (2)$$

式中: V 为河段蓄水量, V_n 为河流多年平均蓄水量, V_{\max} 为满岸时河段最大蓄水量; V_{\min} 为维持河流生存 (不断流) 以及保证生态用水的河段最小蓄水量。

因为 V 的变化区间, $V_n \in (V_{\min}, V_{\max})$, 所以得到关系 $|V - V_n| < (V_{\max} - V_{\min})$, 由此分析出指数变化范围 $0 < \alpha \leq 1$ 。 α 越大, 河流水资源量可再生性越强。当, $\alpha = 1$ 时, $V = V_n$, 此时河流系统处于平衡状态, 其抗干扰的可恢复能力最大, 河流水资源量可再生能力也最大。

由于 $V = V_0 + \Delta V$, V_0 为河流初始蓄水量。式 (2) 可表示如下:

$$\alpha = 1 - \frac{|\Delta V + V_0 - V_n|}{V_{\max} - V_{\min}} \quad (3)$$

如果起始状态, $V_0 = V_n$, 由式 (1) 和 (3) 可得到式 (4)。

$$\alpha = 1 - \frac{|\Delta V|}{V_{\max} - V_{\min}} = 1 - \frac{|(Q_I + Q_P) - (Q_D + Q_U + Q_F)|}{V_{\max} - V_{\min}} \quad (4)$$

基于河流水资源量可再生性指数, 先对黄河断流进行的定性分析。20 世纪 70 年代以来, 黄河流域受气候变化的影响降水在逐渐减少, 而流域耗水却成倍增加 (表 1, 表 2)。这对于下流河段便意味着, Q_I 和 Q_P 减少, Q_U 增大, ΔV 负向增大趋势, 河流蓄水量 V 向下偏离平衡态, 河流水资源量可再生性指数减小。此时河流系统通过自身调节, 减少向下游的输出量 Q_D (因 Q_D 与 V 正相关)。当 Q_I 和 Q_P 持续减少, Q_U 持续增大时, 由于河流系统自调节能力有限, 河流蓄水量 V 将进一步减少, 随之指数减小, 输出量 Q_D 也减少。当指数或 Q_D 小到某个临界值便出现断流或生态断流。作为水资源规划与管理者, 可以根据指数的变化, 来调整人工取用量 Q_U , 使指数能够维持在一个合理的范围内, 确保水循环再生系统具有较强的抗破坏能力, 避免断流和洪灾的发生。

4 黄河水资源量可再生能力的评价及调控

黄河干流河道全长 5 464 km, 流域面积 $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (包括内流区 $4.2 \times 10^4 \text{ km}^2$)。黄河河口镇 (即头道拐) 以上为上游; 河口镇至桃花峪 (即花园口) 为黄河中游, 是洪水和泥沙的主要来源区; 黄河干流自桃花峪以下为黄河下游。其中上中游地区的面积占总面积的 97%。黄河上中下游的十流控制水文站, 分别有头道拐、花园口和利津 (图 3, 表 3)。

黄河流域多年平均天然年径流总量 $580 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，只占全国的 2%，水资源较为贫乏。黄河河川径流主要集中在汛期，干流及主要支流 7~10 月径流量一般占年径流量的 60% 以上。黄河干流各站年最大径流量为年最小径流量的 3.1~3.5 倍，支流一般达 5~12 倍 (图 4)。黄河河川径流利用率已达 53%，与国内外大江大河相比，水资源利用程度属较高水平 (数据来源 www.yellowriver.gov.cn)。

下面基于河流水资源量可再生性指数，定量评价黄河上、中、下游三个河段在不同年代里的水资源量可再生能力大小及空间分布。在计算时，首先要估算黄河上、中、下游三个河段的年最大蓄水容量 V_{\max} 。具体做法为：根据河段特征值和历年的观察资料，确定出黄河上、中、下游河段的年均流速分别为 1.5、0.6、0.4 m/s。根据河段长度与流速之比，计算出黄河上、中、下游河段水体的年更换次数大约为 26、23、23。根据观察资料估算黄河上、中、下游河段平均最大过水断面，分别为 660 m^2 、 $1\ 800 \text{ m}^2$ 、 $1\ 400 \text{ m}^2$ 。根据河段年最大蓄水容量 = 河段平均最大过水断面 × 河段长度 × 年更换次数，初步估计黄河上、中、下游三个

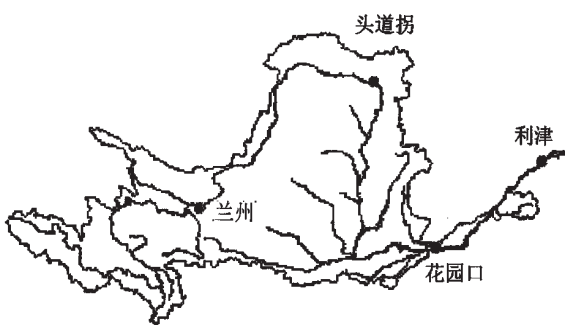


图 3 黄河流域及干流各河段划分图

Fig. 3 Yellow River basin and the reaches division

表 3 黄河干流各河段特征值

Tab. 3 Characteristics of the reaches of Yellow River

河段	起迄地点	流域面积/ km^2	河长/ km	总落差/ m	比降/ 10^{-3}
上游	河源至河口镇	428235	3471.6	3496.0	10.1
中游	河口镇至桃花峪	343751	1206.4	890.4	7.4
下游	桃花峪至河口	22726	785.6	93.6	1.2
全河	河源至河口	794712	5463.6	4480.0	8.2

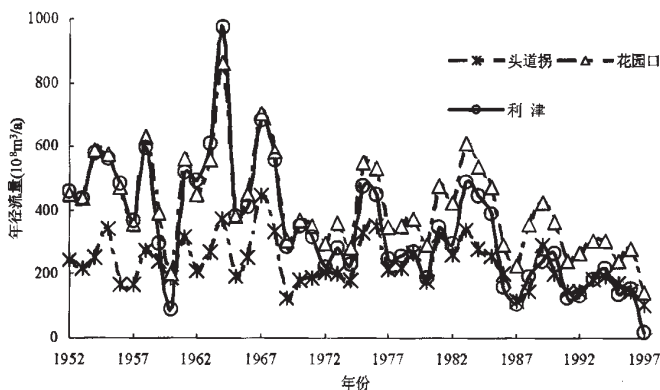


图 4 黄河头道拐、花园口和利津站实测年径流量

Fig. 4 Comparison of measured annual runoff at the Toudaoguai, Huayuankou and Lijin stations of Yellow River

个河段的年最大蓄水容量 V_{\max} 分别为： $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $250 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因缺少生态需水资料，最小蓄水容量 V_{\min} 分别按 V_{\max} 的 10%、10%、5% 进行取值。由于 20 世纪 50 年代初整个黄河流域降水和耗水情况都比较好，可认为黄河上、中、下游三个河段水循环再生系统都比较稳定，按式 (4) 和式 (1) 连续计算不同年代的指数 (表 4，图 5)。

黄河干流各河段水资源量可再生性越来越弱 (图 5)。到 90 年代，下游河段的指数最差为 0.2，已属于低劣状态，中、上游也处于 0.6 以下。这与 90 年代黄河下游出现的严重断流，并向中游发展的实情相一致。在空间分布上，下游河段的水资源量可再生能力最差，在 70 年代指数就已低于 0.4，

表 4 黄河干流各河段 20 世纪水资源量可再生性指数

Tab. 4 Water renewability index of the Yellow River in the 20th century

河段	50 年代	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代
上游	0.98	0.84	0.78	0.65	0.57
中游	0.80	0.59	0.55	0.44	0.41
下游	0.79	0.46	0.29	0.23	0.20

其次是中游，上游最好。评价结果较客观地反映了实际情况，说明河流水资源量可再生性指数，能够正确地描述和揭示河流水资源量可再生能力的大小及变化规律。

(1) 如果想避免 90 年代出现的黄河严重的断流问题，将人类活动耗水量降到 60 年代的水平(图 6)。应使黄河上、中、下游 3 个河段的指数均有所提高，分别为：0.64、0.50、0.51。这样黄河下游段在 90 年代就不会发生断流。

(2) 如果从 70 年代起人类活动耗水量均按 60 年代的水平，黄河上、中、下游 3 个河段的指数(图 7)将不低于 5.0，整个河流的水资源量可再生能力有所提高。

(3) 如果从 70 年代起人类活动耗水量在上、中、下游河段分别按 110×10^8 、 55×10^8 、 $75 \times 10^8 \text{ m}^3$ 分配，90 年代黄河干流河段的指数(图 8)将不低于 0.52，整个河流的水资源量可再生能力将趋向比较合理的状态。

从模拟情况看，指数主要受人工耗水的影响，也说明黄河断流主要受人为因素影响。

5 结语

(1) 黄河断流是黄河水资源可再生系统出现了严重问题的重要标志，也是黄河流域经济发展中水资源超量开采的表现。解决断流问题，关键要探讨断流现象所包含的水资源演化和可再生性的实质问题，本文提出量化和评价黄河水资源量可再生性指数，为认识黄河断流的原因和黄河水资源可持续利用提供一种如何确定控制阈值的依据方法。

(2) 水资源量可再生性反映了水体在水量上损失后，通过水循环可以得到恢复(即更新)的一种能力。因此，本文认为水资源量可再生性也是

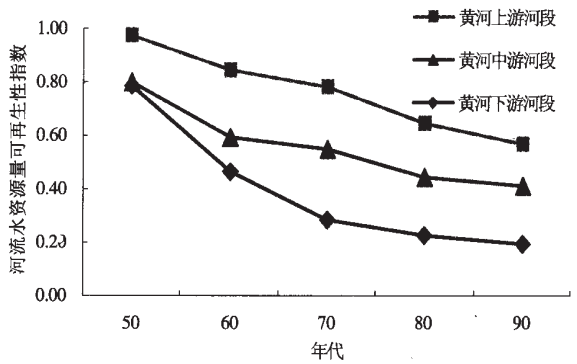


图 5 黄河干流各河段水资源量可再生能力评价图
Fig. 5 Reality evaluation of river water renewability in the upper, middle and lower reaches of the Yellow River

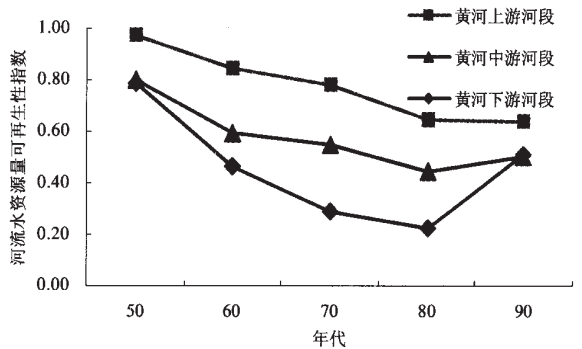


图 6 人类耗水量 90 年代按 60 年代水平黄河干流水资源量可再生能力评价图

Fig. 6 Scenario evaluation of river water renewability: on the assumption that in the 1990s water use is the same as in the 1960s in the mainstems of the Yellow River

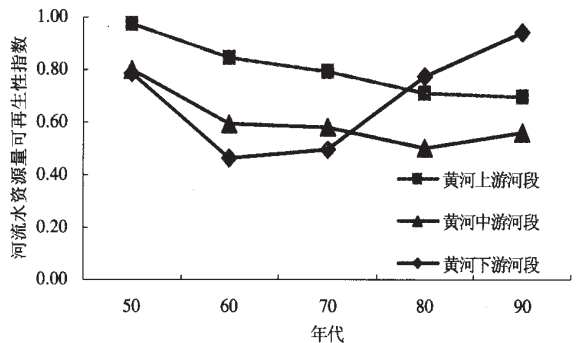


图 7 人类耗水量 70、80、90 年代按 60 年代水平黄河干流水资源量可再生能力评价图

Fig. 7 Scenario evaluation of river water renewability: on the assumption that from the 1970s onward water use is the same as in the 1960s in the mainstems of the Yellow River

水循环系统抗干扰的一种可恢复能力的体现。对于变化环境中的河流而言,当系统输入和输出发生变化时,系统的状态便偏离平衡状态。偏离的越远,河流系统遭到破坏的可能性就越大,可恢复能力就越小。如果河流系统处于稳定状态,输入和输出平衡,河流就不会发生断流,河流水资源量可再生性就能得到维持。基于这种理解,从河流水循环系统的稳定性和抗干扰能力出发,提出的河流水资源量可再生性指数是一种简便易行的途径。

(3) 通过对黄河干流上、中、下游河段不同年代的水资源量可再生能力的宏观评价结果看,本文提出的河流水资源量可再生性指数,能够客观地反映和揭示黄河断流的实际情况。从黄河干流水资源量的调控分析,20世纪90年代严重的黄河断流问题主要受人为因素的影响,可以通过人类活动耗水量的调节加以控制。而这些模拟分析结果,都能通过河流水资源量可再生性指数的变化,十分直观的表现出来。

(4) 水资源量可再生性的研究工作,刚刚起步。本文仅针对河流水循环系统,提出河流水资源量可再生性的量化和评价指数。关于河流水质可再生性的问题,还有大量研究工作需要开展。

参考文献 (References)

- [1] Zuo Qiting, Wang Zhonggen. Modern Hydrology. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2002. 100-130. [左其亭, 王中根 著. 现代水文学. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. 100-130.]
- [2] Wood E F. Global scale hydrology. Reviews of Geophysics, 1991, (Supplement): 193-201.
- [3] Newson M D. Land, Water, and Development. London: Routledge, 1992.
- [4] Biswas A K et al. Water for Sustainable Development in the 21st Century. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [5] Wigmosat M S, L W Vail, D P Lettenmaier. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. Water Resources Research, 1994, 30(6): 1665-1679.
- [6] American Geophysical Union, U S. National Report to IUGG, 1991-1994, Contributions in Hydrology, Boulder, Colorado, July, 1995.
- [7] Xia Jun, Tan Ge. Hydrological science towards global change: progress and challenge. Resources Science, 2002, 24(3): 1-7. [夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战. 资源科学, 2002, 24(3): 1-7.]
- [8] Xia Jun, Zhu Yizhong. The measurement of water resources security: Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 262-269. [夏军, 朱一中. 水资源安全度量. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269.]
- [9] Yellow River Dry-up and Basin Sustainable Development. Beijing: China Environmental Science Press, 1997. [黄河断流与流域可持续发展. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.]
- [10] Meng Qingmei. Soil and Water Conservation of Loess Plateau. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1997. [孟庆枚. 黄土高原水土保持. 黄河水利科技丛书. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.]
- [11] Comprehensive Science Investigation of Loess Plateau of CAS. Water Resources Problems and Its Countermeasures in Loess Plateau. Beijing: China Scientific and Technological Press, 1996. [中科院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区水资源问题及其对策. 北京: 中国科技出版社, 1996.]
- [12] Liu Changming. Research on Water Problems in China. Beijing: China Meteorological Press. 1996. [刘昌明. 中国水问题研究. 北京: 气象出版社, 1996.]
- [13] Shi Zhen. Environmental economy analysis and assessment on Yellow River dry-up. Water Conservancy Economy, 1999, (1): 45-49. [施珍. 黄河断流的环境经济评估浅析. 水利经济, 1999, (1): 45-49.]

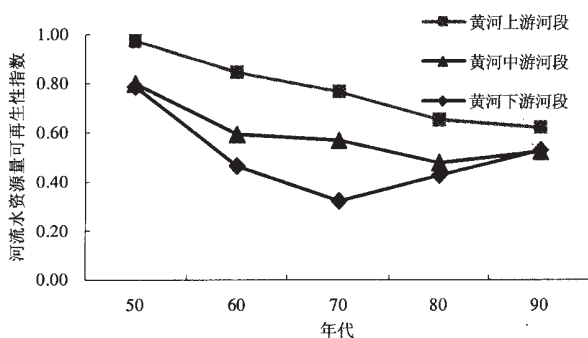


图8 黄河各河段人类耗水量70起年代按110、55、75亿 m^3 干流水资源量可再生能力评价图

Fig. 8 Scenario evaluation of river water renewability: (c) on the assumption that from the 1970s water use in the mainstreams of the Yellow River is 110, 55 and 75 $\times 10^8 m^3/a$ respectively

- [14] Wu Kai. General situation, the changing regularities and the forecast of the absence of flow in the Huanghe River. *Geog. Res.* 1998, 17(2): 125-130. [吴凯. 黄河断流概况、变化规律及其预测. *地理研究*, 1998, 17(2): 125-130.]
- [15] Chen Jiwei. Tendency, causes and control measures on Yellow River dry-up. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(1): 31-35. [陈霁巍. 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.]
- [16] Chen Xiande. Zero flow and water resources in the Yellow River. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 1999, 2(1): 34-37. [陈先德. 黄河断流及水资源变化特点. *水利水电科技进展*, 1999, 2(1): 34-37.]
- [17] Liu Changming, Cheng Li. Analysis on runoff series with special reference to drying up courses of lower Huanghe River. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 257-265. [刘昌明, 成立. 黄河干流下游断流的径流序列分析. *地理学报*, 2000, 55(3): 257-265.]
- [18] Wang Lin. Analysis on dry-up courses of lower Yellow River. *Yellow River*, 1997, (10): 13-17. [王玲. 黄河下游断流成因分析. *人民黄河*, 1997, (10): 13-17.]
- [19] Zhang Guangdou. Talk about the problem of Yellow River dry-up. *Yellow River*, 1997, (10): 27-29. [张光斗. 论黄河断流问题. *人民黄河*, 1997, (10): 27-29.]
- [20] Zhai Jiarui. Analysis on with representative year datum to lower Yellow River dry-up. *Yellow River*, 1997, (10): 22-26. [翟家瑞. 黄河下游断流成因典型年分析. *人民黄河*, 1997, (10): 22-26.]
- [21] Zhang Huiyan. Prospects of water resource supply and demands in the Yellow River. *Yellow River*, 1996, (8): 10-14. [张会言. 黄河地区需水量发展趋势. *人民黄河*, 1996, (8): 10-14.]
- [22] Zeng Weihua, Yang Zhifeng. Principium of the reproducible ability of water resources. *Advances in Water Science*, 2001, 12(2): 276-279. [曾维华, 杨志峰. 水资源可再生能力刍议. *水科学进展*, 2001, 12(2): 276-279.]
- [23] Shen Zhenyao, Yang Zhifeng, Liu Changming. Water resource reproducible ability and its relationship with refresh rate. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(2): 162-165. [沈珍瑶, 杨志峰, 刘昌明. 水资源的天然可再生能力及其与更新速率之间的关系. *地理科学*, 2002, 22(2): 162-165.]
- [24] Mou Haisheng. Approach on the models of cannotation and evaluation of water resources. In: Liu Changming, *Research on Water Problems in China*. Beijing: China Meteorological Press, 1996. 9-12. [牟海省. 水资源内涵及价值评估若干模式的探讨. 见: 刘昌明, *中国水问题研究*. 北京: 气象出版社, 1996. 9-12.]
- [25] Adam H S. A macro-scale natural hydrologic cycle water availability model. *J of Hydrology*, 1997, 201: 329-347.

The Renewability of Water Resources and Its Quantification of the Yellow River Basin in China

XIA Jun^{1,2}, WANG Zhonggen¹, LIU Changming¹

(1. *Institute of Geographic Sciences & Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *College of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)*

Abstract: The drying-up event in the lower reaches of the Yellow River during the 1990s was the most serious problem of water resources issues in China that involved the concept of water resources renewability in the Yellow River basin. The problem of renewability linked with hydrological process affected by climate change and human activity was addressed in this paper. A quantitative method was developed to analyse causes and to propose countermeasures to improve renewability of water resources. The magnitude of renewability and change in time and space within the river system can be represented using this method. According to the analysis of observation data set, the renewability of water resources of the Yellow River basin has had a significant declining trend since the 1950s. Specially, the renewability indicator in the downstream has reduced 0.2 with a worse situation of the 1990s. By renewability assessment, some of the workable countermeasures can be analyzed.

Key words: Yellow River; renewability; water resources; environmental change