

人类活动影响下的黄河流域 水资源演化规律初探

王 浩,贾仰文,王建华,秦大庸,周祖昊,仇亚琴,严登华

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所 北京 100044)

摘要:应用分布式流域水文模型 WEP-L 模型初步分析了人类活动影响下的黄河水资源演化规律。通过 2000 年现状下垫面条件下的评价结果与历史系列条件下的评价结果比较,以及考虑与不考虑人工取水条件下的模拟结果比较,初步发现:黄河流域在强烈的人类活动影响下,水资源量及其构成均发生了显著变化,地表水资源量衰减,而不重复地下水量增加;在狭义水资源衰减的同时,伴随着有效蒸散即降水有效利用的增加,流域广义水资源量有一定幅度增加。研究成果对黄河的治理规划和水安全战略具有参考价值。

关键词:流域;水循环;水资源;分布式水文模型;WEP-L 模型

中图分类号:P333,TV121 文献标识码:A 文章编号:1000-3037(2005)02-0157-06

1 前言

迄今为止,国内外水资源评价方法与实践均是基于“实测—还原”的一元静态模式^[1-2]①,即通过实测水文要素后,再把实测水文系列中隐含的人类活动影响扣除,“还原”到流域水资源的天然“本底”状态。但是,随着人类活动日益加剧,还原比例越来越大,受资料条件等客观因素的限制和选取还原参数时人为主观随意性的影响,应用还原法难以获取“天然”和“人工”二元驱动力作用下的水资源量“真值”。同时,现行水资源评价方法还存在以下问题:①以地表水和地下水构成的径流性水资源为评价口径,评价口径不全面,难以反映水资源的多元有效性(如生态植被对土壤水的有效利用等);②以分离评价为基本模式,如地表水评价与地下水评价相分离、水资源量评价与开发利用评价相分离,难以适应水资源综合规划需求;③采取分区集总式的评价方法,在描述水资源的空间变异特征和指导开发利用方面存在一定的局限。因此,传统水资源评价方法和评价手段亟待改进。

在综合分布式流域水文模型、陆面地表过程模型和传统水资源评价等研究成果的基础上,笔者发展了 WEP 模型和 IWHR-WEP 模型^[3-6],并结合黄河流域的特点,构建了黄河流域分布式水文模型 WEP-L (Water and Energy transfer Processes in Large river basins) 模型。WEP-L 模型主要有以下几方面特点:①综合了分布式流域水文模型和陆面地表过程模型(SVATS 模型)的各自优点,实现了水循环与能量交换过程的耦合模拟;②依据 DEM 和实测河流矢量图进行包含空间拓扑信息的河网生成与子流域划分,以“子流域内等高带”为计算

收稿日期:2004-11-02;修订日期:2004-12-10。

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(G19990436)课题 2。

第一作者简介:王浩(1953~),男,北京人,教授级高工,博士生导师,博士,主要从事水文水资源学研究。

致谢:黄委会水文局的王玲教授、张学成教授、设计院规划处的张新海总工等同仁给予本研究极大的支持和帮助,在此表示感谢。

①水利部水利水电规划设计总院.全国水资源综合规划技术细则.2002.

单元,并用“马赛克”法考虑计算单元内土地覆被的多样性,既避免了“大流域粗网格”带来的水量平衡失真与汇流路径失真问题,又能够合理表述水文变量空间变异特征;③针对各水循环要素过程的特点,采用“变时间步长”进行模拟计算,既保证了水循环动力学机制的合理表述,又提高了计算效率;④在产汇流计算中体现了变水源区(VSA)理论,能够模拟超渗、蓄满和泉水溢出等各种产流机制的产汇流过程,并做到了“地表水、地下水以及土壤水的联合动态计算”;⑤与集总式水资源调控模型进行交互反馈,实现天然主循环系统与人工侧支系统的紧密耦合;⑥模型计算速度快(全黄河流域一年模拟时间 11 分钟),既可用于洪水预报又可用于长期连续计算。

本文应用该模型进行了人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初步分析。

2 黄河流域水资源评价^[7,8]

水资源的本质特征包括有效性、可控性和可再生性 3 个方面,水资源评价相应地有 3 个评价准则。有效性是指,对社会经济发展和生态环境具有效用的水分均可以看作是水资源;可控性是指,在对人类具有效用的水分中,通过采取工程措施可以开发利用的那一部分水分;可再生性是指,水资源在流域水循环形成和转化过程中,其作为可再生性资源的充分必要条件是保持流域水循环过程的相对稳定。由此可见,根据有效性准则定义的水资源包括了降水中的有效部分和径流性水资源,是一种广义水资源,在广义水资源范畴内,根据可控性准则定义的水资源是传统水资源评价的径流性水资源,即狭义水资源。在狭义水资源范畴内,进一步从可再生性准则出发,在自然条件和经济条件允许的情况下,能被工程系统一次性开发利用的最大潜在量,可定义为水资源的国民经济可利用量。

广义水资源总量等于不重复的有效蒸散(发)量与狭义水资源总量之和,可用式(1)表示:

$$W_s = (R_s + R_g) + E_p + E_{ss} + E_{es} \quad (1)$$

式中: W_s ——广义水资源量; R_s ——地表水资源量; R_g ——不重复的地下水资源量; E_p ——冠层截流蒸发量; E_{ss} ——地面截流有效蒸发; E_{es} ——与地表水、地下水不重复的土壤水有效蒸发量。

本研究认为,林草冠层蒸发可直接降低植物表面和体内的温度,对维护植物正常生理是有益的,因此,林草冠层截流蒸发是有效的,居民与工业用地是人类居住和活动的集散地,蒸发可以起到降温、湿润等直接的环境作用,并认为这一部分蒸发也是有效的。对于地面截流蒸发,本研究认为居民与工业用地上的地面截流蒸发、作物和林草棵间截流蒸发分别对于人类和生态环境主体有直接环境效用,应将其纳入到有效的广义水资源范畴。对于难利用土地截流蒸发(沼泽地除外)、稀疏草地的大棵间截流蒸发等都作为无效蒸发;对于土壤水蒸散(发)中,蒸腾耗散的水分直接参与了生物量的生成,属于有效水分,居民与工业用地土壤蒸发、作物和林草棵间土壤蒸发对于人类和生态环境主体也有直接环境效用,作为有效蒸发。潜水蒸散(发)是从狭义的地下水资源转化而来,全部属于有效水分。

本研究中,狭义水资源评价与传统水资源评价口径一致,即是地表水资源量与不重复的地下水资源量之和。

在 2000 年现状下垫面和取用水影响情景下,黄河流域 1956~2000 年系列各二级分区的广义水资源评价结果见表 1。从表 1 可以看出,黄河流域 1956~2000 年系列平均降水量为 $3\,563 \times 10^8 \text{ m}^3$,现状下垫面和取用水影响情景下平均广义水资源量为 $2\,756.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,占降水量的 77.4%,其中非径流性有效水分为 $2\,080.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,是径流性狭义水资源的 3.1 倍,这表明以土壤水等其他形式赋存的有效降水对于经济和生态系统起到重要的支撑作用。在各二级区当中,三门峡—花园口区间的广义水资源占降水比例最高,占 94.7%,而内流区的比例最低,占 54.2%。

表 1 现状条件下黄河流域广义水资源 (10⁸m³)评价结果

Table 1 Assessment of broad sense water resources under present condition in the Yellow River Basin

水资源分区	降水量	狭义水资源	有效降水利用量			总量	广义水资源
			农田有效蒸散 ^①	林草有效蒸散 ^②	居工地有效蒸发 ^③		
黄河区	3 563.0	676.4	890.9	1 173.3	15.9	2 080.1	2 756.6
龙羊峡以上	632.3	212.1	5.5	227.2	0.1	232.8	444.8
龙羊峡至兰州	433.0	116.1	48.5	182.8	1.0	232.3	348.4
兰州至河口镇	427.6	53.7	119.6	116.7	2.8	239.1	292.9
河口镇至龙门	480.2	49.2	144.6	143.0	0.6	288.2	337.4
龙门至三门峡	1 038.9	143.5	386.8	330.1	6.7	723.6	867.1
三门峡至花园口	274.7	50.3	89.6	118.5	1.6	209.7	260.0
花园口以下	157.8	32.0	85.8	20.8	2.9	109.5	141.5
内流区	118.6	19.5	10.5	34.1	0.1	44.7	64.3

黄河流域 1956~2000 年系列分区狭义水资源评价结果见表 2。从表 2 可以看出 2000 年现状下垫面和取用水条件下 ,黄河流域传统的狭义水资源总量为 676.4×10⁸m³ ,其中地表水资源量为 548.7×10⁸m³ ,地下水资源量为 404.2×10⁸m³ ,不重复的地下水资源量为 127.7 ×10⁸m³。

表 2 现状条件下黄河流域狭义水资源 (10⁸m³)评价

Table 2 Assessment of narrow sense water resources under present condition in the Yellow River Basin

水资源分区	地表水资源量	地下水资源量		狭义水资源总量
		资源总量	不重复资源量	
黄河区	548.7	404.2	127.7	676.4
龙羊峡以上	210.1	65.3	1.9	212.1
龙羊峡至兰州	112.8	37.0	3.4	116.1
兰州至河口镇	18.5	58.6	35.2	53.7
河口镇至龙门	42.3	40.0	6.9	49.2
龙门至三门峡	104.5	125.1	39.0	143.5
三门峡至花园口	39.2	35.1	11.0	50.3
花园口以下	18.0	23.6	14.0	32.0
内流区	3.3	19.5	16.2	19.5

现状条件下 1956~2000 年系列黄河干流各主要断面水资源评价结果见表 3。从表 3 可以看出 2000 年现状条件下 45 年系列黄河花园口断面天然年径流量为 485.4×10⁸m³ ,不重复地下水资源量为 97.5×10⁸m³ ,水资源总量为 582.9×10⁸m³。

表 3 现状条件下黄河主要断面 1956~2000 年系列狭义水资源(10⁸m³)评价结果

Table 3 Assessment of narrow sense water resources of main cross sections under present condition in the Yellow River Basin from 1956 to 2000

主要断面	地表水资源量	地下水资源量		狭义水资源总量
		资源总量	不重复资源量	
贵德	201.7	65.3	1.9	203.6
兰州	308.0	102.2	5.3	313.3
头道拐	313.6	160.9	40.5	354.1
龙门	351.5	200.9	47.4	398.9
三门峡	448.9	325.9	86.5	535.4
花园口	485.4	361.0	97.5	582.9

①农田有效蒸散包括农作物冠层截流蒸发、农作物土壤蒸腾和棵间土壤蒸发 ,但不包括潜水蒸散 (发)。

②林草有效蒸散包括林草冠层截流蒸发、林草土壤蒸腾和小棵间蒸发 ,也不包括潜水蒸散 (发)。

③居工地包括城镇用地、农村居民点和其他建设用地 ,居工地有效蒸散是指土壤蒸散 (发)。

3 黄河流域水资源演化规律分析

3.1 水资源历史演变规律分析

黄河流域 1956~2000 年系列狭义水资源评价的“历史仿真”结果见表 4。可以看出,在“自然—人工”双驱动力作用下,黄河流域 1980~2000 年系列平均狭义水资源总量较 1956~1979 年系列减少 3.1%,其中地表水资源衰减 6.9%,但不重复的地下水资源增加了 21.4%。

表 4 黄河流域狭义水资源 (10^8m^3) 系列仿真评价

Table 4 Simulation and assessment of narrow sense water resources in series in the Yellow River Basin

时段	地表水资源量	地下水资源量		水资源总量
		资源总量	不重复资源量	
1956~1959	608.6	372.8	69.4	678.0
1960~1969	650.2	383.0	89.7	739.9
1970~1979	569.8	396.5	112.0	681.7
1980~1989	614.0	395.8	109.9	723.9
1990~2000	524.9	393.7	122.8	647.7
1956~1979	609.4	386.9	96.2	705.6
1980~2000	567.1	394.7	116.8	683.9
1956~2000	548.7	404.2	127.7	676.4

3.2 人工取用水对流域水资源演变的影响

以 2000 年现状下垫面条件为基础,黄河流域有、无取用水两种情景下的 45 年系列水资源评价结果见表 5。可以看出,人工取用水对于流域水资源演变影响主要表现在:①改变了狭义水资源的构成,人工取用水通过袭夺河水减少了地下水的河川排泄量,从而使得河川径流量有明显减少,不重复的地下水资源量有明显增加。虽然狭义水资源总量没有太大变化,但水资源构成变化带来一系列生态环境后果,包括河流生态系统的维护和地下水超采负面生态环境后效等问题;②有效降水利用量有所增加,主要是因为人工取用水造成地下水位下降,包气带增厚,增加了有效土壤水资源量,有利于降雨就地利用。

表 5 有、无取用水情景下的水资源 (10^8m^3) 评价对比

Table 5 Comparison of assessment of water resources under use or non-use conditions

分区	情景	有人工取用水情景				无人工取用水情景					
		地表水 资源	地下水 总量	水重复 地下水	水资源 总量	有效蒸 散(发)	地表水 资源	地下水 总量	不重复 地下水	水资源 总量	有效蒸 散(发)
	龙羊峡以上	210.1	65.3	1.9	212.1	232.8	210.9	65.0	1.85	212.8	232.5
	龙羊峡至兰州	112.8	37.0	3.4	116.1	232.3	114.7	35.6	0.63	115.3	228.9
	兰州至河口镇	18.5	58.6	35.2	53.7	239.2	19.5	47.6	28.89	48.3	224.2
	河口镇至龙门	42.3	40.0	6.9	49.2	288.2	43.3	47.1	10.32	53.6	287.3
	龙门至三门峡	104.5	125.1	39.0	143.5	723.6	120.1	119.3	28.27	148.4	725.9
	三门峡至花园口	39.2	35.1	11.0	50.3	209.8	48.1	31.2	1.26	49.3	214.5
	花园口以下	18.0	23.6	14.0	32.0	109.5	24.0	13.7	8.63	32.7	113.6
	内流区	3.3	19.5	16.2	19.5	44.8	3.3	21.5	19.31	22.6	43.6
	总计	548.7	404.2	127.7	676.4	2 080.1	583.9	381.1	99.2	683.1	2 070.5

3.3 下垫面变化对流域水资源演变的影响

历史实际系列下垫面情景和 2000 年现状下垫面情景下的水资源评价,对比结果见表 6。可以看出,下垫面变化对流域水资源演变影响主要表现在:①狭义水资源的总量减少了 $20 \times 10^8\text{m}^3$,其中地表水减少了 $41 \times 10^8\text{m}^3$,不重复地下水增加了 $21 \times 10^8\text{m}^3$ 。这主要是因为随着水土保持、田间整治、梯田建设等各项人工措施实施,不利于地表水产流,而增加了

垂向的下渗量；②有效降水利用量增加 $113.9 \times 10^8 \text{m}^3$ ，不仅利用了就地拦蓄下来的径流性水资源，而且还增加了原有一部分无效的土壤水和地表截流；③广义水资源总量增加 $94.1 \times 10^8 \text{m}^3$ 。在上述狭义水资源衰减、其他形式有效水分增加的作用下，流域广义水资源量仍有一定幅度增加。

表 6 历史系列下垫面和现状下垫面水资源 (10^8m^3) 评价结果对比

Table 6 Comparison of assessment of historical underlying surfaces and present underlying surfaces water resources

分区	情景		历史下垫面					2000 年下垫面				
	地表水	地下水	不重复	水资源	有效蒸	地表水	地下水	不重复	水资源	有效蒸		
	资源	总量	地下水	总量	散(发)	资源	总量	地下水	总量	散(发)		
龙羊峡以上	223.3	67.7	1.8	225.1	207.3	210.1	65.3	1.9	212.1	232.8		
龙羊峡至兰州	123.5	37.7	2.3	125.9	218.9	112.8	37.0	3.4	116.1	232.3		
兰州至河口镇	19.9	58.3	33.7	53.5	233.1	18.5	58.6	35.2	53.7	239.2		
河口镇至龙门	41.1	37.0	5.3	46.4	275.4	42.3	40.0	6.9	49.2	288.2		
龙门至三门峡	114.8	116.2	29.3	144.2	699.9	104.5	125.1	39.0	143.5	723.6		
三门峡至花园口	42.3	35.4	7.8	50.1	176.2	39.2	35.1	11.0	50.3	209.8		
花园口以下	21.4	19.8	11.6	33.0	108.4	18.0	23.6	14.0	32.0	109.5		
内流区	3.1	18.6	14.9	18.0	46.8	3.3	19.5	16.2	19.5	44.8		
总计	589.4	390.6	106.7	696.2	1 966.2	548.7	404.2	127.7	676.4	2 080.1		

4 总结

(1) 本研究应用 WEP-L 模型提出了黄河流域现状下垫面和取用水影响情景下的全口径水资源评价成果。1956~2000 年系列平均降水量为 $3 563 \times 10^8 \text{m}^3$ ，平均广义水资源量为 $2 756.6 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占降水的 77.4%，其中非径流性有效水分为 $2 080 \times 10^8 \text{m}^3$ ，狭义水资源总量为 $676.4 \times 10^8 \text{m}^3$ 。地表水资源量为 $548.7 \times 10^8 \text{m}^3$ ，地下水资源量为 $404.2 \times 10^8 \text{m}^3$ ，不重复的地下水资源量为 $127.7 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

(2) 根据黄河流域 1956~2000 年系列水资源评价的“历史仿真”结果，黄河流域 1980~2000 年系列平均狭义水资源总量较 1956~1979 年系列减少 3.1%，其中地表水资源衰减 6.9%，但不重复的地下水资源增加了 21.4%。

(3) 通过 2000 年现状下垫面条件下，黄河流域有、无取用水两种情景下的 45 年系列模拟结果对比以及历史实际系列下垫面情景和 2000 年现状下垫面情景下的评价结果比较，人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律主要表现在 ①改变了狭义水资源的构成，即河川径流量有明显减少，不重复地下水明显增加。这也合理揭示了为什么后来的水资源评价中不重复地下水量比我国第一次水资源评价结果 ($82 \times 10^8 \text{m}^3$ ，1956~1979 年系列) 增大。虽然狭义水资源总量略有衰减，但水资源构成的急剧变化将带来一系列生态环境后果。因此，在黄河流域水资源开发利用中应注意地下水的超采问题，以利于河流生态系统的维护和避免地下水超采引起生态环境问题；②有效降水利用量增加，不仅利用了就地拦蓄下来的径流性水资源，而且还增加了原有一部分无效的土壤水和地表截流；③在狭义水资源衰减的同时，由于有效蒸散(发)量的增加，提高了降水的有效利用，流域广义水资源量仍有一定幅度增加。

参考文献(References) :

- [1] 水利电力部水文局.中国水资源评价[M].北京:水利电力出版社,1986.[Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources and Electricity.China Water Resources Assessment.Beijing:Water Resources and Electricity Press,1986.]
- [2] 贺伟程.论区域水资源的基本概念和定量方法[A].中国水利水电科学研究院.水利水电科学研究院科学论文集第 14 集 (水资源)[C].北京:水利电力出版社,1983.13~24.[HE Wei-cheng.On basic concept and quantitatively analysis

- method of regional water resources. In: China Institute of Hydropower and Water Resources Research, Proceedings of China Water Resources and Hydropower Research, vol.14 (Water Resources). Beijing: Water Resources and Electricity Press, 1983.13~24.]
- [3] Jia Y, Ni G, Kawahara Y, Suetsugi T. Development of WEP model and its application to an urban watershed [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15: 2175~2194.
- [4] Jia Y, Ni G, Kinouchi T, *et al.* Assessing the effects of infiltration and storm-water detention facilities in an urban watershed using a distributed hydrological model [A]. In: IAHR. Proc. of 29th Congress of International Association of Hydraulic Research (IAHR) Theme C [C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 379~384.
- [5] 贾仰文, 王浩. 分布式流域水文模拟研究进展及未来展望 [J]. 水科学进展 2003, 14(增刊): 118~123. [JIA Yang-wen, WANG Hao. Advances in distributed watershed hydrological modeling and future prospects. *Advances in Water Science*, 2003, 14 (supplement): 118~123.]
- [6] 贾仰文. WEP 模型的开发和应用 [J]. 水科学进展 2003, 14(增刊): 50~56. [JIA Yang-wen. Development and applications of WEP model. *Advances in Water Science*, 2003, 14 (supplement): 50~56.]
- [7] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 现代水资源评价及水资源学学科体系研究 [J]. 地球科学进展 2002, 17(1): 12~17. [WANG Hao, WANG Jian-hua, QIN Da-yong, *et al.* The study on water resources assessment and subject system of water resources study on modern times. *Advances in Earth Sciences*, 2002, 17(1): 12~17.]
- [8] 王浩, 秦大庸, 陈晓军. 水资源评价准则及其计算口径 [J]. 水利水电技术 2004, (2): 1~4. [WANG Hao, QIN Da-yong, CHEN Xiao-jun. Water resources assessment standards and calculation specifications. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2004, 35(2): 1~4.]

Evolutionary Laws of the Yellow River Basin 's Water Resources under the Impact of Human Activities

WANG Hao, JIA Yang-wen, WANG Jian-hua, QIN Da-yong,
ZHOU Zu-hao, QIU Ya-qin, YAN Deng-hua

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: The paper applies the dualistic distributed hydrological model (WEP-L model) to study the evolutionary laws of the Yellow River Basin 's water resources under the impact of human activities. The water resources assessment results under present underlying surfaces are compared with those under historical underlying surfaces, and the water resources assessment results under no water use condition are compared with those under water use condition as well. By contrast, it is shown that the quantity and compositions of water resources changed distinctly under the impact of intensive human activities. The two main variations are as follow: (1) the surface water resources reduced but the ground water resources which is unrepeatably with the surface water resources increased; (2) the special water resources reduced but the general water resources increased accompanied with increase of the effective evaporation, namely, effective utilization of precipitation. The research achievement can be referenced for comprehensive management and the water safety strategic planning of the Yellow River Basin.

Key words: river basin; water cycle; water resources; distributed hydrological model; WEP-L model