

流域水循环框架下的水资源评价方法与节水问题思考*

贾仰文 王浩 仇亚琴

(中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京市 100044)

摘要 流域水循环理论是节水型社会建设的重要科学基础之一。本文从流域水循环各要素过程出发, 提出了统筹考虑国民经济用水部门和生态环境系统对广义水资源(包括径流性水资源及土壤水资源)利用的评价方法, 并从流域水循环角度对节水问题进行了思考。文章以黄河流域为例, 基于 WEP-L 分布式流域水循环模型, 应用所提出的方法评价了现状下垫面条件下的广义水资源利用、分析了农业节水最大潜力, 并对制定综合节水措施提出了建议。

关键词 流域水循环; 水资源评价; 节水; 黄河

1 前言

一切形式的节水都与流域水循环过程密切相关, 因此流域水循环理论是节水型社会建设的重要科学基础之一。由于强烈的人类活动影响和地球环境变化, 我国许多流域特别是缺水地区流域的水循环模式和水资源演变规律发生了深刻变化。相对于由地表水和地下水构成的传统径流性水资源或“狭义水资源”概念, 所有能为人类社会所利用的大气降水可称为“广义水资源”, 它既包括径流性水资源又包括植被和作物利用的由降水形成的土壤水资源。在国民经济和生态环境对“广义水资源”的利用过程中, 有一部分水对生产、生活和生态环境基本上没有发挥作用, 以“无效蒸发”的形式返回大气, 而发挥作用水分的效率又有高低之分。相应地, 广义的“节水”概念不但包括对径流性水资源的节约, 还包括植被和作物对土壤水资源的有效利用, 以及通过增加作物产量、工业产值或生态环境功效来提高单方水利用效率。

现行水资源评价方法^[1,2]以地表水和地下水构成的径流性水资源为评价口径, 没有评价植被、作物等生态系统对雨水形成的土壤水资源的就地直接利用, 也没有区分节水中的无效蒸发与渗漏补给等循环利用部分, 难以反映水资源的多元有效性。因此, 面对节水型社会建设的生产实践需求, 本文提出了基于分布式流域水循环模型、以流域水循环全要素为评价对象的广义水资源及其高效低效评价方法, 并应用于黄河流域。

* 为中国水科院重点专项课题“缺水地区水资源循环模式与循环效率评价”资助。

2 分布式流域水循环模型

20 世纪 80 年代中期以来,随着计算机技术和 3S 技术的进步,分布式流域水文模型得到很大发展。同时,陆面过程研究已开发出许多较为成熟的 SVATS(土壤-植物-大气通量交换方案)模型,提高了人们对陆面水循环与能量循环规律的认识。综合分布式水文模型和陆面过程模型的优点,便可以建立起分布式流域水循环模型,使得详细计算植被耗水过程、开展广义水资源评价与综合节水潜力分析成为可能。

WEP-L(Water and Energy transfer Processes in Large river basins)模型是在国家重点基础研究发展规划项目研究中开发的大流域分布式水循环模型,模型开发与验证情况详见《自然资源学报》2005 年第 2 期^[3]。WEP-L 建立在网格单元型分布式模型 WEP^[4]的基础上,但为适应黄河这样的超大流域(面积约 79.5 万 km²),WEP-L 采用“子流域内等高带”为计算单元以避免采用过粗网格单元产生的模拟失真问题。同时,计算时针对各水循环要素过程时间尺度不同的特点,采用了 1h~1d 的“变时间步长”,既合理表述了水循环动力学机制又提高了计算效率。

在水循环各要素过程模拟中,冠层截留、土壤蒸发、水面蒸发和植被蒸腾等蒸散发项,采用土壤-植物-大气通量交换方法(SVATS)进行了详细计算。积雪融化过程采用温度指标法。地表径流根据雨强不同采用 Green-Ampt 模型或 Richards 方程计算。坡面汇流与河道汇流采用一维运动波法计算。平原区浅层地下水运动根据 Boussinesq 方程进行模拟,并考虑其与地表水、土壤水及河道水的水量交换。为反映“自然”和“人工”二元驱动力作用下的流域水资源演化机理,将取用水等人工侧支过程与自然水循环过程进行了耦合模拟,即通过 WEP-L 分布式模拟结果的时空聚合与集总式水资源调配模型结果的时空展布来实现。

WEP-L 模型在黄河流域的验证工作基于黄河 23 个主要水文测站 45 年逐月及逐日实测径流系列,其中 1980 年至 2000 年的 21 年取为模型校正期。从校验结果来看,1956~2000 年系列干流各站多年平均实测径流量的相对误差为介于 1.2%和 1.5%之间,Nash-Sutcliffe 效率系数介于 62%和 82%之间。无论在人类活动影响较小的上游,还是在人类活动剧烈的下游,月径流过程拟合的均较好。兰州站月径流模拟验证示例见图 1。

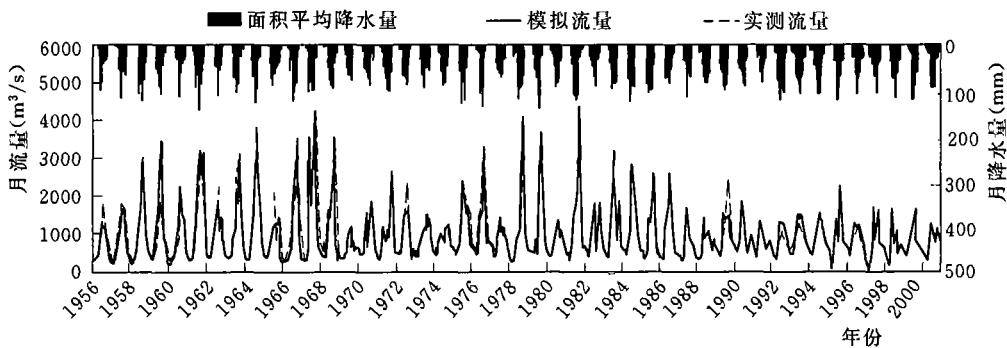


图 1 兰州站月径流模拟验证示例

3 广义水资源评价方法

长系列气象条件下的流域水量平衡方程可用式(1)表示:

$$1/N \sum_{i=1}^{i=N} P_i = 1/N \sum_{i=1}^{i=N} R_{s_i} + 1/N \sum_{i=1}^{i=N} R_{g_i} + 1/N \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} EI_{ij} + 1/N \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ET_{ij} + 1/N \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ES_{ij} + 1/N \sum_{i=1}^{i=N} ED_i + 1/N \sum_{i=1}^{i=N} \Delta S_i \quad (1)$$

式中: i 为计算年; N 为长系列总年数; j 为生态系统类型(如农田、林地、草地、居民与工业用地等); M 为生态系统总分类数; P 为降水量; R_s 为地表水资源量; R_g 为与地表水不重复的地下水资源量(即降水入渗补给地下水量扣除地下水流出); EI 为冠层及地表截留蒸发量; ET 为蒸腾量; ES 为裸间土壤蒸发量; ED 为未利用土地(如沙漠、戈壁、裸岩等)及稀疏植被中大片裸地上的蒸发量; ΔS 为流域水分蓄变量。

在多年平均条件下,方程式(1)右边最后一项可近似取为零,右边第一、二项之和为传统的狭义水资源量,右边第三、第四、第五项之和为有效蒸散发量(即生态系统对降水的有效利用量),右边第六项为无效蒸发量,右边第一至五项之和为广义水资源量。冠层截留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。居民与工业用地(简称“居工地”)是人类居住和活动的集散地,其地表截留蒸发可以起到降温、湿润等直接的环境作用,因此本研究冠层及地表截留蒸发(EI)认为是有效的。对于未利用土地(沼泽地除外)上的蒸发、稀疏林地、草地中的大片裸地(简称“大裸间”)上的蒸发(ED)等都作为无效蒸发。

在计算出广义水资源的基础上,第二层次就是区分广义水资源各分量在被利用时是低效还是高效。国内外大多数研究将单方水的产值或产量作为用水效率的评价指标,但由于社会经济功效与生态环境功效之间、国民经济不同部门(如工业与农业)之间仅用货币量来衡量有失偏颇,因此本研究根据广义水资源各构成部分在循环利用过程中是否发挥关键功效来界定其是“高效水量”还是“低效水量”。

对于植被的雨水利用部分而言,裸间土壤蒸发是植被非生产性的水分消耗,而截留蒸发和植被蒸腾是与植被生长密切联系的生理过程,因而本研究认为裸间土壤蒸发是低效水量,截留蒸发和植被蒸腾是高效水量。居工地的蒸发具有调节温度、美化居住环境、净化城镇空气等作用,因而也认为属于高效水量。而对于狭义水资源,需要对其用水消耗进行分解,首先列出平衡方程如下:

$$W_r = (UAF_{ec} + UAF_{es} + UAF_{er}) + (UIL_{ec} + UIL_{em}) + E_w + E_g + QD + QA + DS \quad (2)$$

式中: UAF_{ec} 为农林牧灌溉渠系及田间输水蒸发; UAF_{es} 为农林牧灌溉水裸间蒸发; UAF_{er} 为农林牧灌溉水蒸腾; UIL_{ec} 为工业与生活用水输水蒸发; UIL_{em} 为工业与生活用水净耗水; E_w 为河湖水体蒸发; E_g 为潜水蒸发; QD 为出入境水量差(全流域情况下则为入海水量); QA 为向流域外调水(简称“外调水”); DS 为河湖及地下水蓄变量; 其余同前。

显然,农林牧灌溉渠系及田间输水蒸发 UAF_{ec} 、灌溉水裸间蒸发 UAF_{es} 以及工业与生活用水输水蒸发 UIL_{ec} 对国民经济基本没有发挥作用,属低效水量,而农林牧灌溉水蒸腾

UAF_{et} 以及工业与生活用水净耗水 UIL_{en} 对国民经济发挥了重要作用, 是高效水量。河湖水体蒸发 E_w 、潜水蒸发 E_g 和出入境水量差 QD 属生态环境用水, 本研究没有进一步分解界定, 暂且归类于高效水量; 外调水因缺乏具体用水使用情况资料, 暂且归类于高效水量。因此, 全部广义水资源中高效水量 (W_{he}) 和低效水量 (W_{le}) 的计算公式可表达如下:

$$W_{he} = UAF_{et} + UIL_{en} + E_w + E_g + QD + QA + 1/N \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} EI_{ij} + 1/N \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ET_{ij} \quad (3)$$

$$W_{le} = UAF_{ec} + UAF_{es} + UIL_{ec} + 1/N \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ES_{ij} \quad (4)$$

4 黄河流域应用

4.1 输入数据与模型参数

本次研究土地利用源信息直接采用了中国科学院《全国资源环境遥感宏观调查与动态研究》得出的三个时期 (1985 年、1995 年和 2000 年) 全国分县土地覆盖矢量数据。该数据是基于多期 TM 影像配合其他影像数据解译获得, 空间分辨率为 30m。黄河流域面积较大, 研究中以基本计算单元 (等高带) 内的各类土地利用百分比数据作为 WEP-L 模型的输入数据。

在分布式水循环模拟中, 植被参数是冠层截留和蒸散发模拟计算的重要参数。本研究采用的植被参数源信息主要为 1982~2000 年 NOAA 系列卫星的 AVHRR 影像数据, 空间分辨率为 8km×8km, 时间分辨率为 10 天。首先根据 AVHRR 影像第一通道 (CH1) 和第二通道 (CH2) 的反射率推求植被指数 (NDVI), 然后推求 WEP-L 模型参数植被盖度和叶面积指数。

除土地利用和植被参数之外, 应用 WEP-L 模型需要的输入数据处理还包括: ① 河网水系生成、子流域划分及其编码, 基本计算单元 (等高带) 的划定与计算顺序的确定; ② 降水等气象要素的时空展布; ③ 其他下垫面要素信息 (如土壤、水文地质、水库、湖泊、河道、灌区、水土保持等) 的综合处理; ④ 社会经济要素 (人口、GDP、灌溉面积、粮食产量等) 和各类取用水信息的时空展布; ⑤ 准备 8485 个子流域、河道 (包括空间拓扑关系) 的基本属性表, 38720 个计算单元的基本属性表, 以及上述各类数据的输入文件。

4.2 应用结果

在 2000 年现状土地利用和取用水条件 (以下简称下垫面条件) 下, 应用 WEP-L 模型和 1956~2000 年气象 (降水和气温等) 系列数据, 黄河流域广义水资源评价结果见表 1。从表 1 中可以看出, 广义水资源量是 2756.6 亿 m^3 , 占总降水的 77.4%, 无效蒸发是 806.4 亿 m^3 , 占总降水的 22.6%。其中狭义水资源占广义水资源量的 24.5%, 农田蒸散发占广义水资源量的 32.3%, 林草地蒸散发占广义水资源量的 42.5%, 居工地蒸散发占广义水资源量的 0.7%。

在 2000 年现状下垫面条件下, 1956~2000 年系列黄河流域狭义水资源用水消耗平衡分析结果见表 2, 广义水资源高效水量和低效水量评价结果见表 3。从表 3 中可以看出,

黄河流域高效水量是 1209.9 亿 m³，占广义水资源量的 43.9%，低效水量是 1546.6 亿 m³。占广义水资源量的 56.1%。结合表 1 和表 2 可以得出，狭义水资源中高效水量占 71.6%，低效水量占 28.4%；农作物对降水的利用中，高效水量占 27.7%，低效水量（棵间土壤蒸发）占 72.3%；林地和草地对降水的利用中，高效水量分别占 52.6% 和 31.5%。

表 1 2000 年现状下垫面条件下黄河流域广义水资源评价结果 单位：亿 m³

降水	狭义水资源												居工地 蒸发	广义 水资源 总量	无效 蒸发
	有效蒸散发（生态系统对降水的有效利用量）														
	地表水	不重复 地下水	总量	农 田			林 地			草 地					
			截留 蒸发	蒸腾	棵间土 壤蒸发	截留 蒸发	蒸腾	棵间土 壤蒸发	截留 蒸发	蒸腾	棵间土 壤蒸发				
3563.0	548.7	127.7	676.4	72.8	174.1	644.1	62.0	169.4	208.1	91.8	139.3	502.7	15.9	2756.6	806.4

表 2 2000 年现状下垫面条件下黄河流域狭义水资源用水消耗平衡分析 单位：亿 m³

狭义 水资源	农林牧用水消耗				工业与生活用水消耗			生态环境用水消耗				外调水
	渠系及田间 输水蒸发	灌溉水棵 间蒸发	灌溉水 蒸腾	小计	工业与 生活净 水蒸发	工业与生 活净耗水	小计	河湖水 体蒸发	潜水蒸发	出入境 水量差	小计	
676.4	76.9	95.1	54.4	226.4	19.8	22.0	41.8	82.1	51.0	200.8	333.9	74.3

表 3 2000 年现状下垫面条件下黄河流域广义水资源高效和低效水量评价结果 单位：亿 m³

高 效								低 效					
雨水截留 与蒸腾	灌溉水 蒸腾	工业与生 活净耗水	河湖水 体蒸发	潜水 蒸发	外调水	出入境 水量差	小计	雨水棵 间蒸发	灌溉水棵 间蒸发	渠系及田间 输水蒸发	工业与生活 输水蒸发	小计	
725.3	54.4	22.0	82.1	51.0	74.3	200.8	1209.9	1354.8	95.1	76.9	19.8	1546.6	

4.3 讨论

以上分析结果，对黄河流域节水型社会建设具有以下启示：

(1) 调整农业种植结构、加强水土保持生态环境建设，可以增加生态系统对雨水资源的高效利用，促进黄河流域综合性节水和水资源高效利用。从以上分析看出，各种生态系统对降水的利用中高效水量所占比例，农田、林地和草地分别是 27.7%、52.6% 和 31.5%，林地高于草地而草地又高于农田。这是因为农田除生长季节外，大部分时间处于裸土状态，不但对防风固沙、保持水土不利，而且对雨水的高效利用也不利。在黄河流域应加大水土保持建设力度，增加林草地的盖度，同时将低产坡耕地或改为梯田或逐步退耕还林还草，这样既有利于减少水土流失、改善生态环境，又能提高降水的高效利用率。

(2) 减少农田棵间蒸发损失，是促进农业节水和高效利用灌溉水及雨水的关键。根据前述分析结果，农田中的水分约 72% 以棵间蒸发的形式返回大气，这意味着降水和灌溉水中的很大比例对农作物生长没有发挥关键功效，因此应大力推广沟畦改造、微灌、地下灌和控制性灌溉等田间节水灌溉技术与耕作、地膜覆盖和秸秆覆盖等保墒技术，以减少棵间蒸发。

(3) 在黄河流域乃至我国整个北方缺水地区, 今后社会经济的进一步发展势必带来工业与生活需水的进一步增加, 同时又要保证粮食安全和生态环境安全, 因此在实施跨流域调水的开源措施之前必须加大农业节水力度。以黄河流域 2000 年用水消耗为例 (表 2), 农林牧灌溉输水蒸发为 76.9 亿 m^3 , 灌溉水棵间蒸发为 95.1 亿 m^3 , 因此总灌溉用水 324.2 亿 m^3 中 170.0 亿 m^3 约 52% 损失于渠系蒸发和棵间土壤蒸发, 这便是农林牧灌溉高效利用后节水潜力的理论最大估计值。夺取这部分低效蒸发需要大量农业节水投入, 而且从技术和经济可行性方面看不可能全部夺取, 但应力争减少一部分以支持工业与生活需水的增加。

5 结语

本研究从流域水循环基础理论出发, 通过应用 GIS、RS 和数字流域技术和 WEP - L 分布式流域水循环模型, 提出了流域广义水资源及其利用的评价方法, 并在黄河流域得到初步应用。应用结果对黄河流域综合节水潜力研究和综合节水措施制定有所启示。

参考文献

- 1 水利电力部水文局. 中国水资源评价. 北京: 水利电力出版社, 1986
- 2 UNESCO. Guidelines for conducting water resources assessment. A contribution to IHP - IV project M - 1 - 1 (a), prepared by Milorad Miloradov and Prvoslav Marjanovic, 1998
- 3 贾仰文, 王浩, 王建华等. 黄河流域分布式水文模型开发与验证. 自然资源学报, 2005. 20 (2): 300 ~ 308
- 4 Jia Yangwen, Guangheng Ni, Yoshihisa Kawahara and Tadashi Suetsugi. Development of WEP Model and Its Application to an Urban Watershed. Hydrological Processes, May 2001, Vol. 15, 2175 - 2194

作者简介: 贾仰文, 1965 年 9 月出生, 1997 年 9 月获日本东京大学工学博士学位。现为水利部水利科学研究所水资源研究所总工、院聘教授级高工。地址: 北京市车公庄西路 20 号, 邮编: 100044, 联系电话: 010 - 68785616, 传真: 010 - 68483367; 电子邮箱: jiayw@iwahr.com。