

文章编号: 0559-9350(2006)09-1051-05

## 基于流域水循环模型的广义水资源评价(I)

## ——评价方法

贾仰文, 王浩, 仇亚琴, 周祖昊

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044)

摘要: 本文针对传统水资源评价中仅以径流性水资源为评价对象、没有考虑生态系统对雨水资源的直接利用, 不能反映水循环过程中的全部有效水量及其利用效率等问题, 阐述了广义水资源(既包括径流性水资源, 又包括植被、作物等生态系统利用的雨水资源)的概念, 论述了广义水资源评价的必要性与可行性; 提出了基于流域水循环模型的广义水资源评价方法和具体计算公式, 并以分布式流域水循环模型 WEPL 为例对广义水资源各构成部分如何计算进行了说明; 提出了根据广义水资源各分量在循环利用过程中, 是否发挥关键功效来初步界定“高效水量”和“低效水量”的评价方法。

关键词: 流域水循环; 分布式水文模型; 广义水资源评价; 人类活动影响; 黄河流域; WEPL

中图分类号: TV213

文献标识码: A

## 1 问题的提出

国内外传统水资源评价<sup>[1-3]</sup>仅将地表水与地下水即径流性水资源作为评价对象, 未包含土壤水即生态系统直接利用的雨水资源。国内近年来的水资源综合规划工作, 在水资源开发利用情况调查评价及需水预测部分提出了生态环境用水(需水)的评价内容, 并分为河道内生态环境用水和河道外生态环境用水(包括湖泊湿地、城镇生态环境美化及其他生态建设用水等), 尽管在考虑生态环境方面比国内外历次水资源评价都迈了一大步, 但基本上仍是沿用径流性水资源的评价口径。农业灌溉、林牧渔业及河道外生态环境需水等计算采用灌溉定额(即蒸散发量与降水量之差)预测方法, 简单考虑了灌溉土地上的雨水利用, 但对广大未灌溉国土面积上的生态系统的雨水利用情况基本上没有考虑, 而灌溉定额预测由于受植被特性、种植结构、耕作方式、工程管理等方面的影响以及蒸散发计算方法的粗略而具有很大的不确定性。因此, 迄今为止的水资源评价方法不能反映水循环过程的全部有效水量和利用效率的高低, 难以科学评价和指导缺水地区农业种植结构调整、退耕还林还草、水土保持、虚拟水战略以及节水型社会建设等生产实践, 对实现总体合理的水土资源布局、水资源的高效利用和人-水-生态和谐发展不利, 亟待水资源评价理论与方法的创新。

1.1 广义水资源的概念 国内外专家学者对上述问题均有反思。瑞典 Malin Falkenmark 教授在 1993 年将自然入渗的土壤水称为“绿水(green water)”, 后来又进一步延伸为“从植被返回大气的蒸气水”, 以区别液态水形态的河湖地表水及地下水。她在国际科学院组织(IAP)2000年东京大会上题为“透过淡水资源看通向可持续性的诚实之路”<sup>[4]</sup>演讲中指出, 温带地区存在“水盲”(water blindness)问题: 在谈及水的时候, 多数人想到的是液态水或“蓝水”(blue water), 但作为植物生产环节之一的蒸气流又回到大气的

收稿日期: 2005-09-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043602); 中国水科院科研专项(资集 05ZD01)

作者简介: 贾仰文(1965-), 男, 山东成武人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源学研究。

E-mail: jiayw@iwhr.com

“绿水”却往往被忽视。她同时指出,在考虑地区土地利用和食物生产时,决不能忽视“绿水”,因为水的流动性将产生“绿水”的上游人类活动(特别是土地利用)与下游的机会和问题联系起来,上下游的得失必须加以权衡。她引入的“绿水”这一概念目前已在植物生产论述中得到广泛应用<sup>①</sup>。英国学者 Tony Allan 在 20 世纪 90 年代初提出了“虚拟水”的概念:在生产产品和服务所需要的水资源数量,即凝结在产品和服务中的虚拟水量。虚拟水既包括“蓝水”又包括“绿水”。国内对农田小尺度的土壤水资源评价进行过研究<sup>②</sup>,但尚缺乏对流域大尺度地表水、地下水和土壤水资源的综合评价研究。程国栋院士指出<sup>③</sup>:实现“量水而行”,有一系列的科学问题需要研究,如:对不同区域、不同部位的水资源状况要深入了解,分析水资源的承载能力;对降水、冰雪水、“绿水”(一种没有被系统评价的水资源)、以咸水为主的劣质水等各种水资源,要摸清家底,从而进行合理配置和高效利用等。

显见,上述“蓝水”即为径流性水资源;“绿水”便是生态系统利用的雨水,其中间赋存形式是土壤水及冠层截留,最终形式是蒸散发后返回大气的蒸气流。如果传统的径流性水资源称为“狭义水资源”,那么“蓝水”与“绿水”之和便可称为“广义水资源”。王浩等<sup>④</sup>定义“广义水资源”包括径流性水资源和生态系统利用的有效降水,其来源为大气降水,赋存形态为地表水、土壤水和地下水。

应当承认,“广义水资源”的概念是相对的,也有更为广义的水资源定义。例如,《不列颠百科全书》将水资源解释为“自然界一切形态的水,包括气态、液态和固态水的总量”。尽管所有降水对全球水循环都是有作用的,但过于宽泛的定义不利于对区域水资源问题的分析。因此,本研究将“广义水资源”的概念取为王浩等的定义,即所有为经济社会和生态系统利用的大气降水:既包括地表水和地下水,又包括植被、作物等生态系统利用的土壤水以及冠层与地表的降水截留,但不包括未被生态系统利用的沙漠、裸地、裸露岩石等下垫面上的蒸发。它是相对于传统径流性水资源而言。

### 1.2 基于分布式水循环模型进行广义水资源评价的必要性与可行性

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。然而,如前所述,现行水资源评价方法以地表水和地下水构成的径流性水资源为评价口径,没有评价生态系统对雨水形成的“非饱和土壤水”的就地直接利用,也没有区分灌溉节水中的“真实节水”(即减少的无效蒸发)与循环利用部分(如地下水补给和排水等),难以反映水资源的多元有效性和利用效率高低。另外,现行水资源评价方法还存在以下问题:(1)采用“实测-还原”静态模式,难以反映下垫面变化对现状及未来可利用水资源量的影响;(2)采用分离评价模式,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等,难以反映水资源各成分间的相互转换;(3)采取分区集总式评价方法,在描述水资源空间变异特征和指导开发利用方面存在一定局限。因此,面对以“经济社会与生态环境和谐发展”为理念的水资源开发利用生产实践需求,迫切需要建立以流域水循环全要素为评价对象的分布式广义水资源评价方法和工具。

20 世纪 80 年代中期以来,随着计算机技术、地理信息系统和遥感技术的进步,分布式流域水文模型<sup>⑤</sup>得到很大发展。基于物理机制的分布式流域水文模型,可结合遥感、航测、数字流域及地理信息系统<sup>⑥</sup>等新技术进行较为细致的水文分析与预测,能够分析不同下垫面条件下的流域水文水资源演变情景。另一方面,陆面过程研究在开展了大量的区域尺度乃至全球尺度的地面与遥感联合观测及模拟分析工作的基础上,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<sup>⑦,⑧</sup>,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,详细计算植被蒸散发过程和开展广义水资源评价。

本文初步提出了基于分布式流域水循环模型的广义水资源评价方法。在经济社会和生态系统利用广义水资源过程中,本研究对广义水资源各构成部分按“高效”与“低效”进行了界定,以期能够对缺水地区节水潜力分析和水资源高效利用规划提供启示。国内外大多数研究将单方水的产值或产量作为用水

① 国际水资源协会 2005 年度最高荣誉奖 IWRA Crystal Drop Award 颁奖信息发布, [http://iwra.siu.edu/awards/IWRA\\_Crystal\\_Drop\\_Award\\_2005](http://iwra.siu.edu/awards/IWRA_Crystal_Drop_Award_2005)。

② 经济日报 2005 年 9 月 15 日西北发展需“量水而行”。

效率的评价指标,但由于生态系统服务功能的价值计算尚未成熟,而且水的经济社会功效与生态环境功效、国民经济不同部门(如工业和农业)水的功效仅用货币量来衡量比较也有失偏颇,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初步界定其是“高效水量”还是“低效水量”。

## 2 分布式水循环模型 WEP-L 的主要特点

WEP-L(Water and Energy transfer Processes in Large river basins)模型<sup>[10]</sup>是在国家重点基础研究(973)发展规划项目研究中开发的大流域分布式水循环模型。它建立在网格单元型分布式模型 WEP<sup>[11]</sup>基础上。该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地地表过程模型(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,对每个计算单元各类土地利用的植被冠层及地表截留蒸发、裸地及裸间土壤蒸发、水面蒸发和植被蒸腾等进行了详细计算;(2)以“子流域内等高带”为计算单元,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”(如强降雨入渗产流过程采用 1h,坡地与河道汇流过程采用 6h,而地下水运移过程采用 1d 等)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)计算速度快(全黄河流域一年模拟时间 11min),可用于长系列连续模拟计算。模型的详细情况请参见文献[10, 11]。

## 3 广义水资源评价方法

广义水资源评价具体分为两个层次:(1)界定降水的有效、无效,计算广义水资源量;(2)区分广义水资源各分量在被利用时是低效还是高效。

### 3.1 广义水资源量计算

长系列气象条件下的流域水量平衡方程可表示为

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

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扣除地下水出流,或潜水蒸发与地下水开采净消耗量之和);  $EI$  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、裸地、裸岩等)及稀疏植被中大片裸地上的蒸发量;  $\Delta S$  为流域水分蓄变量。

在多年平均条件下,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、四、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。本研究认为,植被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,因此认为是有效的;居民与工业用地(简称“居工地”)是人类居住和活动的集散地,绿地、路面和建筑物等各类下垫面上的蒸发均可以起到降温、湿润等直接的环境作用,本次研究认为这一部分蒸发也是有效的。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”)上的蒸发等都作为无效蒸发。为保证狭义水资源评价的口径与传统水资源评价口径一致,各项蒸散发中均扣除潜水蒸发,因为潜水蒸发已包括在不重复的地下水资源量之中。因此,狭义水资源量( $W_r$ )、广义水资源量( $W$ )可分别表示为

$$W_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{s_i} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{g_i} \quad (2)$$

$$W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{s_i} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} R_{g_i} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} EI_{ij} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ET_{ij} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ES_{ij} \quad (3)$$

应用 WEP-L 模型便可根据式(1)~式(3)对广义水资源及其构成进行定量计算。不考虑取用水的“自然”驱动力作用情景下,地表水资源量  $R_s$  可由各计算单元的地表径流、地下水出流及壤中径流简单相加得出,不重复地下水资源量  $R_g$  等于潜水蒸发,而  $EI$ 、 $ET$  和  $ES$  可将各生态系统的模拟结果相加求得。考虑取用水的“自然”-“人工”双驱动力作用情景下,  $R_s$  需要在三种产流之和中扣除用水的影响(本研究为简化计算假定降水与用水对产流贡献相等),  $R_g$  等于潜水蒸发与地下水开采净消耗量之和,而  $EI$ 、 $ET$  和  $ES$  也需要扣除用水对各生态系统蒸散发各项的影响。

**3.2 水量的低效和高效评价** 在界定降水在水循环过程中是否有效、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否高效,并确定有效水分中的低效和高效比例。

对于植被的雨水利用部分而言, 棵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, 因而本研究认为截留蒸发和植被蒸腾是高效水量, 棵间土壤蒸发是低效水量或“奢侈”蒸发。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, 需要对其用水量消耗进行分解, 首先列出平衡方程如下

$$W_r = (UAF_{ec} + UAF_{es} + UAF_{et}) + (UIL_{ec} + UIL_{en}) + E_w + E_g + QD + QA + DS \quad (4)$$

式中:  $UAF_{ec}$  为农林牧用水中的渠系及田间输水蒸发;  $UAF_{es}$  为农林牧用水中的灌溉水棵间蒸发;  $UAF_{et}$  为农林牧用水中的灌溉水蒸腾;  $UIL_{ec}$  为工业与生活用水输水蒸发;  $UIL_{en}$  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(区间流域情况下为当地产水量扣除当地用水消耗, 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。

上述狭义水资源各用水量消耗项中, 河湖水体蒸发  $E_w$  和潜水蒸发  $E_g$  可由模型直接计算得出; 外调水  $QA$  根据统计资料给出; 输水蒸发  $UAF_{ec}$  和  $UIL_{ec}$ 、灌溉水棵间蒸发  $UAF_{es}$ 、灌溉水蒸腾  $UAF_{et}$  和工业与生活用水净耗水  $UIL_{en}$  等, 根据用水统计数据以及渠系水利用系数、田间水利用系数(采用了水利部黄委会 52 个典型灌区调查成果)和工业与生活输水漏水率等参数由模型计算得出; 河湖及地下水蓄变量  $DS$  在多年平均条件下近似取为零, 而出入境水量差  $QD$  由上述平衡方程推算。  $UAF_{ec} + UAF_{es} + UAF_{et}$  是农林牧用水消耗, 等于农林牧用水扣除渠系渗漏与排水回归(循环利用);  $UIL_{ec} + UIL_{en}$  是工业与生活用水消耗, 等于工业与生活用水扣除输水渗漏与排水回归。

显然, 农林牧用水中的渠系及田间输水蒸发  $UAF_{ec}$ 、灌溉水棵间蒸发  $UAF_{es}$  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; 而农林牧用水中的灌溉水蒸腾  $UAF_{et}$  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 ( $W_k$ ) 的计算公式可表达如下

$$W_{he} = UAF_{et} + UIL_{en} + E_w + E_g + QD + QA + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} EI_{ij} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ET_{ij} \quad (5)$$

$$W_k = UAF_{ec} + UAF_{es} + UIL_{ec} + \frac{1}{N} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=M} ES_{ij} \quad (6)$$

## 4 结语

本文论述了广义水资源的概念及其评价的必要性与可行性, 在分布式流域水循环模型 WEP-L 的基础上, 提出了基于流域水循环模型的广义水资源评价方法与计算公式。由于 WEP-L 模型基于水循环物

理机制和生态水文机理,其参数可根据下垫面物性值推算,并对水循环要素过程进行详细模拟,具有进行各种下垫面和气象条件下的水资源评价和预测的潜力,评价内容既包括径流性水资源,又包括植被、作物等生态系统利用的雨水资源,本文提出的方法在黄河流域得到了初步应用。当然,该方法在许多方面还需要进一步完善,如广义水资源利用效率评价方法的改进、增加对水的环境服务功能评价以及统筹考虑“蓝水”和“绿水”的广义水资源合理配置方法等,这些将是今后的研究课题。

## 参 考 文 献:

- [ 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.
- [ 2 ] UNESCO. Guidelines for conducting water resources assessment[M]. A contribution to IHP IV project M-1(a), Prepared by Milorad Miloradov and Prvoslav Marjanovic, 1998.
- [ 3 ] 谢新民, 郭洪宇, 尹明万, 唐克旺. 华北平原区地表水与地下水统一评价的二元耦合模型研究[J]. 水利学报, 2002, (12): 95- 100.
- [ 4 ] 国际科学院. 走向可持续发展的 21 世纪—科学与技术的贡献[M]. 傅伯杰, 刘健, 曹京华, 等译. 北京: 科学出版社, 2005.
- [ 5 ] 靳孟贵, 张人权, Ian Simmers, 方连玉, 赵万林. 土壤水资源评价的研究[J]. 水利学报, 1999, (8): 30- 34.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 刘明柱, 陈鸿汉, 叶念军, 胡丽琴. GIS 在区域地下水资源评价中的应用[J]. 水利学报, 2002, (1): 52- 61.
- [ 9 ] Selleis P J, Dickinson R E, Randall D A, Betts A K, Hall F G, Berry J A, Collatz G J, Denning A S, Mooney H A, Nobre C A, Sato N, Field C B, Henderson Sellers A. Modeling the Exchanges of Energy, Water, and Carbon Between Continents and the Atmosphere[J]. Science, 1997, 275: 502- 509.
- [ 10 ] 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[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 300- 308.
- [ 11 ] Jia Y, Ni G, Kawahara Y, Suetsugi T. Development of WEP model and its application to an urban watershed[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(11): 2175- 2194.

## Generalized water resources assessment based on watershed hydrologic cycle model

### I . Assessment approach

JIA Yang wen, WANG Hao, QIU Ya qin, ZHOU Zi hao

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

**Abstract:** The concept of generalized water resources is discussed and the necessity and feasibility of assessment of generalized water resources are investigated. On the basis of watershed distributed hydrologic cycle models an approach for assessment of generalized water resources is established and corresponding computation formula is proposed. The procedure for calculating various components of generalized water resources by using the WEP-L model is given as an example for demonstration. A method for distinguishing the high efficiency utilized water and low efficiency utilized water according to the assessment of their effectiveness to be utilized is proposed.

**Key words:** watershed hydrologic cycle; WEP-L distributed hydrologic model; generalized water resources; assessment

(责任编辑:王成丽)