

文章编号: 0559 9350(2006) 12 1496 07

# 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法

王浩, 王建华, 秦大庸, 贾仰文

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044)

摘要: 国内外流域水资源评价方法是随着水资源稀缺性的逐渐增强而不断发展的。时至今日, 传统的水资源评价方法在描述人类活动干扰和满足不同层次水资源规划要求方面面临严峻挑战。本文提出了水资源全口径层次化动态评价方法, 即以降水为资源评价的全口径通量, 遵照有效性、可控性和可再生性原则对降水的资源结构进行解析, 实现广义水资源、狭义水资源、径流性水资源和国民经济可利用量的层次化评价。在手段上, 构建了由分布式水循环模拟模型与集总式水资源调配模型耦合而成的二元水资源评价模型, 并将下垫面变化和人工取用水作为模型变量以实现动态评价。

关键词: 人类活动; 水资源; 评价方法; 二元水循环; 分布式水文模型

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

## 1 水资源评价进展及其方法概述

1.1 国内外水资源评价进展 水资源评价是对流域或区域水资源的数量、质量、时空分布特征和开发利用条件进行全面分析和评估的过程, 是水资源规划、开发、利用、保护和管理的基础性工作, 其成果是水利活动和决策的重要依据。

水资源的稀缺性是推动水资源评价工作及其技术方法发展的主要动力。20 世纪中叶以前, 水资源稀缺性并不突出, 美国和前苏联等国家所开展的水文观测资料整编和水量统计具有水资源评价的雏形。自 20 世纪中叶以来, 许多国家出现不同程度的缺水、水生态退化和水污染加剧等水资源问题, 作为水资源规划和管理的基础性工作, 水资源评价开始逐渐受到世界各国的重视。1968 年和 1978 年, 美国完成了两次国家水资源评价, 第一次侧重于天然水资源本底状态的评价, 第二次侧重于水资源开发利用评价与供需预测, 初步形成了以统计为主的水资源评价方法与技术<sup>[1]</sup>。1975 年, 西欧、日本、印度等国家相继提出了本区的水资源评价成果。针对日趋紧张的水资源情势, 国际上逐步对水资源评价工作的重要性达成了共识。1988 年, 联合国教科文组织(UNESCO)和世界气象组织(WMO)在澳大利亚、德国、加纳等国家开展的实验项目的基础上, 共同制定了《水资源评价活动——国家评价手册》, 促进了不同国家水资源评价方法趋向一致, 有力地推动了水资源评价工作的进程<sup>[2]</sup>。1997 年 UNESCO 和 WMO 对该手册进行了修订。

我国于 1980 年开展了第一次全国水资源评价工作, 当时主要借鉴美国提出和采用的水资源评价方法, 同时根据我国实际情况做了进一步发展, 包括提出不重复的地下水资源概念及其评价方法等, 形成了《中国水资源初步评价》和《中国水资源评价》等成果, 初步摸清了我国水资源的家底。随后, 由于华北水资源问题突出, 国家“六五”和“七五”攻关还专门开展了华北地区水资源评价及相关问题研究。1999 年, 水利部以行业标准的形式发布了《水资源评价导则》(SL/T238-1999), 对水资源评价的内容及技术方法做了明确规定。2000 年, “全国水资源综合规划”对水资源评价的技术和方法做了进一步完善。

收稿日期: 2006 10 29

基金项目: 国家自然科学基金委员会重点项目(50239050); 国家重点基础研究发展计划(2006CB403404)

作者简介: 王浩(1953-), 男, 北京人, 中国工程院院士, 博士, 主要从事水文水资源研究。Email: wangh@iwhr.com

1.2 现行水资源评价方法 评价对象上,国外一些国家认为地表水和地下水是重复转换的,因此以河川径流量作为水资源评价的对象,如美国等。俄罗斯和英国等国家虽然没有实施地下水资源评价,但其已将地下水动态作为水资源监测和评估的对象。UNESCO亦开始将地下含水层可恢复的供水量纳入水资源评价的范畴。在我国,从第一次评价开始,就把河川径流量和不重复的地下水资源量作为水资源评价主体。地表水资源量评价方面,包括我国在内的一些国家只将当地地表产水量作为资源量,其他一些国家将入境的河川径流量也作为地表水资源量,联合国粮农组织(FAO)和地质矿藏局(BRGM)就采用了这种方法。

评价模式上,目前国内外在水量上仍然采取地表水-地下水分离评价的模式,或是单一的地表水评价模式,即评价地表水的时候将地下水作为源汇项,评价地下水时将地表水作为源汇项,分别进行评价。在水量-水质方面也采用分离评价的模式,国内水资源评价中对于水质的评价采取的是各类水质代表河长法。时空单元方面,国外大多均以流域、水资源分区或是行政分区作为空间单元,以年作为时间单元,我国则兼顾流域和行政区单元,以水资源分区和行政分区叠加的方式作为底层评价空间单元。

在评价手段上,早期的水资源评价方法主要是统计方法,自20世纪80年代以来,水资源评价方法逐渐发展为水量均衡方法<sup>[1]</sup>,这种方法概念清楚,计算简便快捷,但对于降水量和蒸发量的依赖性较大。联合国粮农组织为了促进各国水资源评价的一致性,进一步提出了基于GIS的水均衡模型。在国内,广泛应用于水资源评价实践的主要是水量均衡方法,经过20多年的发展,对水资源各均衡项大多界定的比较明晰。同时水资源评价模型技术亦逐步发展起来,包括新安江模型和地表-地下水资源联合评价模型<sup>[2]</sup>等,近年一些学者<sup>[3,4]</sup>也尝试将分布式水文模型技术引入到水资源评价中来。

对于人类活动影响,国内外也充分注意到了这一点,主要进行了两方面修正,一是人工取用水对于水资源评价的影响,目前国内外多采用“统计-还原”的手段进行修正,即将人工耗用水统计计算量加到实测水资源量中,作为天然水资源量评价结果;二是下垫面变化造成的水资源演变,目前国内外常常采用“一致性”修正或是在评价模型中设置相应变量的方式进行处理。

## 2 现代环境下水资源评价面临的挑战及传统评价方法的缺陷

2.1 现代环境下水资源评价技术方法面临的挑战 赋存于循环过程中形式各异的水,无所不在且不断运动转化,因此水资源的精确评价本身就是一项极具挑战性的工作。现代环境下的水资源评价技术方法主要面临两方面挑战:

(1)人类活动影响导致水资源演变加剧带来的技术方法挑战。大规模的人类活动正深度扰动着地球表层天然水循环过程,从而影响着水资源的形成与演变。一是人工取用水影响,大规模的人工取用水形成了与天然“坡面-河道”主循环相耦合的“取水-供水-用水-耗水-排水”的人工侧支循环,我国北方的许多流域侧支循环通量甚至超过了主循环的实测通量;二是人类活动对于流域下垫面变化的影响,水体的开发和重构、局部微地貌的改变、土地覆被的改变及人为建筑物的修建全面改造了下垫面,影响了流域天然下垫面各类水文特性;三是大规模排放温室气体,改变了天然水循环的降水输入和能量条件,导致当前系列的水资源基础条件与历史过程存在着不同,给水资源科学评价带来困难。

(2)现代社会发展需求提高对于传统水资源评价技术方法的挑战。一是随着地表水和地下水资源的紧缺形势日益加剧,在合理配置和高效利用径流性水资源的同时,土壤水等其他赋存形式的有效水分的利用也逐步得到重视,要求水资源评价口径相应扩大,以实现多种水资源的统一调配;二是随着资源稀缺性的日益突出,越发要强调资源的高效利用,这对水资源利用效用评价技术方法提出了需求,包括有效无效的判别、生态环境效用和社会经济效用、高效和低效的量化等技术与方法;其三,水资源是量与质的统一体。随着以人为本、和谐社会理念的普及,水资源开发利用的要求不再停留在有水可用的阶段,而是发展为有符合质量标准的水可用,要求提出量和质统一评价的技术方法。

2.2 传统评价方法相对现代环境下水资源评价存在的缺陷 相对于现代环境下的水资源评价技术需求,传统水资源评价方法主要存在以下5个方面的缺陷:

(1) 评价口径狭窄。水资源量评价方面,地表水和地下水是传统水资源评价的对象,有些国家还不评价地下水,未能将在农业生产和生态建设中发挥重要作用的土壤水纳入资源评价范畴,不利于全口径有效水分的配置与调控;其次,传统水资源评价方法中,仅在开发利用评价中对各行业工程末端利用效率进行评价,不利于全面指导水资源高效利用;其三,传统方法侧重于水资源量的评价,对于水质评价较薄弱,不利于分质配水和水量水质的联合调度。

(2) 一元静态评价。传统水资源评价对人类活动影响采取“剔除”的方式进行处理,属一元静态评价模式。对人工取水影响的考虑,主要通过实测获得实际水文系列,加上人工耗用水量,以此“还原”到流域水文的天然本底状态;对于下垫面变化的影响,则采取“一致性修正”的方法,得到具有一致性且能反映近期下垫面条件的天然年径流系列。随着人工取水量的加大,天然系列中还原比例越来越大甚至逐渐占据主导地位,还原方法很难保证成果的精度,“一致性修正”的方法只能反映某一时段的变化状况,难以反映水文的渐变过程,更无法预测未来时段系列变化,因此均存在一定局限。

(3) 要素分离评价。传统的水资源评价中,尽管采取了水量均衡方法进行了各要素的校核,但各要素基本采取的是分离评价的模式,包括降水-径流-蒸发的分离评价,地表水-地下水的分离评价,水质-水量的分离评价,但由于面上蒸发的测定存在困难,当人工耗水还原比例较大后,不仅在要素之间的校核存在困难,同时也不利于水循环与水资源多个要素的统一调配。

(4) 时空集总式评价。传统水资源评价方法采用时空集总式评价方法,空间上忽略了分区内水文参数和自然地理条件的空间变异性,均化了分区的地貌和水文地质空间特性,在此基础上的计算值只代表了一个分区平均的概念,不利于对基层单元进行水资源管理。时间上,采取了洪水期与枯水期水资源集总评价的模式,不利于指导水资源开发利用实践。

(5) 缺乏统一的定量工具。传统水资源评价工作采用的大多是“实测-统计”人工评价的方法,经验成分比重大,缺乏统一有效的定量化模型工具,评价工作极其浩繁,实践上表现为运动人海战,评价周期较长,另外片水和断面水量不容易区分,同时受各种人为因素影响较大,检验的难度很大。

基于现行方法存在的缺陷,迫切需要对传统水资源评价方法进行改进,形成一套物理概念明晰,能够反映人类活动影响和水资源多元属性的水资源评价方法,同时开发出计算快捷并具有可操作性模型工具,以满足现代环境下水资源规划与管理的实践需求。

### 3 基于二元水循环模式的水资源量评价理论、方法与模型

3.1 基于二元水循环模式的水资源量评价理论 大规模人类活动无时不在悄然改变着天然水循环的大气、地表、土壤和地下各个过程,致使现代环境下水循环呈现出明显的“天然-人工”二元特性<sup>[5,9]</sup>,一是循环驱动力的二元化<sup>[6]</sup>,即流域水循环的内在动力已由过去一元自然驱动演变为现在的“天然-人工”二元驱动;二是循环结构的二元化,即人类聚集区的水循环过程往往由自然循环和人工侧支循环耦合而成,两大循环之间保持动力关系,通量之间此消彼涨;三是水资源服务功能的二元化,即水分在其循环转化过程中,同时支撑了同等重要的经济社会系统和生态环境系统。

根据上述模式内涵分析,基于二元模式的评价方法与传统评价方法相比至少存在三方面差异,一是评价的视角上,将人工驱动项作为水资源演变的内生动力,而并非采取“剔除”的方式实现“还原”;二是在评价过程中,要保持天然水循环过程和人工水循环过程的动态耦合关系,同时能够充分反映人类活动的影响;三是评价的内容和成果要同时服务于不同层次的生态建设、环境保护和经济社会发展。基于二元水循环模式的水资源量评价应当遵循以下原则:(1)水资源量评价应当从流域水循环的总通量出发,以对不同特性不同效用的水循环通量的界定作为资源评价的基础;(2)“有用”是自然资源首要属性,因此在水循环全口径通量中进一步对效用进行区分与度量是水资源评价的第二项内容;(3)“可用”是继“有用”后自然资源另外一重要的属性,因此根据可控性准则对于“有用”资源做进一步区分是水资源评价中第三层内容;(4)二元模式下的资源的概念是相对生态环境和经济社会两大系统而言的,因此评价中还需在可控水资源中进一步区分国民经济允许的开发利用量;(5)基于现代环境下的水资源评价还应

当能够清晰描述人类活动对于水资源演变的影响。

### 3.2 改进的全口径层次化动态水资源评价方法 基于上述基础分析,提出了适于现代环境、面向用水实践需求的全口径层次化水资源动态评价方法。

(1) 全口径评价。所谓全口径水资源评价,就是要将水循环的全部输入通量作为水资源评价的基本口径,系统解析不同赋存形式的水分通量,以此为基础实现水资源系统评价。从广义的降水而言,其形式包括垂向降水和水平降水两类,其中垂向降水包括雨、雪、雨夹雪、米雪、霜、冰雹、冰粒和冰针等形式,水平降水主要指雾和露。由于水平降水和垂向降水的内在机制不同,本文中主要研究的是垂向降水,其垂向系统结构大致可以分为4层:冠层截流;地面截流;土壤入渗量;地下水补给量(见图1)。以降水为全部输入通量的流域水资源评价,应对上述4层结构的水分通量进行系统逐层界定和量化评价,才能实现流域全口径的水资源评价<sup>[7,8]</sup>。

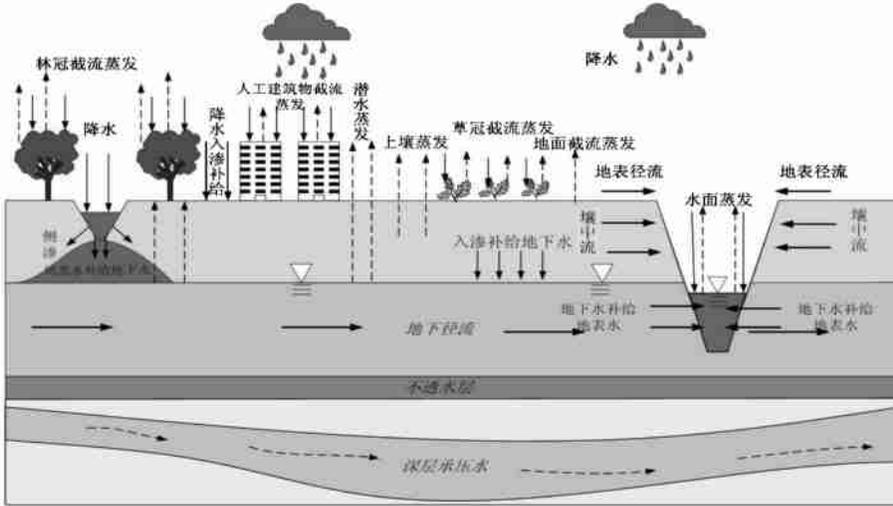


图1 大气降水的垂向系统结构示意图

(2) 层次化评价。如前所述,作为自然资源的一种,有用和可用的水是狭义的资源。为实现水资源在流域单元内的天然分布与社会需求的时空匹配,人们需要通过修建各种水利工程,对资源进行人工调控。另外,水的循环特性决定了水资源具有与一次性资源不同的可再生性,但这种可再生特性不是不可破坏的,流域水资源的开发利用必须维持流域水资源的可持续利用。基于上述分析,提出了水资源评价的三大基本准则,即有效性准则、可控性准则与可持续性准则。

基于上述准则,对作为广义水资源的总降水通量进行资源结构解析,根据有效性准则将广义水资源区分为无效蒸发和狭义水资源;在狭义水资源中,根据可控性准则进一步划分为径流性水资源和非径流性水资源;在径流性水资源中,根据可再生性准则进一步划分为国民经济可利用量和生态环境需水量。在广义水资源量中,有效与无效的识别主要是它在输出转换过程中是否发挥了生态或是经济效用,因此对于降水输入的有效性判别则转化为分项输出量的考察。流域水分输入与输出通量平衡关系如下

$$P = R + E + \Delta V \quad (1)$$

式中: $P$ 为降水通量; $R$ 为实测径流通量; $E$ 为蒸散发通量; $\Delta V$ 为存量蓄变量。

在降水通量各垂向分量中,冠层蒸发能够直接降低植物体或是人居环境的温度,对维护生物正常生理是有益的,同时还可替代一部分植被有效蒸腾,因此冠层截流蒸发是有效的,可作为狭义水资源的组成部分;对于地面截流蒸发,按照国内相关标准,地表土地利用系统分耕地、林地、草地、水域、城乡居工地和难利用土地,其中居工地地面截流蒸发、作物和林草棵间截流蒸发分别对于人类和生态环境主体是有直接环境效用的。对于难利用土地截流蒸发(沼泽地将其归并到水域类)、稀疏草地的大棵间截流蒸发(依据覆盖度确定)等都作为无效蒸发。因此对于土壤蒸散发,蒸腾耗散的水分直接参与了生物量的生成,属于有效水分。居工地土壤蒸发、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;裸地土壤蒸发、稀疏草地的大棵间土壤蒸发等都作为无效水分。

基于上述分析, 狭义水资源总量的计算可用下式表示

$$W_s = (R_s + R_g) + E_p + E_{ss} + E_{es} \quad (2)$$

式中:  $W_s$  为狭义水资源量;  $R_s$  为地表水资源量;  $R_g$  为不重复地下水资源量;  $E_p$  为冠层截流蒸发量;  $E_{ss}$  为地面截流有效蒸发;  $E_{es}$  为与地表水、地下水不重复的土壤水有效蒸发量。

径流性水资源评价的口径与传统评价口径一致, 只是在地表水评价中需进一步区分了“片水”和“断面水”, 即将流域面上产的“片水”减去河道汇流过程中的损失得到“断面水”。

径流性水资源中, 还需区分国民经济可利用量和生态需水量, 其中河道外国民经济可利用量数值上等于河川径流量减去最小河道内生态需水量, 由于不同生态需水和难控制洪水间可能互相重叠, 年生态需水总量应在各时段内选取最大水量过程作为该时段的河道需水过程, 按月时段计算见下式

$$W_{en} = \max(W_{1xs1}, W_{1shj}) + \max(W_{2xs1}, \dots, W_{2shj}) + \dots + \max(W_{ixs1}, W_{ishj}) + \dots + \max(W_{lxs1}, W_{lshj}) \quad (3)$$

式中:  $W_{en}$  为年生态环境需水量;  $W_{ishj}$  为年内第  $i$  月的河流生态需水量;  $W_{ixs1}$  为年内第  $i$  月的河流难控制洪水量。

(3) 动态评价。受人类活动影响, 流域水资源不断发生演变, 因此任何将水资源还原到某一时间断面上的静态评价都是不科学的, 应采取的是反映实际状态的动态评价。造成水资源演变的人类活动主要包括全球气候变化、下垫面变化和人工取用水, 其中全球气候变化对水资源影响的时空尺度较大, 加之定量的不确定性, 在为规划服务的水资源评价中暂不作考虑, 水资源动态评价概念模型可简化为下式

$$R_t = f(P, L_t, W_t) \quad (4)$$

式中:  $R_t$  为  $t$  时间断面上的水资源量;  $P$  为降水;  $L_t$  为  $t$  时间断面上下垫面状况;  $W_t$  为  $t$  时间断面上的人工取用水。

针对上述两方面的主要人类活动影响, 本次研究在实际评价中, 将不同时期实际下垫面和取用水影响作为水资源评价模型的参变量, 从而实现了流域水资源的“还原”量、“还现”量和“还未来”量的多情景动态科学评价, 从而实现了流域水资源的动态评价, 这样评价出来的量才是水资源的真值。

**3.3 有物理机制的流域分布式水资源评价模型工具** 要实现水资源的全口径层次化动态评价, 必须以水循环的全过程模拟为基础。针对现代环境下的流域水循环结构的二元化特性, 采取分布式水循环模拟模型和集总式水资源调配模型耦合的建模思路, 建立基于二元水循环模式的流域水资源评价模型, 通过分布式模型来模拟天然的“坡面-河道”天然水循环“四水”转换过程, 为集总式调控模型提供来水信息、通过集总式调配模型模拟“取水-输水-用水-耗水-排水”的人工侧支水循环过程, 为分布式模型提供产汇流路径上水量的输入输出。模型的基本构架见图2。

根据以上建模思路, 笔者在国家973课题研究中, 构建了有物理机制的分布式黄河流域水循环模拟模型(WEP-L模型)<sup>[8-10]</sup>来模拟各水循环与能量循环要素过程。该模型模拟对象包括天然的“坡面-河道”主循环过程和以“供-用-耗-排”为基本环节的人工侧支循环过程, 二者的耦合主要通过水量平衡和循环要素项之间的水力联系来实现<sup>[6]</sup>。WEP-L模型的平面结构和垂向结构见图3<sup>[11]</sup>。

集总式的水资源调配模型包括水资源合理配置模型和水资源调度模型, 其中配置模拟模型是在给定的系统结构和参数以及系统运行规则下, 对水资源系统进行逐时段的优化配置, 然后得出水资源供需平衡结果。水资源调度模型可采用“实时调度、滚动修正”的精细模型, 也可以采取基于规则的简化模式。

实践当中, 分布式模型和集总式模型耦合关键问题是分布式信息和集总式信息的融合, 具体可以采取两种方式, 一种是将集总式模型的输出信息进行时空二维“离散”, 将其降至分布式时间步长和空间单元相匹配的尺度, 供分布式水循环模拟模型使用; 另一类是将分布式模拟信息在时空二维上进行积分, 通过向上尺度化实现与集总式模型所需时空尺度的匹配。

## 4 结语

作为水资源规划中一项基础性工作, 由于大规模人类活动的影响和社会需求的提高, 水资源评价成

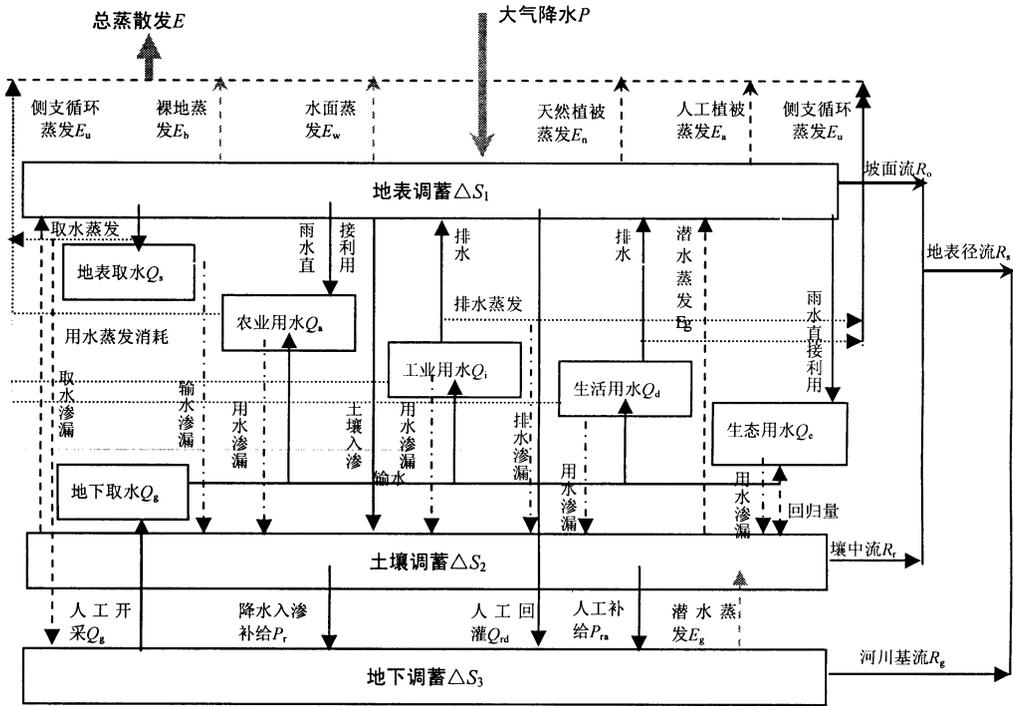


图2 流域水资源二元演化模型的基本结构

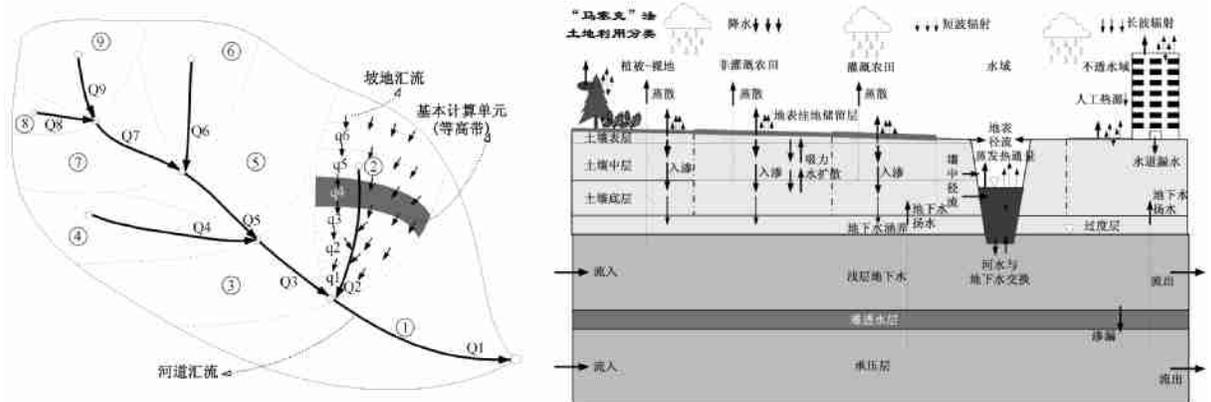


图3 WEPL模型的结构

为了一个复杂的科学问题。本文提出的水资源全口径层次化的动态评价方法较好地描述了现代环境下流域水资源二元演变的特征, 同时能够满足不同类型经济社会建设和生态环境活动的需求, 为人类活动影响下的流域水资源评价提供了基础的方法论, 有望形成适用于水资源紧缺、人类活动频繁地区的新一代水资源评价方法。所构建的基于二元水循环模拟的流域水资源评价模型具有良好的物理机制, 已经在黄河流域得到了应用和验证, 显示了强大的生命力和实用性。但也应看到, 本次提出的水资源评价方法在水资源利用效率评价、水质- 水量联合评价方面还有待进一步拓展, 水资源评价模型应用与推广应用还受分布式水文模型发展的制约, 包括大时空尺度与动力学机制描述问题、数据不足问题、不确定问题等。希望能够和广大水文水资源工作者一道努力, 尽快形成一套具有中国特色的水资源评价新方法。

参 考 文 献:

[ 1 ] United National Education. Scientific and Culture Organization. Guidelines for Conducting Water Resources Assessment [M]. Published 1998.

- [ 2 ] 世界气象组织, 联合国教科文组织. 水资源评价- 国家能力评估手册[M]. 张海敏, 朱庆平, 等译. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. 7- 25.
- [ 3 ] 谢新民, 郭洪宇, 唐克旺, 等. 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 ] 王国庆, 王云璋. 黄河中游分布式水资源评价模型研究[J]. 河南气象. 2000, ( 4 ): 20- 22.
- [ 5 ] 王浩, 陈敏建, 秦大庸, 等. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [ 6 ] 王建华, 江东, 黄河流域二元水循环要素反演研究[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 王浩, 王建华, 贾仰文, 等. 现代环境下的流域水资源评价方法研究[J]. 水文. 2006, 25 ( 3 ): 18- 21.
- [ 9 ] 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, 120( 2 ): 300- 308.
- [ 10 ] 贾仰文. WEP 模型的开发和应用[J]. 水科学进展, 2003, 14( 增刊 ): 50~ 56.
- [ 11 ] 杨大文, 楠田哲也. 水资源综合评价模型及其在黄河流域的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

## Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model

WANG Hao, WANG Jianhua, QIN Dayong, JIA Yangwen  
(China Institute of Hydropower and Water Resources Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A dynamic hierarchical assessment methodology of water resources is put forward in this paper, that is, according to the effective, controllable and renewable principle of water resources, the resources structure of precipitation is classified in order to realize the hierarchical assessment of water resources including general water resources, special water resources, water resources with runoff form and available water resources. The dualistic water resources assessment model combining distributed hydrological model with physical mechanism and centralized water resources allocation model is used. Furthermore, dynamic assessment of water resources is realized with changed underlying surface condition and water use condition.

**Key words:** human activities; water resources; assessment methodology; dualistic water cycle; distributed hydrological model

(责任编辑: 韩昆)