

文章编号: 0559-9350(2006)10-1181-07

基于流域水循环模型的广义水资源评价(II)

——黄河流域应用

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: 本文介绍了 WEP-L 模型在黄河流域的应用情况, 包括输入数据处理、参数估算与模型验证, 以及广义水资源初步评价成果。应用结果表明, 所提出的模型和方法, 能够评价径流性水资源、生态系统利用的雨水资源及其构成, 能够分析在强烈人类活动影响下黄河流域广义水资源与构成所发生的显著变化。1985 年及 2000 年下垫面条件下的水资源评价结果对比分析表明, 水土保持、农田建设及取水水活动等引起的下垫面条件变化, 使得流域狭义水资源总量减少(地表水减少但不重复地下水增加)、广义水资源总量增加, 水土保持及农田建设增加的降水高效利用量远大于其减少的径流性水资源量。最后讨论了成果对黄河流域水安全战略和水资源可持续高效利用的一些启示。

关键词: 流域水循环; 分布式模型; 广义水资源评价; 人类活动影响; 黄河流域; WEP-L

中图分类号: TV213

文献标识码: A

1 输入数据及其处理

本文将基于流域水循环模型的广义水资源评价方法^[1]在黄河流域进行了初步应用。20 世纪 90 年代以来, 黄河流域水资源严重短缺, 生态环境恶化, 下游断流持续时间越来越长。这种状况既与近年降水偏少有关, 又与强烈的人类活动影响, 特别是与用水增长(见表 1)和土地覆被变化(见表 2)密不可分。人类活动不仅改变了水循环过程, 同时对水资源的数量、构成和利用产生重大影响。

表 1 黄河流域用水分类统计(单位: 万 m³)

用水部门	1980	1985	1990	1995	2000
城镇生活用水	57520	79878	108278	140801	180772
农村生活用水	117438	124798	144907	165647	169931
工业用水	281619	320302	428474	540542	594862
农业灌溉用水	2895748	2662165	2947076	2991512	2964958
林牧渔业用水	77113	143480	182493	207589	277136
总用水量	3429438	3330624	3811228	4046092	4187659

本研究的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》成果数据, 即 3 个时期(1985、1995 和 2000 年)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 79.5 万 km², 受到软件存储能力和计算机内存的限制, 研究中采用分区处理与整体处理相结合的办法, 获得 1km 空间尺度的各类土地利用的百分比数据(MOSAIC 处理), 进而生成基本计算单元(子流域内等高带)内的各类土地利用百分比数据, 作为 WEP-L

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(1957-), 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

模型的基本输入数据。黄河流域 1985 年及 2000 年土地利用分类统计结果见表 2。从表 2 可以看出, 2000 年与 1985 年相比, 伴随着黄河流域水土保持建设, 尽管林草地面积没有发生大的变化, 但有林地(高闭郁度)面积增加了 8 581. 3km²、增幅达 30%, 高覆盖度草地面积增加了 7896. 2km²、增幅达 12%。土地覆被变化势必对流域水资源及其利用产生影响。由于缺乏 1985 年以前的遥感资料, 本研究根据各县级行政单元的土地利用历史统计资料和 1985 年土地覆盖矢量数据, 从土地利用构成比的角度对 1950、1960 和 1970 年 3 个时期的土地覆盖分布情况进行了复原。各计算单元土地利用百分比在各个时期之间的逐年变化采用线性插值法考虑。

表 2 黄河流域 1985 年及 2000 年土地利用分类统计(单位: km²)

一级类型	耕地(农田)								
二级类型	山地水田	丘陵水田	平原水田	大于 25 度坡地水田	山地旱田	丘陵旱田	平原旱田	大于 25 度坡地旱田	小计
1985	188.9	7.4	5 939.2	0.0	24 466.0	85 881.6	93 933.0	326.5	210 742.5
2000	187.4	16.3	6 725.4	0.0	30 892.7	87 461.3	89 949.3	259.4	215 491.8
一级类型	林地					草地			
二级类型	有林地	灌木林	疏林地	其他林地	小计	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地	小计
1985	28 342.3	49 220.8	19 964.2	1 799.4	99 326.7	67 371.1	178 848.9	141 506.7	387 726.7
2000	36 923.5	47 160.6	16 734.2	2 076.2	102 894.5	75 267.3	168 269.3	133 204.5	376 741.1
一级类型	水域								
二级类型	河渠	湖泊	水库坑塘	永久冰川雪地	滩涂	滩地	小计		
1985	3 185.0	2 495.3	1 475.0	189.4	0	6 110.6	13 455.2		
2000	3 165.3	2 556.3	1 485.8	239.4	0	5 840.5	13 287.3		
一级类型	城乡、工矿、居民用地(简称居工地)								
二级类型	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	小计					
1985	2 273.8	13 118.5	718.2	16 110.4					
2000	2 539.5	13 567.9	944.9	17 052.2					
一级类型	未利用土地								
二级类型	沙地	戈壁	盐碱地	沼泽地	裸土地	裸岩石砾地	其他	小计	
1985	34 801.9	2 681.5	3 323.0	7 379.4	2 455.3	10 334.2	5 947.1	66 922.3	
2000	33 479.3	3 225.9	4 307.5	8 367.2	2 964.6	11 283.5	5 191.1	68 818.0	
1985	合计								794 285
2000	合计								794 285

除土地利用外, 应用 WEPL 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) 1045 个雨量站和 212 个气象站 1956~ 2000 年降水、气温、风速、日照和湿度等日系列数据的时空展布(降水和气温考虑了地形高程的影响); (3) 其它下垫面要素信息(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) 8 485 个子流域、河道(包括空间拓扑关系)的基本属性表, 38 720 个计算单元的基本属性表, 以及上述各类数据的输入文件。

2 参数估算与模型验证

模型的主要参数包括土壤参数(如饱和导水系数、土壤水分吸力特征曲线参数等)、植被参数(如最大截留深、叶面积指数和覆盖率等)、地下水含水层参数(导水系数和给水度)、坡面和河道的 Manning 糙率以及河床的透水系数等。模型中大多数参数可根据物理特性及试验调查数据推定而不需率定, 但对土壤饱和导水系数、地下水含水层导水系数与给水度、河床材料的透水系数与厚度以及 Manning 糙率等敏感参数, 选择校正期根据模拟流量与观测结果的符合情况, 进行了一些调整。

2.1 土壤参数估算 在综合土壤质地信息(如黏土、壤土和砂土的百分比等)基础上, 将黄河流域土壤

分成四类: (1) 砂土类; (2) 壤土类; (3) 黏壤土类; (4) 黏土类。黄土高原常见的两类土壤即黄棉土和娄土, 分别归类于壤土和黏壤土。在参考黄土高原土壤水分运动实验研究成果^[2]的基础上, 本研究对土壤水分特性参数进行了概化计算, 推定出四类土壤的水分特性主要参数见表 3。

表 3 黄河流域土壤水分特性参数

参数	砂土	壤土	黏壤土	黏土
饱和土壤含水率 θ_s	0.400	0.466	0.475	0.479
田间持水率 θ_f	0.174	0.278	0.365	0.387
凋萎系数 θ_{wil}	0.077	0.120	0.170	0.250
单分子土壤含水率 θ_m	0.035	0.062	0.136	0.090
饱和导水率 k_d (cm/s)	2.5E-3	7.0E-4	2.0E-4	3.0E-5
湿润锋土壤吸力 SW/cm	6.1	8.9	12.5	17.5

2.2 植被参数估算 植被参数是分布式水循环模拟中冠层截留和蒸散发计算的重要参数。本研究对各类植被信息进行加工处理, 并获取所需的相关植被参数。本次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 $8km \times 8km$, 时间分辨率为 10d。本研究在将该数据空间插值到 1km 网格单元的基础上, 根据 AVHRR 影像第一通道和第二通道的反射率推求各计算单元的植被指数 NDVI、植被覆盖率和叶面积指数。黄河流域及各水资源二级分区的 2000 年平均植被覆盖率和叶面积指数推算结果示例见表 4。由于缺乏 1982 年以前的 AVHRR 影像数据, 植被参数采用以下方法推算: (1) 根据文献[3]设定各类土地覆被的植被覆盖率和叶面积指数; (2) 调整各类土地覆被的植被参数使各分区均值与根据 1982~2000 年 AVHRR 影像数据推算的各分区均值之差最小; (3) 根据各类土地覆被的植被参数和 1956~1981 年土地覆被推算 1956~1981 年植被参数。

表 4 黄河流域及各水资源二级分区的 2000 年平均植被覆盖率和叶面积指数

流域分区	综合植被覆盖率			综合叶面积指数		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
黄河流域	0.661	0.100	0.339	2.842	0.091	1.148
龙羊峡以上	0.830	0.107	0.385	4.044	0.094	1.426
龙羊峡~兰州	0.852	0.122	0.419	4.010	0.111	1.513
兰州~河口镇	0.441	0.057	0.210	1.552	0.048	0.605
河口镇~龙门	0.548	0.079	0.265	2.083	0.069	0.818
龙门~三门峡	0.727	0.129	0.412	3.143	0.118	1.424
三门峡~花园口	0.845	0.158	0.491	3.784	0.145	1.738
花园口以下	0.866	0.131	0.458	3.821	0.120	1.525
内流区	0.325	0.059	0.159	1.032	0.049	0.402

2.3 汇流参数估算 Manning 糙率反映边界表面的粗糙程度对水流阻力的影响, 是运动波和动力波汇流模型计算的重要参数。坡面汇流 Manning 糙率取计算单元内各类土地利用 Manning 糙率的面积调和平均值。参照文献[4]附表 11.2, 经模型调试, 各类土地利用 Manning 糙率的取值为林地 0.3、草地 0.1、农田 0.2、裸地 0.05、裸岩及城市地面 0.02、水域 0.01。河道汇流 Manning 糙率根据各断面实测洪水反演值(水文年鉴)并参考文献[4]附表 11.1 和附表 11.2 设定。由于黄河河道断面多为复式断面, 河滩地有杂草、杂树、灌木甚至农作物等植被, 河道汇流计算考虑了漫滩时糙率的增大。

2.4 地下水含水层参数估算 根据黄河流域水资源综合规划有关资料, 黄河流域平原盆地分 51 个区。各平原区地下水含水层的渗透系数、传导系数和给水度等参数参照水资源综合规划调查资料确定。而山区饱和土壤层的参数结合径流模拟验证推定: 渗透系数取表层土壤饱和和透水系数 \times 横向不均匀系数(经模型调试一般取 5); 传导系数定为: 渗透系数 \times 土壤层厚度(m), 给水度定为 0.05。

2.5 融雪参数估算 积雪融化系数(度日因子)及融化临界温度根据有关文献并结合模型调试确定。融化系数的取值为: 林地 $1mm/(^{\circ}C \cdot d)$ 、草地 $2mm/(^{\circ}C \cdot d)$ 、裸地 $3mm/(^{\circ}C \cdot d)$ 、城镇用地 $5mm/(^{\circ}C \cdot d)$ 、冰川雪地 $1mm/(^{\circ}C \cdot d)$; 融化临界温度均为 $0^{\circ}C$; 雨雪临界温度均为 $1^{\circ}C$ 。

2.6 模型校验 模型校正与参数调试和其他分布式水文物理模型一样采用了“试错法”, 即首先根据物

理性质、实验观测数据以及参考文献数据确定初值, 然后按 3 条准则即: (1) 模拟期年均径流量误差尽可能小; (2) Nash-Sutcliffe 效率尽可能大; (3) 模拟流量与观测流量的相关系数尽可能大, 进行参数调整。具体地讲, 首先对土壤饱和导水系数(影响地表径流的产流总量及峰值)按土壤类别进行调试; 然后对含水层的导水系数及给水度、河床材料透水系数(影响河川的退水期流量及年径流总量)按土壤类别进行调试; Manning 糙率(影响河川径流过程线各洪峰部的形状)按土地利用类别进行调试。

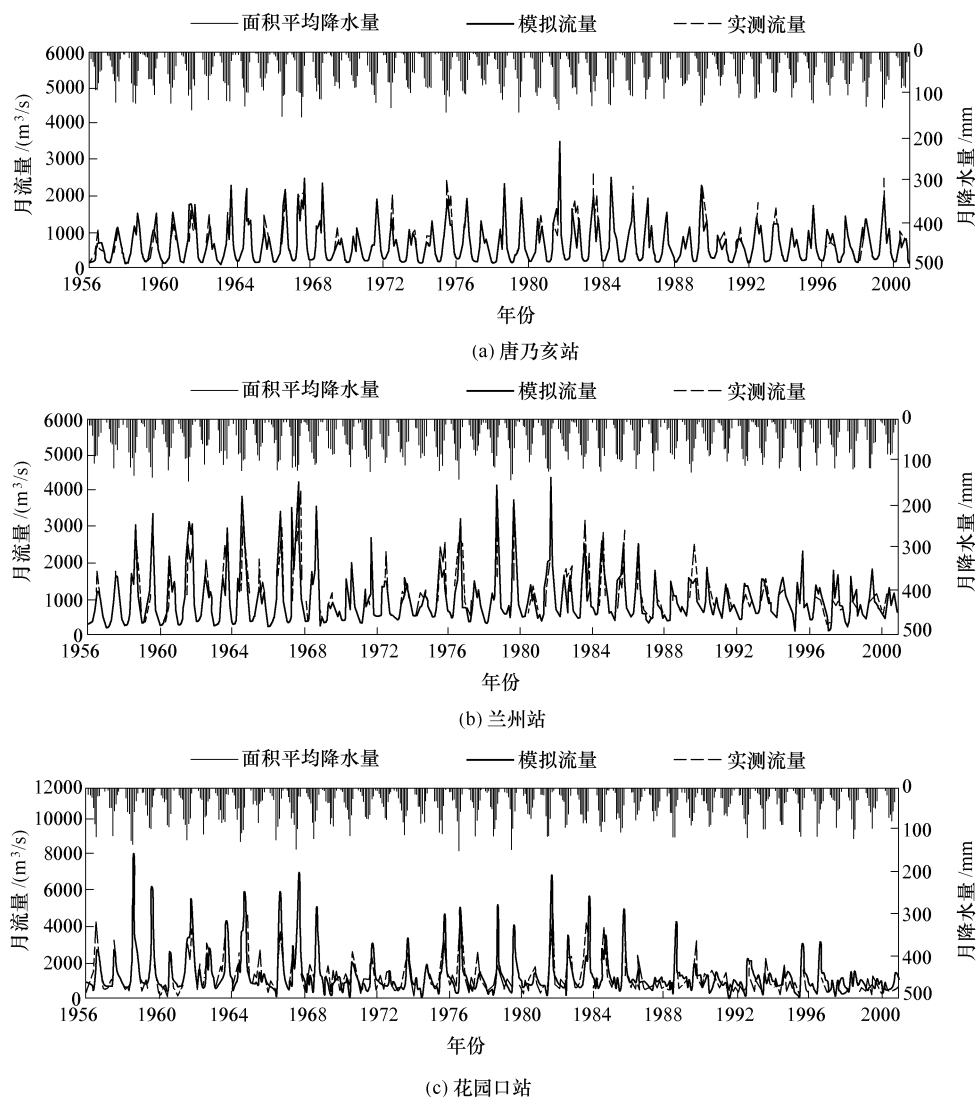


图 1 径流过程模拟验证示例

WEPL 模型在黄河流域的校验工作基于黄河 23 个主要水文测站 45 年逐月及逐日实测径流系列, 其中 1980~ 2000 年的 21 年取为模型校正期, 模型校正后保持所有模型参数不变。从校验结果来看, 1956~ 2000 系列干流各站多年平均实测径流量的相对误差介于 -1.2% 和 1.5% 之间, Nash-Sutcliffe 效率系数介于 62% 和 82% 之间。月径流模拟过程验证示例见图 1, 可以看出: 无论在人类活动影响较小的上游唐乃亥站与兰州站, 还是在人类活动剧烈的下游花园口站, 径流过程拟合的均较好, 因此该模型具有较高模拟精度, 可应用于黄河流域水循环过程模拟和水资源演变分析。

3 现状条件下的评价结果

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 WEPL 模型和 1956~ 2000 年气象(降水和气温等)系列数据, 黄河流域及各二级分区的广义水资源评价结果见表 5。从表 5 中可

以看出, 黄河流域广义水资源量是 2756.6 亿 m^3 , 占总降水的 77.4%, 沙漠和裸地等无效蒸发是 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%, 居工地蒸散法占广义水资源量的 0.7%。

表 5 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 m^3)

水资源分区	狭义水资源			有效蒸散发(生态系统对降水的有效利用量)											广义水资源总量	无效蒸发
	降水量	不重复		农田			林地			草地			居工地蒸散			
		地表水	地下水	总量	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		
黄河区	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
龙羊峡以上	632.3	210.1	1.9	211.1	0.6	0.6	4.3	7.8	5.5	16.6	35.5	20.6	141.3	0.1	444.8	187.5
龙羊峡至兰州	433.0	112.8	3.4	116.1	6.5	7.7	34.3	14.6	14.6	32.6	18.4	18.5	84.1	1.0	348.4	84.6
兰州至河口镇	427.6	18.5	35.2	53.7	12.4	33.2	74.1	3.6	14.4	4.4	12.4	31.9	50.0	2.8	292.9	134.7
河口镇至龙门	480.2	42.3	6.9	49.2	12.0	28.9	103.7	7.9	28.1	25.0	7.1	18.6	56.3	0.6	337.4	142.8
龙门至三门峡	1038.9	104.5	39.0	143.5	28.7	70.6	287.5	19.4	67.9	78.5	11.3	29.8	123.2	6.7	867.1	171.8
三门峡至花园口	274.7	39.2	11.0	50.3	5.2	16.5	67.9	7.4	33.6	45.2	1.7	7.3	23.4	1.6	260.0	14.7
花园口以下	157.8	18.0	14.0	32.0	6.4	14.4	65.1	1.0	4.3	5.5	0.5	2.0	7.4	2.9	141.5	16.3
内流区	118.6	3.6	16.2	19.5	1.0	2.2	7.3	0.3	1.1	0.3	4.9	10.7	16.9	0.1	64.3	54.3

表 6 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 m^3)

水资源分区	农林牧用地消耗				工业与生活用水消耗				生态环境用水消耗				外调水
	狭义水资源	渠系田间输水蒸发	灌溉水棵间蒸发	灌溉水蒸腾	小计	工业与生活输水蒸发	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	
黄河区	676.4	46.9	95.1	54.4	226.4	19.8	22.0	41.8	82.1	51.0	200.8	333.9	74.3
龙羊峡以上	212.1	0.4	0.5	0.2	1.2	0.3	0.2	0.6	20.5	1.8	187.9	210.2	0.0
龙羊峡~ 兰州	116.1	4.6	6.8	3.4	14.8	2.1	2.4	4.5	8.4	0.4	88.1	96.9	0.0
兰州~ 河口镇	53.7	43.6	38.6	23.4	105.7	3.4	4.1	7.5	15.7	23.8	-104.3	-64.8	5.4
河口镇~ 龙门	49.2	1.8	2.4	2.4	6.6	1.0	1.0	2.0	8.0	4.6	28.0	40.6	0.0
龙门~ 三门峡	143.5	14.2	26.0	14.7	54.9	7.5	8.5	16.0	13.4	5.0	54.2	72.6	0.0
三门峡~ 花园口	50.3	3.7	5.1	3.5	12.3	2.8	3.1	5.9	4.9	0.3	26.8	32	0.0
花园口以下	32.0	7.8	14.5	6.1	28.4	2.5	2.5	5.0	9.3	0.6	-80.2	-70.3	68.9
内流区	19.5	0.8	1.2	0.6	2.6	0.1	0.1	0.2	1.9	14.5	0.2	16.6	0.0

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 6, 广义水资源高效水量和低效水量评价结果见表 7。从表 7 中可以看出, 黄河流域高效水量是 1 209.9 亿 m^3 , 占广义水资源量的 43.9%, 低效水量是 1 546.6 亿 m^3 , 占广义水资源量的 56.1%。结合表 5 和表 6 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(不包括灌溉水)中, 高效水量占 27.7%, 低效水量(棵间土壤蒸发)占 72.3%; 林地对降水的利用中, 高效水量占 52.6%, 低效水量(棵间土壤蒸发)占 47.4%; 草地对降水的利用中, 高效水量占 31.5%, 低效水量(棵间土壤蒸发)占 68.5%。

4 下垫面变化对广义水资源演变的影响

1985 年下垫面条件下的水资源评价结果见表 8。与 2000 年下垫面条件下结果(表 5)对照可以看出, 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 22.6 亿 m^3 , 其中地表水减少了 36.7 亿 m^3 , 不重复地下水增加了 14.1 亿 m^3 , 主要原因是水土保持建设和农田建设不利于地表水产流、地下水超采等活动减少了河川基流量; (2) 有效蒸散发增加 105.7 亿 m^3 , 说明水土保持及农田建设不仅利用了原有一部分径流性水资源, 而且还利用了原有一部分无效蒸发的土壤水和地表截留量; (3) 广义水资源总量增加 84.5 亿 m^3 , 说明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; (4) 林草地及农田截留与蒸腾增加 54.5 亿 m³, 说明水土保持及农田建设增加的降水高效利用量远大于其减少的径流性水资源量。

表 7 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)

水资源分区	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	渠系田间输水蒸发	工业与生活水蒸发	小计
黄河区	725.3	54.4	22.0	82.1	51.0	74.3	200.8	1209.9	1354.8	95.1	46.9	19.8	1546.6
龙羊峡以上	70.6	0.2	0.2	20.5	1.8	0.0	187.9	281.2	162.2	0.5	0.4	0.3	163.4
龙羊峡~兰州	81.3	3.4	2.4	8.4	0.4	0.0	88.1	184.0	151.0	6.8	4.6	2.1	164.5
兰州~河口镇	110.6	23.4	4.1	15.7	23.8	5.4	104.3	78.7	128.5	38.6	43.6	3.4	214.1
河口镇~龙门	103.2	2.4	1.0	8.0	4.6	0.0	28.0	147.2	185.0	2.4	1.8	1.0	190.2
龙门~三门峡	234.4	14.7	8.5	13.4	5.0	0.0	54.2	330.2	489.2	26.0	14.2	7.5	536.9
三门峡~花园口	73.3	3.5	3.1	4.9	0.3	0.0	26.8	111.9	136.4	5.1	3.7	2.8	148
花园口以下	31.5	6.1	2.5	9.3	0.6	68.9	-80.2	38.7	78.0	14.5	7.8	2.5	102.8
内流区	20.3	0.6	0.1	1.9	14.5	0.0	0.2	37.6	24.5	1.2	0.8	0.1	26.6

表 8 1985 年下垫面条件下黄河流域广义水资源评价结果(单位: 亿 m³)

水资源分区	狭义水资源		有效蒸散发(生态系统对降水的有效利用量)												广义水资源总量	无效蒸发
	降水量	不重地表水复地地下水	农田			林地			草地			居工地蒸散				
			总量	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			
黄河区	3563.0	585.4	113.6	699.0	67.5	159.6	650.9	57.1	152.6	201.6	84.4	130.7	454.1	14.5	2672.1	891.0
龙羊峡以上	632.3	220.5	1.8	222.3	0.5	0.4	2.6	7.7	5.4	16.5	31.2	17.8	124.1	0.1	428.5	203.8
龙羊峡~兰州	433.0	119.8	2.4	122.3	6.0	6.6	34.5	14.4	14.5	32.5	17.0	417.0	76.9	1.1	342.8	90.2
兰州~河口镇	427.6	18.7	34.2	53.0	10.8	27.4	81.7	3.4	13.7	4.9	11.8	31.3	48.5	2.4	288.9	138.7
河口镇~龙门	480.2	43.5	5.8	49.3	12.1	29.7	102.6	7.1	25.3	26.6	6.9	18.4	49.9	0.6	328.4	151.8
龙门~三门峡	1038.9	117.3	32.7	149.9	26.6	65.7	290.3	18.1	64.0	78.6	10.9	28.3	114.6	5.1	852.3	186.6
三门峡~花园口	274.7	43.0	8.5	51.5	4.7	14.8	65.1	5.2	24.3	35.8	1.52	5.1	16.4	1.4	225.6	49.1
花园口以下	157.8	19.3	12.9	32.2	6.0	13.1	67.8	1.0	4.4	6.4	0.3	1.2	5.8	3.7	142.0	15.8
内流区	118.6	3.2	15.3	18.5	0.8	1.8	6.2	0.2	0.9	0.3	5.1	11.7	17.9	0.2	63.6	55.0

5 讨论和结论

基于上述黄河流域广义水资源及其构成分析结果,可以看出:(1)狭义水资源具有可控性,它的总量及其构成的时空演变对人类的影响最为直接,因此狭义水资源评价仍然是水资源评价的核心内容。狭义水资源评价通过农田及水土保持减水量计算粗略考虑雨水资源利用,但不能定量分析植被生态系统的雨水利用量,而广义水资源评价基于流域水循环全要素过程,可统筹考虑径流水资源和雨水资源的相互作用,有利于实现广义水资源的总体高效利用。(2)调整农业种植结构、加强水土保持建设,不但有利于减少水土流失,还可以增加生态系统对雨水资源的高效利用,对实现黄河流域水安全战略至关重要。分析结果表明,各种生态系统对降水的利用中高效水量所占比例有较大差异,农田、草地和林地多年平均分别是 27.7%、31.5% 和 52.6%,林地高于草地而草地又高于农田。这是因为农田除茂盛的生长季节外,大部分时间有很大比例处于裸土状态,不利于对雨水的高效利用。(3)减少棵间蒸发损失,是促进农田对降水和灌溉水高效利用的关键。模拟结果表明,多年平均农田水分约 72% 以棵间蒸发的形式返回大气,说明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,因此应大力推广田间节水灌溉与保墒耕作技术,尽量减少这部分棵间“奢侈”蒸发。渠系及田间渗漏水量补充地下水后仍可循环利用,减少渠系及田间蒸发损失才是“真实”节水。(4)在黄河流域和整个北方缺水地区,今后经济社会的进一步发展势必带来工业与生活需水的进一步增加,必须加大农业节水力度以支持工业与生活需水的不断

增长。以黄河流域 2000 年用水消耗为例(表 6), 农业(含林牧业)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 , 因此农业灌溉用水 324.2 亿 m^3 中约 52% 损失于渠系蒸发和棵间土壤蒸发, 这便是农业灌溉节水潜力的最大估计值。夺取这部分低效蒸发需要大量投入, 尽管不可能全部夺取, 但应当在技术与经济可行的范围尽量减少这部分低效蒸发, 以支持工业与生活需水的增加和保护河道内生态系统。

总之, 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低效与高效水量的评价方法。黄河流域应用结果表明, 所提出的方法和模型, 能够评价黄河流域的径流性水资源、生态系统利用的雨水资源及其构成与利用效率, 能够分析在强烈人类活动影响下黄河流域广义水资源与构成所发生的显著变化, 研究成果对黄河流域水安全战略以及我国缺水地区水资源可持续高效利用具有一些启示。

致谢: 水利部黄河水利委员会在基础数据等方面对本研究给予了大力支持和帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献:

- [1] 贾仰文, 王浩, 仇亚琴, 周祖昊. 基于流域水循环模型的广义水资源评价(I) [J]. 水利学报, 2006, 37(9): 1051 - 1055.
- [2] 夏卫生, 雷廷武, 杨文治, 邵明安. 蒸发条件下土壤水分再分布的动力学研究 [J]. 水利学报, 2002, (7): 37-41.
- [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(11): 2175- 2194.
- [4] 王国安, 李文家. 水文设计成果合理性评价 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.

General water resources assessment based on watershed hydrologic cycle model II : Applications in the Yellow River Basin

JIA Yang-wen, WANG Hao, QIU Ya-qin, ZHOU Zi-hao
(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Applications of WEP-L model in the Yellow River basin are introduced, including process of input data, parameter estimation and model verification, and the preliminary results of general water resources assessment. The application results illustrate that the suggested model and approach are capable of assessing runoffs-typed water resources and rainfalls-typed water resources utilized by ecosystems, and analyzing the obvious changes of general water resources and various components in the basin under the impacts of strong human activities. The contrast of the assessment results under the land cover conditions of 1985 and 2000 reveals that land cover condition changes caused by water and soil conservation, cultivated land construction and water taking activities make the special water resources in the basin decreased (surface water resources decreased but the non-overlapped groundwater resources increased) and the total general water resources increased, and the high-efficiently utilized rainfalls increased much more than the decreased runoffs-typed water resources. Last, the paper discusses the hints of the research results to water safety strategy in the Yellow River basin and sustainable and efficient development of water resources in China.

Key words: watershed hydrological cycle; distributed model; general water resources assessment; human impacts; the Yellow River Basin; WEP-L

(责任编辑: 王成丽)