

文章编号 :0559-9350(2008)12-1279-07

基于分布式水文模型的水资源评价新方法

王忠静^{1,2}, 杨 芬^{1,2}, 赵建世^{1,2}, 何 杉³

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;
2. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084; 3. 水利部 海河水利委员会, 天津 300170)

摘要:为解决变化环境条件下水资源评价中的“还原失真”和“还原失效”问题,本文提出基于物理参数的分布式水文模型用于变化环境下水资源评价方法的原理和假定,以及基于此原理利用上游测站流量进行模型参数率定和中游测站进行验证(简称 UCMV, Up-reach for Calibration and Mid-reach for Validation)的水资源评价新方法。以永定河山区流域为实例,进行了不同时期下垫面的水资源评价。结果表明,流域 1990 年和 2000 年下垫面条件下多年平均地表水资源量分别为 10.799 和 9.892 亿 m³,后者相对于前者产流能力降低了 8.0%,清楚地表现出下垫面变化对流域产流能力的影响,也进一步证实了“还原失效”现象的存在以及基于物理分布式水文模型进行变化环境下的水资源评价的有效性。

关键词:分布式水文模型;水资源评价;UCMV;下垫面变化;永定河山区流域

中图分类号:TV211

文献标识码:A

1 研究背景

通常情况下,水资源评价的基本方法是实测-还原法,一般包括还原和“还现”过程。一般情况下,水文整编中的还原是将各类用水回加到实测系列中,完成历史实测下垫面条件下水资源评价中的第 1 次还原过程;但是,对于人类剧烈活动、下垫面变化对水资源形成产生较大影响且破坏了径流系列一致性的情况^[1],水文还原还需将历史实测下垫面条件下经第一次还原计算后的天然径流系列修正到现状下垫面条件下的径流系列,使其具有一致性,从而完成第 2 次还原过程,也或称之为“还现”过程。目前,水文还原的方法有降雨径流模拟法、蒸发差值法和分项调查法,我国水文工作中常用的方法为分项调查法。

在一些流域,由于高强度的人类活动,使得分项调查法中存在着“还原失真”与“还原失效”的问题^[1]。如图 1 所示,官厅水库天然入库河川径流量中的还原水量在 20 世纪 80 年代以后远远超过实测水量,此时还原计算中的调查误差将极大影响评价结果,从而产生“还原失真”问题,对应于传统方法中的第一次还原过程;此外,当下垫面变化导致水文循环规律变化时,如草地改旱(农)地、旱坡地改旱梯田等后,流域产流能力大为不同,此过程没有使用工程意义上的水资源(我国现行以天然河川径流量与不重复地下水水资源量之和计),因而就“无水可还”,此时的“还原失真”更可能为“还原失效”,对应于第 2 次还原过程。目前,第 2 次还原过程中采用的方法为引入修正系数进行修正。其值如何选取更为恰当,是需要研究的问题。

自 60 年代以来,随着人们对产流理论的深入理解,集总型(概念性)水文模型慢慢发展起来。这种模型开始主要用于洪水预报,1994 年赵人俊首次使用这种模型(新安江模型)进行还原分析和水资源评价^[2]。由于这种模型参数的率定是通过对流域出口径流与流域面平均雨量和蒸发量的反演而推求的,

收稿日期:2008-04-10

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2006BAB14B01);国家重点基础研究发展(973)计划(2006CB403401)

作者简介:王忠静(1963-),男,山东莱芜人,博士,教授,主要从事水资源规划及水文模型研究。E-mail:zj.wang@tsinghua.edu.cn

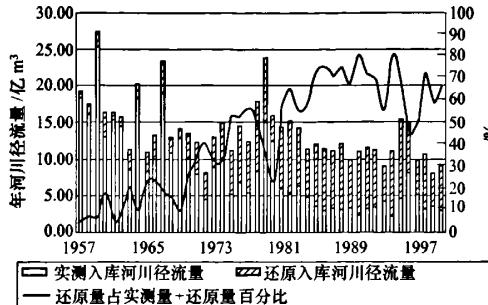


图 1 官厅水库实测 - 还原入库河川径流量

是流域系统降水产流整体特性的综合反映,因此针对一个流域所率定的参数,仅能用于该流域参数率定时的下垫面情况,当流域面积较大时,甚至只能适合于率定时的雨型,更无法进行下垫面变化的水文效应分析。基于降水产流物理机制的分布式水文模型为此提供了一种可能。近年来,已有一些学者尝试应用分布式水文模型进行了下垫面变化条件下的水资源评价^[3-6]。下面将详细阐述分布式水文模型用于水资源评价的原理、假定和进行率定的步骤和方法以及应用。

2 分布式水文模型用于水资源评价的原理与假定

设流域可以无限细分,大流域由子流域组成,子流域由具有单一的下垫面条件即完全均质的下垫面响应单元组成。当水文模型的描述对象从一个流域聚焦到水文响应单元时,基于降水产流原理的概念性水文模型参数,在很大程度上就具有了物理参数属性;当水文模型的概念性假定进一步逼近真实的产流过程时,就成为具有物理机制的水文模型。此时模型参数将仅是反映下垫面物理特性的参数,与降水无关。这样一个均质响应单元无论出现在流域的什么位置,其参数均保持不变,具有同样的水文响应。

以水面为例,水面在水文模型中一般被视为不透水下垫面。当降水到水面时,直接产流,亦即形成水资源,其降水产流系数为1。无论水面出现在流域哪个位置,降水强度多大,这个下垫面的水文参数是不变的,即该下垫面的产流规律是不变的。再以基本不透水的混凝土路面为例,当降水的雨强很小且历时不长时,水平放置的混凝土面不会产生径流,因其表面对少量降水有截留,而截留的水又很快被蒸发;但是同样的降水,若加载在倾斜放置的混凝土面时,因其坡度增大而增加了水力梯度,减小了截留能力,则很可能产生径流。这说明产流系数不仅与下垫面的质地有关,还与下垫面放置的角度有关。因此,至少需要用两类参数才能描述此下垫面的产流特性,一类是下垫面的渗透性质,另一类是其放置的坡度。

实际上,下垫面是影响水文过程的地表各类覆盖物的一个综合体,包括地质、地貌、植被和人工建筑4个主要因素^[7],简称要素。每个要素是一个有限集集合,如地质因素中就包括不同的土壤类型。在水文模拟中,常常用一组独立不相关的物理参数来描述下垫面各类要素的水文特性,如地形坡度、土壤导水率、饱和含水率、叶面指数等。有的要素可以用一个物理参数来描述,如地形要素可用坡度来描述;而有的要素却需要多个参数,如土壤要素的水文特性至少要用饱和导水率、饱和含水率和凋萎含水率来描述。所有要素中的某一种元素组合方式则可认为代表了一个均质的下垫面(即水文响应单元),此时参数的某个特定值或特定值组合,就表示了其代表要素的这个集合中某元素的水文特性。按前文所述,该元素的水文特性参数仅与其物理性质有关,在任何其他的均质下垫面(元素组合)中都保持不变。

下垫面要素的物理参数值获取方法可以分为两类:一类是通过观测可以得到,如地形坡度、土地利用类型和覆被;另一类是通过模型率定得到,如最大叶面指数、地表最大储水量等。这些参数值一旦率定好,可在类似区域直接使用。

简而言之,一个流域的下垫面系统可认为是由一定数量的不同均质下垫面组合而成的,而流域内下

垫面要素的元素组合变化就导致了流域下垫面系统的变化,但这种组合变化并不会改变下垫面要素集中这些元素本身的产流特性。因此,只要没有新的元素出现,就可以不重新率定模型而直接模拟变化下垫面的水文特性,从而进行变化环境下的流域水资源评价。

3 UCMV 率定方法

分布式水文模型输入主要为下垫面以及对应此下垫面时期的降雨和蒸发资料。下垫面数据主要来自于调查或遥感获得的土地利用分布图以及土壤分布图。率定时应选取代表性和同步性较好时期的下垫面及水文资料,不但地图精度要高,而且要有对应的降雨及蒸发系列。考虑到下垫面的变化,率定的年份不能太长,要与下垫面形成的时期匹配。由于分布式水文模型输入参数是分布的,输出结果也是分布的,率定时可不限于在流域出口一个测站,只要分布式模型及资料的分辨率足够高,就可以选择在流域的任何适宜位置进行率定和检验。虽然采用分布式水文模型模拟进行水资源评价,在原理上克服了“还原失真”和“还原失效”问题,但对于人类活动剧烈,水资源开发利用强度大的地区,其模型参数率定所需的径流资料必须慎重考虑。应避免选择那些还原量比例较大的水文测站作为率定参考站。为此,本文提出了变化环境条件下的分布式水文模型 UCMV(Up-reach for Calibration and Mid-reach for Validation)率定方法。其具体步骤如下:(1)选择流域上游人类干扰很小、水资源开发利用程度不高的若干个小流域为基本小流域,选择其出口水文站为基本参照径流站;(2)以基本小流域和基本参照径流站为基础,结合同期降水蒸发观测资料,率定基本小流域下垫面的各单个因子的物理参数;(3)将在基本小流域率定出的单个因子物理参数作为全流域相同下垫面条件各单个因子的基本物理参数,在全流域使用,并以中游人类干扰不太剧烈的若干小流域作为初步检验单元,修正参数;(4)应用率定的模型模拟全流域的降水产流,计算评价同期的天然水资源量。

值得强调的是,在上述水资源评价新方法以及对应 UCMV 率定方法中,假设的流域中任一下垫面要素中单一因子的物理参数在流域中不变。为保证其适用性,要求区域内参数空间不变假定的条件成立,如具有较为相近的气候特征、植被特点以及耕种习惯等。

4 应用实例——永定河山区流域不同下垫面条件下的地表水资源评价

4.1 永定河流域概况 研究区选在永定河流域官厅水库以上的集水区(不包括妫水河)。该区地处干旱和湿润气候的过渡地带,流域面积 4.17 万 km²,其中山区面积占 80%以上。流域多年平均降水不足 400 mm,年内分配很不均匀,80%左右集中在汛期。该区水资源缺乏,开发利用程度高达 80%以上,同时受地下水位下降、土地资源开发和人类活动等因素影响,下垫面变化剧烈。

4.2 基础数据 包括:永定河山区流域 DEM 图(1:5 万,图 2(a));表层土壤类型图(1:500 万,图 2(b));1990 年和 2000 年土地利用图(1:25 万,图 2(c)、2(d));1990~1992、2000~2001 年的日降水、蒸发系列和实测径流系列。其中降雨、蒸发系列用于模型降水产流模拟计算,径流系列则用于模型率定和校核。降水、蒸发资料来自水文年鉴的 103 个雨量站以及国家气象中心的 14 个蒸发站,降水和蒸发站分布如图 2e、2f 所示。此外,模型使用了 1957~2000 年共 44 年的日降水资料用以计算流域多年同系列的产流量,评价地表水资源量。

4.3 模型及其率定与验证 本文改进了基于坡面流单元的 CBHM 分布式水文模型^[8],该模型基于分布的物理参数,可用于变化环境条件下的水资源评价。根据 UCMV 方法,本文首先选取了 1990 年土地利用作为模型参数率定的下垫面,对应 103 站 1990~1992 年降雨系列,同时选取上游 5 个流量站的径流资料用于模型参数率定,选取中下游 13 个流量站用于模型参数初步验证,各水文站的分布见图 3。表 1 列出了与土地利用相关的主要水文物理参数,表 2 列出了模型在各水文断面的率定和检验的结果。其中计算量为模型计算输出值,对应于同水文站的实测量与还原量。

考虑到流域有水库的调节和人类取水活动的影响,短时段的实测径流与天然径流过程必然存在不

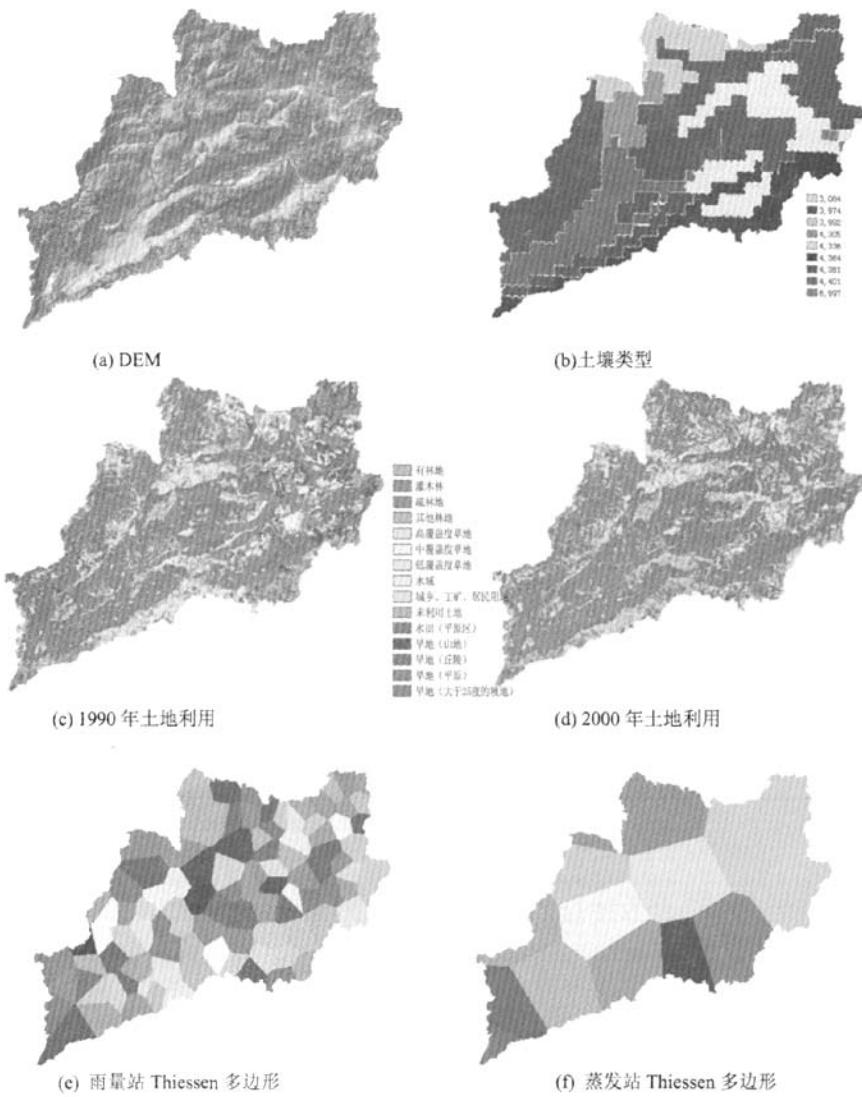


图 2 永定河山区流域基础资料

表 1 不同土地利用类型的参数

土地利用类型	覆盖率	最大叶面指数	根深/m	土壤各向异性系数	地表最大储水量/mm
耕地	水田(平原区)	0.95	4.0	0.5	1.0
	旱地	0.90	4.0	0.5	20.0
	有林地	0.30	7.0	1.0	10.0
林地	灌木林	0.50	7.0	1.0	12.0
	疏林地	0.20	7.0	1.0	8.0
	其他林地	0.70	7.0	1.0	10.0
草地	高覆盖度草地	0.60	4.0	0.2	1.0
	中覆盖度草地	0.40	4.0	0.2	1.5
	低覆盖度草地	0.20	4.0	0.2	2.0
水域	0.00	0.0	0.0	1.0	0.0
城乡、工矿、居民用地	0.20	5.0	0.5	1.0	5.0
未利用土地	0.20	3.0	0.3	1.0	5.0



图3 水文测站分布

一致,不宜用取短时段的纳什(Nash)系数评价模型模拟效果,故提出拟合度(年或更长时段模拟值与真值的比值)作为模型评价标准。

从表2可以看出,模型上游测站的率定结果良好,而且对于大部分中下游测站,其计算结果与统计结果的总量偏差也在可接受范围以内。虽然部分还原量较小的中下游水文站其拟合度相对还原量较大的水文站结果较差,但是考虑到这些站的实测量与还原量的累计之和(拟合度计算的基数)较小的缘故,其结果是可以接受的。此外,给出了率定期模拟的几个上游水文站的日径流过程(图4(a));为对比消除水库调蓄的影响,也给出了流量累积过程(图4(b))。从图4可以看出模型能够较好地模拟天然径流过程。

表2 各水文断面水量计算结果比较(1999~1992平均) (单位:万m³)

位置	站名	实测量①	还原量②	计算量③	拟合度③/(①+②)/%
上游	丰镇(饮二)	2 507	0	2 657	106
	观音堂(二)	1 577	918	2 645	106
	柴沟堡	4 428	170	5 426	118
	兴和	4 985	0	5 184	104
	啕来庙(三)	1 706	148	2 039	110
中下游	罗庄	5 451	8 603	17 146	122
	西朱庄	7 08	17 161	21 462	87
	固定桥	14 161	29 960	41 121	100
	册田水库	9 226	28 733	42 134	111
	石闸里	20 629	36 748	58 525	102
	贾庄(二)	1 992	1 722	4 605	124
	孤山(二)	2 900	1 251	4 400	106
	壶流河水库	2 878	301	4 482	141
	钱家沙洼	8 313	4 454	11 746	92
	响水堡	18 649	14 473	32 128	97
	友谊水库(输水洞)	3 894	866	5 855	123
	柴沟堡(三)	7 271	1 433	9 836	113
	张家口(二)	6 183	656	5 403	79

为比较不同年代下垫面变化的水文效应,同时也为进一步检验模型方法的适宜性和模型物理参数的可靠性。应用1990年下垫面及同步资料率定的参数,模拟计算了2000年下垫面条件下2000~2001年的降水产流过程,其结果如表3。考虑到流域众多水库的调节作用以及人类活动影响,模型率定和验证结果仍在可接受范围。

4.4 不同下垫面条件下的地表水资源评价 应用构建好的模型对永定河官厅水库以上流域的降水产流进行模拟计算和水资源评价。首先,对于1990年的土地利用下垫面,以1957~2000年的日降水系列为输入,计算天然状态下的逐年产流量,得到永定河山区1957~2000年降水系列在1990年下垫面条件

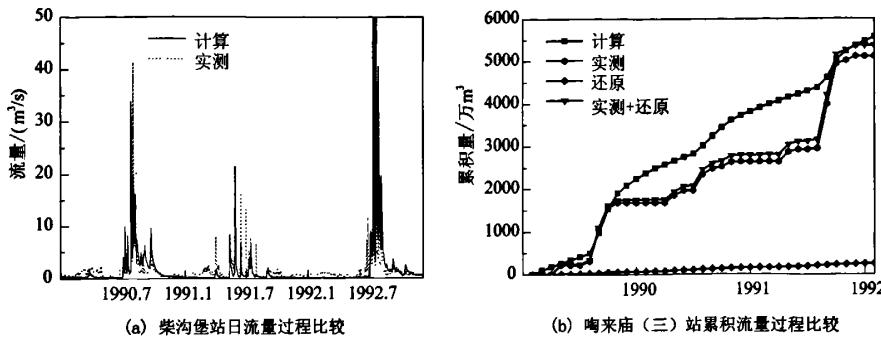


图 4 部分水文站模拟流量与天然流量对比

下的地表水资源量为 10.799亿m^3 。然后,仅改变下垫面,即用 2000 年的土地利用替换 1990 年土地利用,重新计算 1957~2000 年日降水系列输入下的降水产流,得到相应的地表水资源量为 9.892亿m^3 。两个时期相比,流域多年平均产流量降低了 0.91亿m^3 ,产流能力降低了 8.0%。

将两个不同时期下垫面各年对应的年降水产流值点绘后,得出如图 5 的不同时期下垫面条件下流域降雨径流关系曲线。从图 5 可以看出,2000 年下垫面的降水产流能力较 1990 年下垫面的能力有所减小,如在 399mm 的流域多年平均降雨条件下,根据此降水产流关系计算可知,1990 年下垫面流域产流为 9.31亿m^3 ,而 2000 年下垫面的产流为 8.45亿m^3 ,减少了 0.86亿m^3 ,降低幅度为 9.45%。

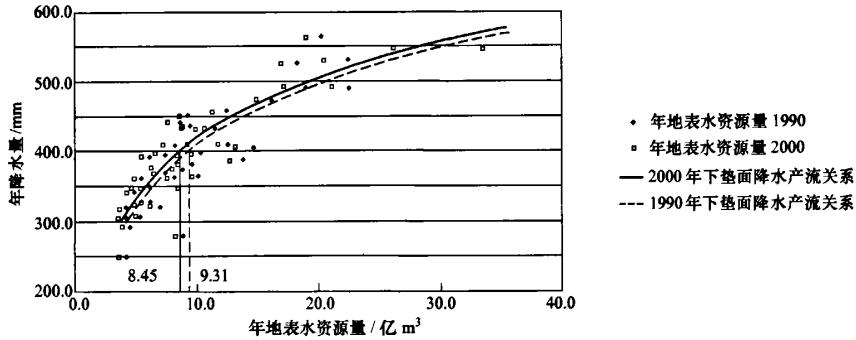


图 5 永定河山区不同时期下垫面降雨径流关系

表 3 部分水文断面水量计算结果比较(2000~2001 平均) (单位:万 m^3)

位置	站名	实测量①	还原量②	计算量③	拟合度③/(①+②)/%
上游	丰镇(饮二)	541	0	660	122
	柴沟堡	1 801	310	2 027	96
	兴和	1 429	0	1 600	112
中下游	罗庄	5 037	10 934	20 762	130
	西朱庄	893	20 081	21 813	104
	固定桥	3 858	28 893	30 786	94
	册田水库	2 107	29 916	31 383	98
	石闸里	5 598	35 484	36 974	90
	响水堡	3 132	9 831	11 667	90

5 结论

随着人类活动日益加剧,传统的水资源评价方法会产生“还原失真”和“还原失效”两个问题,应用基于物理参数的分布式水文模型的降雨径流模拟可以从机理上解释、模拟和解决这两个问题,从而为变化

环境条件下的流域水资源评价探索了一条道路。对于下垫面变化剧烈条件下的水资源评价存在的年代一致性、测站代表性和还原准确性问题,本文提出基于降水产流物理机制及其假设的UCMV率定及评价方法。以永定河山区流域为例,采用基于坡面流的分布式水文模型对不同下垫面条件下官厅水库以上流域多年平均地表水资源量进行了评价,结果表明,官厅水库以上流域1990年下垫面条件下多年平均地表水资源量为10.799亿 m^3 ,2000年下垫面条件下多年平均产流量为9.892亿 m^3 ,产流减少了0.91亿 m^3 ,产流能力降低了8.0%。这一结果清楚地表明以土地利用变化为主的下垫面变化对流域产流能力的影响,“还原失效”现象存在。

参 考 文 献:

- [1] 李宏益,王忠静,杨大文.现代水资源规划若干问题及解决途径与技术方法(一)——还原失真与失效[J].海河水利,2003,(1):13-16.
- [2] 夏岑岭,赵人俊,等.湿润半湿润地区水资源评估水文模拟方法[J].资源科学,1994,(06).
- [3] 王忠静,尹航,王磊,何彬.下垫面变化对流域降水产流关系的影响//中国水文科学与技术研究进展——全国水文学术讨论会论文集[C].南京:河海大学出版社,2004.
- [4] 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.
- [5] 贾仰文,王浩,仇亚琴,等.基于流域水循环模型的广义水资源评价(I)——评价方法[J].水利学报,2006,37(9):1051-1055.
- [6] 贾仰文,王浩,仇亚琴,等.基于流域水循环模型的广义水资源评价(II)——黄河流域应用[J].水利学报,2006,37(10):1181-1187.
- [7] 高延源,叶寿征,张君友,等.水文下垫面分析与分类初探[J].水文,1999,(4):13-18.
- [8] Yang D, Herath S, Musiak K. Development of A Geomorphology-Based Hydrological Model for Large Catchments[J]. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 1998, 42: 169-174.

New approach for water resources assessment based on distributed hydrological model

WANG Zhong-jing¹, YANG Fen¹, ZHAO Jian-shi¹, HE Shan²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Haihe River Water Conservancy Commission, Tianjin 300170, China)

Abstract: The theory and basic assumption of distributed hydrological for water resources assessment under various environment is introduced to solve the problems of restoration distortion and restoration invalidation in traditional method. A method, namely UCMV (up-reach for calibration and mid-reach for validation), based on parameter calibration by up-stream runoff station and verification by validation mid-stream station is developed. As a case study, the water resources assessment for the Yongding River basin under different underlying surfaces is carried out. The result shows that the average annual surface water resources for underlying surface in 1990 is 1.080 billion m^3 , and is 0.989 billion m^3 in 2000, the corresponding runoff generation ability reduction is 8.0%. It clearly indicates the effect of underlying change on runoff generation ability. It also shows that the problems of restoration distortion and restoration invalidation exists and the application of distributed hydrological model to assessment of the water resources under changed environment is effective.

Key words: distributed hydrological model; water resources assessment; UCMV; underlying change; Yongding River Basin

(责任编辑:王成丽)