

# 变化环境下渭河流域水资源演变规律分析

周祖昊, 仇亚琴, 贾仰文, 王浩, 王建华, 秦大庸

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:**渭河是黄河最大的支流,它是黄河中下游主要洪水来源区之一,也是黄河主要的产沙区之一。伴随气候变化、人类对水资源的开发利用活动加剧、大规模水土保持工程建设以及其他人类活动影响,渭河流域水资源的演变规律发生很大的变化。本文基于水资源二元演化模型研究了渭河流域的水资源演变规律,分析的水资源演变规律不仅包括狭义水资源,还包括广义水资源。本文所指的狭义水资源就是传统的水资源,即地表、地下水资源;广义水资源不仅包括狭义水资源,还包括直接为人类和生态系统所利用的降水。对1956~2000年渭河流域水资源演变过程进行了模拟,模拟结果表明,主要受降水减少和人类活动影响,1980~2000年地表水资源比1956~1979年衰减了7.3%,不重复地下水资源增加了20.2%,狭义水资源量减少了2.1%,直接为人类和生态系统所利用的降水减少了1.9%,广义水资源减少2.0%。考虑社会经济用水变化和土地利用变化,本文还预测了2020年水资源的演变趋势。经预测,2020年地表水资源量为81.6亿 $m^3$ ,比2000年少3.20亿 $m^3$ ;不重复地下水资源量为24.62亿 $m^3$ ,比2000年少0.28亿 $m^3$ ;狭义水资源总量为106.21亿 $m^3$ ,比2000年少3.48亿 $m^3$ ;直接为人类和生态系统所利用的降水为487.16亿 $m^3$ ,比2000年多3.05亿 $m^3$ ;广义水资源量为593.37亿 $m^3$ ,比2000年少0.43亿 $m^3$ 。

**关键词:**水资源二元演化模型;狭义水资源;广义水资源;演变规律

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1000-0852(2009)01-0021-05

## 1 前言

近几十年来,由于全球气候的变化和人类活动的加剧,地球上的水循环和水资源状况发生了深刻的改变,很多地区发生了严重的水问题和水危机,水问题已经成为很多国家和地区严重制约社会发展的重要因素。为了研究新的环境下的水资源演变规律,解决日益严重的全球水问题和水危机,探索变化环境下水资源的可持续利用方法和路子,国际水文计划(IHP)、世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)的“水文循环的生物圈方面(BAHC)”、地球系统科学联盟(ESSP)以及国际人文计划(IHDP)开展了大量的工作<sup>[1-9]</sup>。从国际整体研究现状来看,天然状态下的水循环过程的研究比较成熟,而人类活动对于水文循环和水资源形成与演化过程的干扰,尽管已引起了广泛的重视,但其作用机制和人类活动作用下的水资源演变规律研究,以及天然水循环与社会水循环的耦合研究仍处于起步阶段,基础理论与模型方法体系尚未真正形成。

在国内,水资源演变规律的研究尽管起步较晚,但近年来引起水文水资源界的广泛关注,国家和地方部门启动了一些重要的研究项目和计划。2002年我国召开了香山科学会议第187次学术讨论会,会议主题设为“全球变化与中国水循环前沿科学问

题”,有关专家指出当前应特别关注人类活动影响下的水文循环的速率和水资源可再生性调控、人类与自然二元驱动的水循环、水文循环与生态水文三个方面问题<sup>[7]</sup>。2004年完成的国家973项目“黄河流域水资源演变规律与可再生性维持机理”(以下简称“黄河973”)的相关成果可体现我国当前的研究水平。该项目第二课题在充分借鉴国际相关成果的基础上,提出流域“自然-人工”二元水循环演化模式,并集成了水文模拟技术和现代空间信息技术,开发了原创性的流域水资源二元演化模型,并研究了黄河流域水资源演变规律<sup>[8-9]</sup>。

本文基于黄河973第二课题研制的流域水资源二元演化模型<sup>[10-12]</sup>模拟了变化环境下渭河流域水循环过程,并基于黄河973第二课题提出的广义水资源理论<sup>[13-16]</sup>探讨渭河流域水资源演变规律。

## 2 渭河流域概况

渭河流域(见图1)发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,全长818km,流域面积134766 $km^2$ ,是黄河最大的支流。泾河和北洛河是渭河最大的两条支流,流域面积分别占渭河流域面积的33.7%和20.0%。渭河流域是黄河流域降水量比较多的区域之一,尤其渭河下游干流以南的秦岭北坡山地,因而成为黄河中下

收稿日期:2008-04-07

资助项目:自然科学基金“黄土高原水沙过程尺度效应与模拟”(50709041)、“十一五”国家科技支撑计划课题“黄河水资源管理关键技术及一体化管理机制研究”(2006BAB06B06);自然科学基金“黄土高原流域水文生态过程相互作用机制与耦合模拟”(20779074);自然科学基金创新研究群体基金项目“流域水循环模拟与调控”(50721006)

作者简介:周祖昊(1975-),男,湖北武汉人,高工,博士,主要从事流域水循环模拟与调控方面的研究。

游三大洪水来源区之一。渭河北部为宽广的黄土高原, 土质疏松, 植被覆盖条件差, 水土流失严重, 是渭河主要泥沙来源区, 也是黄河流域主要的产沙区之一。渭河实测年沙量 4.933 亿 t, 占黄河年沙量的 30.8%。渭河关中平原是黄河流域重要的经济区, 工农业非常发达, 人类对水资源的开发量大且历史悠久。近年来随着气候变化和水资源开发、水保建设发展进程的加速, 渭河流域的水文水资源时空演变规律发生了剧烈的变化。渭河流域的水循环演变规律在黄河流域具有典型意义, 本文以该流域为例, 揭示变化环境下流域水资源演变规律<sup>[17]</sup>。



图1 渭河流域概况图

### 3 资料来源

降水、径流资料来源于黄委会水文局, 气象资料来源于国家气候中心, 用水资料来源于历年《黄河水资源公报》、第二次黄河流域水资源评价成果及黄河设计公司调查, DEM 来源于美国地质调查局 (USGS) EROS 数据中心建立的全球陆地 DEM (也称 GTOPO30), 土地利用信息来源于中科院地理所生产的全国 1:10 万电子地图库, 河流水系信息来源于国家基础地理信息中心开发的“全国 1:25 万地形数据库”, 水土保持参数来源于渭河流域各县《水利统计年鉴》, 土壤及其特征信息采用全国第二次土壤普查资料和《中国土种志》, 水文地质参数来源于第二次黄河流域水资源评价成果。

### 4 水资源影响因子分析

渭河流域包括五个水资源分区(见图 1), 其中渭河宝鸡峡至咸阳、渭河咸阳至潼关主要是平原区, 其他三个主要是山丘区。1956~2000 年影响水资源演变的主要因子变化情况如下。

#### 4.1 降雨量年际变化

降雨是流域水资源的唯一来源, 降雨的变化对水资源影响很大。根据黄委会水文局监测的渭河流域雨量资料计算渭河流域五个三级区降雨量年际变化如表 1 所示。从表中可以看到, 渭河全流域 1980~2000 年均降雨量为 525.7mm, 比 1956~1979 年减少了 6.7%; 1990~2000 年年均降雨量为 494.9mm, 比 1956~1979 年偏少 12.2%。

#### 4.2 人类取水变化

渭河流域是黄河流域内重要的工农业生产基地, 随着工农业生产的发展, 渭河流域用水增长较快, 特别是两个平原区的用水量增加很快(见图 2)。全流域 20 世纪 90 年代较 50 年代增长了 2.93 倍, 与渭河华县+北洛河状头断面实测流量的比值从 0.22 增加到 1.22。

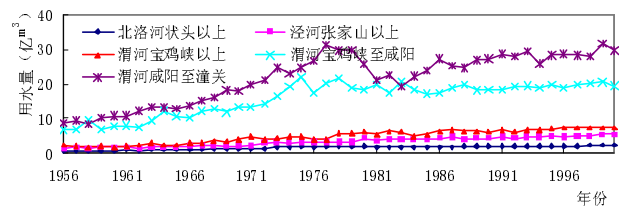


图2 渭河流域各三级区社会经济总用水年际变化图

#### 4.3 土地利用的变化

在人类活动和气候变化的影响下, 渭河流域土地利用构成发生了明显的变化(见图 3)。其中林草面积是减少的, 从 20 世纪 50 年代到 90 年代, 林地面积减少 11.0%, 草地面积减少了 7.6%; 农田面积持续增长, 从 50 年代到 90 年代增长了 11.6%, 其中灌溉面积增长 1.87 倍; 随着城市化进程的发展, 居民与工业用地面积稳步增长, 5 个年代累计增加了 7.7%; 受人类水库建设和景观用水的需要, 水面面积主要呈增长态势, 从 50 年代到 90 年代, 增加了 7.4%。

### 5 渭河流域水循环模拟

本次研究利用二元演化模型对 1956~2000 年系列实际过程进行“仿真”模拟, 包括采用了各历史时期实际系列的气象信息、下垫面信息和供用水信息, 其中由于难以得到逐年下垫面情况, 研究采用时段代表方法, 分别选用了 6 期下垫面信息, 代入

表1 渭河流域各三级区降雨量年代变化 (mm)

时段	北洛河状头以上	泾河张家山以上	渭河宝鸡峡以上	渭河宝鸡峡至咸阳	渭河咸阳至潼关	渭河全流域
1956~1959	540.1	517.7	523.5	734.6	726.1	579.1
1960~1969	567.7	541.4	563.9	674.7	660.0	584.5
1970~1979	504.5	490.2	523.0	640.0	621.0	537.2
1980~1989	512.8	491.4	519.8	727.8	695.0	559.7
1990~2000	458.8	469.1	473.3	561.7	579.8	494.9
1956~1979	536.7	516.1	540.2	670.2	654.8	563.9
1980~2000	484.5	479.7	495.4	640.8	634.7	525.7

对应时段模拟,6期下垫面分别为:1956~1959系列代表下垫面、1960~1969系列代表下垫面、1970~1979系列代表下垫面、1980~1989系列代表下垫面、1990~2000系列代表下垫面和2000年下垫面,以此组成下垫面系列,与人工取水用的逐年过程共同形成两大人类活动影响要素系列,再与逐年气象信息一起作为水资源系列模拟仿真基础。

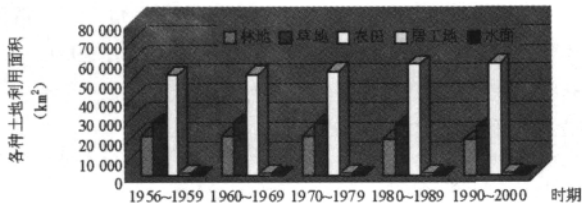


图3 渭河流域土地利用面积变化图

本研究采用变时间步长（即对降雨强度超过10mm以上的人渗产流过程采用1h、坡地与河道汇流采用6h而其余的采用1d），对渭河流域进行了1956~2000年共45年的连续模拟计算。其中1956~1979年的24年取为模型校正期,主要校正参数包括土壤饱和导水系数、河床材料透水系数和Manning糙率、各类土地利用的洼地最大截留深以及地下水含水层的传导系数及给水度等。校正准则包括:(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。模型校正后,保持所有模型参数不变,对1980~2000年(验证期)的连续模拟结果进行验证。

渭河干流华县和咸阳站45年系列实际月径流过程逐月校验情况见图4~5,渭河干流主要水文断面实测年径流量校验结果见表2。

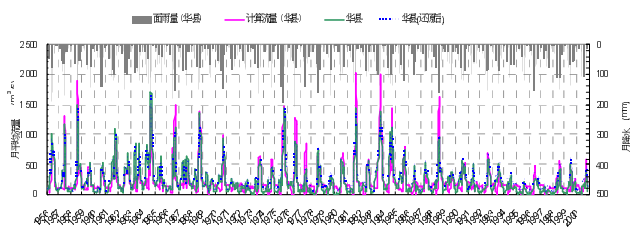


图4 华县逐年实际月径流过程校验

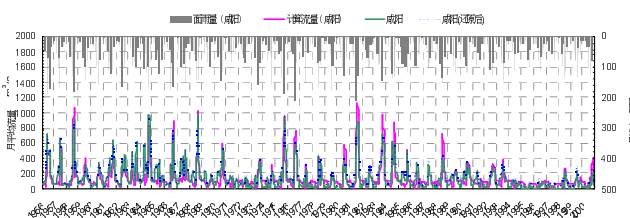


图5 咸阳逐年实际月径流过程校验

1956~2000年系列渭河各站多年平均实测径流量的最大相对误差为4.7%(林家村站),最小相对误差-1.7%(华县站),逐月过程拟合得较好,模型Nash效率系数整体在0.7以上。

## 6 渭河流域水资源演变规律分析

基于流域水资源二元演化模型,以狭义水资源和广义水资源

表2 1956~2000年实际年径流量模拟结果校验

水文站	实测径流量 年均值(亿 m <sup>3</sup> )	计算流量 年均值(亿 m <sup>3</sup> )	相对误差	月径流过程 Nash 效率系数
华县	70.2	69.0	-1.7%	0.709
咸阳	42.1	40.6	-3.7%	0.732
林家村	22.0	23.1	4.7%	0.700

源两种口径对渭河流域的水资源规律进行分析,结果如下。

### 6.1 历史水资源演变规律分析

#### 6.1.1 狭义水资源演变

渭河流域1956~2000年系列不同时段狭义水资源评价的“历史仿真”结果见表3。

表3 分区“片水”资源系列仿真评价 单位:亿 m<sup>3</sup>

时段	地表 水资源量	地下水水资源量		水资源总量
		地下水资 源总量	不重复地下 水资源量	
1956~1959	92.71	54.0	20.28	112.99
1960~1969	91.99	53.1	18.68	110.67
1970~1979	83.34	50.8	22.94	106.27
1980~1989	100.71	53.3	24.13	124.84
1990~2000	65.02	49.7	25.62	90.64
1956~1979	88.51	52.3	20.72	109.22
1980~2000	82.02	51.4	24.91	106.93

从表3结果看出,在“自然-人工”二元驱动力作用下,渭河流域1980~2000年系列平均狭义水资源总量较1956~1979年系列低2.1%,其中地表水资源衰减7.3%,但不重复的地下水资源增加了20.2%。渭河流域1990~2000年系列平均狭义水资源总量较1956~1979年系列低17.0%,其中地表水资源偏少26.5%,但不重复的地下水资源偏大23.6%。

#### 6.1.2 广义水资源演变

渭河流域1956~2000年系列广义水资源评价的“历史仿真”结果见表4。

从表4可以看出,渭河流域1980~2000年系列平均年降水量较1956~1979年系列低6.7%,径流性水资源减少了2.1%,广义水资源量减少了2.0%,生态环境系统和社会经济系统的非径流性有效水分的利用率略有减少,减少幅度1.9%。渭河流域1990~2000年系列平均年降水量较1956~1979年系列低12.3%,径流性水资源偏少17.0%,广义水资源量偏少7.7%,生态环境系统和社会经济系统的非径流性有效水分的利用率略微偏少,偏少幅度5.6%。

### 6.2 未来水资源演变预测

为指导未来流域水资源远期规划,本次研究利用二元耦合模型对渭河流域2020年水资源演变情景进行了模拟预测,其中人工取水情景为规划水平年考虑控制地下水超采措施的供需情况,由集总式水资源合理配置模型输出;下垫面情景则以2000年现状下垫面为基础,根据各省区相关专项规划(如水土

保持规划、灌溉面积发展规划、城市化发展规划等),结合历史未来演变规律分析,在GIS平台上综合处理得到。由于未来气候变化存在很大的不确定性,预测和定量模拟相当困难,未来气候变化对水资源演变的影响有待气象学领域相关理论和技术的突破,故本次研究中模拟未来水资源状况时不考虑气候变化因素,各气象要素仍采用1956~2000年系列资料。

### 6.2.1 狭义水资源演变预测

渭河流域2020年狭义水资源演变情景模拟评价结果见表5。

从表5结果看出,2020年下垫面和取用水情景下,渭河流域地表水资源量将演变为81.60亿 $m^3$ ,地下水资源总量演变为55.63亿 $m^3$ ,不重复的地下水资源量为24.62亿 $m^3$ ,水资源总量演变为106.21亿 $m^3$ 。与现状相比,渭河流域水资源总量减少了3.48亿 $m^3$ ,地表水资源量减少3.20亿 $m^3$ ,不重复的地下水资源量减少0.28亿 $m^3$ ,地下水资源总量增加4.63亿 $m^3$ 。在这五个三级区中,变化规律不尽相同。前三个区(主要为山丘区)受农田面积发展和生态建设的影响,地表水资源量减少、地下水资源量减少,由于地下水开采减少,不重复的地下水资源量减少,水资源

总量减少;渭河宝鸡峡至咸阳区间控制了农业取用地下水量,导致地下水总量增加,但由于工业取用地下水量增加,不重复地下水仍然增加;渭河咸阳至潼关区间同时控制了农业和工业取用地下水量,导致地下水总量和不重复量同时增加。

### 6.2.2 广义水资源演变预测

渭河流域2020年广义水资源演变情景模拟评价结果见表6。

从表6结果看出,2020年下垫面和取用水情景下,渭河流域有效降水量为593.37亿 $m^3$ ,无效降水量为151.93亿 $m^3$ ,与2000年相比,直接有效利用的水分增加了3.05亿 $m^3$ ,这主要是因为农田及生态建设的发展所致。

## 7 结论

本文采用流域水资源二元演化模型模拟了变化环境下渭河流域水循环过程,基于广义水资源评价理论,探讨了渭河流域历史水资源演变规律,并对未来水资源演化进行了预测。分析表明,受气候变化和人类活动影响,1980~2000年地表水资源比1956~1979年衰减了7.3%,不重复地下水资源增加了20.2%,狭

表4 渭河流域广义水资源系列仿真评价

单位:亿 $m^3$

时段	年降水量	广义水资源						无效降水
		狭义水资源	有效蒸散发				总量	
			农田	林草	居工地	总量		
1956~1959	789.9	112.99	250.10	219.60	3.05	472.76	585.75	204.15
1960~1969	797.1	110.67	252.64	241.60	3.07	497.31	607.98	189.12
1970~1979	733.8	106.27	251.23	233.70	3.02	487.95	594.22	139.58
1980~1989	764.4	124.84	269.32	227.69	3.14	500.15	624.99	139.41
1990~2000	675.0	90.64	251.81	206.27	3.47	461.56	552.20	122.80
1956~1979	769.5	109.22	251.63	234.64	3.05	489.32	598.54	170.96
1980~2000	717.6	106.93	260.15	216.47	3.31	479.93	586.86	130.74

表5 2020年渭河流域水资源情景模拟评价

单位:亿 $m^3$

分区	地表水资源量	地下水资源量	不重复地下水资源量	水资源总量
北洛河湫头以上	9.25	6.43	1.95	11.20
泾河张家山以上	17.47	9.79	2.38	19.85
渭河宝鸡峡以上	21.97	8.54	4.15	26.12
渭河宝鸡峡至咸阳	19.04	13.3	6.16	25.20
渭河咸阳至潼关	13.87	17.57	9.98	23.84
总计	81.6	55.63	24.62	106.21

表6 2020年渭河流域水资源演变情景模拟评价

单位:亿 $m^3$

分区	降水量	广义水资源			无效蒸发
		狭义水资源	有效蒸散	合计	
北洛河湫头以上	130.28	11.20	85.55	96.75	33.53
泾河张家山以上	220.10	19.85	141.21	161.06	59.04
渭河宝鸡峡以上	161.60	26.12	97.71	123.83	37.77
渭河宝鸡峡至咸阳	116.29	25.20	79.38	104.58	11.71
渭河咸阳至潼关	117.00	23.84	83.31	107.15	9.85
总计	745.30	106.21	487.16	593.37	151.93

义水资源量减少了2.1%,直接为人类和生态系统所利用的降水减少了1.9%,广义水资源减少2.0%。考虑社会经济用水变化和土地利用变化,预测2020年地表水资源量、不重复地下水资源量以及狭义水资源总量分别为81.6亿 $m^3$ 、24.62亿 $m^3$ 和106.21亿 $m^3$ ,分别比2000年少3.20亿 $m^3$ 、0.28亿 $m^3$ 和3.48亿 $m^3$ 。直接为人类和生态系统所利用的降水为487.16亿 $m^3$ ,比2000年多3.05亿 $m^3$ ;广义水资源量为593.37亿 $m^3$ ,比2000年少0.43亿 $m^3$ 。

#### 参考文献:

- [1] IGPB, WCRD & IHDP. Abstract Volume of Challenge of a Changing Earth[C]. Amsterdam, Netherlands, 2001, 10~13.
- [2] IAHS. Abstract Volume of a New Hydrology for a Thirsty Planet [C]. Maastricht, Netherlands, 2001, 18~27.
- [3] Turner B. L. II. Land Use and Land Cover Change. Science Research plan[R]. IGBP Report(35), 1995, 21~25.
- [4] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 553~557.
- [5] 黄秉维. 论地球系统科学与可持续发展战略基础 [J]. 地理学报, 1996, 51(4): 350~354.
- [6] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战 [J]. 资源科学, 2002, 24(3): 1~7.
- [7] 全球变化与中国水循环前沿科学问题——香山科学会议第187次学术讨论会[J], 地球科学进展, 2002, 17(4): 628~630.
- [8] 王浩, 贾仰文, 王建华, 等. 人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初探[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 157~162.
- [9] 贾仰文, 王浩. “黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”研究成果简介[J]. 水利水电技术, 2006, 37(2): 45~52.
- [10] 贾仰文, 王浩, 王建华, 等. 黄河流域分布式水文模型开发和验证[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 300~308.
- [11] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践. 北京: 中国水利水电出版社 [M], 2005.1.
- [12] Yangwen Jia, Hao Wang, Zuhao Zhou, et al.. Development of the WEP-L Distributed Hydrological Model and Dynamic Assessment of Water Resources in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2006(331): 606~629.
- [13] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 现代水资源评价及水资源学学科体系研究 [J]. 地球科学进展, 2002年, 17(1): 12~17.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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(II)[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1181~1187.
- [17] 刘斌, 冉大川, 罗全华, 等. 北洛河流域水土保持措施减水减沙作用分析[A]. In: 汪岗, 范昭. 黄河水沙变化研究(第二卷)[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002, 462~493.

## Evolution Law of Water Resources in Weihe River Basin Based on Dualistic Water Resources Evolution Model

ZHOU Zu-hao, QIU Ya-qin, JIA Yang-wen, WANG Hao, WANG Jian-hua, QIN Da-yong

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

**Abstract:** The Weihe River Basin is the largest subbasin of the Yellow River Basin. It is one of the three main flood sources of the middle and lower reaches of the Yellow River and one of main sources of sand in the Yellow River. The water resources in the Weihe River Basin have changed a lot because of climate change, water resources exploitation, conservation of water and soil and other human activities. This paper studied the evolution law of water resources in the Weihe River Basin based on a dualistic water resources evolution model. The dualistic model couples a distributed hydrology model to simulating the natural water cycle process with a water resources allocation model simulating the artificial water cycle processes. This paper not only analyzed the evolution law of the specialized water resources, but also discussed the evolution law of the generalized water resources. The total of the surface water resources and ground water resources is the traditional water resources, namely, specialized water resources. The total of the specialized water resources and the precipitation directly utilized by human or ecological system is called the generalized water resources. A simulation of water cycle in the Weihe River Basin from 1956 to 2000 was performed. The result shows that, comparing the water resources from 1980 to 2000 with those from 1956 to 1979, the surface water resources decreased by 7.3%, the ground water resources not overlapping with the surface water resources increased by 20.2%, the specialized water resources decreased by 2.1%, the precipitation directly used by human and ecological system decreased by 1.9%, the general water resources decreased by 2.0%. As well as water resources at present, water resources in the future was evaluated based on WEP-L taking account of water use change and land use change. The volume of surface water resources in 2020 was predicted to be  $8.160 \times 10^9 m^3$ ,  $0.320 \times 10^9 m^3$  less than that in 2000. The volume of ground water resources in 2020 was predicted to be  $5.563 \times 10^9 m^3$ ,  $0.463 \times 10^9 m^3$  more than that in 2000. The volume of ground water resources not overlapped with surface water in 2020 was predicted to be  $2.462 \times 10^9 m^3$ ,  $0.028 \times 10^9 m^3$  less than that in 2000. The volume of specialized water resources in 2020 was predicted to be  $10.621 \times 10^9 m^3$ ,  $0.348 \times 10^9 m^3$  less than that in 2000. The volume of precipitation directly utilized by human and ecological system in 2020 was predicted to be  $48.716 \times 10^9 m^3$ ,  $0.305 \times 10^9 m^3$  more than that in 2000. The volume of generalized water resources in 2020 was predicted to be  $59.337 \times 10^9 m^3$ ,  $0.0430 \times 10^9 m^3$  less than that in 2000.

**Key words:** dualistic water resources evolution model, specialized water resources, generalized water resources, evolution law