

二元年径流演化模式及其在无定河流域的应用*

王 浩 王成明 王建华 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 由于受人类社会活动影响的不断加强, 流域水循环过程变得越来越复杂. 探索流域年径流量的演变规律对定量分析变化环境中的水资源状况和预测流域未来水资源的演变规律具有特别重要的意义, 因为以年为时间尺度能最好地反映天然和人类活动驱动下的流域水资源变化规律. 在水资源的二元演化模式下提出了年径流的天然-人工二元演化理论, 并在黄河中游的无定河流域进行了应用. 应用实例中着重对无定河流域下垫面动态变化情况下的降水径流关系进行了深入的对比分析, 并提出了代表流域水保措施的水保指标面积的概念, 利用水保指标面积来反映流域下垫面条件, 并建立了反映流域下垫面动态变化的降水径流经验模型.

关键词 年径流 二元模式 水资源演变 演化理论 无定河

日益增强的人类社会活动深刻影响了流域水循环过程, 从而影响着流域水资源演变规律. 河川径流量作为水循环的重要环节和水资源的基本表征量, 是水资源综合利用、科学管理、优化调度最重要的依据. 由于人类活动对水资源的演化是一个渐变的过程, 因此以年为单位的径流过程演化规律能最好地体现人类活动对流域水循环变化的驱动过程和结果. 目前在人类活动对水资源演化的影响刻画上主要以统计、还原和修正等作为基本手段, 这些研究方法已不能满足显式考虑人类活动影响从而在变化条件下进行动态水资源评价和规划等的要求, 探讨和建立“天然-人工”二元驱动力作用下的流域年径流演化模式理论, 可为人类活动影响剧烈区的流域水资源实践提供理论依据.

2004-01-15 收稿, 2004-05-18 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043602)资助

SCIENCE IN CHINA Ser. E Technological Sciences

1 年径流二元演化理论

1.1 天然地表水循环过程的概化

天然状态下流域降水径流的地表水循环过程在年尺度上可如下描述:假设流域降水为 P (黑体表示是流域随时空分布的降水,常用一个面平均值 P 来概化),流域出口年径流量为 R ,则水循环过程的降水径流关系可用如下方程概括:

$$R = f(P), \quad (1)$$

其中函数 f 为表示综合反映流域蒸发、产流、汇流、入渗、排泄等流域下垫面特性及水循环特性的降水径流函数。当降水用面平均值表示时,其具体形式在实际应用上多简化为线性、对数线性以及包含考虑降水年内分配参数的函数。年径流的演化规律完全取决于降水的天然变化规律以及流域下垫面条件的天然变化规律。如果流域下垫面保持相对稳定的话,则年径流的演化规律完全取决于降水的变化规律。

1.2 二元模式提出

发展进程中的人类活动,从系统、响应和结构三方面明显改变了天然状态下的流域水循环过程。从水循环输入来看,人类活动产生一系列次生效应改变了流域水循环系统输入输出条件,如温室效应引起的气候和气温变化,影响着流域水循环中的降水和蒸发等环节;其次,流域内的水土保持措施、水资源开发利用、工农业生产、土地利用和城市化等,大范围改变了下垫面及微地貌类型与植被分布,使流域地表水的产汇流特性和地下水的补给排泄特性发生相应变化,从而改变了径流对降水的相应关系;其三,水资源开发利用改变了江河湖泊关系,改变了地下水的赋存环境,也改变了地表水和地下水的转化路径,同时在天然水循环的大框架内,产生了由取水-输水-用水-排水-回归 5 个基本环节构成的人工侧支循环圈。

基于人类活动对于流域水循环过程的强烈影响,作者结合流域实际,提出了显式考虑人类活动影响的流域水资源演变二元驱动模式理论,即认为现代流域水循环及水资源演化的结果是由“天然-人工”二元驱动力共同作用所导致的,系统分离二元驱动力,因此在定量过程上方面,也提出了有别于传统一元静态模式的“实测~还原~建模~调控”的量化过程,经拓展的二元动态水资源演化模式研究的基本视角可以概括为“实测~分离~耦合~建模~调控”,所谓分离,是指在实测水文量中识别自然要素与人类活动影响各自的贡献;所谓耦合,是指对分离后的各项参量保持其间的动态联系^[1,2]。对于二元驱动力作用下的流域水循环次生效应,也提出了相应的定量方法^[3]。

1.3 基于二元模式的年径流演化理论

在二元驱动模式,上述天然模式下降水径流函数关系已不复成立.人工侧支循环过程中产生的蒸发渗漏,以及下垫面改变带来的减水效应,使流域的实测年径流量远小于用公式(1)算出的计算年径流量,因此在年径流演化规律研究中必须寻求新的方法来考虑这种变化以便能在变化环境下定量确定水资源的变化.

目前,考虑人类社会活动对径流变化影响方面的研究多集中在水利水保措施对年径流的影响上,如应用在黄河上的水沙变化研究^[4].在这些研究方法中,其目标是定量确定人类活动的减水效应.常用的方法有水文法、水保法、环境要素法^[5]及对比分析法^[6]等,其中水文法和水保法是最常见的方法.水文法是将未受人类活动的天然降水径流关系(即(1)式)延用于受人类活动影响的时期,用计算出的年径流与实测年径流比较从而确定减水量.水保法是根据各支流水利水保措施的数量及其蓄水效益指标分别计算减水量再汇总到全流域.从水资源的二元演化模式的角度看,水文法直接计算天然还原径流,水保法由于采用减水量的概念,而减水量是相对于天然还原径流而言,因而两种方法从本质上说仍然停留在“实测-还原”的一元水资源演化模式上.

针对传统一元模式在描述人类活动影响的流域年径流演变规律存在的内在缺陷,本文将水资源二元演化模式应用在年径流的演化中,提出了基于二元模式的年径流演化理论,以满足变化环境下的水资源研究需求.

相对于(1)式而言,受自然和人工驱动的流域主循环在年尺度上可用如下公式概括:

$$R + W_{\text{耗水}} + \Delta V = f'(P), \quad (2)$$

其中 $W_{\text{耗水}}$ 表示流域内的年人工耗水量, R 仍为流域出口年径流量, ΔV 是流域内所有水库蓄水量变化的总和,其中的 f' 表示在受人类活动影响后下垫面条件下的降水径流函数关系, $R + W_{\text{耗水}} + \Delta V$ 反映了流域的实有径流量及水资源状况.(1)和(2)式假定没有跨流域引水和调水,并假定流域内地下水蓄量不变.如有的话,则还需加上(或减去)相关项.

引入人工侧支循环的另外两个变量: $W_{\text{引水}}$ 和 $W_{\text{回归}}$ 分别表示流域内的年引水量和河道回归水量,则人工侧支循环过程在年尺度上可概括为:

$$W_{\text{引水}} = W_{\text{耗水}} + W_{\text{回归}}, \quad (3)$$

(2)和(3)式概括了天然-人工二元驱动下的年径流演化规律,上述年径流二元演化理论应用的关键是确定受人类活动影响后下垫面条件动态变化的降水径流函数 $f'(P)$.常规方法中,水文法可以求得还原天然年径流量 $f(P)$,而水保法可以求得还原天然年径流的减水量 $f(P)-R$,二者都不能单独确定流域出口的年径流

量 R , 从而无法进行变化条件下的水资源研究如评价和预测等, 而流域出口未来的年径流量 R 对确定流域的水资源状况及生态需水状况也具有十分重要的作用, 这是两种方法的最大缺陷. 从原理上说将水文法与水保法结合是可以达到预测未来流域年径流量 R 的目的, 其应用实例已见于文献[7]. 尽管水保法已将流域用水的耗水量包含在减水量中, 将水文法和水保法结合可以确定 R 从而间接确定上述函数的 $f'(P)$. 但采用这两种方法的结合有两个明显的问题: 一是实测年径流资料的验证早已表明两种方法的结果存在较大差异, 将两者结合起来确定年径流量 R 会产生无法估计的较大随机误差; 二是两种方法都以还原天然年径流的概念为基础, 属于隐式考虑人类活动影响的范畴. 随着时间的推移, 流域受人类活动影响的程度愈来愈剧烈, 而人类社会活动的影响对径流的效应比较复杂, 还原后的天然径流无法反映人类活动的直接驱动效应, 二元演化模式正式在这种实际需要下产生的.

正如上面所指出的, 由于水文法和水保法各自的缺陷, 迫使我们寻求一种新的确定受人类活动影响后下垫面条件动态变化的降水径流函数 $f'(P)$ 的方法. 从宏观上讲, 首选的方法是经验统计方法, 即找出影响径流形成的主要因子, 利用实有径流量 $R + W_{耗水}$ 建立与这些影响因子之间的经验关系, 这些因子除降水外可包括人类活动影响后的下垫面条件如淤地坝面积及其他水保措施, 如梯田、造林和种草的面积等, 从而为流域的水资源实践提供指导. 从微观上讲, 可以利用分布式水文模型等手段模拟受人类活动影响的区域降水径流函数 $f'(P)$.

2 应用: 无定河流域年径流演化规律的研究

2.1 概况

无定河流域是黄河中游河龙区间水土流失最为严重的一条支流, 从 20 世纪 70 年代开始的对流域进行的大规模水土保持治理, 标志着流域受强人类社会活动影响的开始, 有关无定河流域更为详细的情况可见文献[7]. 以往有关无定河流域年径流变化研究的结论为: 与降水减少引起径流减少的原因比较, 流域用水和水土保持措施是流域径流减少的主要原因. 本文从二元演化模式的角度出发, 以年径流的演化规律为出发点, 目标是研究变化条件下流域水资源的演变规律. 通过典型流域的应用, 最终目的是将理论扩展到整个黄河流域, 定量揭示黄河流域的水资源演化规律.

不同于传统的研究方法, 本文采用的资料从明显受人类社会活动影响和大规模的水土保持措施开始的 1973 年起到资料较完整的 1996 年共 24 年. 降水资料包括流域内的 78 个雨量站, 径流资料包括流域出口白家川的径流量及全流域历年的引水和耗水量, 无定河流域历年水土保持措施面积如淤地坝面积、梯田、造林、种草面积等资料来源于文献[7].

2.2 反映流域下垫面动态变化的年降水径流关系

作为年径流二元演化理论的初步应用,本次研究考虑宏观的反映流域下垫面动态变化的年降水径流经验关系.流域内的降水采用面平均年降水以 P 代表,其值采用泰森多边形法获得.而流域下垫面条件的动态变化则难于概括,对无定河流域而言代表人类活动的下垫面因素有淤地坝面积、梯田面积、造林面积、种草面积,如果将每个因子都引入降水径流经验关系中则较难建立经验关系,水保试验和调查资料已经证明各水保措施的减水拦蓄能力是不同的.文献[8]给出了各种水保措施的拦蓄能力:梯田 $700.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,坝地 $4500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,林地 $199.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,种草 $150.0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$.为此,我们引入水保指标面积 FI 的概念,即将各种水保措施的面积按不同拦蓄系数相加,取坝地面积系数为 1,则其他水保措施的面积系数由上面给出的拦蓄能力与坝地的拦蓄能力的比值确定(如梯田为 $700.5/4500=0.1557$),用上述方法算出的无定河流域历年水保指标面积 FI .

在(2)式左端, R 根据水文站实测值获得, $W_{\text{耗水}}$ 根据取用水量结合耗水水平获得, ΔV 据实测值获得.流域 24 年实测系列 $R+W_{\text{耗水}}+\Delta V$ 与年面均降水量 P 、水保指标面积 FI 的相关系数分别为 0.660 和 -0.535,从中可以看出水保指标面积 FI 对径流的影响力.考虑线性、非线性 1(降水线性,下垫面影响为对降水线性的负指数修正)和非线性 2(对数线性)三类经验公式见表 1 所示,其中线性和非线性 2 公式将降水 P 和水保指标面积 FI 作为等同的影响因子考虑.用 24 年中的前 18 年作为建模样本集,回归和率定系数见表 1,后 6 年作为测试样本集,总的 3 种模型率定和预测结果见表 2.

表 1 反映流域下垫面动态变化的年降水径流经验公式

类型	公式	A	B	C
线性	$R+W_{\text{耗水}}+\Delta V=A \times P-B \times FI+C$	162.96	87.46	104618
非线性 1	$R+W_{\text{耗水}}+\Delta V=(A \times P+C) \times e^{-B \times FI}$	203.71	6.577×10^{-4}	93305
非线性 2	$R+W_{\text{耗水}}+\Delta V=C \times P^A \times FI^{-B}$	0.4166	0.2548	50472

2.3 不同公式间的对比分析

对比表 2 中 3 个公式对 6 年测试样本集的预测结果,平均相对误差分别为:线性为 -6.91%,非线性 1 为 -5.13%,非线性 2 为 -2.75%.可见单从预测方面讲,上述结果表明非线性 2(对数线性)公式的预测最为精确,这说明受强人类活动影响后,流域水循环降水径流关系的非线性趋势更加明显.当然上述结论是建立在观测资料准确的条件下,而流域耗水量及水保等资料往往可靠性较差,因而在无定河流域获得的结果还需在其它流域进一步验证.随着流域水资源开发利用程度的提高,人们对人工用水和水保措施的计量和观测必然会越来越精确,从而进

进一步加强上述方法的实用价值. 今后, 随着认识的不断提高, 可以不断改进函数关系 $f'(P)$ 的准确性表述方法, 也可以采用其它微观模拟方法如分布式水文模型等方法. 可以看出, 年径流的二元演化理论已经不再将还原天然径流作为研究方法的基准. 就本次研究而言, 我们推荐对数线性公式, 因为其预测结果比其它两个公式更为准确. 其中由于 1993 年的实有径流量偏小, 造成了计算径流量偏大, 其实测径流量和耗水量有待进一步核查.

表 2 年径流经验模型率定和预测结果

年 份	实测资料			不同方法计算的实有径流量					
	P/mm	FI/km^2	$R+W_{\text{耗}} + \Delta V / \text{m}^3 (\times 10^4)$	线性		非线性 1		非线性 2	
				计算	误差/%	计算	误差/%	计算	误差/%
1973	463.12	236.71	141790	159384	12.41	160591	13.26	161610	13.98
1974	262.43	264.94	129639	124211	-4.19	123293	-4.9	123950	-4.39
1975	349.2	283.92	122893	136691	11.23	136428	11.01	137173	11.62
1976	415.22	292.16	140624	146729	4.34	146788	4.38	146361	4.08
1977	443.18	297.26	175857	150839	-14.23	150981	-14.15	149727	-14.86
1978	511.15	298.80	173811	161780	-6.92	162204	-6.68	158688	-8.70
1979	340.48	300.99	143131	133777	-6.54	133447	-6.77	133730	-6.57
1980	279.06	318.91	123465	122202	-1.02	121740	-1.4	121295	-1.76
1981	391.08	353.71	134838	137412	1.91	137068	1.65	135968	0.84
1982	339.23	364.84	127688	127990	0.24	127759	0.06	127139	-0.43
1983	340.57	388.22	120047	126163	5.09	126021	4.98	125347	4.42
1984	396.09	415.71	124273	132806	6.87	132367	6.51	131179	5.56
1985	467.07	444.33	134403	141870	5.56	140693	4.68	138139	2.78
1986	307.49	469.38	117923	113674	-3.60	114521	-2.88	114452	-2.94
1987	323.17	495.10	109369	113981	4.22	114907	5.06	115270	5.40
1988	416.66	512.50	140962	127693	-9.41	127194	-9.77	127017	-9.89
1989	310.69	540.01	112139	108019	-3.67	109780	-2.1	110913	-1.09
1990	427.59	563.29	117401	125032	6.50	124552	6.09	125339	6.76
1991	329.02	583.21	113051	107228	-5.15	109249	-3.36	111388	-1.47
1992	399.04	600.01	120577	117168	-2.83	117660	-2.42	119839	-0.61
1993	282.97	613.24	87883	97097	10.48	100845	14.75	103277	17.52
1994	428.45	631.16	136972	119237	-12.95	119230	-12.95	121860	-11.03
1995	336.38	637.78	122041	103655	-15.07	106383	-12.83	109886	-9.96
1996	352.93	648.12	125400	105447	-15.91	107862	-13.99	111647	-10.97

2.4 流域未来实有径流量和入黄水量的简单预测

通过对 1956~1996 年 41 年的年均降水量进行频率计算, 获得无定河流域丰水年(75%)、平水年(50%)和枯水年(25%)的降水量分别为 428.9, 371.5 和 317.0 mm. 根据 1996 年水土保持治理程度以及流域的治理规划, 假设预测某一年的水保指标面积为 1000 km², 将预测的年降水量 P 及 FI 值带入表 1 中的非线性 2(对数线性)公式, 获得未来实有水资源量 $R+W_{\text{耗}} + \Delta V$ 在丰水年、平水年和枯水年情况下

分别为 10.85, 10.22 和 $9.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据流域历年灌溉面积的变化趋势以及灌溉定额变化, 假设预测年的未来流域的耗水量(包括工业和生活用水) $W_{\text{耗水}}$ 为 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 水库蓄水量不变, 则预测的未来无定河流域入黄水量在丰水年、平水年和枯水年情况下分别为 8.85, 8.22 和 $7.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

上述预测例子仅仅是一个简单的示范, 其中对年降水量的预测也可以采用其他长系列并结合大气环流等的分析预测方法, 有了方法性的指导, 我们可以对不同的规划方案的进行预测从而选择出最有利于流域可持续发展的方案, 为决策者提供决策依据。

3 结论

本文提出了年径流的二元演化理论, 并将其首先应用于无定河流域的年径流演化规律研究和水资源演变预测。虽然理论基于年时间尺度, 其指导意义同样适用于各种时间尺度。本文的理论方法为黄河流域的水资源演变规律和二元演化模型的集成型理论平台打下了坚实的基础。随着全球化的人类社会活动对流域水循环影响的加剧, 建立于人工-天然驱动基础上的二元水循环模式和理论会越来越显出其重要的价值。

参 考 文 献

- 1 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. 郑州: 黄河水利出版社, 2003. 20-50
- 2 王 浩, 秦大庸, 王建华. 多尺度区域水循环过程模拟进展与二元水循环模式的研究. 见: 刘昌明, 陈效国主编. 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. 34-42
- 3 吴洪寿, 王建华. 人类活动的流域水循环效应及其定量研究方法. 水科学进展, 2003, 14(增刊): 41-45
- 4 汪 岗, 范 昭. 黄河水沙变化及其影响的综合分析报告河水沙变化研究, 第二卷. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. 1-106
- 5 陈 浩, 周金星, 陆中臣, 等. 黄河中游流域环境要素对水沙变异的影响. 地理研究, 2002, 21(2): 1-9
- 6 王国庆, 兰跃东, 张 云, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域水土保持措施的水文效应. 水土保持学报, 2002, 16(5): 87-89
- 7 张经济, 冀文慧, 冯晓东. 无定河流域水沙变化现状和发展趋势预测的研究. 见: 汪岗, 范昭主编. 黄河水沙变化研究, 第二卷. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. 393-429
- 8 李雪梅, 徐建华, 王国庆, 等. 不同降雨条件下河口镇至龙门区间水利水保工程减水减沙作用分析. 见: 汪岗, 范昭主编. 黄河水沙变化研究, 第二卷. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. 261-304