宁夏小河流域天然径流复原计算研究

马福海　马晓龙
宁夏水文水资源监测预警中心固原分局　宁夏　固原　756000

摘　要：本文以茹河支流小河流域黄家河水文站为研究对象，基于该站1981—2024年长序列水文观测资料，综合运用累积距平分析、Mann-Kendall显著性检验等数理统计方法，开展人类活动干扰影响下的天然径流复原推算工作。研究结果表明，本文构建的分段降水-径流耦合模型能够有效复现黄家河站天然径流系列，相较于传统分项调查复原方法，计算效率显著提升。经多方法交叉验证：降水径流模型计算成果与分项调查法相对偏差为-15.4%～32.4%，与水文比拟法对比偏差为-40.7%～16.8%。研究成果可为区域水资源本底评估、统一调度管理及"四水四定"管控准则的落地实施提供可靠的数据基础与理论支撑。

关键词：天然径流复原；径流一致性还原修正；宁夏南部；小河流域

引言

区域水资源本底调查是掌握流域水文特征、落实“四水四定”及推进黄河流域生态保护的核心基础。径流一致性还原修正是消除气候变化与人类活动（如水库建设、水土保持）对水文序列影响的关键环节，旨在复原天然径流以支持精准评价与调度[1]。当前主流技术中，分项调查法基于水量平衡原理，成果可靠但工作量大且参数适用性受限；水文比拟法则对下垫面一致性要求高，易受蓄水工程干扰。鉴于此，本文选取宁夏黄土丘陵半干旱区小河流域黄家河水文站为研究对象，系统开展人类活动干扰下的天然径流复原计算研究，旨在解决现有方法局限，为流域水资源精细化管理及供需平衡调控提供科学的技术支撑。

1 研究区域基础概况

小河为茹河左岸一级支流，发源于甘肃环县，全长74.6km，流域面积1127km^2。该流域属黄土丘陵半干旱区，年均降水450mm且集中在汛期，蒸发量达900mm，水土流失严重，多年平均输沙模数高达5500t/km^2。黄家河水文站控制断面以上水利设施完善，拥有中型水库1座、小（一）型7座、小（二）型7座及骨干坝59座。上游各类蓄水工程控制产流面积226.6km^2，占水文站总集水面积的23.5%。这些工程对河道天然径流具有显著的拦蓄调节作用，有效改变了流域的水文情势。

2 基础资料与分析手段

2.1 水文监测站点资料概况

本次分析以黄家河控制站及流域内8处雨量站的同步观测序列作为基础数据。所选雨量站点观测年限充足，监测数据质量稳定，空间布设覆盖整个流域且分布较为均匀[2]。各雨量站点均配备自记雨量监测设备，实现了全年连续观测，逐年降雨过程数据完整，各站点实测序列均超过40年。研究所用监测站点基础信息见表1。

表1：水文、雨量监测站点基础信息统计表

站　名	类　别	控制面积（km^2）	平均降水量（mm）			设立年份
			1981-1995年	1996-2024年	相对值%	
寨　科	雨量站	19.26	441.3	440.2	0.25	1981.1
党家沟	〃	155.51	422.3	433.8	-2.65	1961.1
官　厅	〃	107.43	402.7	426.2	-5.51	1965.1
共　和	〃	57.89	419.6	433.2	-3.14	1981.1
马　坪	〃	65.89	423.1	435.2	-2.78	1981.1
马　河	〃	124.72	425.8	434.4	-1.98	1981.1
石　岔	〃	53.28	455.3	471.6	-3.46	1986.1
王　洼	〃	109.02	452.0	454.4	-0.53	1978.1
黄家河	水文站	693	428.6	443.9	-3.45	1981.1

2.2 分析计算方法

本研究综合运用降水-径流双累积曲线法、Mann-Kendall突变检验法两种手段识别径流序列一致性突变节点，以突变年份为分界对不同时段径流序列开展修正，并基于年径流深、分段修正系数完成天然径流复原推算；同时引入分项调查还原法和水文比拟法，对降水径流模型复原成果进行可靠性验证。

2.2.1 累积距平分析法

累积距平统计是水文序列趋势分析中常用的数理方法，能够直观反映长时序水文要素的周期性波动和阶段性演变特征。该方法通过逐年计算水文观测值与全序列多年均值的差值，并对差值逐项累加得到累积距平序列，从而判别数据整体变化趋势[3]。当累积距平曲线持续上升，表明该时段水文要素数值总体偏高；曲线持续下降则表明要素数值总体偏低；若曲线出现明显转折点，则说明该年份流域下垫面或气候条件发生突变，径流产汇流规律出现实质性改变。累积距平计算公式为：

$$\tilde{x}_i = \sum_{t=1}^{i}\left(x_t - \bar{x}\right) \qquad \bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} x_t$$

式中：$\tilde{x}_i$为累积距平值（无量纲）；x_t为时间序列数据样本x的第t个样本；$\bar{x}$为序列均值；n为样本总数；t为时间变量。

2.2.2 Mann-Kendall趋势检验法

Mann-Kendall检验属于非参数统计检验方法，仅依靠序列内部数据的相对大小进行趋势判定，无需样本服从正态分布，且对极端异常值不敏感，能够准确识别水文序列变化趋势的显著性及突变年份。具体计算流程如下：

设水文数据序列$X=\{x_1,x_2,x_3,\ldots,x_n\}$，则统计量S表达式为：

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\operatorname{sgn}\left(x_j-x_i\right)$$

式中：x_j、x_i为序列中第j、i个样本值，sgn为符号函数。则S的均值E(S)和方差Var(S)表达式为：

$$E(S)=0$$

$$\operatorname{Var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

将S标准化，可得：

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, & S>0\\ 0, & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, & S<0\end{cases}$$

式中Z符合正态分布。当$Z>0$时，序列呈上升趋势；当$Z<0$时，序列呈下降趋势；若$|Z|>Z_{1-\alpha/2}$，则水文序列变化趋势显著，反之不显著。将序列X倒序排列得到$X'=\{x_n, x_{n-1}, \cdots, x_1\}$，重复上述步骤，使$UF_k$满足：

$$UF_k=\frac{S_k-E(S_k)}{\sqrt{\operatorname{Var}(S_k)}},\quad k=n,n-1,\ldots,1$$

$$UB_k=-UF_k$$

当水文序列存在显著变化趋势时，如果UF_k和UB_k两条曲线出现交点，且交点位于临界线之间，则该时间点即为序列的突变点。

3 径流一致性修正与天然径流计算分析

3.1 径流序列一致性判别分析

降水-径流双累积曲线（DMC）是检验水文序列一致性的重要手段。本文绘制黄家河站1981—2024年面平均降水量与实测年径流深的双累积关系曲线（见图1）。结果显示，前期曲线线性稳定，自1996年起斜率明显偏移，表明该年后下垫面条件改变，破坏了径流序列的天然一致性。

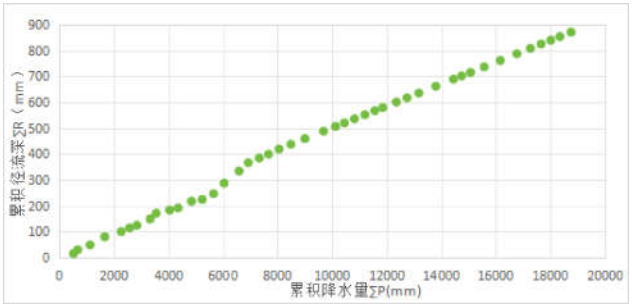


图1：黄家河水文站1981~2024年降水量~径流深双累积曲线图

3.2 径流序列突变年份识别

采用M-K趋势检验法对黄家河站径流突变进行分析。结果显示：1981—2011年径流呈波动抬升趋势；2012—2024年持续下降，但未通过显著性检验。UF与UB曲线交点指示2001年为径流突变分界年份，详见图2。

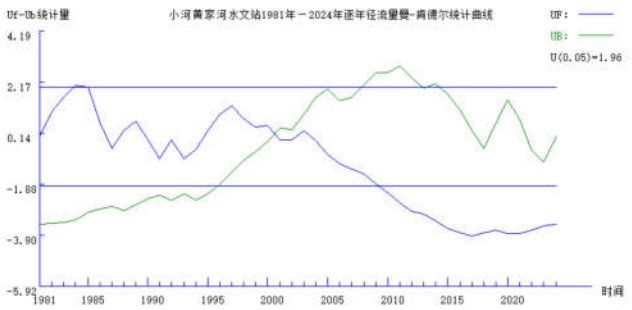


图2：黄家河水文站1981~2024年年径流量M-K趋势检验分析

3.3 径流复原

以突变年份2001年为分割节点，分别建立1981—2000年、2001—2024年两个时段降水-径流深相关曲线。两时段相关方程分别为：

1981—2000年：y = 0.0283x+0.7824

2001—2024年：y = 0.0527x-6.9505

以两段曲线方程推算值的比值构建与降水量配套的径流修正系数，作为实测径流复原校正的依据。修正系数随降水量增加呈递减趋势：降水量300mm时修正系数为1.9527，降水量450mm时降至1.6702，降水量700mm时为1.5066，反映出枯水年份人类活动对径流的相对影响程度更为显著[4]。经模型复原后的天然年径流序列表明，流域多年平均天然径流较实测值有较大幅度的提升，复原成果较好地还原了天然状态下的产水能力。

3.4 径流复原成果合理性交叉验证

为验证降水径流耦合模型计算成果的可靠性，分别采用水文面积比拟法和分项水量调查复原法两套独立方案进行对照校验。

3.4.1 水文面积比拟复原法

该方法的基本思路为：逐年统计黄家河站断面以上当年建成蓄水工程的控制拦蓄面积，用总集水面积扣除拦蓄面积得到当年有效产流面积；利用实测年径流总量除以有效产流面积，得到当年实际径流深；再将该径流深乘以流域原始总面积，复原出无工程拦蓄条件下的天然径流总量。2001—2024年逐年计算成果显示，水文比拟法复原的天然径流在丰水年份增幅较大，体现了蓄水工程拦蓄对径流年际分配的影响。

3.4.2 分项水量调查复原法

分项复原计算所需的基础耗水和蓄水统计数据，直接采用2018—2024年度官方发布的《宁夏水资源公报》整编成果进行核算。该方法通过逐项统计流域内农业灌溉、工业用水、城乡生活取水及水库蓄水变量等，基于水量平衡方程推求天然径流量。

3.4.3 多方法成果对比分析

汇总水文面积比拟法、分项调查法和降水-径流耦合模型法三类方案的2001—2024年天然径流计算结果。总体规律表现为：水文面积比拟法计算的天然径流总量整体偏大，分项水量调查法计算结果整体偏低[5]。定量偏差统计显示：降水径流模型成果与分项调查法相比，年度相对偏差区间为-15.4%～32.4%；与水文面积比拟法相比，偏差范围为-40.7%～16.8%；水文比拟法与分项调查法相互对比，偏差区间为-18.6%～34.7%。以2018年为例，三种方法计算结果分别为1039.5万m^3、889.0万m^3和794.3万m^3，水文比拟法与分项调查法偏差为16.9%，降水径流法与分项调查法偏差为-10.7%，降水径流法与水文比拟法偏差为-23.6%，三者之间的偏差呈现出较好的一致性规律。2023年的对应数据为1027.9万m^3、1102万m^3和1177.8万m^3，除个别年份外，三种方法的变化趋势保持高度一致。

三类计算手段所得结果的变化趋势总体统一，可实现成果的交叉印证，充分说明本文构建的降水-径流综合模型推算出的天然径流序列具有合理性与可靠性。

结束语

本文基于黄家河水文站1981—2024年长序列观测资料，通过分段降水-径流相关模型完成实测径流一致性复原推算。研究利用双累积曲线识别出1996年为下垫面产汇流规律改变节点，结合Mann-Kendall检验确定2001年为关键突变年份，据此建立分段方程并推求修正系数，实现了全时段天然径流的精准复原。对比分析表明，该模型在大幅缩减野外调查与计算耗时、提升工作效率的同时，其结果与分项调查法及水文比拟法偏差均处于合理区间，验证了复原系列的高可信度，可有效支撑流域水资源评价、水量统筹调配及水利工程规划运行。尽管模型精度仍有优化空间，但已为小河流域径流复原提供了高效可靠的方法参考。后续研究建议引入地形因子、水土保持措施动态变化及水库拦蓄量等多元参数，细化不同降水量级和工程规模下的修正参数，以进一步提升模型的精确度与适用性。

参考文献

[1]陈丹,张华.宁夏水文手册[M].银川:宁夏人民教育出版社,2020.

[2]黄晨璐.祖厉河流域水沙演变规律及其成因分析[J].水文,2021,41(2):101-108.

[3]韩颖异.茧场水文站以上径流还原计算分析[J].水利科技与经济,2012,18(1):13-14.

[4]刘强.水利工程影响下水文情势分析及天然径流量还原计算技术研究[D].泰安：山东农业大学，2018.

[5]宁夏回族自治区水利厅.宁夏水资源公报[R].银川:宁夏回族自治区水利厅,2018-2024.