

岑鑫雨, 钟金先, 邓国仕, 等. 基于迟滞排泄水箱模型模拟岩溶断流泉水文过程[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 711-721.

DOI: 10.11932/karst20230407

基于迟滞排泄水箱模型模拟岩溶断流泉水文过程

岑鑫雨¹, 钟金先¹, 邓国仕¹, 许模²

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610218; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:传统的连续排泄水箱难以模拟岩溶泉断流现象, 通过将表层岩溶带调蓄水箱对管道水箱的补给设置为迟滞排泄模式, 模拟岩溶断流泉水文过程, 并应用于丽江市黑龙潭岩溶泉域。研究结果表明, 该模型较好地模拟了泉群流量动态及断流现象; 当降雨量明显增大时, 通过表层岩溶带调蓄水箱进入裂隙水箱的水量变幅不明显, 而管道水箱的分配水量迅速增加, 反映了集中补给的大气降水在岩溶系统中形成快速流的过程; 黑龙潭泉群水量的绝大部分(82%~95%)来自于管道水箱, 岩溶水流在时间和空间上分配的不均匀性易导致泉群断流。该研究提供了将水箱模型应用于岩溶断流泉模拟的参考, 有助于理解该类型岩溶水系统的水文过程。

关键词:岩溶泉; 水箱模型; 迟滞排泄; 水文过程; 黑龙潭

中图分类号: P641.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2023)04-0711-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

岩溶地貌在中国分布广泛, 岩溶水常作为工业基地和城市生活的主要水源, 而近半个世纪以来, 受气候变化和人类活动的影响, 我国北方岩溶大泉近30%发生断流, 南方岩溶大泉流量也不同程度衰减甚至断流^[1-6]。为了探究气候变化和人类活动对泉流量衰减的影响机制, 并预测泉流量和地下水动态, 开展了大量岩溶含水系统模型概化和模拟运算的研究。总体上, 岩溶含水系统可被概化为以下三类模型: 基于函数与智能算法的黑箱模型^[7-9]、基于详细水文地质参数的分布式模型^[10-12]、基于岩溶含水系统结构或水文过程划分的水箱模型^[13-14]。黑箱模型仅需考虑系统的输入项(降雨为主)和输出项(泉流量和开采量为主), 所需资料相对易得, 但无法反映岩溶水系统的

特征。分布式模型能够较好地刻画岩溶含水系统的非均质性, 但对野外勘察数据精度要求较高, 且部分重要参数不易获取。水箱模型对岩溶含水系统的概化程度介于上述两个模型之间, 既能在一定程度上反映含水系统的内部特征, 还能用于预测和管理岩溶水系统, 因此适用于大部分岩溶泉的模拟, 应用前景较好^[15]。Fleury等成功采用水箱模型对法国南部两个岩溶泉域的水文过程进行模拟^[16-17], Jukić等基于水箱模型计算了克罗地亚两个岩溶泉域的水均衡和地下水补给量^[18-19], Tritz等在传统水箱的结构上增加了迟滞排泄模块, 更好地描述了渗透性随含水量变化的情况^[20], Zhou等则将水箱模型与传统新安江模型进行耦合, 提升了岩溶区降雨-径流的模拟精度^[21]。在我国北方地区, 龙玉桥等初步建立了晋祠岩溶水系统水箱模型及水均衡方程, 模拟得到了年尺度上的泉流量

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20211381)

第一作者简介: 岑鑫雨(1994—), 女, 博士, 工程师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: cenxinyukl2@163.com。

通信作者: 钟金先(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环方向研究。E-mail: 110674929@qq.com。

收稿日期: 2023-01-20

和地下水位数据^[22]。

近年来,水箱模型在岩溶区的应用范围逐渐扩展,延伸出地下水资源评价和管理模型等应用方向^[23-25],但该模型尚未应用于对泉群断流的模拟和对典型岩溶断流泉水文过程的分析,且迟滞排泄模块的应用案例较少,其可靠性有待进一步验证。本文基于水箱概念模型,将黑龙潭岩溶泉域采用表层岩溶带调蓄水箱、裂隙水箱和管道水箱进行概化,根据水量均衡方程和水箱排泄方程进行求解,以模拟泉流量动态、分析泉域的岩溶水文过程,并在此基础上对泉群的断流机制进行初步探讨,以期合理开发丽江市地下水资源和后续复流工作的规划提供参考。

1 研究区概况

黑龙潭泉群位于云南省丽江市古城区和玉龙纳西族自治县辖区内,泉域范围整体呈南北展布(图 1),泉域面积约为 168 km²。研究区整体地貌为南西向的尖锥形态,区内山体走向总体呈北北东向,地势北高南低,位于泉群北部的九子海为区内最大溶蚀洼地,海拔 2 810~2 850 m,面积约 20 km²。丽江市地处低纬度高原季风气候区,干湿季节分明,年均气温 13 ℃,年均降雨量 960 mm。丽江地区处于三面被金沙江环绕的分水岭地区,属于长江流域金沙江水系。

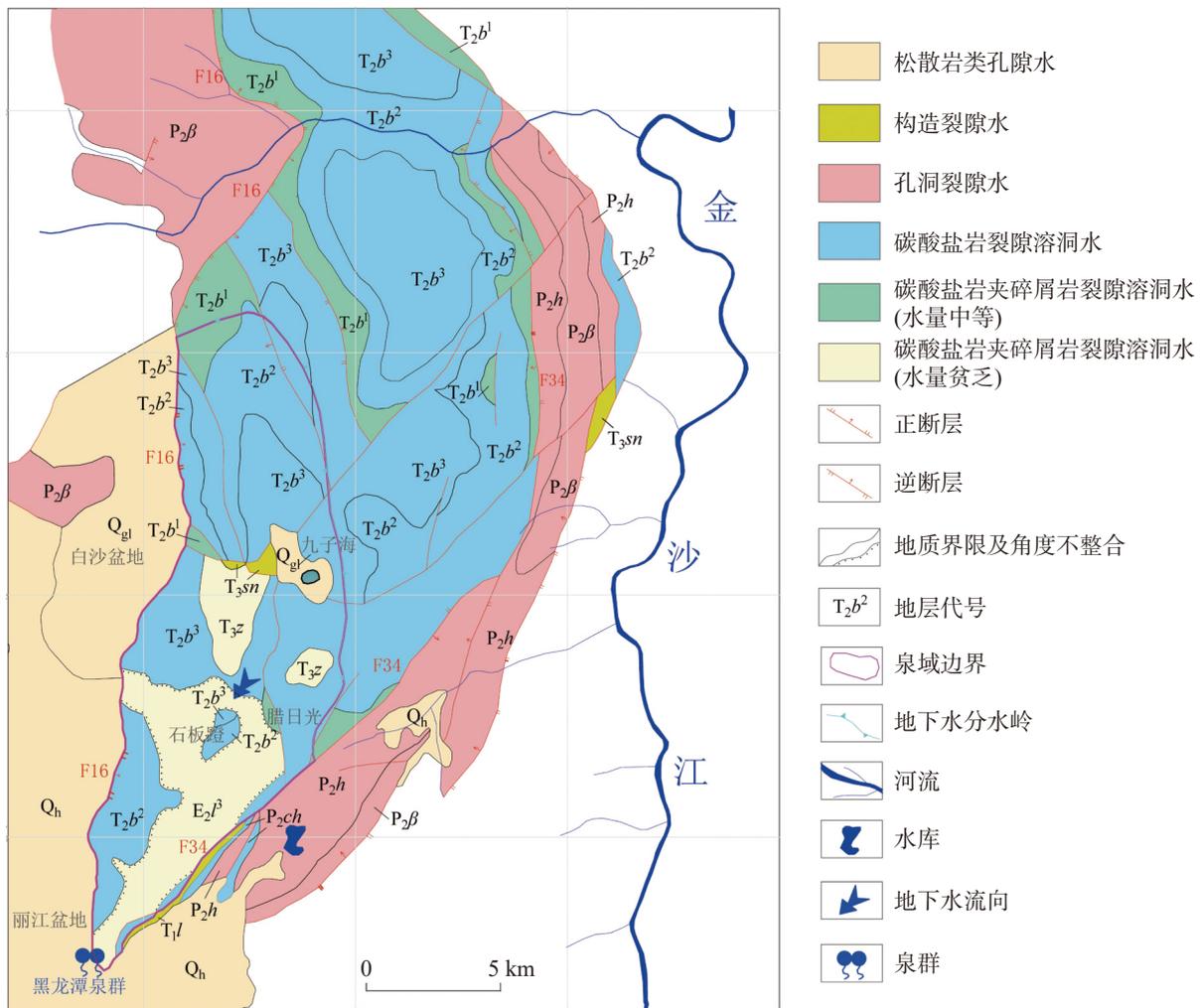


图 1 黑龙潭泉域水文地质简图

Fig. 1 Hydrogeological sketch map of Heilongtan spring area

研究区出露的地层以三叠系灰岩和白云质灰岩为主,下覆二叠系的峨眉山组和黑泥哨组玄武岩^[26]。黑龙潭泉域边界由地下分水岭和隔水断裂组成,碳

酸盐岩岩溶水是研究区内最主要的地下水类型,含水岩组包括北衙组(T_2b)、中窝组(T_3z)和丽江组第三段(E_2l^3)。研究区主要受九子海环状扭动构造的控

制,北东向分布的断裂(包括F16和F34等)是研究区的主要控水构造,九子海复向斜(S1)则提供了良好的褶皱储水条件。泉群以北的碳酸岩盐分布区及岩溶高原盆地构成了泉域的主要补给区域,大气降雨主要经由岩溶洼地和落水洞集中补给地下水,随后自北向南经由岩溶管道和溶隙径流,最后在可溶岩边界与隔水断层以岩溶泉的方式排泄。

黑龙潭泉群是流经丽江古城的玉洞河之源,其断流现象最早可追溯至清乾隆年间;根据丽江水文分局监测,自1993年以来,黑龙潭泉群频繁发生季节性断流,断流持续时间为5~82 d不等;自2012年起泉群连发两次跨年度断流,断流持续时间分别为958 d和1 298 d。

2 研究方法

2.1 水箱模型及模型概化

在黑龙潭岩溶泉域中,当降雨进入表层岩溶带后,一部分表层岩溶带水在重力和坡度汇流作用下产生侧向流汇集于各岩溶洼地,通过洼地底部的落水洞直接进入岩溶管道并主要由黑龙潭泉群排出;另一部分水通过包气带渗入进入裂隙含水带;此外,还有一部分水会以表层岩溶泉的形式短期排泄。由表层岩溶带渗入进入裂隙系统的水量一部分由黑龙潭泉群排出,另一部分以潜流的形式稳定排泄补给丽江盆地孔隙含水层。据此,黑龙潭泉域模型可概化为三个水箱,包括表层岩溶带调蓄水箱(E)、裂隙水箱(M)和管道水箱(C),如图2。为了更好地刻画降雨对泉流量的影响,引入表层岩溶带调蓄水箱对管道水箱的迟滞排泄(Hysteresis),迟滞排泄现象主要用来描述当研究区域含水量较低(干旱)时,降雨过程中仅当其含水量达到一定阈值(E_{hy})时才能产生地下水流补给下游水箱,当降雨结束后该区域的渗透性随着含水率的降低而降低,即使低于 E_{hy} 仍存在地下水补给直至含水量低于 DE_{hy} ^[20]。裂隙水箱排泄速率较慢且稳定,因此由黑龙潭泉群的长期断流现象可知该泉群水量主要来自于管道水箱,因此迟滞排泄的下游水箱设定为管道水箱。

2.2 模型方程及离散求解

2.2.1 水量均衡方程

表层岩溶带调蓄水箱的水量来源为大气降雨

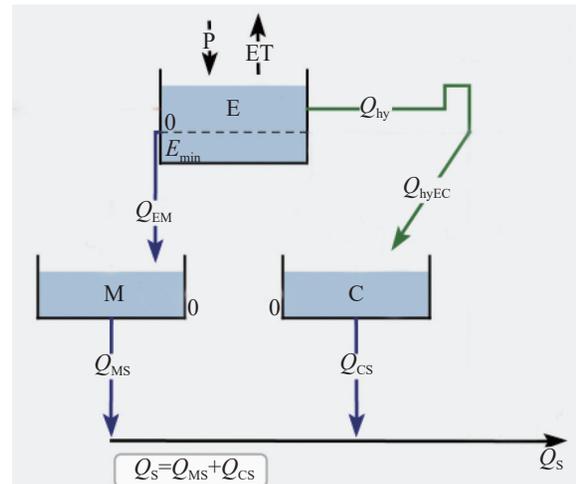


图2 水箱模型结构概化图

Fig. 2 Structure of hysteretic reservoir model

(P),水量排泄途径包括蒸散发(E_T)、连续补给裂隙水箱(Q_{EM})、迟滞补给管道水箱(Q_{hyEC}),由于泉域内无常年性地表河流,故在水箱模型中忽略降雨产生的地表径流量;此外,由于表层岩溶泉流量较小且无监测数据,故模型中不对该排泄量进行概化。据此,该水箱内的水均衡方程可描述为:

$$\frac{dE}{dt}S = PS - E_T S - Q_{EM} - Q_{hyEC} \quad (1)$$

式中, E 为水箱水位[L], t 为模拟时间[T], S 为流域面积[L²], P 为降雨速率[L·T⁻¹], E_T 为蒸散发速率[L·T⁻¹], Q_{EM} 为岩溶调蓄水箱(E 水箱)补给裂隙水箱(M 水箱)的流量[L³·T⁻¹], Q_{hyEC} 为当岩溶调蓄水箱(E 水箱)中水位达到产流阈值后补给管道水箱(C 水箱)的流量[L³·T⁻¹].

影响蒸散发(E_T)的因素众多,包括降水、温度、风速、湿度、太阳辐射、下垫面结构、包气带结构等^[27-28],其中降水和温度是最重要的两个因素,因此采用高桥浩一郎经验公式来计算陆面实际月蒸散发量^[29]:

$$E_T = \frac{3100P}{3100 + 1.8P^2 \exp\left(-\frac{34.4T}{235 + T}\right)} \quad (2)$$

式中: T 为月平均温度(℃)。

裂隙水箱的水量来源为表层岩溶带调蓄水箱的连续补给(Q_{EM}),水量排泄途径包括潜流渗漏排泄和补给黑龙潭泉群流量(Q_{MS}),由于模型中暂无潜流排泄量的计算模块,故不将该部分水量单独列出,而是合并到裂隙水箱的储水量中。据此,该水箱内的水均衡方程可描述为:

$$\frac{dM}{dt}S = Q_{EM} - Q_{MS} \quad (3)$$

式中: M 为水箱水位 [L], Q_{MS} 为裂隙水箱(M 水箱)排泄补给黑龙潭泉群的流量 [$L^3 \cdot T^{-1}$].

管道水箱的水量来源为表层岩溶带调蓄水箱的滞时补给(Q_{hyEC}), 水量排泄途径为补给黑龙潭泉群流量(Q_{CS}), 该水箱内的水均衡方程可描述为:

$$\frac{dC}{dt}S = Q_{hyEC} - Q_{CS} \quad (4)$$

式中, C 为水箱水位 [L], Q_{CS} 为管道水箱(C 水箱)排泄补给黑龙潭泉群的流量 [$L^3 \cdot T^{-1}$].

2.2.2 水箱连续排泄方程

采用水箱连续排泄方程计算的流量成分包括 Q_{EM} 、 Q_{MS} 和 Q_{CS} , 以 Q_{CS} 为例:

$$Q_{CS} = k_{cs}S \left(\frac{C}{L_{ref}} \right)^{\alpha_{cs}} \quad (5)$$

式中: k_{cs} 为连续排泄系数 [$L \cdot T^{-1}$], C 为水箱水位 [L], L_{ref} 为单位长度 [L], α_{cs} 为连续排泄指数 [-], S 为流域面积 [L^2].

2.2.3 水箱迟滞排泄方程

表层岩溶带调蓄水箱向管道水箱的迟滞排泄方程为:

$$Q_{hyEC} = \varepsilon \left[\frac{\max(E - DE_{hy}, 0)}{(E_{hy} - DE_{hy})/L_{ref}} \right]^{\alpha_{hy}} k_{hy}S \quad (6)$$

式中: E_{hy} 和 DE_{hy} 分别为迟滞排泄的上下产流阈值 [L], α_{hy} 为迟滞排泄指数 [-], k_{hy} 为迟滞排泄系数 [$L \cdot T^{-1}$], ε 为常数, 取 0 或 1, 可由以下公式得出:

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon = 0 \\ E = DE_{hy} \end{array} \right\} \Rightarrow \varepsilon = 1 \quad (7)$$

$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon = 1 \\ E = E_{hy} \end{array} \right\} \Rightarrow \varepsilon = 0 \quad (8)$$

在公式 5 和公式 6 中, 排泄指数 α 取值大于 0, 当 $\alpha = 1$ 时为线性排泄, 当 $\alpha \neq 1$ 时为非线性排泄。

3 结果与讨论

3.1 黑龙潭泉群流量模拟

本次研究收集了云南省长江流域清溪站、团山站、丽江站及九子海站的降雨量月数据, 数据时间区间为 1993 年 1 月至 2017 年 12 月, 根据年降水量将上述时间区间划分为枯水年、平水年与丰水年分别进行模拟。此外, 在每个模拟时段内分别划分预热期、校正期与验证期, 通常情况下, 验证期的时长应至少为校正期的两倍^[30], 模拟时段的划分见表 1。

表 1 水箱模型模拟时段划分表

Table 1 Division of simulation time for reservoir model

模型编号	模拟时段	降雨量特征	预热期	校正期	验证期
I	1993.1—1997.12	平水年	1993.1—1993.12	1994.1—1994.12	1995.1—1997.12
II	1998.1—2004.12	丰水年	1998.1—1998.5	1998.6—1999.7	1999.8—2004.12
III	2005.1—2010.12	平水年	2005.1—2005.12	2006.1—2006.12	2007.1—2010.12
IV	2011.1—2017.12	枯水年	2009.1—2009.9	2009.10—2010.11	2010.12—2017.12

水箱模型采用准蒙特卡洛(quasi Monte-Carlo)程序进行校正, 并结合 Sobol 序列对参数空间进行采样^[31-32]。模型校正的质量指标采用效率系数(NSE)和修正平衡误差 Balance Error(BE)的加权值 W_{obj} 进行评价:

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{mean})^2} \quad (9)$$

$$BE = 1 - \left| \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum Q_{obs}} \right| \quad (10)$$

$$W_{obj} = wNSE + (1 - w)BE \quad (11)$$

效率系数(NSE)常被用来衡量降雨-径流模型的质量, 该系数能够很好的评价较高流量值的模拟质量, 但对低数值的模拟结果评价质量有限, 因此引入修正平衡误差(BE)对泉流量模拟值进行综合评价可以更好地描述模型的质量。NSE 与 BE 的取值范围均为 $(-\infty, 1)$, 当 NSE 值为 1 时, 模型的模拟值等于观测值; 当 NSE 值为 0 时, 模型的模拟值等于观测值的平均值; 当 NSE 值小于 0 时, 模型质量较差; 当 BE 的值为 1 时, 说明在模拟时段内, 模型计算得到

的泉流量总量等于实际观测总量。在公式 11 中, 权重 w 取值为 0.7。

水箱模型采用 KarstMod 软件进行模拟, 该软件由法国岩溶国家观测局 (French institution INSU-CNRS SNO KARST) 开发 (<http://www.sokarst.org>), 能对水箱模型进行概化及模拟计算^[31]。在设置模型参数时, 由于管道水箱向岩溶泉的排泄强度较大

且一般为非线性排泄^[18,20], 故 k_{cs} 校正取值区间较大, 且 α_{cs} (0.2, 4)。此外, 降雨入渗面积 S 等于泉域面积 168 km^2 , 因在同一水箱中无法单独设置蒸散发面积, 因此模拟中蒸散发与降雨入渗面积相同。由于 E 水箱中的迟滞排泄过程与初始水位 E_0 有关, 故根据四个模型中的降雨量特征对 E_0 进行初始赋值。模型参数释义如表 2, 校正结果如表 3。

表 2 水箱模型校正参数释义及初始值设置表

Table 2 Interpretation of calibration parameters and initial value settings for the reservoir model

参数符号	单位	参数释义	是否为校正参数	取值或校正区间
E_0	mm	E 水箱初始水位	×	模型 I 和 III: 15 模型 II: 30 模型 IV: 5
E_{min}	mm	E 水箱排泄至 M 水箱阈值	√	(30, 100)
C_0	mm	C 水箱初始水位	×	模型 I~III: 0 模型 IV: 10
M_0	mm	M 水箱初始水位	×	0
k_{em}	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	E 水箱至 M 水箱连续排泄系数	√	(e^{-4}, e^{-2})
k_{hy}	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	E 水箱迟滞排泄系数	√	(0.01, 1)
E_{hy}	mm	E 水箱迟滞排泄上产流阈值	√	(0, 200)
DE_{hy}	mm	E 水箱迟滞排泄下产流阈值	√	(0, 50)
α_{hy}	-	迟滞排泄指数	√	(1, 4)
k_{cs}	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	C 水箱至泉连续排泄系数	√	(0.1, 20)
k_{ms}	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	M 水箱至泉连续排泄系数	√	(e^{-4}, e^{-2})
α_{cs}	-	C 水箱至泉连续排泄指数	√	(0.2, 4)
S	km^2	降雨入渗和蒸散发面积	×	168

表 3 水箱模型参数校正值

Table 3 Calibrated values for the reservoir model

参数符号	单位	校正结果			
		模型编号 I	模型编号 II	模型编号 III	模型编号 IV
E_{min}	mm	10.2	21.3	11.8	1.9
k_{em}	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	0.002 8	0.003 3	0.003	0.003 1
k_{hy}	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	0.065 6	0.084 5	0.059 8	0.034 2
E_{hy}	mm	147	92	138	172
DE_{hy}	mm	42	18	32	85
α_{hy}	-	1.32	1.41	1.19	1.27
k_{cs}	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	0.102	0.093	0.098	0.113
k_{ms}	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	0.001 2	0.002 2	0.002 4	0.001 9
α_{cs}	-	0.509	0.329	0.447	0.58

黑龙潭泉群流量各模拟时段结果如图 3。对于平水年模型 I 和模型 III (图 3a 和图 3c), 模拟泉流量在年际动态变化情况上与观测值基本一致, 并能够较好地反映当年降雨量对泉流量的影响; 此外, 模拟

与观测的峰值同步性较好。模拟曲线整体形态较平滑, 反映了水箱模型对降雨信号的滤波作用。此外, 由于管道水箱和裂隙水箱的连续排水特征, 在一定程度上弱化了降雨相对连续的两年 (1995 年和 1996

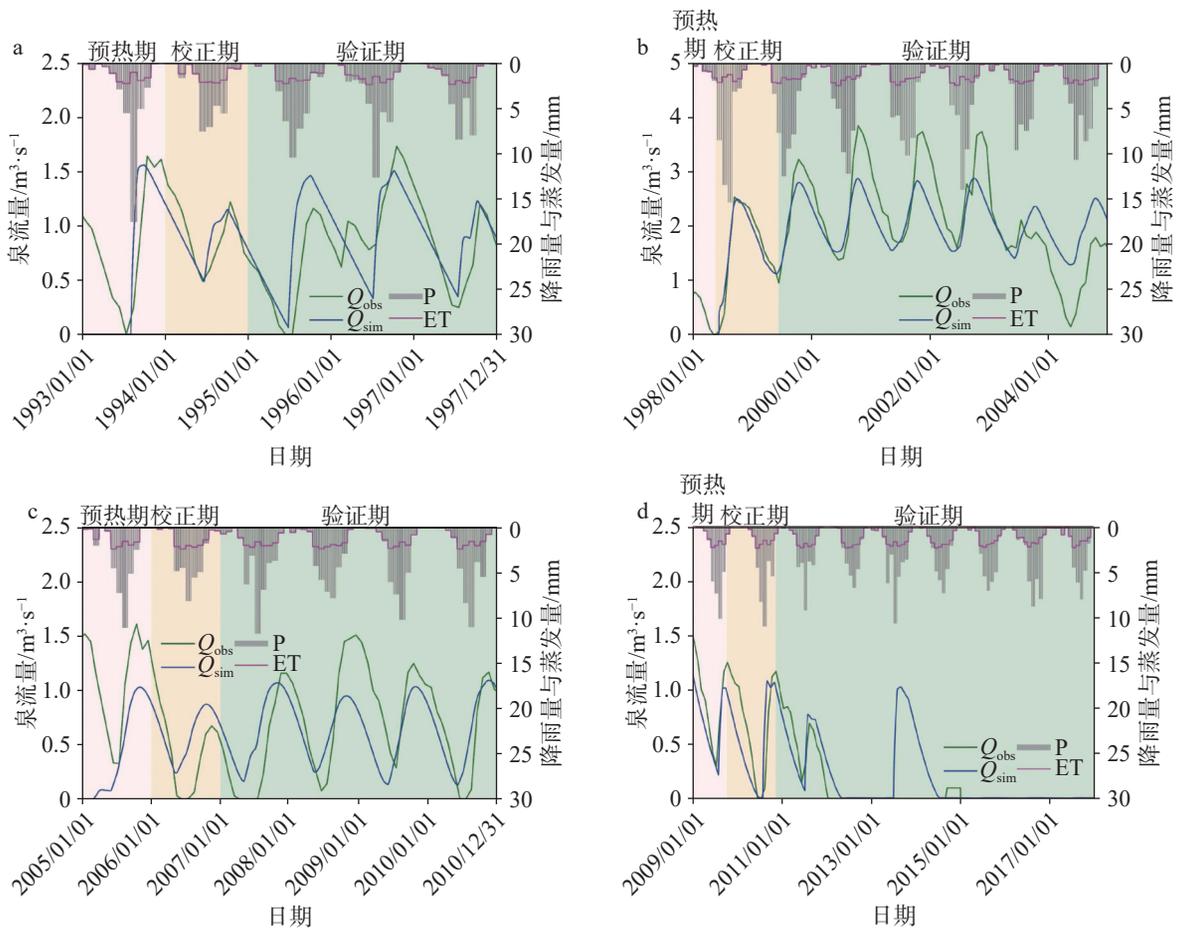


图3 黑龙潭泉群流量模拟结果。a.模型 I; b.模型 II; c.模型 III; d.模型 IV

Fig. 3 Simulation results of the Heilongtan springs. Subplots a-d are corresponding to models from I to IV

年)多峰值曲线模拟质量,导致模拟峰值数量比实际观测峰值数量少一个。模型 II(图 3b)中模拟泉流量的上升支与下降支斜率与观测值基本一致,说明该水箱模型对于排水速率的刻画较准确。该模型的模拟时段为丰水年,此时岩溶水系统中储水量较充足,因此即使在降雨量相对较少的春、冬两季也能保证黑龙潭泉群以一定的流量稳定出流,水箱模型较好地模拟了泉群的枯季低值流量。

在模型 IV(图 3d)中,由于黑龙潭泉群在枯水期的大部分时间处于断流状态,故将模拟的起始时间前移两年,以更好地对模型进行预热和校正操作。模拟结果显示,水箱模型较好地重现了低值流量并成功模拟了 2010 年的年内断流现象;而对于跨年度的断流(2012 至 2017 年),除 2013 年以外,模拟泉流量均为零。分析造成以上误差的原因主要是 2013 年的年降雨总量为 1 090 mm,达到平水年的降雨量标准,明显高于该阶段内的平均年降雨量 917 mm,从而满足了表层调蓄水箱的迟滞排泄阈值标准,导

致模拟泉口出流。该误差说明了迟滞排泄水箱能较好地模拟当年降雨量转化为泉流量的情况,但对于降雨量与泉流量的多年动态特征分析尚待进一步研究。

对上述四个模型进行质量评价,结果见表 4 和图 4。分析可知,模型校正期的质量整体好于验证期,这是由于校正期时长较短,参评参数较少。对比四个模型的整体质量评价可以看出,丰水期模型(II)质量略好于平水期模型(I 和 III),这是由于当岩溶含水系统的饱水程度较高时,各水箱之间的水量传输较连续,更加符合连续排泄水箱的模型设置。枯水期模型(IV)质量相对较差主要是由于 2013 年的模拟流量与实际情况偏差较大,排除该因素后该模型的整体质量仍然较高,并且能够成功模拟跨年度的泉群断流现象。分析三个评价指标可知,用于评价泉流量总量的 BE 值最高,除模型 IV 以外均大于 0.9;其次是加权指标 W_{obj} ; NSE 值相对较低,但除模型 IV 以外其值区间为 (0.33, 0.85)。综合以上三个指标分析

表 4 模型质量评价参数表
Table 4 Quality evaluation parameters for the reservoir model

模型编号	评价指标	评价时期	
		校正期	验证期
I	NSE	0.85	0.33
	BE	0.92	0.96
	W_{obj}	0.87	0.52
II	NSE	0.63	0.55
	BE	0.98	0.95
	W_{obj}	0.96	0.67
III	NSE	0.44	0.46
	BE	0.97	0.96
	W_{obj}	0.6	0.61
IV	NSE	0.33	-0.21
	BE	0.92	0.19
	W_{obj}	0.51	-0.09

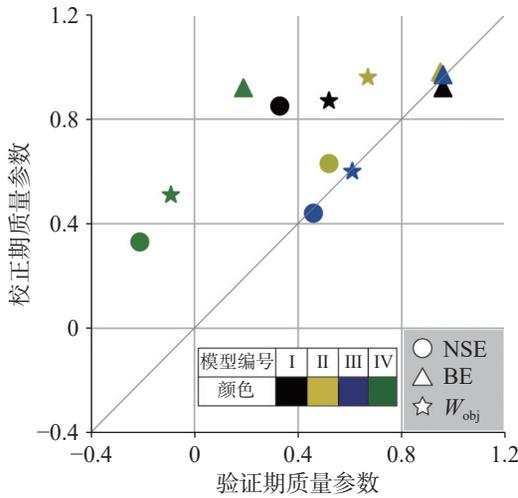


图 4 模型质量评价参数散点图

Fig. 4 Scatter plot of quality evaluation parameters for the reservoir model

可知水箱模型整体可信度较好, 模拟质量较高。

3.2 表层岩溶带对裂隙系统与管道系统的补给

大气降雨由表层岩溶带调蓄水箱入渗补给岩溶含水层的过程主要包含连续补给裂隙水箱(Q_{EM})和迟滞补给管道水箱(Q_{hyEC}), 由水箱模型计算得到的上述两类年均分配水量如图 5。由图可知, 进入含水层的总水量由大到小排序依次为丰水期模型(II)、平水期模型(I 和 III)和枯水期模型(IV), 说明降雨量是影响岩溶含水层补给量的最主要因素。四个模型中裂隙水箱的分配水量差别较不明显(398~605 万 m^3),

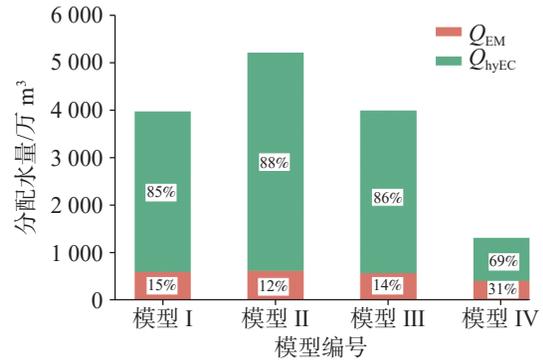


图 5 由表层岩溶带分别进入裂隙系统和管道系统的年均水量分配柱状图

Fig. 5 Histogram of annual groundwater distribution from epikarst reservoir (E) into matrix reservoir (M) and conduit reservoir (C)

而管道水箱的分配水量(901~4 591 万 m^3)变动幅度较大, 表明黑龙潭泉域内岩溶管道介质十分发育且通畅, 对降雨入渗量的变化较敏感, 导致集中补给的大气降雨或坡面流在进入岩溶管道后, 易形成快速流, 使得其分配水量迅速增加。此外, 进一步计算裂隙水箱和管道水箱的水量分配比例可知, 在丰水期进入管道水箱的比例最高(88%), 平水期比例略低(85%~86%), 而枯水期比例(69%)明显低于上述两个时期, 这是由于在丰水期时, 表层岩溶带调蓄水箱中的水位持续处于高位, 高于该水箱对管道水箱的迟滞排泄阈值, 故对管道水箱产生快速补给; 而调蓄水箱对裂隙水箱为连续补给, 其补给速率仅与调蓄水箱中水位有关, 不具备发生快速补给的条件。

除水量以外, 四个模型中 Q_{EM} 和 Q_{hyEC} 的年内补给时间也具有普遍差异, 以平水期模型 I 为例, 绘制 Q_{EM} 和 Q_{hyEC} 随时间的变化曲线如图 6, 由图可知, 表层岩溶带对裂隙系统的补给为全年连续补给, 其波动情况与降雨基本一致; 而表层岩溶带对管道系统

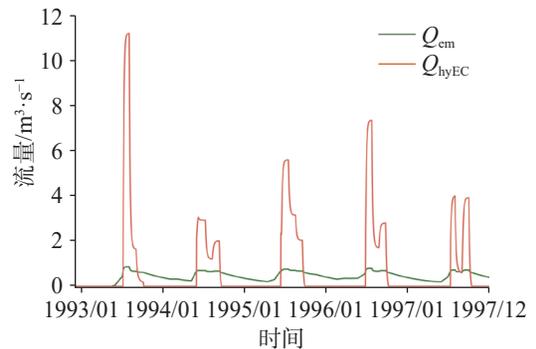


图 6 Q_{EM} 与 Q_{hyEC} 随时间变化曲线图

Fig. 6 Dynamic plot of Q_{EM} and Q_{hyEC}

的补给仅发生在每年的 6~10 月,即一年内的主要降雨月份,其余月份补给量为零,这一结果与水箱的迟滞补给设置有关,同时也与实际情况较为符合,即低于一定强度的降雨无法对地下水形成有效补给^[27,33-34]。此外, Q_{hyEC} 的振幅与斜率明显大于 Q_{EM} ,说明表层岩溶带对管道系统的补给强度与补给速率均明显大于裂隙系统,该推论可由模拟得到的排泄系数 k_{hy} 与 k_{em} 加以佐证,结合表 3 可知,表层岩溶带水箱对管道水箱的排泄系数 k_{hy} 普遍比对裂隙水箱的排泄系数 k_{em} 大一个量级。

模拟得到的上、下水位阈值(E_{hy} 和 DE_{hy})如图 7,由图可知,丰水期模型 II 的两个阈值均为最低,平水期模型 I 和 III 的阈值相对较高,枯水期模型 IV 最高,上述差异主要是由于 E 水箱的初始含水状态与降雨量高度相关,因此在含水率相对较高的丰水期更易产生径流补给下游 C 水箱,且结束径流的阈值也较低;而在枯水期中,降雨需要首先补给土壤、表层岩溶带和包气带,随后才能转化为地下径流补给下游水箱。

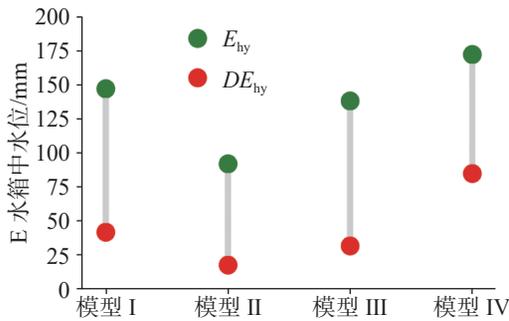


图 7 水箱 E 迟滞补给上、下水位阈值散点图

Fig. 7 Scatter plot of the upper and lower threshold levels of Reservoir E

3.3 黑龙潭泉群水量来源解析

根据水箱结构模型概化图(图 1)可知,黑龙潭泉群水量 Q_s 的来源由两大部分组成,包括裂隙水箱的补给量 Q_{MS} 和管道水箱补给量 Q_{CS} ,由水箱模型计算得到的上述两类年均补给水量如图 8。由图可知,平水期和丰水期的泉群水量绝大部分(95%以上)来自于管道水箱,在枯水期模型中该比例有所降低(82%);各模型中来自裂隙水箱的水量基本相同,说明黑龙潭泉群的流量变化情况与管道水箱中的水量与排泄速率密切相关。此外,由表 3 可知,管道水箱至泉的排泄系数(k_{cs})普遍比裂隙水箱排泄系数(k_{ms})高出 1 至 2 个量级,说明黑龙潭泉域的裂隙系统释水速率

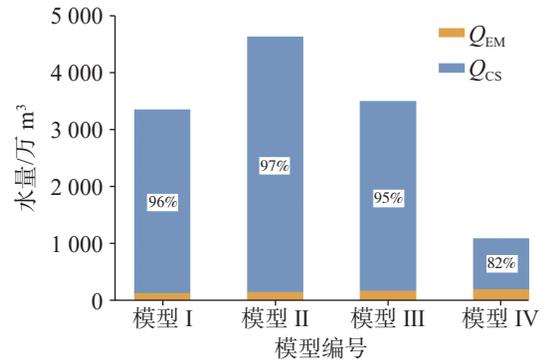


图 8 黑龙潭泉群年均水量来源成分图

Fig. 8 Composition histogram of annual water source of the Heilongtan springs

远远慢于管道系统,因此其响应滞后的时间较长。本文在进行水箱模型模拟时,由于裂隙介质中地下水流量与水头呈线性关系,水箱排泄流量与水箱内水位也呈线性关系,故概化为线性水箱^[15];而地下水在管道中的流动一般为紊流,此时管道排泄流量与管道内的水头偏离线性关系,故概化为非线性水箱,非线性指数区间为(0.329, 0.58)。

3.4 基于水箱模型的泉群断流机制探讨

通过将表层岩溶调蓄水箱(E)至管道水箱(C)设置为迟滞排泄,水箱模型可以较好模拟泉群的由于年降水量不足引起的断流现象。由图 2,水箱 E 的水量排泄包括对裂隙水箱 M 的连续排泄以及对管道水箱 C 的迟滞排泄,这两条排泄途径分别是通过触发水箱 E 中的水位高度 E_{min} 和 E_{hy} 来实现的,根据模拟结果(表 3)可知, E_{min} (1.9~21.3 mm)远小于 E_{hy} (92~172 mm),因此降雨量较少时表层岩溶调蓄带即可对裂隙系统产生补给;而对管道系统的补给所需降雨量则明显较大。其次,通过对模拟泉流量的来源解析可知,泉流量绝大部分(82%~97%)来自于管道水箱,而管道水流在泉点出流时表现为陡升陡降的动态特点^[28],因此大量的管道水流迅速排泄,使得水量在时间分配上极不均匀,易导致泉群断流。

综上所述,根据水箱模型可知,降雨量转化为泉流量的最主要岩溶水文过程为:降雨量扣除蒸散发量后,产生的净入渗量使表层岩溶调蓄水箱(E)中的水位抬升;当水位达到 E_{hy} 时,水箱 E 对水箱 C 产生快速集中补给,直至水箱中水位降至 DE_{hy} 停止补给;最后,进入水箱 C 的水量通过连续排泄的方式转化为泉流量。在上述过程中,水箱 E 是否产生水量补给水箱 C 受降雨量的控制,而水箱 C 排泄转化为泉流量的过

程则反映了岩溶水流在管道系统内的传输过程。

4 结 论

(1) 水箱模型适用于岩溶泉域泉流量模拟及岩溶水文过程分析工作, 其中丰水期模型和平水期模型可以较好地模拟水箱连续排泄情况下的泉流量动态; 通过对水箱进行迟滞排泄设置, 可以模拟泉群的断流。若要进一步刻画岩溶含水层的多年调蓄特征, 需考虑增加相应水箱;

(2) 模拟结果显示, E 水箱对 M 水箱的补给量受降雨量的变化不明显, 补给量较稳定; 而 E 水箱对 C 水箱的补给量对降雨入渗量的变化较敏感, 这表明黑龙潭泉域岩溶管道十分发育且通畅, 导致集中补给的大气降水或坡面流在岩溶管道中易形成快速流, 使得其分配水量迅速增加;

(3) 黑龙潭泉群的水量绝大部分(82%~95%)来自于 C 水箱。触发 E 水箱对 C 水箱快速补给的所需降雨量较大, 且 C 水箱的水量排泄具有管道水流陡升陡降的动态特点, 上述特征造成岩溶水流在时间和空间上分配极不均匀, 易导致泉群断流。

参考文献

- [1] 徐永新, 张志祥, 张永波, 梁永平, 曹建华, 蒋忠诚. 山西岩溶泉研究进展与前瞻[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(3): 413-426.
- XU Yongxin, ZHANG Zhixiang, ZHANG Yongbo, LIANG Yongping, CAO Jianhua, JIANG Zhongcheng. Research advance in karst springs of Shanxi Province[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(3): 413-426.
- [2] 梁永平, 申豪勇, 高旭波. 中国北方岩溶地下水的研究进展[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 199-219.
- LIANG Yongping, SHEN Haoyong, GAO Xubo. Review of research progress of karst groundwater in Northern China[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 199-219.
- [3] CEN Xinyu, XU Mo, QI Jihong, ZHANG Qiang, SHI Haoxin. Characterization of karst conduits by tracer tests for an artificial recharge scheme[J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29: 2381-2396.
- [4] 王焰新. 我国北方岩溶泉域生态修复策略研究: 以晋祠泉为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 331-344.
- WANG Yanxin. Study on ecological restoration strategy of karst spring region in North China: Taking Jinci spring as an example[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(3): 331-344.
- [5] 康晓波, 王宇, 张华, 曹瑾. 丽江黑龙潭泉群水文地质特征及断流的影响因素分析[J]. 中国岩溶, 2013, 32(4): 398-403.
- KANG Xiaobo, WANG Yu, ZHANG Hua, CAO Jin. Hydrogeological features and influence factors of zero flow of the Heilongtan spring group in Lijiang[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4): 398-403.
- [6] 李颂章, 荣冠, 罗琳, 侯迪. 锦屏大河湾磨房沟泉流量衰减规律研究[J]. 工程勘察, 2013, 41(12): 32-36, 89.
- LI Songzhang, RONG Guan, LUO Lin, HOU Di. Dynamic study on discharge attenuation in Mofanggou spring at Jinping river bend[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(12): 32-36, 89.
- [7] 郝永红, 王玮, 王国卿, 杜欣, 朱宇恩, 王学萌. 气候变化及人类活动对中国北方岩溶泉的影响: 以山西柳林泉为例[J]. 地质学报, 2009, 83(1): 138-144.
- HAO Yonghong, WANG Wei, WANG Guoqing, DU Xin, ZHU Yuen, WANG Xueming. Effects of climate change and human activities on the karstic springs in Northern China: A case study of the Liulin springs[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(1): 138-144.
- [8] 袁孝圣, 邢立亭, 赵振华, 李常锁, 陈免良. 济南四大泉群流量衰减过程及其指示意义[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7): 126-132.
- YUAN Xuesheng, XING Liting, ZHAO Zhenhua, LI Changsuo, CHEN Huanliang. Flow attenuation process of four spring groups in Jinan and its indicative significance[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(7): 126-132.
- [9] 林云, 曲鹏冲, 吕海新, 武亚遵. 太行山东缘典型岩溶泉流量变化特征及规律分析[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 671-679.
- LIN Yun, QU Pengchong, LYU Haixin, WU Yazun. Variation characteristics of typical karst springs in the eastern margin of the Taihang Mountains[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(5): 671-679.
- [10] 徐中平, 周训, 崔相飞, 拓明明, 王昕昀, 张颖. 岩溶区地下水数值模拟研究进展[J]. 中国岩溶, 2018, 37(4): 475-483.
- XU Zhongping, ZHOU Xun, CUI Xiangfei, TA Mingming, WANG Xinyun, ZHANG Ying. Research advances of numerical simulation of groundwater in karst areas[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(4): 475-483.
- [11] Andrea Borghi, Philippe Renard, Fabien Cornaton. Can one identify karst conduit networks geometry and properties from hydraulic and tracer test data?[J]. Advances in Water Resources, 2016, 90: 99-115.
- [12] Lea Duran, Laurence Gill. Modeling spring flow of an Irish karst catchment using Modflow-USG with CLN[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 125971.
- [13] 常勇, 齐尧勇, 刘玲. 基于改进的Vensim模型模拟岩溶水文过程[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 301-307.
- CHANG Yong, QI Yaoyong, LIU Ling. Modelling the hydrological process of the karst spring using a revised Vensim model[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5): 301-307.

- [14] Lea Duran, Nicolas Massei, Nicolas Lecoq, Matthieu Fournier, David Labat. Analyzing multi-scale hydrodynamic processes in karst with a coupled conceptual modeling and signal decomposition approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124625.
- [15] 常勇. 裂隙-管道二元结构的岩溶水文过程分析与模拟[D]. 南京: 南京大学, 2015.
CHANG Yong. Analysis and simulation of the hydrological process of the karst aquifer with fracture-conduit dual structure[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [16] Perrine Fleury, Valérie Plagnes, Michel Bakalowicz. Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France)[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 345(1-2): 38-49.
- [17] Fleury P, Ladouche B, Conroux Y, Jourde H, Dörfli N. Modelling the hydrologic functions of a karst aquifer under active water management—The Lez spring[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 365(3-4): 235-243.
- [18] Damir Jukić, Vesna Denić-Jukić. Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373(3-4): 302-315.
- [19] Damir Jukić, Vesna Denić-Jukić, Ana Lozić. An alternative method for groundwater recharge estimation in karst[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 126671.
- [20] Sébastien Tritz, Vincent Guinot, Hervé Jourde. Modelling the behaviour of a karst system catchment using non-linear hysteretic conceptual model[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 397(3-4): 250-262.
- [21] Zhou Qing, Chen Lu, Singh Vijay P, Zhou Jianzhong, Chen Xiaohong, Xiong Lihua. Rainfall-runoff simulation in karst dominated areas based on a coupled conceptual hydrological model[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 524-533.
- [22] 龙玉桥, 李伟, 李砚阁, 杨忠平. 疏干开采条件下晋祠岩溶水系统的水箱模型[J]. 中国岩溶, 2011, 30(1): 27-33.
LONG Yuqiao, LI Wei, LI Yange, YANG Zhongping. Tank model of the Jinci karst groundwater system under the conditions of simultaneous draining in mining[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(1): 27-33.
- [23] Vianney Sivel, Hervé Jourde, Daniel Bittner, Naomi Mazzilli, Yves Trambly. Assessment of the relative impacts of climate changes and anthropogenic forcing on spring discharge of a Mediterranean karst system[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126396.
- [24] Nerantzis Kazakis, Konstantinos Chalikakis, Naomi Mazzilli, Chloé Ollivier, Antonios Manakos, Konstantinos Voudouris. Management and research strategies of karst aquifers in Greece: Literature overview and exemplification based on hydrodynamic modelling and vulnerability assessment of a strategic karst aquifer[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 592-609.
- [25] Cécile Baudement, Bruno Arfib, Naomi Mazzilli, Johan Jouvès, Thierry Lamarque, Yves Guglielmi. Groundwater management of a highly dynamic karst by assessing baseflow and quickflow with a rainfall-discharge model (Dardennes springs, SE France)[J]. *BSGF-Earth Sciences Bulletin*, 2017, 188: 40-60.
- [26] 王平, 刘辉龙, 罗波, 陈雪峰. 丽江东部地区黑泥哨组铜矿成矿规律及潜力分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2017, 37(4): 77-83.
WANG Ping, LIU Huilong, LUO Bo, CHEN Xuefeng. Mineralization and potential of the copper deposits in the Heinishao Formation in the eastern part of Lijiang, northwestern Yunnan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2017, 37(4): 77-83.
- [27] 罗明明. 南方岩溶水循环的物理机制及数学模型研究: 以香溪河岩溶流域为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2017.
LUO Mingming. The physical mechanism and mathematical model of karst water circulation: A case study of the Xiangxi river karst basin, South China[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2017.
- [28] 申豪勇, 梁永平, 程洋, 黄春玲. 龙子祠泉域不同下垫面陆面蒸散量的对比研究[J]. 中国岩溶, 2017, 36(2): 234-241.
SHEN Haoyong, LIANG Yongping, CHENG Yang, HUANG Chunling. Study on the regional evapotranspiration over different surface conditions of the Longzici spring drainage[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(2): 234-241.
- [29] 高桥浩一郎, 王长根. 根据月平均气温、月降水量推算蒸散量[J]. 气象科技, 1980(Supp.4): 48-50.
- [30] Vianney Sivel, David Labat, Naomi Mazzilli, Nicolas Massei, Hervé Jourde. Dynamics of the flow exchanges between matrix and conduits in karstified watersheds at multiple temporal scales[J]. *Water*, 2019, 11(3): 569.
- [31] Mazzilli N, Guinot V, Jourde H, Lecoq N, Labat D, Arfib B, Baudement C, Danquigny C, Dal Soglio L, Bertin D. KarstMod: A modelling platform for rainfall-discharge analysis and modelling dedicated to karst systems[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 122: 103927.
- [32] Andrea Saltelli. Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices[J]. *Computer Physics Communications*, 2002, 145(2): 280-297.
- [33] 黄丹红, 成建梅, 刘军, 王增银, 张晓宇. 岩溶含水层降雨非线性入渗补给的处理方法[J]. 地下水, 2006(2): 23-25.
HUANG Danhong, CHENG Jianmei, LIU Jun, WANG Zengyin, ZHANG Xiaoyu. New approach for calculating nonlinear infiltration replenishment by rainfall in the karst aquifer[J]. *Ground Water*, 2006(2): 23-25.
- [34] 杨郑秋, 杨杨, 邵景力, 苏春田, 崔亚莉, 罗飞. 基于MODFLOW-CFP的岩溶水模型降雨非线性入渗补给研究: 以湖南省香花岭地区为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 691-695.
YANG Zhengqiu, YANG Yang, SHAO Jingli, SU Chuntian, CUI Yali, LUO Fei. Study on non-linear rainfall infiltration recharge of numerical karst water model based on MODFLOW-CFP: A case study of Xianghualing area, Hunan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 691-695.

Modelling the hydrological process of the dried-up karst spring based on a reservoir model for hysteretic discharge

CEN Xinyu¹, ZHONG Jinxian¹, DENG Guoshi¹, XU Mo²

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610218, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract Karst is highly developed and widely distributed in Southwest China which is endowed with rich karst water resources but in different temporal and spatial distribution. As the main water source for the ecology and landscape of Lijiang Ancient City, Heilongtan springs have frequently dried up in recent years, which has seriously affected the production activities, daily life, and tourism quality of Lijiang Ancient City. The principle of reservoir model is to divide the karst aquifer system into different parts according to its structure or hydrological process. Based on the above division, each part has been generalized into a corresponding reservoir connected by a certain way in order to simulate the discharge of karst springs. The conventional reservoir model of continuous discharge has been widely used for reproducing the discharge of perennial springs. However, this continuous discharge model performs poorly in simulating the dry-up of karst springs. By setting the discharge law from epikarst reservoir to conduit reservoir as a hysteretic transfer function, this study reasonably reproduced the hydrological process of the dried-up springs. Several conclusions have been drawn as below. Firstly, Heilongtan spring area can be generalized as a reservoir model composed of epikarst regulation reservoir (E), matrix reservoir (M), and conduit reservoir (C). Discharge of Heilongtan springs has been successfully reproduced by the above model. Secondly, the rainy season and the normal season models can effectively simulate the spring dynamics based on the continuously discharge law. By setting the hysteretic discharge of the epikarst reservoir, the dry-up of the springs can be reproduced. To further characterize the multi-year regulation and storage characteristics of karst aquifers, additional reservoirs are needed. Thirdly, the simulation results show that the recharge from Reservoir E to Reservoir M is not sensitive to the rainfall, while the discharge from Reservoir E to Reservoir C is very sensitive to the rainfall, which indicates that the karst conduit in the Heilongtan spring area is developed and well connected, leading to the concentrated recharge and rapid increase of discharge at springs. Finally, the vast majority (82-95%) of Heilongtan spring water is recharged from Reservoir C. The threshold of rainfall required to trigger the rapid replenishment from Reservoir E to Reservoir C is relatively high. Moreover, the discharge from Reservoir C is characterized by sharp increase and decrease. The above characteristics cause uneven temporal and spatial distribution of karst groundwater, which can lead to the dry-up of springs. The research findings provide a reference for applying the hysteretic reservoir model to the simulation of karstic dried-up springs and help to understand the hydrological process of this type of karst system.

Key words karst spring, reservoir model, hysteretic discharge, hydrological process, Heilongtan

(编辑 张玲 杨杨)