

河流峡谷区地下水温度异常特征分析

周志芳, 王锦国

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 河流峡谷地区特有的地形地貌、地质特征等自然、地质条件使得这些地区的地下水温度场表现出了异常的现象。以金沙江上游溪洛渡水电站峡谷区为例, 采用数值模拟、类比和回归等方法对电站峡谷区地下水温度场作了系统的分析, 探讨了河流峡谷区地下水温度场异常的机理, 实例分析表明: 溪洛渡峡谷区地下水温度异常是由于区域循环地下水流经过深部加热后在排泄处表现出来的正常现象, 并非活动构造形成的, 在该区选址建坝是可行的。

关键词: 河流峡谷区; 地下水温度场; 区域水流; 数值模拟

中图分类号: P 641.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2003)01-062-05

我国大、中型水利水电工程大多兴建在峡谷地区的河流上, 其工程前期勘测工作中发现, 河流峡谷地区一定深度范围内钻孔揭露有热水或温水, 如隔河岩水电站坝址区、彭水水电站坝址区、万家寨水电站坝址区和溪洛渡水电站坝址区等。查清河流峡谷区地下水温度场异常的原因, 正确认识和评价这些工程区地下水温度的异常, 将直接关系到工程的选址和具体实施, 对工程的安全建设有非常重要的意义。此外, 由于地热能开发的需要, 也要求对地下水温度场分布规律进行分析。

地球内部的热量, 通过对流、传导和辐射等多种形式, 传导至地壳而形成不同性质的水温场。水温场与地温场的温度, 在地壳浅部一般相差 1~3, 在深部, 两种温度接近一致^[1]。在河流峡谷地区, 由于其特有的地形地貌、地质特征等自然、地质条件, 这些地区的地下水温度场表现出了异常的现象。本文以金沙江上游溪洛渡水电站峡谷区为例, 探讨了河流峡谷区地下水温度场异常特征。

1 溪洛渡峡谷区地质概况

溪洛渡水电站峡谷区位于雷波-永善菱形盆地的中部, 其地质单元如图 1 所示。坝区出露地层, 主要为二迭系上统峨眉山玄武岩 (P_{2-14}), 峨眉山玄武岩底部有一层海陆交互的泥页岩沉积层 (P_{2-n}), 一般厚度为 2~3 m, 部分地段缺失。在峡谷进口段的河床谷底分布有二迭系下统上段茅口组新灰岩 (P_{1m}), 两岸谷肩残留有部分二迭系上统宣威组砂页岩 (P_{2x}), 各层层间均为假整合接触。第四系不同成因的松散堆积物不整合于上述基岩之上。坝址附近两岸谷肩出露基岩玄武岩, 总厚度达 490~520 m。

从构造上看, 溪洛渡峡谷区位于雷波-永善构造盆地。盆地内在次一级褶皱影响下分为东北侧的马湖向斜盆地和南部的永盛向斜盆地, 其间是竹叶坪背斜隆起。竹叶坪背斜隆起构筑成雷波-永善菱形盆地地表水和地下水的分水岭, 将马湖向斜盆地和永盛向斜盆地分为构造上相对封闭、水文地质体系相对独立的两个次一级水文地质单元 (图 1)。溪洛渡水电站即位于永盛向斜之西翼, 系一总体倾向东南的似

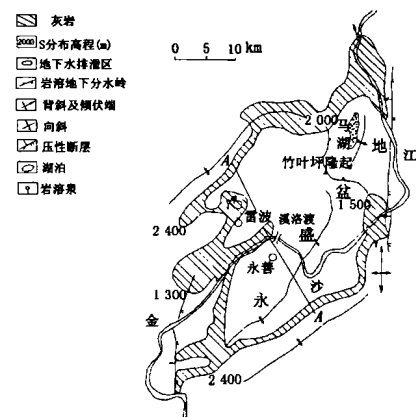


图 1 雷波-永善水文地质单元

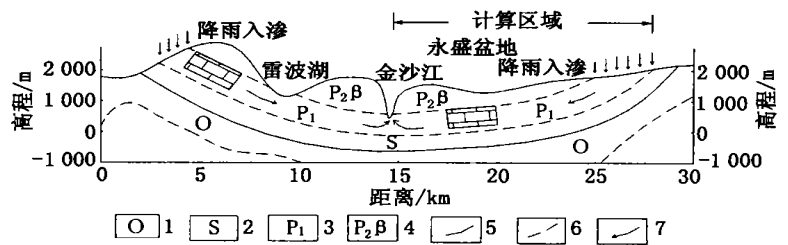
Fig. 1 Outline of hydrogeological unit in the Leibo-Yongshan region

收稿日期: 2001-11-28; 修订日期: 2002-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目 (50239070); 国家自然科学基金资助项目 (50179010); 河海大学院士基金资助项目

作者简介: 周志芳 (1962-), 男, 江苏丹阳人, 教授, 主要从事地下水运动与模拟方面的研究。

层状玄武岩组成的单斜构造。从水电站坝区地质、水文地质勘探成果分析,溪洛渡峡谷区发育有两个既相互独立,又相互联系的地下水流系统,即区域地下水流系统和局部地下水流系统。区域地下水流系统地下水由永盛盆地边缘阳新灰岩(P_1m)出露处得到补给,顺阳新灰岩经深循环流向排泄区——金沙江灰岩出露段(图 2)。其水循环深度大,循环周期长,水量少,温度一般较局部水流高。而局部水流循环周期短、水量大、水循环活跃,主要受降雨、江水控制。因此,该地区地下水的许多物理、化学特性和地下水的动态特征表现为局部水流的特点,但在个别裂隙连通性差的部位又表现为区域水流的特点,两种水流及其混合物共存,表现出水的温度变化无常的现象。



1. 奥陶系; 2. 志留系; 3. 阳新灰岩; 4. 峨眉山玄武岩;
5. 地层界线; 6. 地层假整合界线; 7. 水流方向

图 2 区域地下水流运动模型示意(A-A剖面)

Fig. 2 Profile of regional groundwater flow in Yongshan basin

2 地下水温度分布特征

溪洛渡峡谷区所处的永盛向斜盆地,据其地层、构造特点,盆地内无规模较大的深大断裂,向斜盆地内相对透水的阳新灰岩深埋于盆地下部 1000 余 m。因此,盆地中具有良好的热储和保温条件。由于该地区特定的地形、地质条件,在局部地下水流影响下,钻孔在灰岩中某些部位分别揭示出冷水(< 20)、温水($20 \sim 37$)和热水(> 37) 3 种类型的地下水,反映出地下水温度场的复杂性。

2.1 区域地下水温度分布特征

为了了解区域地下水温度的分布特征,采用边界元-有限分析耦合法对区域水流-温度场进行了模拟计算^[2]。以金沙江为对称轴,取盆地一半的 P_1 灰岩作为研究对象(图 2),计算得到温度等值线如图 3。

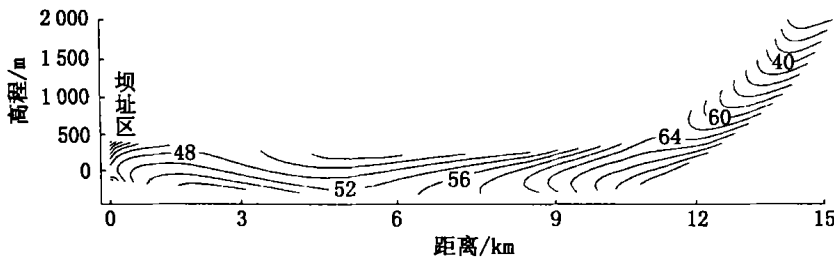


图 3 地下水温度等值线(温度单位:)

Fig. 3 Groundwater temperature isotherm line

溪洛渡水电站峡谷区位于向斜盆地的中部,处于区域地下水流的排泄区。从等值线图可以看出,灰岩深部地下水最高温度达到 80 ;区域地下水从盆地的边缘接受补给,经过深部的加温后流向排泄区,在溪洛渡水电站坝区表现出水温偏高的现象。由于金沙江的江水与深部灰岩地下水水力联系差,因此,坝区附近深部灰岩地

2.2 井(孔)水温分布特征

溪洛渡峡谷区共有 20 余个钻孔进行了地下水测温。从地下水温度随深度变化曲线看,可分为 5 种类型。在地质条件类似的其它地区,如江垭、彭水、乌江渡等也都出现过类似的曲线类型^[3](表 1)。

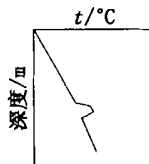
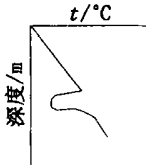
溪洛渡峡谷区两个深孔 SX71 和 SX70 作了温度测量。由测温资料可以知道, SX70 孔在 340 m 深度内, SX71 孔在 250 m 深度内都有几个“尖峰”状异常。这些尖峰状异常位置对应部位钻孔围岩的裂隙较发育,井温受这些裂隙中的地下水活动影响较大。一般“尖峰”状的凹处对应于地下冷水出露点;显著凸处对应于地下热水涌出点。SX70 孔在 40~60 m 井段内、SX71 孔在 30~80 m 井段内各曲线均有一“尖峰”状异常,这主要受钻探过程中循环液渗入的影响所致。依据 SX70 孔的 8 次测温温度值回归(图 4(a)),得曲线方程为

$$T = 2.68334 \ln Dh + 14.69 \quad (1)$$

式中 T 为温度, ; Dh 为埋深, m。曲线呈 B 型, 即对数曲线, 表明局部地下水流在 SX70 孔处对地下水温度的影响深度较大。

表 1 某些水温曲线类型及形成机理

Table 1 Curve types of water temperature and their forming mechanisms

序号	曲线名称	曲线图形	代表性地点及钻孔	形成机理
A	直线型	图略	法国特里约 P8、P11 孔(旱季); 窄巷口 44 号孔(枯季); 溪洛渡 X22 孔、SX71 孔	冷水地温场多见, 符合一般地温增温率曲线
B	抛物线型	图略	江垭 Z16、Z20 孔; 窄巷口 37 号孔(枯季); 溪洛渡 X62 孔、SX70 孔	上部曲线符合一般增温率曲线, 下部遇温度较稳定的热源
C	指数曲线型	图略	溪洛渡 X40 孔、X69 孔	上部曲线符合一般增温率曲线, 下部遇热水, 增温快
D	正异常型		乌江 JZ14 孔; 溪洛渡 X45 孔	在正常曲线中出现正异常, 说明有岩溶溶隙, 地下水对流快, 补给水温度高
E	负异常型		窄巷口 43、45 号孔(枯季); 法国特里约 P8、P11 孔(雨季); 溪洛渡 X59 孔	在正常曲线中出现负异常, 说明有岩溶溶隙, 地下水对流快, 补给水温度低

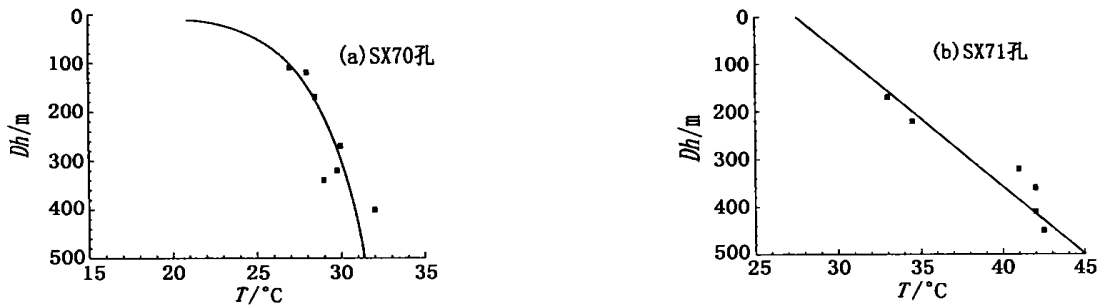


图 4 钻孔温度随深度回归曲线

Fig. 4 Regression curves of temperature along with depth in borehole

SX71 钻孔具有与 SX70 钻孔不一致的温度变化规律。依据 SX71 孔 7 次测温温度值回归(图 4(b)), 得到的方程为

$$T = 0.03707 Dh + 27.51 \quad (2)$$

曲线为 A 型, 即为斜直线, 显示深部地下水温度在同一孔深处明显大于 SX70 孔, 表明局部地下水流在孔 SX71 处较 SX70 处对地下水温度的影响明显降低。反映出 SX71 孔深部温度代表了真实区域地下水流在坝址区的温度。SX70 和 SX71 两孔温度曲线的差异同时与该处灰岩的埋藏条件是相对应的。SX70 处近河谷灰岩出露段, 局部地下水流的径流条件显然优于 SX71。此外, 通过对我国部分地区钻孔地下水井温曲线回归并与溪洛渡坝区回归曲线对比(表 2)可以看出, 溪洛渡和彭水地下水温度异常较为明显。

表2 我国部分岩溶地区水温曲线回归式

Table 2 Regression formulas of water temperature curves in some karst regions of China

工程名称	灰岩	孔号	最高水温 /	最低水温 /	回归式	相关系数 r
窄巷子 (P ₁ 灰岩)	坝址左岸	37	17.1	12.8	$Y = 12.73 + 0.13 - 0.0014X^2 + 0.0000056X^3$	0.979
	窄巷子右岸	新21	20.3	18.3	$Y = 19.56 - 0.05X + 0.00068X^2 - 0.0000022X^3$	0.966
	坝址左岸	37	17.3	13.7	$Y = 13.4 + 0.68X + 0.00009X^2 - 0.0000047X^3$	0.996
	坝址左岸	43	21.8	17.0	$Y = 16.7\exp 1.55X$	0.963
		45	22.4	17.3	$Y = 17.32 + 0.03X + 0.00057X^2 - 0.0000029X^3$	0.921
隔河岩 (I灰岩)	坝址	157	22.4	17.3	$Y = 22.77 + 1.86X - 0.12X^2 - 8.3X^3$	0.913
	坝址	154	40.0	22.3	$Y = 7.2X^{0.19}$	0.983
彭水 (O ₂ 灰岩)	坝址右岸	H40	27.8	20.0	$Y = 21.4 + 0.1X$	0.995
	坝址右岸	H25			$Y = 19.27\exp 3.3X$	0.930
	坝址右岸	D1	58.0	27.2	$Y = 18X^{0.0068}$	0.966
	坝址右岸	D9	10.15	9.15	$Y = 27\exp 0.012X$	0.977
万家寨 (O灰岩)	右岸	CK06	10.5	16.5	$Y = 2.53X^{0.24}$	0.992
	右岸	CK09	14.9	10.65	$Y = 15.65 + 0.006X$	0.950
	右岸	CK08	27.2	24.5	$Y = 7.8 + 0.016X$	0.972
阿岗 (P _{1m} 灰岩)	左岸	2(上)			$Y = 23.4 + 0.11X + 0.000014X^2$	0.985
		2(下)			$Y = 1 / (0.041 - (0.26 / X))$	0.962
溪洛渡 (P _{1m} 灰岩)	坝址左岸	SX70	32.5	27.0	$Y = 2.68334\ln X + 14.69$	0.883
	坝址左岸	SX71	42.4	33.0	$Y = 0.03707X + 27.51$	0.933

注: Y 为温度, ; X 为埋深, m。

3 影响地下水温度异常的主要因素

溪洛渡峡谷区揭示了在地壳浅部几十米至数百米范围内地下水温度场的分布特征。通过对地下水流系统分析可知,影响地下水温度场的因素主要有地层岩性、地质构造、地形、降水及地下水的活动等。以下就这几方面的情况作具体分析。

3.1 岩性及岩层组合

在溪洛渡水电站峡谷区,低传导的 P_{2n} 砂页岩层(导热系数为 0.8 ~ 2.1 W/m·k)覆盖在高温传导的石灰岩(导热系数为 1.7 ~ 3.1 W/m·k)之上,使 P_{2n} 层构成为相对隔温的覆盖层,这样由地下深处来的热量一般不易很快散失,而聚积在 P_{2n} 层底部的石灰岩之中。说明岩性对地温分布有一定的影响,尤其是 P_{2n} 层对产生较高温度的区域地下水流有着重要的影响,它一方面起着灰岩顶板隔水层的作用,另一方面又对灰岩区域地下水流起着相对隔温层的作用。

3.2 地形与降水

通过对 SX70、SX71 两孔地下水温度随深度回归曲线(图 4)的分析可知,降水及气温对地下水温度分布的影响多反映在 40 ~ 60 m 的深度。在金沙江两岸有 50 ~ 60 m 范围内的卸荷带岩石风化破碎,降水直接渗入到地下,并形成径流,对此范围内的地温起着降温作用,但随着深度的增加,这种作用也将逐渐减弱。另外,在坝址区河谷切割深,地形起伏较大,有利于产生侧向散热,对地温分布也产生一定的影响。地下低地温的形成应是地形、降水入渗、地下水径流及构造破碎综合作用的结果,这种影响随着深度的增加逐渐减小。当达到一定深度时,上述因素的影响将会消失。河床下部出现高温的原因,是从深部来的区域地下水流至河床底部排泄,与局部地下水相混合,总体上增加了该区的地下水温度。

3.3 地质构造

一般区域地质构造对地温的分布起着较大的控制作用^[4]。虽然溪洛渡峡谷区乃至整个永盛盆地不存在大的构造断裂,但永盛构造盆地及其独特的地层组合为盆地阳新灰岩产生、贮存热量创造了良好的地质环境。就坝区而言,裂隙构造对地温局部分布有着较大的影响。凡有井温突变的地方,大多是出现承压水或该点(段)岩石

破碎、有裂隙或出水点。这些现象是与节理裂隙构造分不开的。一般破碎岩石透水性好，这就为地下水在其间的活动提供了良好的通道。

3.4 地下水活动

地下水下渗降低岩温，渗透条件越好，岩温降低越大，影响越深，形成低温带；相反，当上部低渗透率地层覆盖时，深部热水顺破碎带或断层上涌至浅部或地表，从而形成高温带。这两种情况一般温梯度均较低。溪洛渡坝区深部地下水温度异常，热源主要源于深部区域地下水流。因此坝址区附近地下水温度场不同于正常的地温场，地温随着深度的变化曲线也反映出浅部温度增长快、梯度大，深部增长慢、梯度小的特点。因为浅部是地表水、局部地下水(低温)向区域地下水流过渡带，由于两种水流天然温差大，势必造成浅部地下水温度梯度较大。在深部，地表水、局部地下水流影响逐渐减弱，地下水温度体现出来自深循环区域水流自身应有的温度，地下水温度较为均匀，故梯度小。因此地下水活动是决定峡谷区地下水温度分布的最主要的因素之一。

4 结 论

通过对溪洛渡水电站峡谷区地下水温度场的分布特征、成因及其影响因素的分析可知，该峡谷区深部地下水温度异常，主要受区域地下水流的控制。峡谷区山高谷深，在特定的地质构造条件下，区域地下水经过岩体深部加温，在排泄区与局部地下水流相混合，表现出了变化无常的现象。地下水的活动强弱是决定峡谷区地下水温度分布的最主要的因素，局部水流循环周期短、水量大、水循环活跃，因此地下水的温度特征主要表现为局部水流的特点，但在个别裂隙连通性差的部位又表现为区域水流的特点。区域地下水流通过岩体深部裂隙、溶隙经深循环流至排泄区，局部地下水流通过相互连通的裂隙、溶隙与区域地下水流产生联系，共同影响溪洛渡峡谷区的温度场。溪洛渡峡谷区地下水温度异常是由于区域深循环地下水流经过深部加温后在排泄处表现出来的正常现象，并非活动构造形成该现象，因此在该峡谷区选址建坝是可行的。

参考文献：

- [1] 王 钧. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京:地震出版社,1990. 59 - 63.
- [2] 王锦国,周志芳,金忠青. 地下水热量运移模拟的 BEM-FAM 耦合法[J]. 水利学报, 2001, 46 (5) :71 - 76.
- [3] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京:水利电力出版社, 1994. 101 - 102.
- [4] 彭汉兴. 河谷工程地质问题[M]. 南京:河海大学出版社, 1993. 27.

Abnormal characteristics analysis of groundwater temperature field in canyon areas^{*}

ZHOU Zhi-fang, WANG Jin-guo

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The groundwater temperature field shows some abnormal phenomena due to special topographic and geomorphic conditions and geologic characteristics in canyon areas. Taking groundwater temperature field in canyon areas at Xiluodu hydroplant as an example, the groundwater temperature field is analyzed systematically through the numerical simulation, the analogy and the regression analysis method. And then, the abnormal mechanism of groundwater temperature field in canyon areas is discussed. From the examples analysis, it is concluded that as region groundwater flow in deep circulation is warmed through deep parts, the abnormality of the groundwater temperature in Xiluodu canyon areas is normal phenomena displayed in drainage region. It is not made by active tectonics. Therefore, the dam location selected in here is feasible.

Key words : canyon areas; groundwater temperature field; regional flow; numerical simulation

^{*} The project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50179010).