

文章编号: 1001-1986(2005)05-0054-04

关中地区地下热水的分类

马致远, 范基娇, 牛光亮, 徐迎东

(长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 环境同位素研究结果表明, 研究区地热水为大气降水成因。根据降水补给的年代及混合程度可将地下热水分为主要由现代大气降水补给的混合型地下热水; 由现代大气降水和古代降水补给的混合型地下热水; 主要由古代大气降水补给的深部循环型地下热水。

关键词: 地下热水; 环境同位素; 大气降水; 关中地区

中图分类号: P314.1 **文献标识码:** A

Classification of thermal water in Guanzhong Area, Shaanxi Province

MA Zhi-yuan, FANG Ji-jiao, NIU Guang-liang

(School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The meteoric origin of geothermal water in study area is evidenced by its environmental isotope composition. The geothermal water can be classified into three categories based on the time when replenishment take place and mixing extent with normal groundwater which are: geothermal water mixing with normal groundwater recharged mainly by the modern meteoric water; geothermal water mixing with normal groundwater water recharged by both ancient and modern meteoric water; deep-runoff geothermal water recharged mainly by ancient meteoric water.

Key words: geothermal water; environmental isotope; precipitation; Guanzhong Area;

1 热储层的埋藏分布

陕西关中地区在地质构造上属渭河断陷, 区内构造断裂对研究区地下热水的形成与分布起着控制作用。根据地下热水的埋藏分布特征, 可将区内地下热储分为层状热储和带状热储。地下热水可分为赋存在层状热储区的热水和带状热储区的热水。

大气降水和地下水通过断裂破碎带经深循环加热形成的地下热水, 又储存于断裂破碎带及其周围的裂隙中, 形成带状热储区。根据关中地下热水的赋存条件, 可将带状热储分为3类^[1]:

a. 秦岭山前断裂热储带 沿秦岭山前断裂形成地热异常带, 该带地下热水的天然露头有蓝田东汤峪温泉和眉县西汤峪温泉, 它们出露于中下元古界变质岩中, 水温50~70℃。

b. 临潼—长安断裂热储带 沿临潼—长安断裂由西南到东北分布有东大、西北饭店、毛西村等地的热水井, 水温43~57℃, 东段与骊山山前断裂相交。该带地下热水的天然露头有临潼华清池温泉, 它出露于太古界变质岩中, 水温41~45℃。

c. 渭河断裂热储带 沿渭河断裂带分布, 此带热水出露于第四系冲积层或黄土层中。沿该断裂

带分布有蔡家坡泉、马跑泉、老雅泉等, 水温20~26℃。当地下热水通过断裂带沿各热储层作水平运动并赋存于其中时, 则形成了层状热储区。

层状热储区也可分为3类:

a. 奥陶系碳酸盐岩岩溶热储层 埋藏分布于渭河以北。岩溶热水的天然露头有筛珠洞泉、龙岩寺泉、温汤泉等, 水温26~45℃。

b. 第三系松散半松散岩类裂隙孔隙热储层 是西安城区和咸阳、兴平一带的主要热储层, 热水温度55~70℃。

c. 第四系松散岩类孔隙热储层 主要为下更新统粗粒沉积物。地下热水主要分布在长安县的东大、子午镇、西留堡和纺织城区。水温59~70℃。

2 地下热水的补给来源

将研究区各类水体 δD ~ $\delta^{18}\text{O}$ 关系列入表1和图1。在图1中, 地表水、地下水, 包括浅层冷水和深层冷水以及不同温度的各类地下热水的样点均沿关中大气降水线呈平行排列, 地热水具有现代大气降水的H、O同位素组成特征。然而, 不同出露地点和构造部位的地下热水稳定同位素组成又各自不同, 显示其具有不同的补给水源和补给年代。

收稿日期: 2005-04-01

基金项目: 中国地质调查局地质调查(鄂尔多斯盆地地下水勘查)项目(编号: 121201013302)

作者简介: 马致远(1956—), 女, 云南昆明人, 长安大学环境工程与科学学院副教授, 从事水资源与环境的教学与科研。

表1 地下热水的环境同位素组成

Table 1 Environmental isotopes composition in underground thermal water

编号	位置	井深/m	含水岩组	水温/℃	¹⁴ C/a	ΔD/‰	δ ¹⁸ O/‰	TU
1	临潼陆军疗养院	865.00	第三系砂砾岩	44~46		-80.82	-10.70	
2	临潼空军疗养院	732	第三系砂砾岩	44		-78.10	-10.76	
3	临潼四一七医院	1 160	第三系砂砾岩	47		-75.20	-10.44	
						-71.70	-9.98	
4	临潼华清池温泉	地表	太古界变质岩	43	5 176±87	-74.30	-10.59	31.53±4.65
						-72.90	-10.32	
						-88.50	-12.04	
5	长安县东大乡北渔场南头	497.50	第四系更新统砂砾石	56~70	14 461±257	-89.20	-12.10	12.63±3.86
						-86.25	-11.91	
						-86.12	-11.94	
6	长安县东大乡北大2号井	270	第四系更新统砂砾石	42	1 991.9	-88.10	-12.11	
						-83.70	-11.90	
7	长安西留堡	514.54	第四系更新统砂砾石	68	13 300±480	-86.97	-12.02	7.0
						-82.78	-11.95	
8	长安县子午镇	356	第四系更新统	50	1 991.6	-87.80	-12.08	
						-86.20	-11.94	
9	西安市工人疗养院	1 500.00	第三系砂砾岩	56	18 211±787	-88.40	-12.01	15.49±3.73
						-86.32	-12.05	
						-86.65	-11.99	
10	西北第一印染厂	600.00	第三系砂砾岩	31		-84.80	-11.63	
11	长安西北饭店	1 556.00	第三系砂砾岩	56		-87.30	-11.97	
12	眉县西汤峪泉	地表	元古界下宽坪组	56		-91.50	-12.60	
						-91.90	-12.63	
13	眉县西汤峪森林公园	279.50	元古界下宽坪组片岩夹大理岩、花岗岩	63~70		-93.70	-12.71	
						-88.06	-12.24	
14	眉县西汤峪疗养院	256	元古界下宽坪组			-84.4	-11.52	
						-89.10	-12.00	
15	蓝田东汤峪2号井	627.12	元古界宽坪组变质岩	53~57		-85.94	-11.86	
						-84.10	-11.94	
16	蓝田县东汤峪温泉		元古界下宽坪组	44		-82.00	-11.33	
17	泾阳筛珠洞泉	地表	奥陶系灰岩	21		-67.38	-10.27	
18	兴平县东关		第三系砂砾岩	60		-85.00	-11.63	
19	户县太平口饮水井	156	第四系松散层	21		-63.30	-9.28	
20	户县太平口饮水井	156	第四系松散层	21		-75.40	-10.72	
21	户县太平口饮水井	156	第四系松散层	21		-68.15	-9.61	
22	户县太平口饮水井	156	第四系松散层	21		-68.70	-9.60	
23	户县太平口饮水井	156	第四系松散层	21		-68.24	-9.59	
24	临潼骊山遇仙桥泉	0	太古界变质岩	20		-65.8	-9.41	
25	临潼骊山遇仙桥泉	0	太古界变质岩	20		-64.80	-9.31	
26	临潼骊山遇仙桥泉	0	太古界变质岩	20		-65.80	-9.05	
27	临潼骊山遇仙桥泉	0	太古界变质岩	20		-63.66	-9.07	
28	渭北东王瀵泉	0	古生代奥陶灰岩	40		-74.20	-10.33	3±1
29	渭北东王瀵泉	0	生代奥陶灰岩	38		-72.20	-10.52	3±1
30	渭北袁家坡泉	0	古生代奥陶灰岩	32		-73.4	-10.26	
31	渭北温汤泉	0	古生代奥陶灰岩	40		-71.71	-10.70	

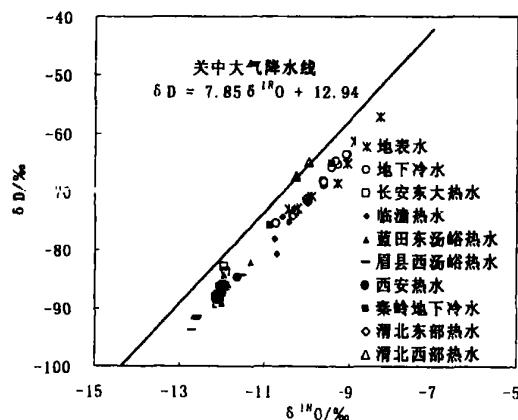
图1 各类水体的 δD — $\delta^{18}\text{O}$ 关系图

Fig. 1 The relationship between δD and $\delta^{18}\text{O}$ values of precipitation, surface water, normal temperature groundwater and hydrothermal water

其中, 渭北西部热水点压在大气降水线上(图1), 显示渭北西部热水与现代大气降水密切相关。渭北西部岩溶热水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $-67.38\text{‰} \sim -64.88\text{‰}$ 和 $-10.27\text{‰} \sim -9.96\text{‰}$, 与渭北黄土地区浅层潜水和北部岩溶裸露区地表水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值相似。由此推测, 渭北西部岩溶热水接受北部岩溶裸露区现代大气降水的补给, 流经渭河北岸活动断裂被加热, 其流程较短, 更新能力较强。

渭北东部热水偏离大气降水线, 与当地地表水重合, 表明其流程较远。根据 ^{14}C 测算, 该区热水的地下滞留时间大致为 1×10^4 a。按 δ 高程效应推算, 渭北东部热水的补给高程为 969.70 m, 对应于富平和蒲城之间的将军山、频山、金栗山和饶山碳酸岩露头区。由此推测, 渭北西部岩溶热水接受北山岩溶裸露区现代大气降水的补给, 流经渭河北岸活动断裂被加热, 在排泄区洪水期又混入了黄河、洛河地表水, 降低了岩溶热水的温度。所以, 推断渭北东部热水为古代大气降水与现代降水的混合水。

秦岭山前断裂和临潼长安断裂热储带各热水点, 如东、西汤峪、西安、长安、户县等地热水, 出露地层不论是太古代变质岩, 还是第三系、第四系松散层, 其 δ 值十分接近, 提示其补给来源相似。值得注意的是, 这些水点的氢氧同位素组成远低于当地地下水和地表水氢氧同位素值, 也远低于秦岭分水岭大气降水及地下水氢氧同位素值。这说明其补给源不是当地大气降水, 也不是秦岭北麓现代大气降水, 因为附近没有比秦岭更高的山区。“净”热水的补给时期应排除现代大气降水。根据 ^{14}C 年龄测定结果, 秦岭山前断裂和临潼长安断裂热储带各热水点地下热水形成的年龄为 13.3~28.2 ka, 此时正值

我国北方第四纪末次冰期。若按研究区以东六盘山高程效应 $-0.664\text{‰}/\text{hm}^{1/2}$ 推算, 热水补给区和排泄区平均高程应相差 1 149 m, 加上研究区的海拔高程, 推测净热水的补给为高程约在 1 800 m 以上的高山区雪水。而研究区外围的高山区, 只有地下水西部补给方向上的六盘山(海拔 2 100 m)及南部补给方向上的秦岭(最高海拔 3 767 m)。秦岭、六盘山山区的海拔高程一般都在 1 800 m 以上。可见, 研究区秦岭山前断裂和临潼长安断裂热储带的热水均为第四纪末次冰期形成的。形成期的热水同时受到来自西、南方向的秦岭六盘山山区海拔 1 800 m 以上冰川雪水的补给。其西部热水如眉县东汤峪热水, 主要受六盘山和秦岭冰川雪水的共同补给, 而中部及东部热水主要受秦岭冰川雪水的补给。

临潼热水的 δ 值偏离大气降水线, 说明临潼热水补给水源较远。临潼热水与当地地表水、地下水、秦岭地下冷水、渭北东部热水的 δ 值重合, 提示除当地地表水与地下冷水对临潼热水有大量混入外, 临潼热水通过临潼—长安断裂带接受了来自关中南部秦岭山区的地下水的补给及部分渭北东部的岩溶水的补给。此外, 临潼热水的 δ 值虽与西安、长安、户县、东西汤峪热水点的 δ 值呈直线排列, 但前者远大于后者, 表明临潼热水与西安、长安、户县、东西汤峪热水点有共同的补给水源, 又同时接受了渭北东部岩溶水、当地地表水与地下冷水大量混入。故此推断, 临潼热水主要为秦岭地下水和渭北岩溶水、当地地表水的共同补给。临潼华清池、长安东大等热水井泉的 ^{14}C 测年分别在 5×10^3 a 和 1×10^4 a 以上, 而氚值的测定分别为 31.53 ± 4.65 和 12.63 ± 3.86 。结果显示热水为现代大气降水和古水的混合补给, 放射性同位素的测定结果进一步证实了研究区地下热水为混合水的结论。

综上所述, 根据关中地区地下热水的不同补给水源和补给年代, 可将研究区热水分为:

- 现代大气降水补给的热水, 如渭北西部热水;
- 古大气降水补给的热水, 如东西汤峪、西安、长安、户县等地热水;
- 现代大气降水和古大气降水混合补给的热水, 如临潼热水和渭北东部热水。

3 热水的混合程度

研究区地下热水大多非“净”热水, 而是混合水, 其混合比例因地而异。根据同位素混合公式^[3], 冷水比例为 $(\delta_{\text{热}} - \delta_{\text{混}}) / (\delta_{\text{热}} - \delta_{\text{冷}})$ 。其中 $\delta_{\text{热}}$ 为研究

表2 各温泉及热水井冷水混合比例

Table 2 The mix proportion between normal ground water and hydrothermal water

编 号	地 点	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	冷 水 /热 水	冷 水 比 例/%
1	临潼陆军疗养院	-10.70	2.89	74.27
2	临潼空军疗养院	-10.76	2.74	73.23
3	临潼四一七医院	-10.44	3.71	78.76
4	临潼华清池温泉	-9.98	6.52	86.70
5	临潼华清池温泉	-10.59	3.20	76.17
6	华清池温泉	-10.32	4.22	80.83
7	长安县东大乡北渔场南头	-12.04	2.24	51.12
8	长安县东大乡北渔场南头	-12.10	2.10	50.09
9	长安县东大乡北渔场南头	-11.91	2.60	53.37
10	长安县东大乡北渔场南头	-11.94	2.51	52.85
11	长安县东大乡北大2号井	-12.11	2.08	49.91
12	长安县留堡	-11.90	2.63	53.54
13	长安县留堡	-12.02	2.29	51.47
14	长安县留堡	-11.95	2.48	52.68
15	长安县子午镇	-12.08	2.15	50.43
16	西安市工人疗养院	-11.94	1.26	52.85
17	西安市工人疗养院	-12.01	1.20	51.64
18	西安市工人疗养院	-12.05	1.17	50.95
19	西安市工人疗养院	-11.99	1.22	51.99
20	西北第一印染厂	-11.63	1.60	58.20
21	长安西北饭店	-11.97	1.24	52.33
22	眉县西汤峪泉	-12.60	0.78	41.45
23	眉县西汤峪森林公园	-12.63	0.76	40.93
24	眉县西汤峪森林公园	-12.71	0.72	39.55
25	眉县西汤峪森林公园	-12.24	1.01	47.67
26	眉县西汤峪疗养院	-11.52	1.74	60.10
27	蓝田东汤峪2号井	-12.00	1.21	51.81
28	蓝田东汤峪2号井	-11.86	1.34	54.23
29	蓝田东汤峪2号井	-11.94	1.26	52.85
30	蓝田县东汤峪温泉	-11.33	2.03	63.39
31	泾阳筛珠洞泉	-10.27	6.31	81.69
32	兴平县东关	-11.63	1.60	58.20
均值			57.66	

区净热水 $\delta^{18}\text{O}$ 值。在研究区的 $\text{TU}-\delta^{18}\text{O}$ 图(图2)中, 若连接热水中温度最高、 $\delta^{18}\text{O}$ 值最低的眉县东汤峪热水点A点与冷水中最接近热水的B点为直线, 与氚值为0的横坐标相交, $\delta^{18}\text{O}$ 值为-15‰, 可近似视为“净”热水氧同位素的最小值。因此 $\delta_{\text{水}}^{18}\text{O}$ 为-15‰; $\delta_{\text{水}}$ 分别采用户县、临潼、西安的地下常温水 $\delta^{18}\text{O}$ 值(表1), 将表1中热水值代入上述冷水比例式, 可得研究区各温泉及热水井冷水混合比例(表2)。表2显示, 临潼热水的冷水混入量最大, 冷水比例达73.27%~86.70%; 最小混入量的热水井泉为眉县西汤峪热水, 冷水比例为39.55%~60.10%, 平均值为57.66%, 即混合热水中一半以上为冷水混入。

地下热水的稳定同位素和水温反映了地下热水的混合程度^[4]。根据地下热水的 δD 值和水温, 可

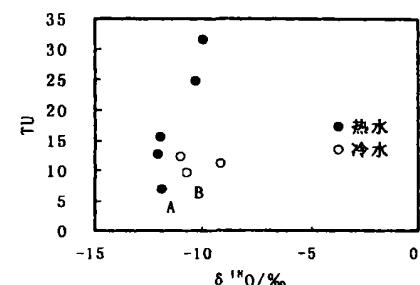
图2 热水氚(T)值与 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系图

Fig. 2 The relationship between TU and $\delta^{18}\text{O}$ in the thermal water

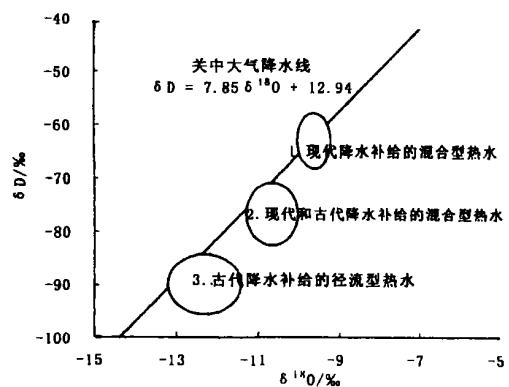


图3 关中地区地下热水分类图

Fig. 3 Classification of the geothermal water in Guanzhong Area.

将地下热水划分为3种类型: 混合型、径流型和深部热源型^[3]。混合型地热水因混入了较大量普通地下水, 其 δD 值接近当地的地下水值, 水温降至30~50℃; 径流型地热水的 δD 值普遍低于当地地下水值, 水温不超过70℃; 深部热源型地热水的 δD 值与地下水偏差很大, 水温大于80℃, 混合程度很小。

关中地区地下热水, δD 一般为-71‰~-93.70‰, 水温为31~70℃, 属混合型和径流型。其中, 渭北西部热水与现代大气降水密切相关, 其补给水源为大气降水及浅层潜水。渭北西部岩溶热水的 δD 值分别为-67.38‰~64.88‰, 与渭北黄土地区浅层潜水 δD 值相似, 水温24~45℃。由此推测, 渭河以北的岩溶热水与浅层地下水发生了混合。与此相类似的情况还有临潼热水。秦岭山前断裂东、西汤峪、西安、长安、户县各热水点的 δD 值远低于当地地下水和地表水氢氧同位素值, 也远低于秦岭分水岭大气降水及地下水的 δD 值, 水温50~70℃, 属径流型地下热水。近期钻探成井的地下热水井, 深度为1700m左右, 氢同位素组成为-85‰左右, 水温普遍在80℃以上。据此推断研究区在2000m以下可能存在径流型—深部热源型地下热水。

文章编号:1001-1986(2005)05-0058-03

网格法全局搜索土坡临界滑动面

朱益军^{1,2}, 朱向荣¹ (1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027;
2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 基于坡面网格提出了一种全局搜索土坡临界滑动面的几何优化方法。该方法较好地利用了几何优化的长处, 原理简单, 若辅以一定的经验分析, 它将能较为高效地得到土坡临界滑动面。两个计算实例表明, 该方法计算搜索结果具有较好的全局性, 并且能较好适用于一些复杂的工程土坡。

关键词: 土坡; 危险滑动面; 几何优化; 枚举法; 二分法

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

Globally finding critical surface on soil slope by grids method

ZHU Yi-jun^{1, 2}, ZHU Xiang-rong¹

(1. Geotechnical Department of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Provincial Institute of Communication Plan, Design and Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: Based on soil slope face grids, a new method is put forward to globally search critical slip face on slope. It has preferentially utilized the optimization advantages of geometrical model. Furthermore, its theory is easily intelligible. If assisted by experience analysis on some degree, it will more efficiently get the critical slip surface on soil slope. Two examples are given, their results are both of good integrity. It is applicable to some complex soil slopes.

Key word: soil slope; critical surface; geometrical optimization; enumerative method; two-division method

1 引言

土坡的危险圆弧滑动面搜索是一个非常古老但又富有活力的研究课题。长期以来, 很多学者都在该领域开展了卓有成效的工作, 并形成了变量解析法^[1~3]、几何优化法^[4]和数值优化法^[5~8]等3类。随着非线性科学理论、非连续介质理论、随机可靠性理论以及计算机技术的发展, 新的科学和技术为边坡稳定性问题的研究提供了新的途径和方法, 并呈现出了多学科的紧密融合与相互渗透。以有限元为代

表的数值分析方法为临界滑动面的安全系数分析提供了应力场; 以Monte Carlo法为代表的随机理论和以遗传算法为代表的、基于非线性的人工智能技术的引入则为非规则滑动面全局搜索提供了更为高效的算法, 临界滑动面的搜索技术得到了很大的提高^[9, 10]。因此, 能否确保计算方法的优化效率和样本的充分性是一种方法实现其工程应用效果优劣与否的技术关键。本文的目的在于提供一种半经验的、基于坡面网格的几何优化方法。

收稿日期: 2004-12-28

作者简介: 朱益军(1977—), 男, 浙江义乌人, 工程师, 浙江大学岩土工程研究所博士生, 主要从事路基防护设计、边坡工程的理论与实践研究。

4 结论

综上所述, 根据环境同位素组成和水文地质条件, 可将关中地下热水划分为3大类(图3):

第1类: 埋藏于渭河以北碳酸盐岩溶热储层中, 由现代降水补给的混合型地下热水, 如渭北西部地下热水。

第2类: 赋存于临潼—长安断裂带内和渭北碳酸盐岩溶热储层中, 由现代降水和古代降水补给的混合型地下热水, 如临潼、渭北东部热水。

第3类: 秦岭山前断裂带和临潼—长安断裂带内, 主要由古代降水补给的径流型地下热

水, 该类地下热水包括东西汤峪、西安、长安、户县热水。

参考文献

- [1] 陶书华. 西安附近地下热水的形成[J]. 水文地质与工程地质, 1996, 40(3): 6—11.
- [2] 马致远. 平凉隐伏岩溶水环境同位素研究[J]. 长安大学学报, 2003, 25(4): 60—65.
- [3] 马致远. 环境同位素地下水文学[M]. 西安: 陕西科技出版社, 2004.
- [4] Fournier, R O Rowe jj. Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot spring and wet—stream well. Am. [J]. Sci., 1996, 264: 685—697.
- [5] 徐步台, 张秋芳等. 浙江武义盆地地热水同位素地球化学研究[J]. 地球学报, 1999, 20(4): 357—361.