

江苏泰州城市规划区浅层地热能特征及其开发利用

杜建国

(江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018)

摘要:泰州地处江苏中部的长江冲积平原, 浅层地热能资源丰富。通过对该市城市规划区第四纪岩土体地质结构、水文地质条件、地温场背景等调查研究和 6 个岩土体现场热响应测试, 获取了该区域不同岩土体的热物性参数, 查明了浅层地热能的赋存条件、分布特点及规律, 评价了浅层地热能的可采资源量, 并提出了可行的开发利用方案及建议。

关键词:浅层地热能; 分布特征; 资源量; 开发利用; 城市规划区; 江苏泰州

中图分类号: P314.1; TE132.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-3636(2013)04-0657-06

0 引 言

泰州地处江苏中部、长江沿岸, 是一个快速崛起的新兴工贸城市, 常规能源贫乏, 浅层地热能是一种可再生的新型环保能源, 利用前景广阔(卫万顺等, 2010a)。

泰州市城市规划区地处长江冲积平原, 浅层地热能资源丰富, 为了能更好地、科学地开发利用浅层地热能, 在对该区已有区域地质、水文地质、工程地质等资料分析的基础上, 补充了地热地质、岩土工程地质及地热能开发利用现状等项调查, 通过钻探、现场热响应试验和室内测试研究, 查明了区域地层热物性参数、浅层地热能的赋存条件、分布特征, 估算了可利用资源量, 并进行了适宜性分区, 同时提出了可行的开发利用方案及合理的开发利用建议, 为浅层地热能可持续利用、保护和管理提供了科学依据。

1 地质背景

研究区地质构造上位于下扬子地块的苏南隆起与苏北凹陷交界部位, 主体处于苏北盆地的泰州低凸起中, 北邻溱潼凹陷, 东南有海安凹陷, 低凸起轴

向北东东, 普遍分布巨厚的古近纪地层。本区处在新生代以来的沉降地带, 前第四系地层主要有新近纪、古近纪、白垩纪以及侏罗纪地层, 200 m 以浅均为第四系松散层覆盖。区内第四纪地层发育齐全, 地层厚度大于 220 m。以新通扬运河为界, 大体可分为 2 个沉积区: 北为里下河沉积过渡区, 南为长江三角洲沉积区。

2 浅层地热能资源赋存条件

2.1 第四纪岩土体地质条件

研究区第四纪地层发育齐全, 厚度大于 220 m。本次自北往南在研究区农业园(CSK04)、海陵国土资源分局(CSK05、CSK06)、医药城(CSK03)、永胜村(CSK01、CSK02)4 个点共施工了 6 个钻孔(图 1), 其中 4 个钻孔孔深为 120 m 左右, 2 个钻孔孔深为 150 m 左右, 均未揭穿第四纪地层。从工程地质角度来看, 整个区域分为 4 个工程地质区, 由南往北分别为低河漫滩沉积工程地质区、高河漫滩沉积工程地质区、埋藏型古阶地工程地质区、潟湖相沉积工程地质区。整体上以黏土、砂层为主, 在区域上呈现由南往北黏土层增厚、砂层减少的趋势, 南部地区偶见含砾石层存在, 而北部地区则以黏土层为主, 无砾石。

收稿日期: 2013-09-10; 编辑: 陆李萍

作者简介: 杜建国(1968—), 男, 高级工程师, 地质调查及找矿专业, 主要从事地热资源勘查开发、浅层地热能应用技术研究及管理工作, E-mail: djg6841@126.com

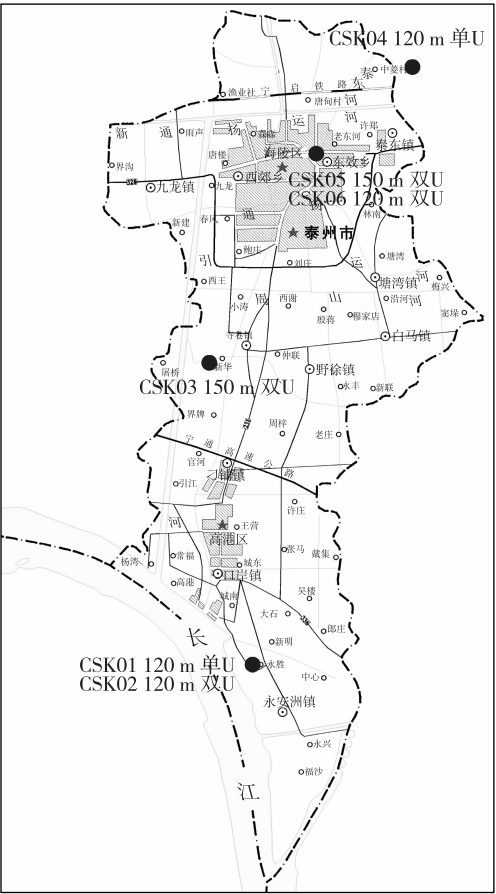


图 1 6 个测试孔分布示意图

2.2 第四纪岩土体物性条件

本次研究分别在永胜村、医药城、农业园区、海陵国土资源分局各实施岩土体热物性测试分析取样钻孔 1 个,合计送分析样品 47 件。经测试分析,区内岩土体导热系数为 $1.067 \sim 2.292 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,平均为 $1.614 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;热扩散率为 $1.23 \times 10^{-3} \sim 4.23 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$,平均为 $2.52 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ 。全区平均岩土体导热系数及热扩散率统计见表 1。从表 1 可以看出,整个区域的岩土体导热系数和热扩散率均较强,整体上呈现由南往北逐步减低的趋势,这与第四纪岩土体黏土层增厚的地质特征密切相关。

表 1 各点平均岩土体导热系数及热扩散率统计表

钻孔位置	孔深 /m	导热系数/ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	热扩散率/ $\times 10^{-3} (\text{m}^2/\text{h})$
永胜村	120	1.714	2.88
医药城	150	1.675	3.08
农业园区	120	1.515	1.90
海陵国土资源分局	150	1.496	1.84

2.3 水文地质条件

区内地下水类型主要为松散岩类孔隙水。泰州市城市规划区呈南北长条形分布,在沉积物厚度、沉积物特征、含水层结构、富水性、补给条件等各个方面都显示出南北向差异,条件较为复杂。根据沉积环境、含水层厚度、含水层岩性等将调查区分为长江三角洲沉积区和里下河沉积过渡区。以新通扬运河为界,以北为里下河沉积过渡区,以南为长江三角洲沉积区。根据地下水在含水介质中的赋存条件、形成时代、水力特征,将区内松散岩类孔隙水分为 5 个含水层组,即潜水、第 I、第 II、第 III、第 IV 承压水(表 2)。在寺巷以南地段,第 I、第 II、第 III 承压水相互连通,形成巨厚型含水层分布区。

2.4 地温场条件

本次研究利用分布在 4 个点的 6 个现场热响应测试孔对地层原始地温进行了测试,整个区域测定的不同深度原始地温在 $13.82 \sim 22.32 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,岩土体平均原始地温在 $17.9 \sim 18.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间。所有测试孔不同深度岩土体的原始温度都呈现随深度增加而温度升高的趋势。不同测试点地表下不同深度岩土体原始温度对比如图 2 所示。

3 现场热响应测试

3.1 测试原理及方案

测试根据传热学相似理论,简单模拟地源热泵空调系统夏季工况制冷(向地下排热)和冬季工况供暖(向地下排冷)的运行模式(GB 50366—2005;韩再生等,2007),通过整个试验,对该地区的水文地质状况、温度场、传热系数等进行测算、分析。测试分 2 种模式:一种是模拟地源热泵空调系统夏季制冷的运行模式,通过向地下排热获取岩土的热物性参数,测试持续时间不小于 72h;另一种模式是模拟地源热泵空调系统冬季供暖的运行模式,通过向地下排冷来获取岩土的热物性参数,测试持续时间不小于 72h。2 种工况测试过程中,为了解土壤的自我恢复能力,2 种模式测试时,中间间隔不小于 24h。具体测试原理如下:将仪器的水路循环部分与所要测试换热孔内的 PE 管路相连接,形成闭式环路,通过仪器内的微型循环水泵驱动环路内的液体按设定的流速不断循环,同时仪器内的加热器/制冷设备按设定的功率不断加热/冷却环路中的液体介质。该

表 2 泰州市城市规划区地下水类型与含水岩组划分一览表

地区	地下水类型	含水岩组				
		名称	地层时代	主要含水层岩性	顶板埋深/m	厚度/m
长江三角洲地区	潜水	潜水	Qh	粉砂、粉细砂、粉土		10 ~ 30
	承压水	第 I 承压水	Qp	含砾粗砂、中砂、细砂、粉细砂	10 ~ 50	30 ~ 50
		沿江(I + II + III)				
		第 II 承压水	Qp	含砾粗砂、细中砂、粉细砂	59 ~ 206	147
		主城区				
		第 III 承压水	Qp	含砾中粗砂、细砂、粉砂	105 ~ 130	20 ~ 40
		第 IV 承压水	N	含砾中粗砂、细砂、粉砂	120 ~ 240 220 ~ 560	20 ~ 35 10 ~ 198
里下河过渡地区	潜水	潜水	Qh	粉质黏土粉砂互层、粉土、粉砂		2 ~ 5
	承压水	第 I 承压水	Qp	粉砂、粉细砂	40 ~ 60	20 ~ 38
		第 II 承压水	Qp	中粗砂、细砂、粉砂	104 ~ 178	40 ~ 46
		第 III 承压水	Qp	中细砂、粗砂、细粉砂	160 ~ 180	< 30
		第 IV 承压水	N	中粗砂、中细砂、粉细砂	260 ~ 300	

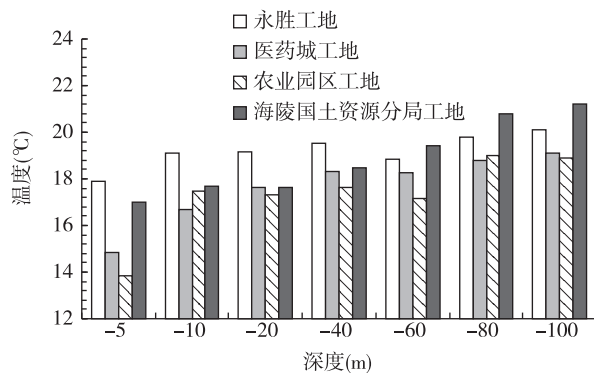


图 2 不同工地各深度岩土体原始温度对比图

闭式环路内的液体不断循环,加热器/制冷设备所产生的热量/冷量就不断通过换热孔内的换热管释放到地下。闭式环路内的液体循环过程中,将进/出仪器的温度、流量和加热器/制冷设备的加热功率/制冷参数进行适时采集记录,然后通过理论上参数的变化规律,利用专业软件来模拟计算岩土的热物性参数;同时,通过岩土的热物性参数及热响应规律分析校核岩土的热响应规律。

本次热响应测试采用大功率恒流法,并采用圆柱热源理论模型结合参数估计法来计算土壤导热系数及其他相关参数(彭清元等,2010)。其中 CSK01 和 CSK02 同在一个工地,深度相同,埋管方式不同,用来对比同一地质条件下,不同埋管方式的单位孔深换热量;CSK05 和 CSK06 同在一个工地,埋管方

式相同,深度不同,用来对比同一地质条件及埋管方式下,不同孔深的单位孔深换热量;CSK01 和 CSK04 在不同工地,孔深相同,埋管方式均为单 U,用来对比相同孔深及单 U 埋管方式下,不同地质条件的单位孔深换热量;CSK03 和 CSK05 在不同工地,孔深相同,埋管方式均为双 U,用来对比相同孔深及双 U 埋管方式下,不同地质条件的单位孔深换热量。

3.2 测试结果

由换热孔测试数据分析,该地区岩土体平均原始温度在 17.9 ~ 18.2 °C 之间。测试中综合单 U 和双 U 埋管相比,双 U 换热效果相对较好。实际工程中,需要将钻孔、管材的经济成本联合考虑,选出性价比比较高的埋管方式(表 3)。

由于单位延米换热量是在特定测试工况下得到的数据,受工况影响很大,比如流量大小介质等因素,用于埋管地源热泵系统设计时,可根据相应工况,利用安全裕量系数进行调整。靠近长江附近区域可能地下水流动性较好,换热效果可能较理想。

通过利用模拟软件进行分析,假设地层各个方向均匀分布,热量会以柱状热源为中心向四周蔓延,在距离热源中心半径越大,温度影响越小,温升幅度越小。换热孔横向影响半径在不考虑地下水径流及冷热负荷间歇作用的情况下,推荐双 U 埋管间距一般在 5 m 左右,单 U 埋管间距一般在 4.5 m 左右。所以,在钻孔场地富裕的情况下,双 U 型换热器之

表 3 换热孔测试结果一览表

名称	埋管方式	深度/m	平均能耗 /kW		岩土原始温度 /℃	埋管平均进/ 出水温度/℃		单位孔深换热量/ (W/m)	
			排热	排冷		排热	排冷	排热	排冷
CSK01	单 U	120	6.00	4.23	18.0	37.2/31.2	6.0/7.5	54.12	35.25
CSK02	双 U	120	7.76	5.74	17.9	37.4/33.9	6.2/8.7	64.70	47.83
CSK03	双 U	150	8.05	6.06	18.1	36.6/32.0	7.0/9.8	62.00	40.36
CSK04	单 U	120	6.00	4.12	18.1	38.1/32.3	5.8/7.4	53.25	34.33
CSK05	双 U	150	7.68	5.21	18.0	36.1/32.3	8.2/10.4	51.18	34.73
CSK06	双 U	120	7.28	4.34	18.2	40.2/36.4	5.6/7.1	60.33	36.16

间间距取 5 m 应该较为经济合理。纵向方向上,温度呈现一定的梯度,在换热器底部,热量向下传导的作用减小,影响范围一般是孔底向下 0.5 m 深处。

3.3 测试结果的分析研究

3.3.1 不同埋管方式的对比分析 本次测试在永胜工地布置了 CSK01 和 CSK02 两个测试孔,两孔相距 5 m,孔深均为 120 m。其中 CSK01 采用单 U 埋管方式,CSK02 采用双 U 埋管方式,经测试结果对比发现,在相同的地质条件和深度下,双 U 的换热效果明显比单 U 的换热效果高,其中排热工况下,双 U 比单 U 高出 19.5%,排冷工况下,双 U 比单 U 高出 35.7%。

3.3.2 不同埋管深度的对比分析 本次测试在海陵国土资源分局工地布置了 CSK05 和 CSK06 两个测试孔,两孔相距 5 m,均采用双 U 埋管方式,其中 CSK05 孔深为 150 m,CSK06 孔深为 120 m。从测试结果对比发现,在相同的地质条件和埋管方式下,孔深 120 m 的换热效果明显比孔深 150 m 的换热效果高,其中排热工况下,孔深 120 m 比孔深 150 m 高出 17.9%;排冷工况下,孔深 120 m 比孔深 150 m 高出 4.1%。

3.3.3 不同地质条件的对比分析 本次测试在永胜工地布置的 CSK01 孔和在农业园区布置的 CSK04 孔均采用单 U 埋管方式,孔深均为 120 m,经对比可知:在相同的孔深和埋管方式下,永胜工地的 CSK01 孔的换热效果比农业园区的 CSK04 孔的换热效果略高,其中排热工况下,永胜工地的 CSK01 孔比农业园区的 CSK04 孔高出 1.6%,排冷工况下,永胜工地的 CSK01 孔比农业园区的 CSK04 孔高出 2.7%。

在永胜工地布置的 CSK02 孔和在海陵国土资源分局布置的 CSK06 孔均采用双 U 埋管方式,孔深

均为 120 m,经对比发现,在相同的孔深和埋管方式下,永胜工地的 CSK02 孔的换热效果比海陵国土资源分局的 CSK06 孔的换热效果高,其中排热工况下,永胜工地的 CSK02 孔比海陵国土资源分局的 CSK06 孔高出 6.8%,排冷工况下,永胜工地的 CSK02 孔比海陵国土资源分局的 CSK06 孔高出 32.3%。

在医药城工地布置的 CSK03 孔和在海陵国土资源分局布置的 CSK05 孔均采用双 U 埋管方式,孔深均为 150 m。从测试结果可以看出,在相同的孔深和埋管方式下,医药城工地的 CSK03 孔的换热效果比海陵国土资源分局的 CSK05 孔的换热效果要好,其中排热工况下,医药城工地的 CSK03 孔比海陵国土资源分局的 CSK05 孔高出 21.1%;排冷工况下,医药城工地的 CSK03 孔比海陵国土资源分局的 CSK05 孔高出 16.2%。

3.4 测试结果的对比分析

通过分析对比,整个研究区换热效果均较好,但南部明显比北部地区换热效果要高,主要是由于砂层含量高和地下水含量及径流的原因,整体上呈现出由南往北换热效果逐渐减低的趋势,但总体差别不是很大。另外,双 U 的换热效果明显比单 U 的换热效果要好,建议在浅层地温(热)能开发利用工程中尽量采用双 U 的埋管方式。

4 浅层地热能资源评价

4.1 评价计算方法

计算垂直地埋管换热系统浅层地热能可开采量时采用单位换热量法,计算公式如下(DZ/T 0225—2009;卫万顺等,2010b):

$$D_q = Dn\tau \quad (1)$$

式(1)中, D_q 为评价区总地热能,kW; n 为可钻换热孔数; τ 为土地利用系数; D 为单孔地热能,kW:

$$D = K_y \Delta t L / 1\,000 \quad (2)$$

式(2)中, D 为单孔地热能,kW; K_y 为每延米换热量,W/(m·℃); Δt 为温差,℃,即为U形管内温度平均值与埋管影响范围内岩土体温度之差; L 为单孔有效换热长度,m。

4.2 计算参数的获取

根据泰州市城市规划区土地利用规划估算土地利用系数 τ 为0.22。根据现场换热测试,夏季在120 m深度分别为64.7 W和60.33 W,则设定 $K_y \Delta t L$ 为 $(64.7 + 60.33) \div 2 = 62.52$ W。

$$D_{\text{夏}} = 62.52 \times 120 \div 1\,000 = 7.50 \text{ kW}$$

冬季在120 m深度分别为47.83 W和36.16 W,则设定 $K_y \Delta t L$ 为 $(47.83 + 36.16) \div 2 = 41.99$ W。

$$D_{\text{冬}} = 41.99 \times 120 \div 1\,000 = 5.04 \text{ kW}$$

按每孔间距5 m计算,则每孔占地面积为25 m²,可钻换热孔数 $n = 428 \div 25 \times 10^6 = 17\,120\,000$ 个。

地热能提取利用系数设为32%(参照北京),开发利用时间夏季和冬季各取120天。

4.3 计算结果

夏季可开发利用功率为:

$$D_{q\text{夏}} = D_{\text{夏}} n \tau = 7.50 \times 17\,120\,000 \times 0.22 \times 0.32 = 9.04 \times 10^6 \text{ kW}$$

夏季可开发利用资源制冷量为:

$$Q_{\text{夏}} = D_{q\text{夏}} h = 9.04 \times 10^6 \times 24 \times 120 = 2.60 \times 10^{10} \text{ kWh}$$

冬季可开发利用功率为:

$$D_{q\text{冬}} = D_{\text{冬}} n \tau = 5.04 \times 17\,120\,000 \times 0.22 \times 0.32 = 6.07 \times 10^6 \text{ kW}$$

冬季可开发利用资源制热量为:

$$Q_{\text{冬}} = D_{q\text{冬}} h = 6.07 \times 10^6 \times 24 \times 120 = 1.75 \times 10^{10} \text{ kWh}$$

以120 m深孔计算的可开采量见表4所示。

表4 研究区可开发利用浅层地热能资源量表(120 m以浅)

面积 /km ²	可利用功率/kW		可利用量/kWh	
	夏季	冬季	夏季	冬季
428	9.04×10^6	6.07×10^6	2.60×10^{10}	1.75×10^{10}

如果以夏季100 W/m²、冬季80 W/m²负荷计

算,则泰州市城市规划区浅层地热能可供暖服务面积 7.59×10^7 m²,可制冷服务面积 9.04×10^7 m²。

4.4 环境效应评价

泰州城市规划区可开发利用的浅层地热能每年达到 4.35×10^{10} kWh,按照推荐的地热利用节能减排估算(GB/T 11615—2010),相当于5 352 kt标煤完全燃烧所释放的能量。如被充分利用,可减少排放二氧化碳12 769.87 kt、二氧化硫90.98 kt、氮氧化物32.11 kt、粉尘42.82 kt;减少煤灰渣等固体废物排放5.35 kt。即使按其10%的开发利用量,仍具有显著的节能减排效应。

5 浅层地热能开发利用建议

(1) 泰州市夏季制冷和冬季供暖时间基本相当,非常适合浅层地热能开发利用。以120 m以浅计算,泰州市城市规划区可合理开发利用的浅层地热能每年将达到 4.35×10^{10} kWh,而根据调查情况表明,目前仅有医药城和第四人民医院进行了浅层地热能开发利用。医药城、滨江新城、农业园区有大量在建、拟建的工程,非常适宜进行浅层地热能开发利用。浅层地热能开发利用率的提高,也有助于泰州市节能减排指标的实现。

(2) 泰州市城市规划区地层可钻性强,换热效果好,非常适合利用垂直地埋管地源热泵进行浅层地热能开发利用。垂直地埋管建议采用双U埋管方式,口径为25 mm或32 mm,深度控制在80~120 m,视工程的场地情况而定,一般宜在100 m深度,能取得较好的换热效果和性价比。

(3) 鉴于苏锡常地区开采地下水而引发的地质灾害先例,以及地下水回灌存在的技术难题,结合泰州市城市规划区的地下水特征和泰州市城区已有地面沉降的实际情况,不推荐使用水源热泵方式来进行浅层地热能开发利用。

(4) 泰州市浅层地热能开发利用率较低,需要加大宣传力度,制定相关的政策措施来规划、规范、引导、支持浅层地热能开发利用。

6 结 论

(1) 泰州市城市规划区浅层地热能资源潜力巨大,夏季可利用量达 2.60×10^{10} kWh,冬季可利用量

1.75×10^{10} kWh。利用浅层地热能可供暖面积为 7.59×10^7 m², 可制冷面积 9.04×10^7 m²。

(2) 泰州市城市规划区地质条件好, 地层可钻性强, 换热效果佳, 非常适合利用垂直埋管地源热泵系统进行浅层地热能的开发利用, 工程初投资成本低, 具有明显的开发优势。

(3) 泰州市城市规划区可开发的浅层地热能每年可达到 4.35×10^{10} kWh, 相当于 5 352 kt 标煤完全燃烧所释放的能量。如被充分利用, 可减少排放二氧化碳 12 769.87 kt、二氧化硫 90.98 kt、氮氧化物 32.11 kt、粉尘 42.82 kt。节能减排效益明显。

(4) 泰州市城市规划区可开发利用的浅层地热能资源量巨大, 但目前开发程度相对较低, 建议加大

开发力度。

参考文献:

- DZ/T 0225—2009, 浅层地热能勘查评价规范[S].
GB 50366—2005, 地源热泵系统工程技术规范[S].
GB/T 11615—2010, 地热资源地质勘查规范[S].
韩再生, 冉伟彦. 2007. 城市地区浅层地温能评价方法探讨[J]. 城市地质, 2(4): 9—15.
彭清元, 常桂钦, 崔文智, 等. 2010. 基于线热源理论的岩土热响应测试研究现状[J]. 节能, 29(8): 15—19.
卫万顺, 李宁波, 冉伟彦, 等. 2010a. 中国浅层地温能资源[M]. 北京: 中国大地出版社.
卫万顺, 李宁波, 冉伟彦, 等. 2010b. 浅层地温能资源评价[M]. 北京: 中国大地出版社.

On shallow geothermal energy characteristics and its development in urban planning zone in Taizhou of Jiangsu

DU Jian-guo

(Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

Abstract: Located in alluvial plain of Yangtze River in middle Jiangsu, Taizhou City was rich in geothermal energy resource. Based on the studies of rock mass geological structures, hydrogeological conditions, geothermal field background and six rock mass site heat response test in the urban planning zone, The author obtained the thermal parameters of different rock mass, put forward some feasible plans and proposals for the development of geothermal energy.

Keywords: Shallow geothermal energy; Distribution characteristics; Resources abundance; Development and application; Urban planning zone; Taizhou, Jiangsu

世界地质奇观——元谋土林

元谋土林主要分布在云南金沙江支流龙川江西侧, 沿分支水流的河谷、冲沟的边缘分布, 其中规模较大, 发育较典型的有班果、虎跳滩(芝麻)、弯保、小雷宰、新华等土林群落, 它们的面积均在 5 km² 左右。

元谋土林是一种土状堆积物塑造、成群的柱状地貌, 因远望如林而得名。它反映了古地理变迁和地貌发育的过程。元谋土林按其成因和土柱的形态特征, 分为 4 种类型: 土芽型、古堡型、尖笋型、铁帽型。各种形态的土柱是混杂分布的, 形成了丰富多彩、风姿各异的土林奇观。土柱上分布密集的云母和石英等矿物质, 在阳光的照射下反射着灿烂的光芒, 更为土林增添了绚丽的色彩。

土林是在水流外动力地质作用下, 经历千万年的时间而形成的。土林是由千差万别的地形结构、组成物质、构造运动、水文气候、土壤团力和水动力等综合因素形成的。作为地质奇观的元谋土林景观所具有的唯一性, 就在于柱状土台形成“森林状态”的成熟性。这是其他土林景观形态难于比拟的。

马可·波罗和徐霞客等人均到访过元谋土林。徐霞客对土林描述道: “涉枯涧, 乃蹶坡上, 其坡突石, 皆金沙烨烨, 如云母堆叠, 而黄映有光, 时日渐开, 蹶其上, 如身在祥云金粟中也。”元谋土林为一种奇异的自然地理现象, 作为特殊形态的地质景观又以气势恢宏、形态多变、色彩绚丽著称于世, 应成为不可多得的一处世界级地质公园。

(晓 生 供稿)