

长江大通断面水空调适宜性分析

陆宝宏¹, 冯新月¹, 羊艳^{1,2}, 裴颖^{1,3}, 孔彦龙⁴, 沈文龙¹, 宋杨¹, 庞忠和^{4*}

1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098

2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120

3. 安徽省水利水电勘测设计研究总院有限公司, 合肥 230088

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要 以长江大通水文站断面为例, 开展长江地表水地热资源量研究。利用径流不均匀系数、Mann-Kendall法、滑动T检验法等方法, 探讨了大通站水文情势变化, 发现大通断面流量的集中期在7月上旬, 多年平均径流量为 $9.05 \times 10^{11} \text{ m}^3$; 分析了长江大通断面2004—2021年气温及水温实测资料, 发现月均最低、最高气温分别在1月与7月, 多年平均水温为 18.9°C , 水温低于 5°C 天数为1.5天, 较适宜采用容积式地表水制热/冷机组。选取11月至翌年2月为制热月份、6月至9月为制冷月份, 依据气温与水温的温差分别计算制热和制冷月份的地热资源总量分别为 $3.08 \times 10^{18} \text{ J}$ 、 $1.67 \times 10^{18} \text{ J}$; 根据水温变化控制阈值, 计算出仅大通水文站一个断面制热与制冷月份的可采地热资源量分别为 $1.28 \times 10^{17} \text{ J}$ 、 $6.71 \times 10^{17} \text{ J}$, 总的可采地热资源量相当于减排 CO_2 约16604万t。

关键词 江水源热泵; 长江大通断面; 可采资源量; 碳减排

随着人民生活水平的日益提高, 政策供暖线以南地区的人民对冬季采暖夏季供冷的需求日益增长, 导致建筑能耗不断增加。中国北方供暖主要依赖于煤炭资源, 而南方主要依靠电力采用空调系统制冷或制热。据统计, 2019年, 中国62.15%电能主要依靠碳基能源发电^[1], 而碳基能源的利用势必伴有大气污染、温室效应等系列环境问题。近年来,

中国高度重视能源结构调整, 大力发展低碳清洁可再生能源。由于地表水体会根据环境温度适时吸收或释放热能, 天然状态下地表水体吸收或释放的热能主要用于维系水体自身及其周边的生态环境。中国南方地区降水充沛, 地表水资源十分丰富, 水体本身蕴藏着巨大的潜在热能, 但对地表水体中的热能开发利用相对较少。利用地表水作为建筑制

收稿日期: 2022-10-23; 修回日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金项目(U22402181009321); 中国科学院学部咨询评议项目(2020-DX03-B-007)

作者简介: 陆宝宏, 教授, 研究方向为水文水资源, 电子信箱: lubaohong@126.com; 冯新月(共同第一作者), 博士研究生, 研究方向为水文资源, 电子信箱: fengxinyuehhu@126.com; 庞忠和(通信作者), 研究员, 研究方向为地热地质, 电子信箱: z.pang@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 陆宝宏, 冯新月, 羊艳, 等. 长江大通断面水空调适宜性分析[J]. 科技导报, 2023, 41(12): 75-85; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.008

冷/制热源,可部分替代碳基能源的利用,对中国实现“碳达峰”“碳中和”的战略目标具有重要意义。

长江作为亚洲第一长河,流域内蕴含着丰富的水热资源。江水热源/冷源是利用地表水源热泵将江水低位热源/冷源转为高位进行热源/冷源的提取^[2]。为合理开发、有效利用天然水体中的冷热资源,需对江(河)等地表水中的潜在热能资源进行科学评价,以实现地表水热能资源的可持续利用。水体作为热能的载体,水量、温度变化以及水质都影响其开发利用,因此,评价地表水体的潜在热能资源首先要分析江(河)中水量年内及年际的变化,依据其年内和年际变化规律,结合气温与水温变化规律以及水质标准有效评估江(河)中水资源蕴含的热能资源。

大通站是长江下游重要的水文站,具有较好的代表性。本研究基于该站长期水文观测资料,利用径流不均匀系数、Mann-kendall 检验、滑动 T 检验方法,探讨该站径流年内及年际变化趋势,根据该站水温和地面气温资料,估算长江大通断面的地热资源总量以及其可利用量。

1 研究区概况

长三角地区是中国人口密集、经济发展水平和城市化程度较高的地区,且地热资源较丰富,孔彦龙等已估算出地热资源总量约 782 亿 t 标准煤,可采资源量为 164.5 亿 t 标准煤(不包含地表水地热资源),这些地热资源不能满足区域碳减排的需求。

横穿长三角地区的长江下游水体是流动的地热资源,选取长江下游大通水文站断面为代表性断面进行地表水地热资源研究。大通水文站是长江干流下游最重要的水文站,位于安徽省池州市,控制流域面积占长江总流域面积的 94.7%^[3]。铜陵气象站位于安徽省铜陵市,是距大通水文站较远的国家气象观测站,观测场海拔高度 11 m;五步沟环境监测断面位于安徽省池州市贵池市,距大通站较远的国控水质考核断面(图 1)。

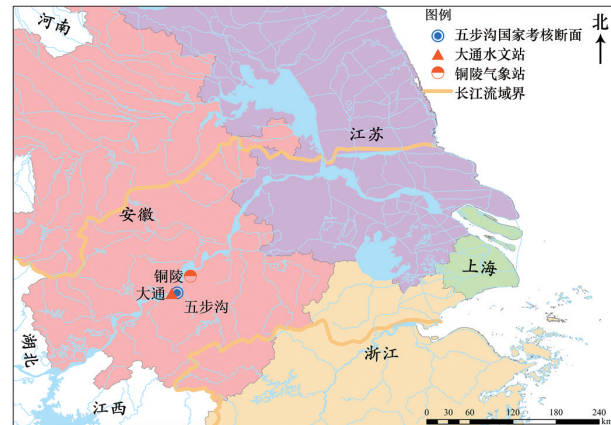


图 1 研究区位置

2 地热资源评价方法

2.1 径流评价方法

江水源的水量多少直接关系到存储热量的多寡,水量稳定均衡才能保证水源热泵系统的正常运行^[4]。因此,需要探究河流径流年内及年际变化规律,规避过多或过少安装机组所带来的损失。

长江下游流域受季风气候影响,降水多集中在夏季,径流存在年内年际分配不均。采用不均匀系数、集中度、集中期、Mann-Kendall 法、滑动 T 检验法探讨长江下游径流情势变化,有助于清晰认识长江流域径流年内及年际变化规律。

对径流整体分配特征,可采用径流分配不均匀系数^[5]表述

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{r}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (r_i - \bar{r})^2}}{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} r_i} \quad (1)$$

式中, C_v 为径流年内分配不均匀系数; σ 为径流标准差,亿 m^3 ; \bar{r} 为年内月平均径流,亿 m^3 ; r_i 为各月径流,亿 m^3 。

径流的集中度 C_n 以及集中期 D 可反映径流各时期水量变化规律^[6]。表达式为

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} r_i \sin \theta_i \quad (2)$$

$$R_y = \sum_{i=1}^{12} r_i \cos \theta_i \quad (3)$$

$$C_n = \frac{R}{w} = \frac{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}}{\sum_{i=1}^{12} r_i} \quad (4)$$

$$D = \arctan \frac{R_x}{R_y} \quad (5)$$

式中, r_i 为各月径流, 亿 m^3 ; θ_i 为第 i 月径流向量所在位置, 1 月份为 0° , 其他月份依次增加 30° ; C_n 为径流集中度, D 为径流集中期。

除分析径流年内变化趋势外, 利用 Mann-Kendall (M-K) 检验法以及滑动 T 检验等方法探讨径流年际演变规律。

1) M-K 检验。

M-K 检验^[7-9]是非参数检验方法, 不受异常值干扰, 常用于数据年际变化的趋势性分析。原假设年平均流量趋势性变化不显著。

对于 M-K 趋势检验, 在样本容量 n 的时间序列 $t_1, t_2, \dots, t_n, i, j \leq n$, 且 $i \neq j$, 检验统计量 S 计算为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(t_j - t_i) \quad (6)$$

$$\text{sign}\theta = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, S 为统计量, sign 为符号函数。

样本容量大于 10 年时, S 服从正态分布, 对 S 进行标准化, 得到

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{n(n-1)(2n+15)/18} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{n(n-1)(2n+15)/18} & S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, Z 为标准正太分布统计量, n 为样本容量。

在显著性水平 $\alpha=0.05$ 条件下, 当 $|Z| < Z_{1-\alpha/2}$ 接受假设, 趋势变化不显著, 当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 说明即时间序列存在明显上升或者下降趋势, 值越大越显著; $Z > 0$ 时是上升趋势, $Z < 0$ 时是下降趋势。

时间序列是随机独立时, 利用 M-K 突变检验对径流对突变点进行检验^[9], 对于时间序列 x_i , 构造秩序列 m_i 表示 $x_i > x_j$ ($1 \leq j < i$) 的样本累计数, 定义 d_k

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad 2 \leq k \leq n \quad (9)$$

$$m_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (10)$$

$$UF_k = (4d_k - n(n-1)) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/72} \quad (11)$$

$$UB_k = -UF_k \quad (12)$$

式中, UF_k 为标准正态分布统计量。

当 UF_k 以及 UB_k 曲线出现交点且在临界线之间, 那么交点对应的时刻为突变点时刻。

2) 滑动 T 检验。

滑动 T 检验^[10]是用来判断两组数据是否显著性突变。设两组数据样本序列为 x_1, x_2 , 其统计量为

$$T = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (13)$$

$$S = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (14)$$

式中, n_1, n_2 为样本长度, \bar{x}_1, \bar{x}_2 为样本均值, S_1, S_2 为样本方差。 S 服从自由度 $\nu=n_1+n_2-2$ 的 t 分布。若 $|T| > t_{2/\alpha}$, 则拒绝原假设, 说明存在显著性差异, 反之, 则不存在显著性差异。

2.2 水温水质评价方法

对于河流来说, 是否适合进行水热储能开发的主要影响因素有循环可利用水量、温差、水质等。江水源应符合水量充足、供水稳定, 水温与空气温度温差较大、水温符合进水口机组性能需求; 水质应符合泥沙含量低、酸碱性适中、矿化度低^[11]。

水源热泵运行性能受地表水温度影响显著, 对热泵系统起到决定性作用^[12]。Lv 等^[12-13]依据闭环地表水换热提出地表水温度下降 1°C , 性能系数 (COP) 提高 2.3%, 闭环地表水换热管长度增加 100 m, COP 提高 0.08%。Si 等^[14]利用河水源热泵机组模型得到水温每变化 1°C , COP 会变化 2%。Zou 等^[15]对湖水源热泵机组提出了简单、准确的中央空调系统能耗计算方法, 得出 1 天内的水温变化不大, 可用日均水温替代, 对于同一台机组, 采暖季进水温度越高或制冷季进水温度越低, COP 越高, 且河水比湖水更有利于提高冷水机组的能效, 在夏季/冬季, 河水较湖水 COP 平均增加 5.38%/3.28%。

因此,当水温与气温温差越大,越有利于江水热能的利用。

关于地表水地源热泵进水侧温度要求,依据《GB/T 19409—2013 水(地)源热泵机组》中规定水源的温度范围见表1。

表1 地表水机组正常工作的冷(热)源温度范围

机组类型	制冷/°C	制热/°C
容积式地表水机组	10~40	5~30
离心式地表水机组	15~35	10~30

地源热泵对于进水侧的水质要求,机组水处理要尽量采用物理方法,减少水体污染^[1],但未经处理的直接进水会有管道堵塞及冲蚀、结垢、腐蚀等问题,影响机组使用寿命与运行效果。因此,江水源热泵系统进水侧的水质越好,越有利于江水源热储能的开发与利用。

国内暂无地表水水源热泵系统的进水水质要求,由于机组对水质的要求是一致的,《GB 50366—2005 地源热泵系统工程技术规范》^[16]中对地下水水质规定:含沙量小于 1/200000, pH 值为 6.5~8.5, CaO 小于 200 mg/L, 矿化度小于 3 g/L, Cl⁻ 小于 100 mg/L, SO₄²⁻ 小于 200 mg/L, Fe²⁺ 小于 1 mg/L, H₂S 小于 0.5 mg/L。本研究将地表水基本符合《GB3838—2002 地表水环境质量标准》^[17]标准中的 II 类及以上的水质,定义为满足江水源热泵系统进水侧的水质要求。

2.3 地热资源评估方法

依据《DZ/T0225—2009 浅层地热能勘察评价规范》地下水和地表水换热功率计算公式:

$$Q_h = q_w \Delta T \rho_w C_w \times 1.16 \times 10^{-5} \quad (15)$$

式中, Q_h 为换热功率,单位 W; q_w 为地表水循环利用量, m³/d; ΔT 为可利用温差, °C; ρ_w 为水的密度,取值为 1000 kg/m³; C_w 为水的比热容,取值为 4180 J/(kg·°C)。

在地表水中流量单位为 m³/s, 将 ρ_w 、 C_w 的数据代入简化可得出地表水地热资源量计算公式:

$$Q_H = Q_h t = 4.18 \times 10^6 q_w \Delta T t \quad (16)$$

$$= 4.18 \times 10^6 W \Delta T$$

式中, Q_H 为地表水地热资源量, J; q_w 为地表水循环

利用流量, m³/s, W 为地表水循环利用水量, m³; ΔT 为利用温差, °C; t 为时间, s。

以江水源为水空调时,江水源利用时段在长江流域主要集中在夏季与冬季。假设空气温度与水温之间的差值 ΔT 能够完全被利用,则理论上大通站的地表水地热资源量总量可定义为水体可向空气中完全释放/吸收的热量。如图2所示,当空气温度大于水的温度,水体吸收大气中热量,地表水体可作为冷源;当空气温度小于水体的温度,水体向周边环境释放热量,地表水体可作为热源。

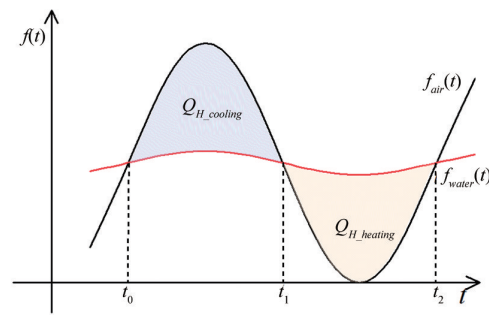


图2 地热资源量总量计算示意

$$Q_H = Q_{H_cooling} + Q_{H_heating} \quad (17)$$

$$Q_H = C \bar{q}(t) \int_{t_0}^{t_1} (f_{air}(t) - f_{water}(t)) dt + C \bar{q}(t) \int_{t_1}^{t_2} (f_{water}(t) - f_{air}(t)) dt \quad (18)$$

式中, C 为系数,取值 4.18×10^6 J/(m³·°C); $f_{air}(t)$ 、 $f_{water}(t)$ 分别为空气、水的温度函数, °C, $\bar{q}(t)$ 表示时间 t 时刻的流量, m³/s。

由于观测的气温、水温及流量为离散数据且一般南方制热/冷与气候变化规律密切相关,制热/冷月份集中在冬/夏两季,每年的变化不大,且相对固定。结合实际情况,将式(18)离散得到公式:

$$Q_H = C \left[\sum_{i=s_1}^{s_2} \bar{q}_i t_i (T_{air} - T_{water}) + \sum_{i=w_1}^{w_2} \bar{q}_i t_i (T_{water} - T_{air}) \right] \quad (19)$$

式中, T_{air} 、 T_{water} 分别为空气以及水的温度, °C; s_1 、 s_2 为制冷水空调起始与终止时间, w_1 、 w_2 为制热水空调起始与终止时间。

由于水源热泵仅利用水体中储存的热能,几乎不消耗水量,属于“取热不取水”。耗水量仅由除砂

器、过滤器等排污产生,以重庆市悦来生态城区域为例,耗水量仅占取水总量的0.04%^[18]。当江水制热/制冷后,水体总热量减少/增加,会造成河道水体产生温变。水体总热量的变化取决于取排热量与水体与周围环境的热交换。而热交换会弥补部分取排热量所造成的温度变化。《GB3838—2002地表水环境质量标准》中规定:“人为造成环境水温变化应限制在周平均最大温升 $\leq 1^\circ\text{C}$ 、周平均最大温降 $\leq 2^\circ\text{C}$ 。”^[17]江水源地热资源的最大可开采量可定义为:造成水体最大温升/温降条件下,被排入/取出的热量。

为估算长江大通站断面地热资源的最大可开采量,假定水体未与外界环境系统产生热交换,则取/排出热量会导致下游断面发生温变。假设在单位断面上水量为 W ,初始水温为 T_0 ,从中取水量为 w 的水体提取温差 ΔT_w ,排入下一断面,则下一断面的水温 T_1 依据热量平衡与水量平衡可表达为

$$C_w \rho_w W T_1 = C_w \rho_w (W - w) T_0 + C_w \rho_w w (T_0 - \Delta T_w) \quad (20)$$

$$T_0 - T_1 = \frac{w}{W} \Delta T \quad (21)$$

式中, ρ_w 为水的密度; C_w 为水的比热容; W 为单位断面水量; w 为提取水量; T_0 为上断面水温即初始水温; T_1 为下断面水温,即为热泵系统排水与河水充分混合之后的水温,二者差值即为下断面水温变化。

由式(21)可知,下断面温变与提取水量占比和可利用温差有关。依据文献[18]规定中的温升/降,下断面温升 $\leq 1^\circ\text{C}$ 、温降 $\leq 2^\circ\text{C}$ 以此来限制上断面的取水量和可利用温差。上断面提取水量占比要符合河道水资源可利用量的限制,利用温差要选取最佳温差,并不是越高越好。

忽略外界环境热交换条件下的最大地热资源可采资源量估算公式为

$$Q_{\Delta T_{\text{available}}} = C \sum_{i=s_1}^{s_2} \bar{q}_i t_i \Delta T_s + C \sum_{i=w_1}^{w_2} \bar{q}_i t_i \Delta T_w \quad (22)$$

式中, $Q_{\Delta T_{\text{available}}}$ 为最大地表水可采资源量, $J; \bar{q}_i$ 为考虑下游水温温变阈值下提取断面处流量, m^3/s ; $\Delta T_s, \Delta T_w$ 为制冷、制热时考虑下游水温温变阈值下

可利用温差, $^\circ\text{C}$ 。

计算最大地热资源可采资源量时,由于忽略与外界环境系统的热交换作用,未来可将外界环境影响因素考虑进去进一步进行数值模拟分析。

3 结果与讨论

3.1 大通站径流

利用1982—2021年的大通站月平均流量数据对大通下游的径流年内以及年际变化进行研究。将多年各月流量平均计算,得到大通站年内流量分布特征,见图3。长江干流大通断面流量在年内呈不均匀特性:7月份流量最大,为 $51398 \text{ m}^3/\text{s}$,1月份最小,为 $13083 \text{ m}^3/\text{s}$,年内不均匀性在0.35~0.64,见图4,呈现出典型的夏季流量大、冬季流量小季风气候流域径流特征。

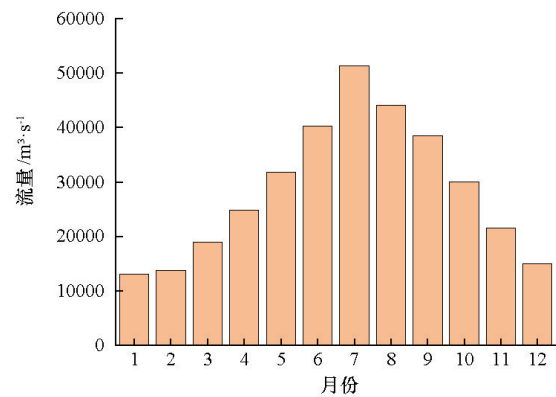


图3 大通站各月多年平均流量

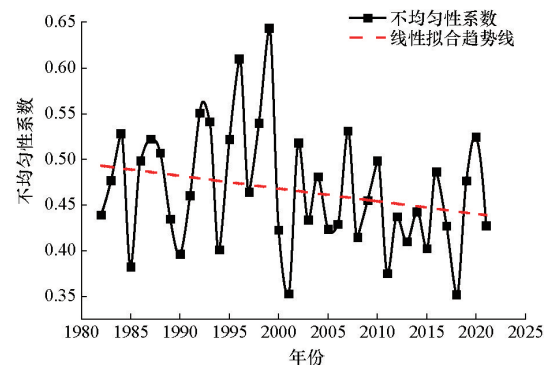


图4 大通站径流量不均匀性

大通站近40年多年平均径流为9053.6亿m³,径流量年际变化总体趋势不显著(图5)。图4显示大通站径流量不均匀性在0.35~0.65,呈下降趋势,与大通站集中度(图6)变化趋势一致。大通站集中度在0.23~0.41,较珠江下游0.36~0.48、渭河0.46~0.65、淮河0.41~0.59以及北江0.36~0.46等流域^[5,9,19-20],长江下游径流集中度偏小且呈下降趋势,与图4大通站流量年内水量趋于均衡结论一致。

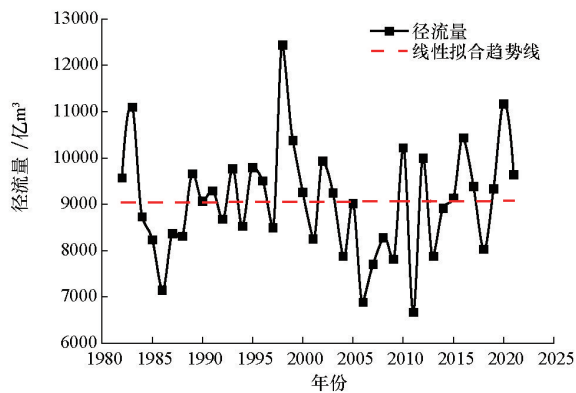


图5 大通站径流量年际变化

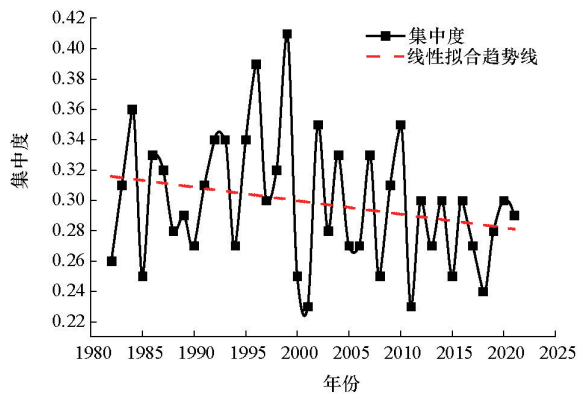


图6 大通站集中度(C_n)年际变化

以10年为单位计算大通站的集中度与集中期,计算结果如表2所示。

表2 大通站集中度与集中期

时期	不均匀性系数(C _v)	集中度(C _n)	集中期(D)	
			合成向量方向/(°)	最大径流出现日期
2002—2006年	0.44	0.31	194.95	7月14日
2007—2011年	0.48	0.33	191.50	7月11日
2012—2016年	0.43	0.30	186.98	7月6日
2017—2021年	0.41	0.28	181.90	7月1日

从表2数据可以得出,大通站径流集中度有减小趋势,最大径流出现时间在7月中下旬,且时间越来越提前。

根据M-K趋势性检验,设置可信度为95%,根据式(8)可知,分数位 $Z_{1-\alpha/2}$ 等于1.96时,计算所得结果 $Z < Z_{1-\alpha/2}$,且 $Z > 0$,说明虽然径流量呈增加趋势,但是增加趋势不显著,见表3,其与图5所述结论相互验证。

表3 M-K趋势检验

样本容量n	平均值	Z值	显著性
40	9053.6	0.17	不显著

采用M-K突变检验、T检验方法探究径流量趋势及是否发生突变。对大通站径流突变点进行检验,由图7中2003年UB曲线部分大于置信区间,说明发生径流呈显著变化,但是位于置信度之间的交点较多,采用滑动T检验法进一步验证突变点的合理性。步长取5,自由度为8,显著性水平为5%,查表得 $t_{0.05/2}=2.306$,见图8,可知 $|T| > t_{0.05/2}$ 的为1998年、2003年,径流序列在上述年份发生了突变。

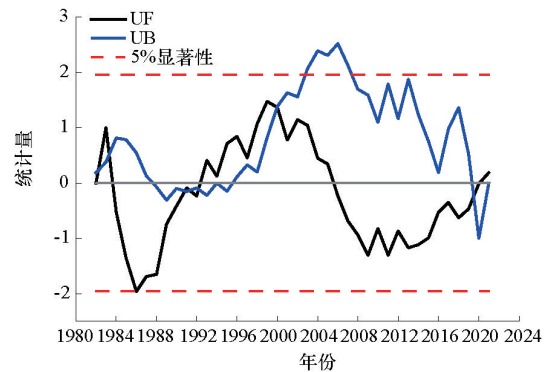


图7 大通站M-K突变点检验

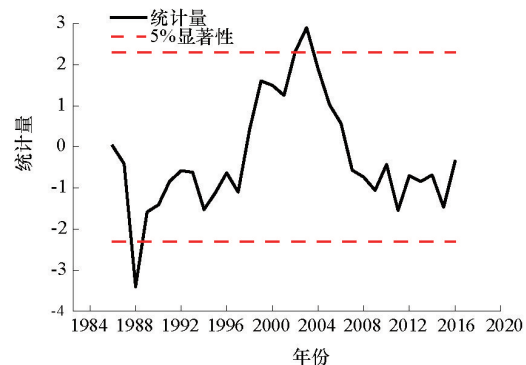


图8 大通站滑动T检验

综上所述,大通站近40年来平均径流量为9053.6亿 m^3 ,水资源丰富,且径流流量呈不显著变化趋势。突变点检验表明大通站径流在1998年及2003年发生了突变。因此,可选择2004—2021年径流数据分析计算热储能。

3.2 大通站水温

气温数据选取距离大通站较近的铜陵气象站2004—2021年实测气温数据,气温数据中部分时间有缺失。由于水文站水温均为8:00测量,且研究发现江水水温日均变化不大,一般在 1°C 以内^[21-22],因此将8:00测量值作为日水温进行分析。

铜陵气象站不同时期日观测频次不同。2004—2006年为8:00、14:00、20:00观测气温数据,2007—2019年,气象数据为自2:00每隔3h一组温度数据,2020—2021年为每隔1h为一组数据。由于部分数据缺失,当缺失天数小于3日,采用线性插值填补空缺数据,当数据长序列缺失弃用不参与计算(缺失天数大于3日则弃用,如2019年12月12日至2020年4月21日、2020年5月8日至2020年8月11日等数据缺失)。2004—2006年日均温度采用式(23)计算,2007—2021年利用4个定时(2:00、8:00、14:00、20:00)平均计算出日均气温并加以分析。

$$\bar{T} = (9T_8 + 6T_{14} + 9T_{20}) / 24 \quad (23)$$

式中, T_i 即为*i*时刻记录的温度, $^\circ\text{C}$ 。

2014—2021年气温数据可以得出,日均气温极大值、极小值分别出现在2013年8月8日、2016年1月24日,气温分别为 35.3°C 、 -5.1°C 。多年平均气温与水温温差在夏季较小,冬季温差较大,温度年内分布,7月份为月平均气温最大,1月份平均值最小,见图9、图10。

2004—2021年中水温最大值为 31.3°C 出现在2016年8月20日,最小值 2.6°C 出现在2008年1月27日。对8时实测水温数据进行分析得到年内水温变化,月均水温最高值为8月份,最低值为1月份,多年水温平均值为 18.9°C 。冬季水温高于气温,夏季除8月份外气温高于水温,且冬季温差要大于夏季温差。

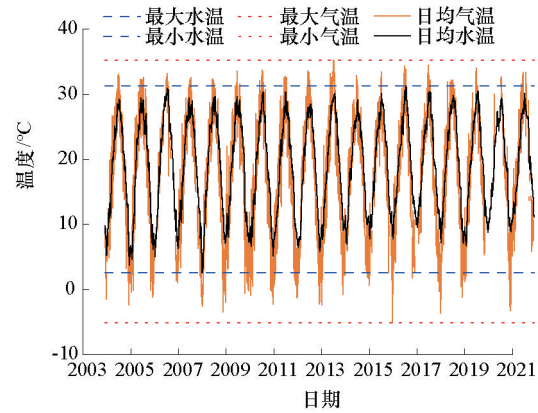


图9 大通站多年日均气温、水温变化图

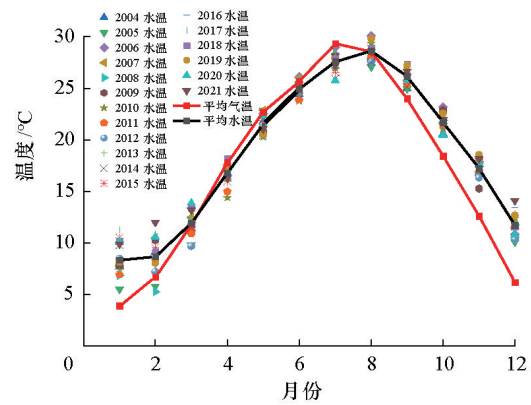


图10 大通站逐月平均气温及水温

依据表1中的规定以及表4中统计数据,对于机组温度标准,容积式地表水机组标准中低于 5°C 的标准除2005、2008年等个别年份出现不符合条件的情况,总计27d,其余均符合标准,多年均值为1.5d,适宜使用机组制冷/热;而离心式制热标准水温在 10°C 以上,2004—2021年不符合标准的水温总计816d,年均47d,不适用作为露天地表水的热储能提取设备。因此,依据江水温度条件,要选择容积式机组。对于极端天气温度较低情况,可通过少量辅助加热设备对较低温度进行进水温度处理,降低江水对机组的损害。

表4 大通站地表水机组非正常工作天数

机组类型	>制冷温度天数/d	<制热温度天数/d
容积式地表水机组	0	27
离心式地表水机组	0	816

3.3 大通站水质

选取距大通站较近的安徽省池州市五步沟监测断面水质数据,2020—2021年的年平均监测值如表5所示。

表5 安徽省池州市五步沟断面水质监测年均值

年份	pH	DO	COD	NH ₃ -N	浊度	TP	TN	等级
2020	7.95	8.95	1.57	0.02	42.80	0.07	2.70	I
2021	7.75	7.66	1.95	0.06	39.35	0.06	1.64	I

注:数据源于环境专业知识服务系统。pH为氢离子浓度指数,DO为溶解氧,mg/L;COD为化学需氧量,mg/L;NH₃-N为氨氮,mg/L;浊度,NTU;TP为总磷,mg/L;TN为总氮,mg/L。

由表5可知,大通站附近水质较好,pH值符合规范要求,年均水质评价达到I级水质标准。由表6可知,长江干流监测断面II类水及其以上水质占比89.1%,就水质而言,长江大部份均适宜作为热泵系统的水源。大通站附近水质在II类以上,在经部分物理处理以及尽量减少化学处理的工序下,即可被利用。

表6 2021年长江干流断面水质占比

断面类别	I	II	III	IV	V
水质占比/%	12.2	76.9	10.5	0.4	0

通过对水量、水质、水温3方面的分析可知,大通站水量大、气温变幅较水温变幅大,水温适宜选用容积式地表水机组。夏季温差虽小但是水量较大,冬季温差大水量相对偏小,水质需经部分处理后可即进入机组。

3.4 大通站地热资源评估

通过水文情势、温度以及水质分析可知,长江大通站水资源丰富、自然条件适宜进行地热资源开发与利用。从径流分析可知,大通站径流呈不显著性变化、在2003年发生显著突变,因此,利用大通站2004—2021年的平均径流量评估江水源蕴藏的地热资源量。将多年月内各时间段气温求均值,如图11所示,本研究选取制热水空调的起止月份为11月~翌年2月(制热月份),制冷水空调起止月份为6~9月(制冷月份),由于2004—2006年1天之内仅有3个数据,不能完整反映1天之内较为详细变化,因此,选取2007—2021年每隔3h气温日变化与水温对比分析,结果如图11、图12所示。水空调利用的地热资源即空气温度与水温之间形成温度差。

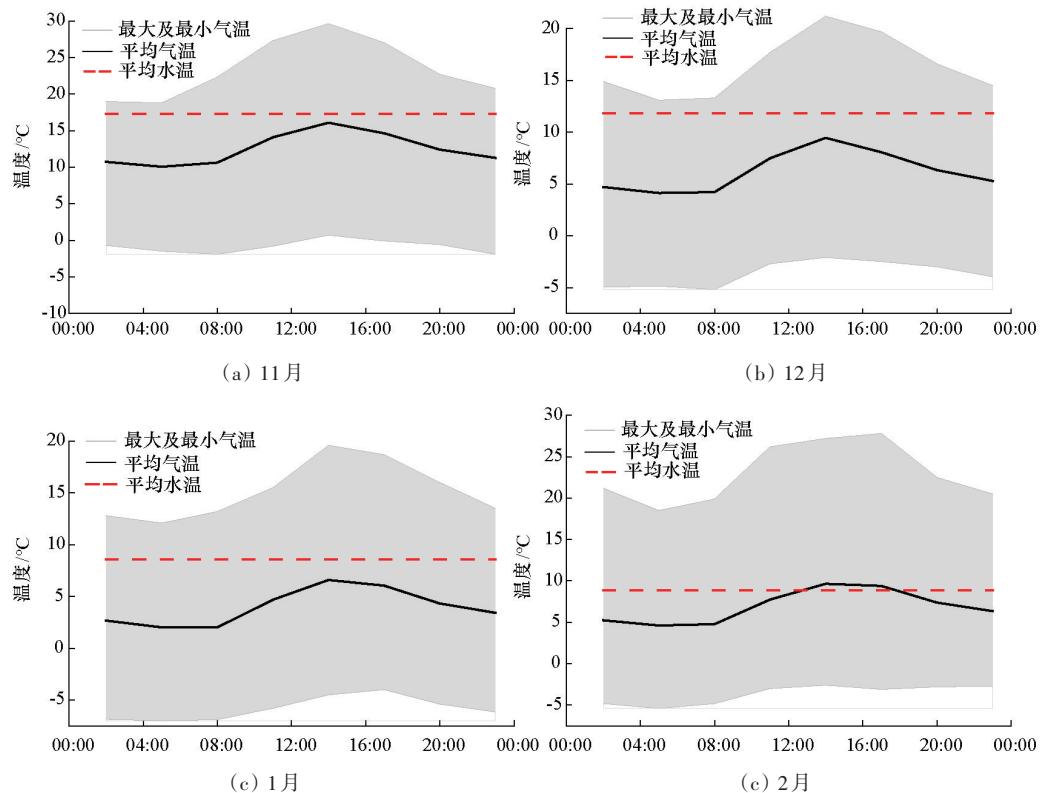


图11 制热月份温度日变化

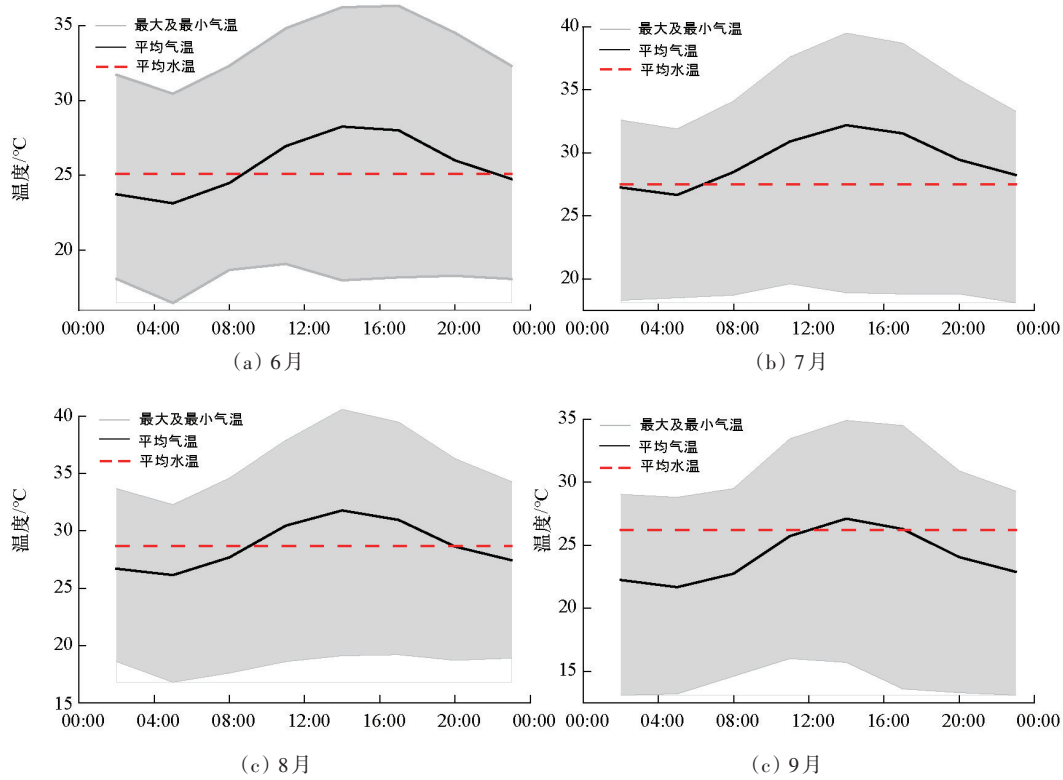


图12 制冷月份温度日变化

由图 11 可知,制热月份气温最低值出现在 5:00,最高温度出现在 14:00,多年气温变化幅度较大,多年月内最大最小气温相差 20°C 以上。11 月~翌年 1 月,全天平均水温高于平均气温,则全天温差都可利用作为地热资源,但 2 月份 11:00~20:00 时间段出现气温高于水温现象,说明此时间段利用水温不合理,剔除此时间段,并利用剩下时间段气温值按权重求均值,得出多年低于水温时间段的月均气温,依次为 12.5°C、6.2°C、3.9°C 和 5.5°C。并依据式(19)对大通站断面制热月份的江水源地热资源进行计算,得出制热月份(11~翌年 2 月)的地热资源量为 3.08×10^{18} J。

制冷月份可利用温差应选取水温小于气温时段,由图 12 可知,6 月应选用 11:00~20:00 时段,7 月份选用 8:00~23:00 时段,8 月选用 11:00~17:00 数据,9 月选用 14:00~17:00 数据。利用以上时段计算得出选用时间段气温高于水温时间段的月均值气温,依次为 27.5°C、30.4°C、31.1°C 和 26.7°C。计算得出大通站断面制冷月份(6~9 月)地热资源量为 1.67×10^{18} J。则总地热资源量为 4.75×10^{18} J,依

据 1 kg 标准煤低位发热量为 29307.6 kJ,总地热资源量资源量可折算为 16208.6 万 t 标准煤。

长江流域水资源多年平均水资源可利用率为 30%^[23],则选取此占比作为可利用地热资源量的可最大提取水量占比,选取使系统能效比达到最大值的 7°C^[24]作为最佳可利用温差。则依据式(21)计算得出下水水温最大温升/温降为 2.1°C,超过规定温升/温降不能超过 1°C/2°C。因此,在考虑下游断面温升/温降生态温度限制的情况下,依据式(22)及上述选用计算时间段,计算大通站断面地表水地热资源的最大可采资源量。计算得出:制热月份(11 月~翌年 2 月)可采资源量为 1.28×10^{18} J,当热负荷取值为 50 W/m²时,借用中深层地热资源可利用潜力可估算出可供暖面积为 2.47×10^9 m²,依据 1 kg 标准煤低位发热量为 29307.6 kJ,可采资源量可折算为标准煤为 4372 万 t 标准煤;制冷月份(6~9 月)可采资源量为 6.71×10^{17} J,冷负荷取值为 70 W/m²时,制冷面积为 9.09×10^8 m²,可折算为标准煤为 2288 万 t 标准煤。大通站总可采资源量 1 年可减排 CO₂ 约 16604 万 t。

4 结论

利用长江下游大通站断面的径流、水温、气温、水质等长系列水文观测资料评估了江水源空调的适宜性,并计算了该断面的地表水地热资源量。

1) 大通站多年平均径流量为 9053.6 亿 m^3 。月平均气温 7 月份最大, 1 月份最小。气温与水温的温差冬季大、夏季小, 水温低于 5°C 的天数多年均值仅为 1.5 d。长江水空调适宜采用容积式地表水机组加以利用。大通站附近五步沟断面近两年平均水质为 I 类水, 水质条件符合机组对水源水质的要求。

2) 依据 2004—2021 年均径流以及 2007—2021 年水温和气温观测资料, 计算得出多年平均制热月份为 11 月至翌年 2 月, 制冷月份为 6 至 9 月。地热资源量分别为 3.08×10^{18} J 和 1.67×10^{18} J, 总地热资源量为 4.75×10^{18} J, 折算标准煤为 16208.6 万 t。制热月份和制冷月份可采资源量分别为 1.28×10^{18} J 和 6.71×10^{17} J, 折算为可供暖面积 $2.47 \times 10^9 \text{m}^2$ 、可制冷面积为 $9.09 \times 10^8 \text{m}^2$, 仅长江大通水文站一个断面的总可采资源量一年就可以减排 CO_2 约 16604 万 t。

通过大通站(断面处)地热资源量计算发现, 江水源地热储能利用潜力巨大, 是一种具有开发利用价值的清洁非碳基能源。在实现“双碳”目标的征程中, 地表水源地热作为地热资源中的组成之一, 其利用潜力可观。由于江水源取热不取水, 未来可根据沿江城市的布局和特点探讨上、中、下游及左、右岸的江水源地热资源的开发利用, 进而结合社会经济的发展探讨沿江城市群/集中居住区的规划与布局以及江水源利用的取退水设施合理布置等科学问题, 进一步提高江水源地热资源利用率。

参考文献(References)

- [1] 孙旭东, 张蕾欣, 张博. 碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 1-6.
- [2] Long J, Huang S. Study on energy efficiency evaluation method of cooling water system of surface water source heat pump[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, Vol 2: Hvac&r Component and Energy System. Berlin: Springer-Verlag Berlin, 2014: 333-340.
- [3] 汪峰. 长江安徽段径流演变规律分析及防洪减灾措施研究[D]. 南京: 河海大学水利水电学院, 2014.
- [4] 李沫. 热泵用江水水温数据生成方法及其应用研究[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2014.
- [5] 郭巧玲, 杨云松, 畅祥生, 等. 1957—2008年黑河流域径流年内分配变化[J]. 地理科学进展, 2011, 30(5): 550-556.
- [6] 杨远东. 河川径流年内分配的计算方法[J]. 地理学报, 1984, 39(2): 218-227.
- [7] 周陈超, 贾绍凤, 燕华云, 等. 近 50 a 以来青海省水资源变化趋势分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 432-437.
- [8] 肖森元, 李国芳, 王伟杰. 长江口潮位一致性检验与修正方法研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 6-10.
- [9] 欧阳卫, 王筱, 周维博. 1956—2016年洋河径流量变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 118-123.
- [10] 吕琳莉, 李朝霞. 雅鲁藏布江中下游径流变异性识别[J]. 水力发电, 2013, 39(5): 12-15.
- [11] 吴艳菊. 地表水源热泵适宜性综合评价及规划研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [12] Lv N, Zhang Q, Wu D, Chen Z. Surface water source heat pump air conditioning system simulation and operation performance analysis[C]//9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ishvac) Joint with the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (cobee). Amsterdam: Elsevier Science Bv, 2015, 121: 1880-1886.
- [13] Lv N, Zhang Q, Chen Z, Wu D. Simulation and analysis on thermodynamic performance of surface water source heat pump system[J]. Building Simulation, 2017, 10(1): 65-73.
- [14] Si P, Li A, Rong X, et al. New optimized model for water temperature calculation of river-water source heat pump and its application in simulation of energy consumption[J]. Renewable Energy, 2015, 84: 65-73.
- [15] Zou S, Xie X. Simplified model for coefficient of performance calculation of surface water source heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 201-207.
- [16] 中华人民共和国建设部. GB 50366—2005 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [17] GB/T 3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2022.

- [18] 王渺林. 江水水源热泵项目取用水影响与用水量指标分析[C]//2022(第十届)中国水生态大会论文集. 南阳: [出版者不详], 2022: 8.
- [19] 乔雪媛, 石朋, 陈喜, 等. 不同气候区代表性江河径流变化特征分析[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(3): 357-365.
- [20] 杨远东, 王永红, 蔡斯龙, 等. 1960—2017年珠江流域下游径流年际与年内变化特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 23-31.
- [21] 王子云. 长江水源热泵换热器研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [22] 谭洪卫, 李潇潇, 朱金明, 等. 黄浦江水温变化规律与上海地区江水源热泵节能潜力研究[C]//上海市制冷学会 2007 年学术年会论文集. 上海: 上海制冷学会, 2007: 371-374.
- [23] 蔡其华. 长江流域节水与水资源可持续利用[J]. 中国水利, 2005(13): 180-183.
- [24] 杨正武, 戎向阳, 闵晓丹. 江水源热泵系统取水最佳温差设计研究[J]. 制冷与空调, 2011, 25(3): 267-269.

Suitability analysis of water conditioning in Datong section of Yangtze River

LU Baohong¹, FENG Xinyue¹, YANG Yan^{1,2}, PEI Ying^{1,3}, KONG Yanlong⁴, SHEN Wenlong¹, SONG Yang¹, PANG Zhonghe^{4*}

1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. Water resources and Hydropower Planning and Design General Institute, Beijing 100120, China
3. Anhui Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China
4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract As a kind of building heating and cooling technology, surface water source heat pump (commonly known as "water-cooled air-conditioning") technology has been applied gradually. It provides a new way to solve the problem of refrigeration (heat) in the hot summer and cold winter areas south of the policy heating line in China. The heat energy project using the Yangtze River water is developing in scale. But theoretical research on resource potential, utilization conditions and environmental effects has not kept up. In order to study the geothermal resources contained in the Yangtze River water source, the Datong Station of Yangtze river was selected as the representative section. The means of non-uniformity coefficient of runoff, Mann-Kendall method and the moving T-test method were used to analyze the hydrological regime of the Datong Station. The average annual runoff of Datong station was calculated as 905.36 billion cubic meters, and the concentration of water flow occurs in early July. According to the data of air temperature and water temperature from 2004 to 2021, it is concluded that the monthly average temperature is the highest in July and the lowest in January. The annual average water temperature is 18.9°C, and the annual average of the days when the water temperature is lower than 5°C is 1.5 days. Therefore, it is suitable to use volumetric surface water units for heating/cooling. The water quality of Datong section is above Class II, so it meets the standard. To sum up, the water quantity, temperature and quality are suitable for the development and utilization of geothermal energy from river sources. On this basis, according to the temperature difference between air temperature and water temperature, the total geothermal resources of Datong Station are calculated as 3.08×10^{18} J from November to February and 1.67×10^{18} J from June to September. According to the control threshold of water temperature variation in the next section, the recoverable resources were calculated as 1.28×10^{18} J from November to February and 6.71×10^{17} J from June to September. The total amount of recoverable geothermal resources is equivalent to the emission reduction of about 166.04 million tons of CO₂.

Keywords river water source geothermal energy; Datong Hydrological Station of Yangtze River; amount of recoverable resources; carbon emission reduction ●



(责任编辑 祝叶华)