

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-748-08

成渝经济圈湿环境分析及应对方案

张俊苗 卢 军 杨露露

(重庆大学土木工程学院 重庆 400044)

【摘 要】 成渝经济圈人居环境因气候因素发展受限, 湿气较重, 秋冬季尤甚, 湿环境改善不可忽视。故全面对成渝地区高湿环境形成的九个方面的成因进行了分析, 即自然因素、燃气燃烧、三峡水库工程、汽车尾气排放、空调融霜水、燃煤电厂烟气排放及工商业冷却水蒸发、人体散湿。同时提出了相应的调湿措施以对成渝地区湿环境进行人为调控, 并对相应机器的除湿量和经济效益等进行了可行性分析。

【关键词】 湿环境; 调湿; 成渝经济圈
中图分类号 P426 文献标识码 A

Analysis and Countermeasures of Wet Environment in Chengdu Chongqing Economic Circle

Zhang Junmiao Lu Jun Yang Lulu

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044)

【Abstract】 The development of human settlements in Chengdu Chongqing economic circle is limited due to climate factors, and the humidity is heavy, especially in autumn and winter. Therefore, the causes of high humidity environment in Chengdu and Chongqing are analyzed in nine aspects, including natural factors, gas combustion, Three Gorges Reservoir Project, vehicle exhaust emissions, air conditioning defrost water, flue gas discharge from coal-fired power plants, evaporation of industrial and commercial cooling water, and human body moisture dissipation. The corresponding humidity control measures are put forward to control the humidity environment in Chengdu and Chongqing, and the dehumidification capacity and economic benefits of the corresponding machines are analyzed.

【Keywords】 Wet environment; humidity control; Chengdu Chongqing economic circle

0 湿环境研究意义

中央财经委员会第六次会议中, 习近平强调要推动成渝地区双城经济圈建设, 而成渝经济圈因气候因素发展受限, 人居环境质量堪忧, 尤以秋冬季节为甚。以成渝地区年降水量丰富, 大部分地区在 1000~1350mm; 云雾较多, 年日照数 1000~1400h, 日照百分率仅为 25%~35%; 年平均相对湿度多在 70%~80%, 属于高湿区。成渝地区相对湿度过大, 空气湿度的控制刻不容缓。

据研究, 环境相对湿度大于 60%时霉菌就会开始生长, 相对湿度大于 85%则是霉菌的高发环境。

潮湿多云雾的环境不仅会对农作物的生长发育, 还会对我们日常生活及身心健康带来不良影响。

0.1 相对湿度与空气质量的关系

通过对重庆市 2014 年至 2018 年的空气湿度以及颗粒物浓度数据 (见图 1) 处理后发现, 其空气湿度主要集中在 75%~85%, 其平均值达到了 78%, 秋、冬季较大, 春季次之, 夏季最小, 变化趋势大致呈余弦函数分布; 绝对湿度大部分集中在 $6\text{g}/\text{m}^3$ ~ $8\text{g}/\text{m}^3$ 和 $18\text{g}/\text{m}^3$ ~ $21\text{g}/\text{m}^3$, 平均值为 $12.52\text{g}/\text{m}^3$, 绝对湿度的年变化呈现倒“U”型分布, 夏季绝对湿度最大, 春、秋季次之, 冬季最小。

作者简介: 张俊苗 (1998-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 202016021101t@cqu.edu.cn

通信作者: 杨露露 (1965-), 女, 博士, 副教授, E-mail: yanglulu@cqu.edu.cn

收稿日期: 2021-09-29

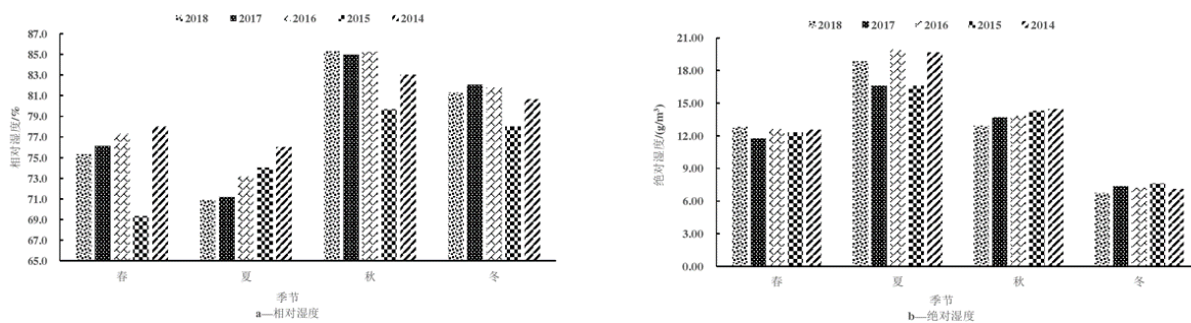


图 1 空气湿度的季节变化特征

Fig.1 Seasonal variation characteristics of air humidity

对相对湿度进行区间划分, 图 2、图 3 分别为 PM2.5 和 PM10 的质量浓度在不同相对湿度、绝对湿度区间的分布图, 可以看出, 随着相对湿度的增大, PM2.5 和 PM10 的平均质量浓度也随之增加;

而 PM2.5 和 PM10 的平均质量浓度随着绝对湿度的增加而降低, 绝对湿度集中在 9~12g/m³ 时, PM2.5 和 PM10 的浓度最大。

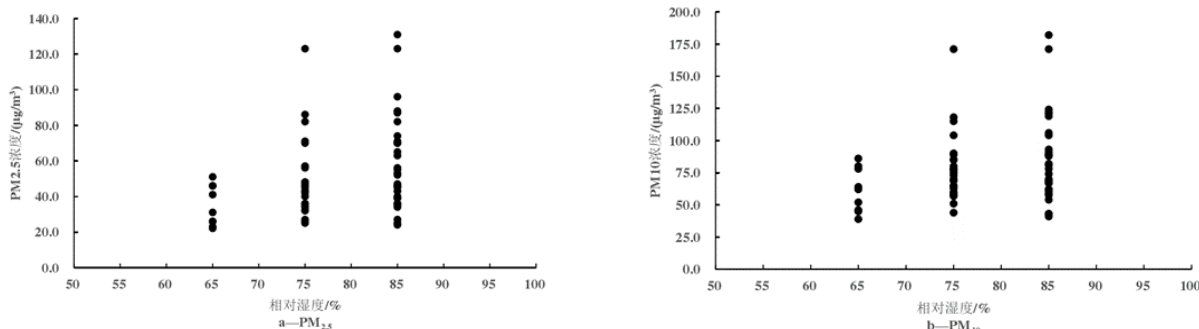


图 2 不同相对湿度区间颗粒物浓度分布图

Fig.2 particle concentration distribution in different relative humidity ranges

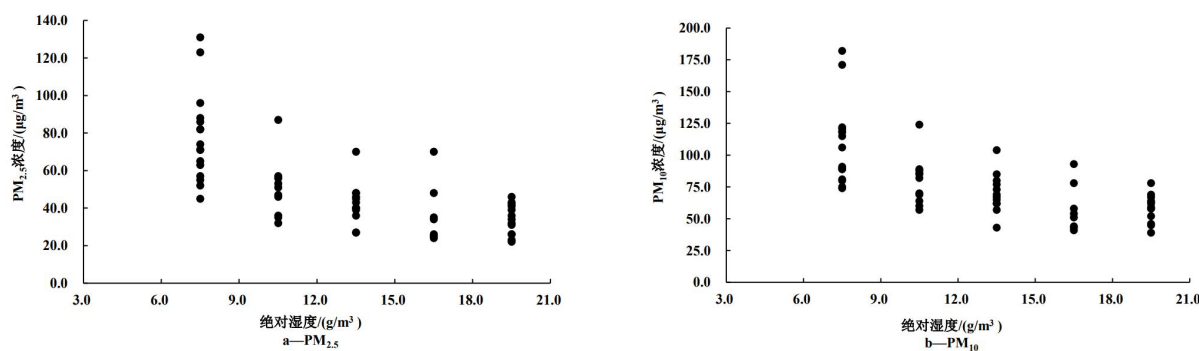


图 3 不同绝对湿度区间颗粒物浓度分布图

Fig.3 Particle concentration distribution in different absolute humidity ranges

研究显示, 相对湿度 RH 通过物理和化学过程显著地影响 PM 从形成到分解的过程^[1]。由此可知, 空气湿度和空气质量存在相关关系, 为了改善成渝地区的人居环境, 调节城市的空气湿度必不可少。

0.2 相对湿度与臭氧浓度的关系

大气中的臭氧主要分布在平流层(约海平面至距离地面 15~50km 范围内) 和对流层(在海平面

距离地面 15km 范围内) 中。平流层中的臭氧起着吸收紫外辐射保护人类和地球环境的重要作用。但对流层大气中的臭氧是一种对地球上生命有害的气体污染物, 作为一种氧化性极高的气体, 它对人体健康、生态环境、气候变化都有不利的影响。

水汽与臭氧浓度反应是流层臭氧浓度的一个重要的汇集。总体来看, 随着相对湿度的增加, 臭

氧平均浓度逐渐减少。重庆地区相对湿度常年较高，臭氧含量较低也验证了这一结论^[2]。

成渝地区的秋冬季节过于潮湿的环境对人居环境和生产生活造成极为恶劣的影响，因此，分析造成高湿环境的成因和采取高效地调湿措施迫在眉睫。

1 湿气候的影响因素

成渝经济圈位于中国西南部、长江上游地区，年平均降水量较丰富，年平均气温为 16~18℃，年平均相对湿度多在 70%~80%之间，属高湿区。由于其独特的地理、气候等影响，全年空气湿度较大。其中高湿环境的影响因素分为以下几个方面：

1.1 自然因素

(1) 四川盆地影响

由于青藏高原平均海拔超过 4000 米，比平原地区接受到的太阳辐射更多。夏季高原表面吸收的太阳热量不断的加热地表上方空气，地面区域形成低压区，吸引了印度洋和太平洋的季风进入。季风带来的大量水气途经四川盆地时，被周围的高山阻挡，形成地形雨；同时四川盆地气候温暖湿润，盆地内部蒸发的水蒸气无法散出，持续堆积在该区域形成持续的云层和降雨，雨季时间长，降雨强度大。这也是成渝地区是全国阳光辐射最少地区的主要原因之一。

(2) 地形地势影响

成渝地区江河较多，其中重庆市流域面积大于 50 平方公里的河流达到 510 条，成都市河网密度高达 1.22km/km²。同时成渝地区全年气温较高，江河蒸发量大，导致其湿度较大。

1.2 植物蒸腾作用

大部分植物的夏季蒸腾作用最强，春秋季节次之，冬季最弱。而植物蒸腾作用的强弱是影响植物散湿量的主要因素。森林覆盖率是调查范围内的湿度差异变化的主要决定因素，森林覆盖率越高，相应湿度越大，覆盖率低则反之。成渝经济圈冬季温

度最低日平均温度在 2~5℃之间，全年常绿植物多，秋冬季节植被蒸腾作用较强。

以重庆为例，重庆年平均相对湿度多在 70%~80%之间，森林覆盖率达 37.15%。重庆市森林面积总体上逐年增幅更大，并且始终保持增长状态。结合植物散湿量估算方法^[3]，估算可得 2017 年重庆市森林增湿总量约为 524814.108 万吨，2017 年重庆市降水量为 1196.2 毫米。

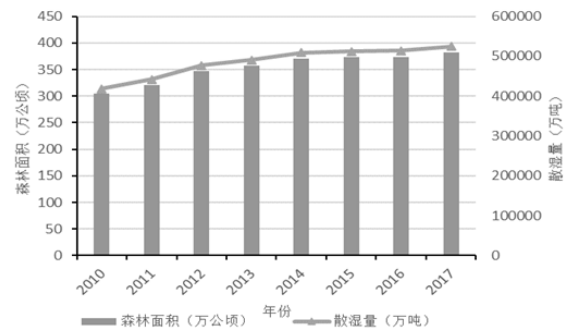


图 4 重庆市逐年森林面积和散湿量情况

Fig.4 Annual forest area and moisture dissipation in Chongqing

1.3 天然气燃烧排湿

天然气的主要成分为甲烷，1 份的天然气燃烧会产生 2 份的水蒸气。据测算，每 1 立方米天然气燃烧后可以产生约 1.55 千克的水蒸气。

天然气完全燃烧：



天然气不完全燃烧：



据重庆市年鉴得到重庆市 2013 至 2018 年间重庆市城市天然气消耗总量，设想重庆城市供应的天然气全部燃烧生成的水汽量全部转化成液态水，并设这些液态水平均分布在重庆市主城区（总面积为 28657km²），将其折合成降雨量。2013 年至 2018 年间每年由于燃烧天然气增加的降雨量计算可得如表 1 所示。

表 1 燃气燃烧产生的水汽量

Table 1 Water vapor produced by gas combustion

年份	城市天然气消耗量 (亿立方米)	天然气产生水汽量 (万吨)	折合年降雨量 (mm)	重庆冬季降雨量 (mm)	重庆年降雨量 (mm)
2013	37.1	575.1	0.201	54.5	1026.9
2014	35.9	556.4	0.194	40.7	1452.5

续表 1 燃气燃烧产生的水汽量

年份	城市天然气消耗量 (亿立方米)	天然气产生水汽量 (万吨)	折合年降雨量 (mm)	重庆冬季降雨量 (mm)	重庆年降雨量 (mm)
2015	37.9	587.4	0.205	63.1	1448.7
2016	40.9	633.9	0.221	82.9	1345.8
2017	49.1	761.1	0.266	55	1196.2
2018	51.9	804.4	0.281	72.2	1128.2

计算可得燃气燃烧产生的水汽量转化成的降雨量约占每年降雨量的 1/5000, 其产生的降雨量约占冬季降雨量的 1/300, 故秋冬季节天然气的燃烧产生水汽对成渝地区的湿度有一定的影响。由于地形条件所限, 当秋冬季节, 气候条件不利于空气扩散时, 大量水蒸汽聚集在低空, 会导致相对湿度的提高, 造成高湿的环境。故燃气燃烧在成渝地区应当引起重视。

1.4 三峡水库影响

三峡工程成库后, 水位上升, 河道增阔, 水体增大将使下垫面中水陆比例发生改变, 对太阳辐射的吸收和释放也发生改变。

三峡水库水面蒸发量呈周期性变化, 最大蒸发量在 8 月份, 最小蒸发量在 1 月份。春季占全年的 24.3%、夏季占 42.9%、秋季占 22.6%、冬季占 10.2%^[4]。三峡水库平均月水面蒸发量为 68.5mm, 则冬季水面平均蒸发量约在 205.5mm。按冬季蓄水位 175m 计算, 水域覆盖面积达到 1084km²。水库冬季平均蒸发量则达到了 222762m³。对库区周边

的湿环境造成不利影响。

1.5 汽车尾气排放

随着群众生活水平的不断提升, 重庆的汽车保有量近几年增速位居全国第一。截至 2019 年 12 月, 公安部交管局数据显示, 重庆汽车保有量已达 463.3 万辆, 位居全国前三。

据研究, 汽车尾气中的水汽成分可以高达 13%, 相比于空气中 0.03% 左右的水蒸气较高, 而水蒸气的增加会使相对湿度增加。

查阅年鉴得到重庆市近五年油料的使用量, 一般车辆占油料消耗总量的 55% 左右, 估算可得近年来由于汽车尾气排放所产生水汽量, 如表 2 所示; 除汽车耗油产生水汽, 耗气汽车也会产生大量水汽, 查看年鉴得到近年耗气汽车保有量对其进行估算, 如表 3 所示。

由表 2、表 3 可知, 成渝地区车辆产生的水汽量是不容小觑的, 所以对于汽车尾气末端产生的水汽应进行处理, 不能随意让其排放在环境中。

表 2 耗油汽车产生水汽量

Table 2 Water vapor generated by fuel-consuming vehicles

年份	油料消费总量 (万吨标准煤)	车辆耗油量 (万吨标准煤)	产生水汽量 (万吨)
2015	1008.76	554.82	475.56
2016	1019.61	560.79	480.67
2017	1087.18	597.95	512.53
2018	1323.39	727.86	623.88
2019	1376.68	757.17	649.01

表 3 天然气汽车产生水汽量

Table 3 Water vapor generated by natural gas consuming vehicles

年份	天然气汽车保有量 (辆)	日均行程 (公里)	出勤天数 (天)	年耗气量 (亿立方米)	产生水汽量 (万吨)
2013	1630472	57.1	340	24.2	374.36
2014	1729832	57.1	340	25.6	397.17
2015	1849292	57.1	340	27.4	424.60
2016	2041000	57.1	340	30.2	468.61
2017	2269981	57.1	340	33.6	521.19

1.6 冬季空调滴水现象

由于没有集中供暖及经济技术因素等影响，南方冬天普遍使用空调制热。一般制热模式启动，室外温度是在 10℃ 以下。室外温度低，室外机还需要吸收热量时，蒸发器本体温度会降到 0℃ 以下，周围的水分很快就会凝结成霜。室外气温越低，相对湿度越大，空调化霜越频繁。

南方冬季大量排放的融霜水引发了资源浪费，而融霜水虽不是绝对的纯净水，但其水质较好完全可以回收利用。



图 5 空调滴水现象

Fig.5 Dripping phenomenon of air conditioner

由湿空气干球温度及相对湿度即可求得其含湿量。且设空气与蒸发器接触时间无限长，则湿空气出口状态点应与制冷剂入口温度相同，且接近饱和状态。最后由质量守恒定律就可以求得凝结水量。通过单位流量空气时空调产生的融霜水量计算公式为：

$$m = \rho v_o (d_o - d_i) \quad (3)$$

式中： m 为冷凝水量，kg/h； d_o 为回风/新风空气的含湿量，kg/kg； d_i 为送风空气的含湿量，kg/kg； ρ 为空气密度，取 1.2kg/m³； v_o 为空气流量，取单位流量 1m³/h。

中国统计摘要 2019 发布的最新数据显示：2018 年底全国居民空调保有量达到 109.3 台/百户。而 2018 年重庆家庭总户数约为 1261 万户。由上式求得重庆市 12~2 月份单位时间内每与 1m³/h 的空气接触产生的融霜水量如表 4 所示。

表 4 重庆市供暖季各月每小时接触 1m³/h 空气时融霜水量

Table 4 Defrosting water volume when exposed to 1m³/h air every month in heating season in Chongqing

月份	12	1	2
平均温度 (°C)	9.20	7.98	9.62
相对湿度 (%)	80.00	78.15	75.3
融霜水量(kg/h)	33078.552	26462.84	36386.41

现实生活中，冬季各类建筑使用空调时间一般在 4~8h 之间，且成渝地区空气相对湿度较大，故空调制热产生的融霜水量不容小觑。而国内对家用空调融霜水的处置主要采用向室外排放的方法，会对城市湿环境造成一定影响。

1.7 燃煤电厂烟气排放

国内大部分火电机组均采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺^[5]，烟气中的水蒸气含量增多，吸收塔出口烟温降低至 45~60℃ 左右，经烟囱口扩散时由于外部环境温度低，出现冷凝，在烟囱周边形成“烟囱雨”。若不进行处理，会对环境的湿度造成一定的影响。

2011 至 2017 年重庆市能源消耗量变化趋势见图 6。对湿法脱硫且排放饱和湿烟气的煤电机组，每生产 1 千瓦时能排放 3.5m³ 标态烟气，饱和湿烟气温度按 50℃ 计，则其含湿量为 111.8g/m³，每生产 1 千瓦时电能排放约 0.39kg 水蒸气。对闭式水冷循环的火电机组，冷却塔排放的水蒸气按烟气排放的水蒸气的 4.5 倍估算，每生产 1 千瓦时电能对应排放约 1.76kg 水蒸气，与烟气排放合计 2.15kg。2018 年重庆市火电发电量为 553.39 亿千瓦时，估算水蒸气排放量为 1 亿吨，考虑部分机组采用空冷、直流冷却方式，估算水蒸气排放量约 0.8 亿吨。

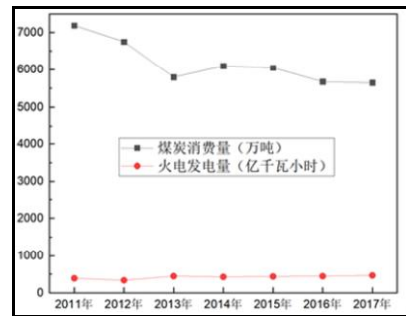


图 6 2011 至 2017 年重庆市能源消耗量变化趋势

Fig.6 The trend of energy consumption in Chongqing from 2011 to 2017

1.8 工业、商业冷却水蒸发散湿

工业冷却塔是将工业废热散去的设备。干燥的空气经风机进入冷却塔，饱和蒸汽分压力大的高温水分子向压力低的空气流动，当水与空气接触时，空气与水直接传热的同时，水与空气在压力作用下，产生水蒸气，带走蒸发潜热，从而降温。

商业冷库也离不开冷却水的蒸发冷却作用，对周围环境的湿度造成了一定的影响。空调冷却水、汽车冷却水等同样地影响了重庆地区的湿环境。



图 7 工业冷却塔

Fig.7 Industrial cooling tower

1.9 人体散湿

日常生活中, 人体作为一项重要湿源也会向外散湿, 是城市湿源中不可忽视的一部分。根据女性散湿约为男性 85%, 儿童约为其 75% 的比例取群集系数; 以 2019 年重庆市人口 3124.3 万人, 其中儿童约为 566.75 万人, 男女比例约为 1.002:1 进行估算。重庆市秋冬平均气温 13.5℃, 取成年男子轻度劳动散湿量 82g/h。

由人体散湿量计算公式:

$$M=0.278n\phi g \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

式中: M 为人体散湿量, kg/s; n 为人口数; ϕ 为群集系数; g 为成年男子散湿量, kg/h。

求得重庆市人体散湿量约为 636.23kg/s。由此可知, 人体散湿在城市湿源中占有很大比重。

2 调湿措施及效果分析

2.1 冷却塔节水消雾技术^[6]

对于冷却塔散湿部分, 我们可以采用节水消雾式冷却塔, 其结构如图 8 所示。

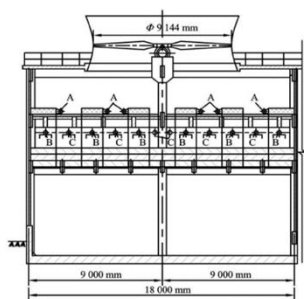


图 8 节水消雾式冷却塔结构

Fig.8 Water saving and mist eliminating cooling tower structure

(1) 节水工作原理

以保证冷却塔效果为前提, 当环境温度比较低时, 部分高温循环水经下层配水管道 C 喷淋在原填料区, 并流入下部水池; 其他高温循环水经上层配

水管道 A 进入翅片管换热器进行间壁换热, 再流入下部水池, 此处高温循环水与空气不接触, 不存在蒸发, 达到节水效果。

(2) 消雾工作原理

干冷空气经原填料区淋水后变成湿热空气, 两种状态的空气在气室内混合后由风筒排出, 与大气混合。温度最低时, 风筒排除的为不饱和空气, 不生成凝结水蒸气, 从而减弱甚至消除雾团。

(3) 效益分析

增加翅片管换热器后, 其下面填料区的高度降低, 综合风阻与原风阻基本一致, 故轴功率基本不变, 能耗没有升高。按每年运行时间 365 天、吨水价格 5 元计, 每年减少蒸发水约 9 万吨, 可节省成本约 45 万元。翅片管换热器投资成本为 200 万元, 则投资回报率为 4.44 年。

2.2 燃煤电厂湿烟气处理技术

对于燃煤电厂排放的湿烟气散湿部分, 可在排放前对湿烟气进行预处理, 目前除湿方式主要是湿法脱硫塔后喷淋换热洗涤回收。

(1) 工作原理

①在脱硫塔后与烟囱之前加装除湿脱白装置。当烟气进入烟道后, 一级循环泵组抽取冷水池中低温水, 对烟道内高温烟气进行一级喷淋。原低温喷淋水经过与高温烟气进行充分换热后, 温度升高, 进入热水池内。

②一次换热后的烟气进入冷水池内, 进行二次喷淋降温。二次喷淋的烟气经除雾器后被排出, 排出的烟气温度已被降至小于 30℃。其中二次喷水是二级循环泵抽取的高温水, 经海水换热器后, 形成冷水以保证烟气降低的温度。达到除湿脱白、余热回收等目的。

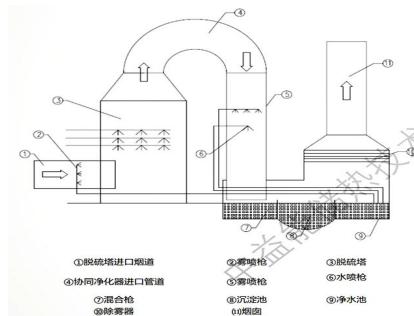


图 9 湿法脱硫后喷淋换热洗涤回收示意图

Fig.9 The diagram of spray heat exchange and water recovery after FGD

(2) 效益分析

表 5 烟羽消白系统总运行成本增量估算

Table 5 Estimation of total operation cost increment of plume whitening system

项目	年用电费/(万元/a)	年节水费/(万元/a)	折旧维修等费用/(万元/a)	总运行成本增量/(万元/a)
	100	-75	295	320

整个烟羽消白系统初投资费用约 230 万元,年运行小时数 5000h, 折旧年限 15 年, 烟气系统产生能耗 500kW, 水系统增加功耗 250kW, 节水量 30t/h, 吨水价格 5 元, 年用电费用 100 万元, 年节水费用达 75 万元, 维护及折旧成本较高, 约合 295 万元。则烟羽消白改造总运行成本增量约 320 万元。

2.3 热源塔热泵技术

热源塔热泵系统就是一种新型的能源系统。在夏季工况, 热源塔用作冷却塔, 冬季即冷却塔的逆用。适用于冬季潮湿、湿球温度高的成渝地区。

(1) 除湿量

利用文献[7]武汉地区项目数据作为参考, 对其项目数据整理得到图 11 所示。

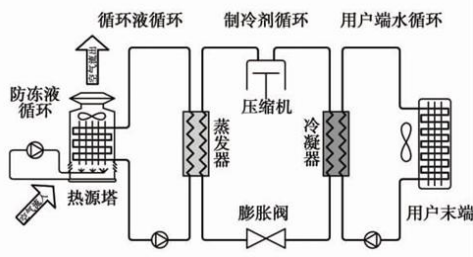


图 10 热源塔的工作原理图

Fig.10 Working principle diagram of heat source tower

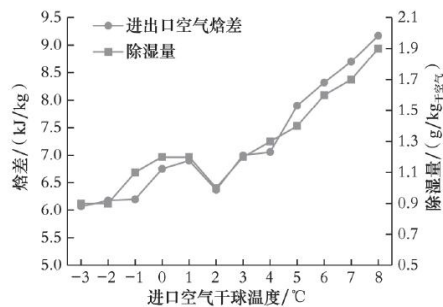


图 11 热源塔进出口空气焓差和除湿量随室外空气干球温度的变化

Fig.11 Variation of air enthalpy difference and

dehumidification capacity at inlet and outlet of heat source tower with outdoor air dry bulb temperature

在相对湿度大致相同的情况下, 通过图 11 发

现, 随着室外空气干球温度从-3℃逐渐升高到 8℃, 湿空气的进出口焓差从 6.07kJ/kg 增加至 9.17kJ/kg。随着进口空气干球温度的升高, 热源塔对空气的除湿量从 0.9g/kg_{干空气}增加到 1.9 g/kg_{干空气}。统计近三年重庆最冷月(1月)平均温度 7.98℃下, 热源塔热泵除湿量可以达到 1.9g/kg。

(2) 效益分析

以重庆市某办公楼为例, 分析热源塔热泵系统运行的经济效益。表 6 为热源塔热泵系统的初投资估算可知, 热源塔热泵系统造价稍高, 其他两种方案略低。表 7 可知热源塔热泵系统运行费用低, 且能耗较低, 一次能源利用率高, 具有很好应用前景, 在成渝地区具有很大发展空间。

表 6 热源塔热泵系统的初投资估算

Table 6 Initial investment estimation of heat source tower heat pump system

项目	热源塔 / (元/m ²)	风冷热泵 / (元/m ²)	冷水机组+燃气锅炉 / (元/m ²)
初投资	197.7	165.8	176.8

表 7 各系统全年能耗及运行费用比较

Table 7 Comparison of annual energy consumption and operation cost of each system

	热源塔	风冷热泵	冷水机组+燃气锅炉
系统全年能耗折标煤 /kgce	191326	238097	193209
单位建筑面积能耗 /kgce/m ²	34.32	42.72	34.66
系统全年一次能源利用效率	1.01	0.81	1.00
年运行费用/万元	52.30	65.08	56.13

2.4 空气源热泵技术

冬季, 成渝地区可利用空气源热泵技术从室外空气中吸热供暖。同时, 湿空气流经蒸发器, 温度降低, 空气中的水汽凝结出来, 空气得以除湿。

(1) 除湿量

通过对文献[8]中实验数据分析, 代入 2017-2020 年重庆市平均各月空气干球温度及相对湿度数据, 结果表明, 重庆市 2 月份除湿量最低为

0.91L/h, 在 10 月份最高为 1.36L/h, 年平均除湿量为 1.11L/h, 对高湿环境具有改善作用。

表 8 重庆市各月平均除湿量计算表

Table 8 Calculation table of monthly average dehumidification capacity in Chongqing

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
各月平均干球温度(°C)	7.98	9.62	14.28	20.22	22.02	24.85	28.52	29.92	23.10	17.42	13.48	9.20	18.39
各月平均相对湿度(%)	78.15	75.30	73.42	69.82	72.50	76.92	70.95	62.15	77.38	84.80	79.05	80.00	75.04
各月除湿量估计值(L/h)	0.95	0.91	0.97	1.00	1.12	1.31	1.22	1.01	1.28	1.36	1.11	1.03	1.11

(2) 效益分析

表 9 不同采暖方案效益分析

Table 9 Benefit analysis of different heating schemes

采暖方案	燃气锅炉	直燃机	空气源热泵	水源热泵
初投资(万元)	15	440	106	230
运行成本(万元/年)	63.5	56.8	6.66	34.84

由表 9 可知^[9], 空气源热泵初投资较燃气锅炉较高, 但运行费用较低, 且空气源可以降低一次能源消耗, 污染少, 环保效益显著, 但空气源热泵供暖运行时受气候条件的影响较大, 结霜问题突出。

湿的目的。

3 结语

湿环境对于成渝经济圈的发展有着不可小觑的作用, 本文通过查阅资料及分析计算得出如下结论:

参考文献:

[1] Cheng Y, He K, Du Z, et al. Humidity plays an important role in the PM2.5 pollution in Beijing[J]. Environmental Pollution, 2015:197:68-75.

[2] 黄伟, 刘芮伶, 李灵, 等. 重庆近地面臭氧污染与气象条件关系[J]. 资源节约与环保, 2020, (9):3.

[3] 赵置, 李海梅. 11 种地被植物固碳释氧与降温增湿效益研[J]. 江西农业学报, 2009, 21(1):44-47.

[4] 张祎, 刘杨, 张释今. 三峡水库近 20 年水面蒸发量分布特征及趋势分析[J]. 水文, 2018, 38(3):90-96.

[5] 王守柱. 火电厂“烟气消白”技术对比[J]. 低碳世界, 2019, 9(2):42-43.

[6] 赛庆新. 冷却塔节水消雾技术[J]. 化肥工业, 2015, 42(1):49-52.

[7] 夏雨琳, 李宏浩, 张政, 等. 武汉地区太阳能-热源塔热泵复合空调系统研究[J]. 制冷与空调, 2019, 19(11):62-68.

[8] Patel J, Patel K, Mudgal A, et al. Experimental investigations of atmospheric water extraction device under different climatic conditions[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020, 38(Apr.): 100677.1-100677.6.

[9] 陈睿曦, 毛瑞勇, 张航铭, 等. 贵阳市集中供暖现状及热源选择分析[J]. 北方建筑, 2020, 5(6):53-56.

(1) PM2.5 和 PM10 的平均质量浓度随着相对湿度的增大而增加; 绝对湿度集中在 9~12g/m³ 时, PM2.5 和 PM10 的浓度最大。同时随着相对湿度的增加, 对流层的臭氧平均浓度逐渐减少。

(2) 成渝地区湿环境的形成主要有九个成因: 自然因素、植物蒸腾作用、天然气燃烧、三峡工程、汽车尾气、空调融霜、燃煤电厂烟气排放及工商业冷却水蒸发、人体散湿。可以此入手进行调节控湿。

(3) 目前冷却塔节水消雾措施和燃煤电厂湿烟气处理技术对于成渝地区的湿环境调节有较好的参考价值; 热源塔热泵及空气源热泵技术可在制热的同时, 有效地除去成渝地区空气中的水分, 从而改善成渝地区高湿环境, 但成本较高。

(4) 对于本文分析的成渝地区高湿环境影响因素, 未来可据此提出更多的新技术手段对部分湿源的散湿进行减排或回收, 从而达到对成渝地区调